



ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂ EN EL PRINCIPADO DE ASTURIAS

Convenio Específico de colaboración Principado de Asturias - IGME

Proyecto: “Realización de un estudio hidrogeológico en estructuras geológicas relevantes y con potencial actividad económica”

MADRID, DICIEMBRE DE 2014

Este documento ha sido elaborado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en el marco del proyecto denominado **“Realización de un estudio hidrogeológico en estructuras geológicas relevantes y con potencial actividad económica”** resultado del Convenio Específico de colaboración existente entre la administración del Principado de Asturias y el Instituto Geológico y Minero de España.

El equipo de trabajo ha estado compuesto por:

Isabel Suárez Díaz

Ricardo Molinero Molinero

Jesús García Crespo

1- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El almacenamiento geológico de CO₂ es una opción de mitigación de las emisiones antropogénicas de gases de Efecto Invernadero, ligada a la captura del gas emitido en los grandes centros estacionarios que lo producen y a su transporte mediante tubería o buque a emplazamientos en los que existan estructuras geológicas profundas capaces de confinar el citado gas de forma permanente, evitando así su difusión en la atmósfera.

El Principado de Asturias, debido a su larga relación con la minería y la industria está a la cabeza de las Comunidades Autónomas españolas en lo que se refiere a emisiones de CO₂ por habitante, y además son, en gran medida procedentes de grandes centros estacionarios (centrales térmicas, cementeras, siderúrgicas...) en los que es posible la captura del CO₂.

El objetivo del presente informe es doble. Por una parte, y en forma de Anexo, propone las áreas del Principado y de su entorno que a priori representan las mayores posibilidades de convertirse en depósitos efectivos de CO₂. Por otra parte, presenta una revisión de aquellas etapas necesarias para el desarrollo de un proyecto de almacenamiento geológico de CO₂, con objeto de establecer una metodología para el seguimiento de estos proyectos por parte de la Administración.

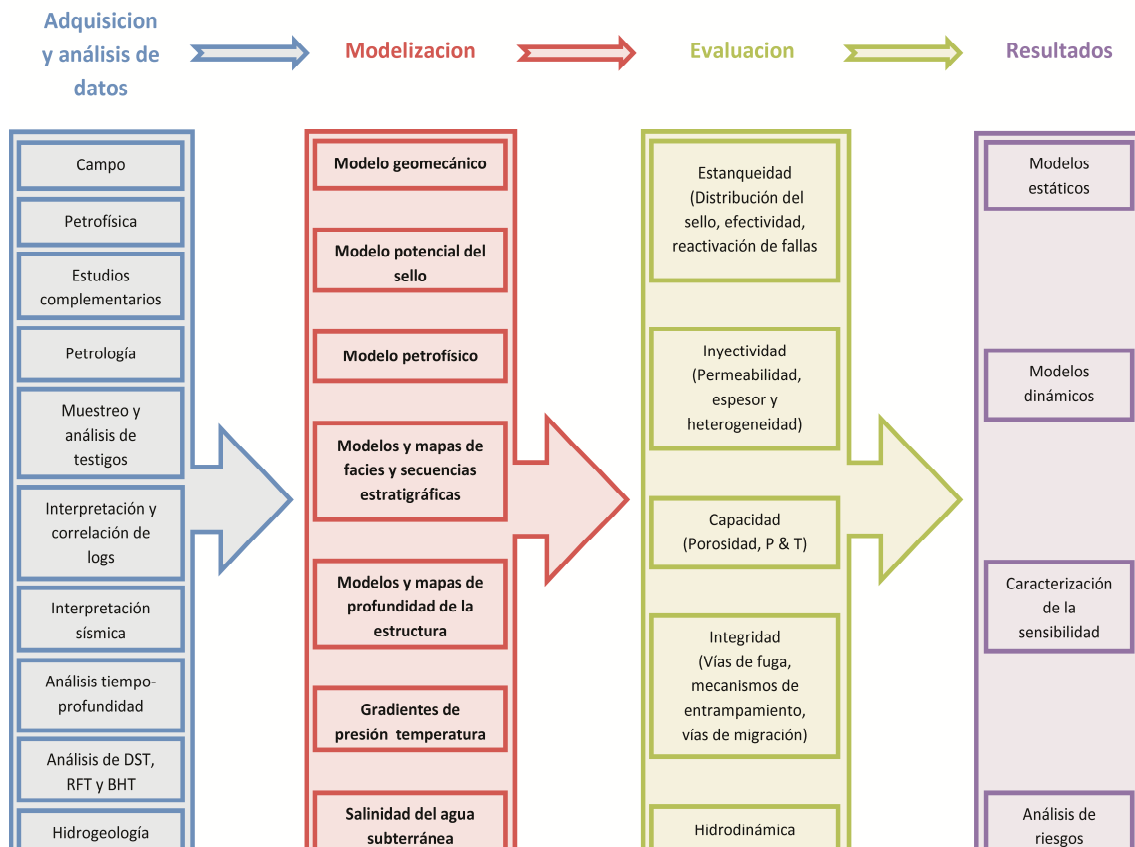
Esta última parte se centra específicamente en los anexos técnicos de la Ley 40/2010 de Almacenamiento Geológico de Dióxido de Carbono, que supone la legislación básica para esta actividad en España, derivada de una Directiva del Consejo y del Parlamento Europeo.

2- Aspectos relevantes del ANEXO I

Criterios de caracterización y de evaluación del complejo de almacenamiento potencial y de la zona circundante indicados en el artículo 10, apartado 2

La caracterización y la evaluación de los lugares de almacenamiento contemplados en esta ley se llevarán a cabo en tres etapas, de conformidad con las mejores prácticas en el momento de la evaluación y de los criterios que figuran a continuación. Podrán autorizarse excepciones a uno o más de estos criterios siempre que el titular haya demostrado que ello no afecta a la eficacia de la caracterización y de la evaluación para las determinaciones previstas. La idoneidad de una formación geológica para ser utilizada como lugar de almacenamiento se determinará a través de una caracterización y una evaluación del complejo de almacenamiento potencial y de las formaciones geológicas circundantes, Una formación geológica sólo podrá elegirse como lugar de almacenamiento si, en las condiciones de utilización propuestas, no existe riesgo importante de fuga ni riesgo significativo alguno para el medio ambiente o la salud humana.

La siguiente figura muestra los distintos pasos recogidos en el Anexo 1 y su interrelación para la obtención de los resultados.



Etapa 1: Recogida de datos.

Conviene reunir datos suficientes para establecer un modelo tridimensional volumétrico y estático, correspondiente al lugar de almacenamiento y al complejo de almacenamiento, incluida la roca sello, así como a las zonas circundantes que incluyan las conectadas hidráulicamente. La autoridad competente debe asegurarse que los datos y la forma en que se han recopilado y analizado sean de buena calidad y que caractericen el almacén y la zona circundante. La recopilación y análisis de estos datos llevara a una caracterización y modelización correcta y fiable.

Aunque la recogida de datos debe estar diseñada para un sitio específico, existen datos generales que se deben obtener para todos los sitios, dependiendo del conocimiento existente.

El operador debe recopilar y evaluar toda la información asociada al sitio potencial de almacenamiento. Las fuentes primarias de datos pueden incluir información sobre campos petroleros o gasíferos, en exploración y producción y cualquier sondeo estratigráfico profundo (>100m) realizado en la zona. Hay que tener en cuenta que esta información puede estar restringida por lo que debe de haber una buena comunicación de la autoridad con los diferentes operadores y poder, en su caso, obtener la información necesaria.

Estos datos se referirán al menos a las siguientes características:

a) Geología y geofísica.

La información asociada a geología y geofísica provendrá principalmente de afloramientos y sondeos y mediciones asociadas a las rocas. En geofísica los principales datos se derivaran de la sísmica y de otros métodos geofísicos de sensores remotos.

Es conveniente reunir y revisar toda la información existente sobre la geología tanto de superficie como del subsuelo reuniendo la cartografía geológica existente para generar un mapa geológico regional y uno detallado de la zona. Estos mapas muestran la geología en superficie donde se pueden identificar zonas de afloramiento del complejo de almacenamiento y de la roca sello e identifican las principales estructuras geológicas de la zona conteniendo datos estructurales útiles para la caracterización del almacén. Si la información existente es insuficiente será necesario realizar un levantamiento geológico a fin de obtener una geología lo mas detallada posible para la generación de un mapa geológico midiendo datos estructurales, teniendo en cuenta que estos datos nos ayudaran a definir las características de la estructura de estudio. Se podrán realizar nuevos cortes geológicos y utilizar los existentes para caracterizar la estructura en profundidad. Es necesario reunir también la información geofísica existente y planear campañas geofísicas con el fin de poder determinar la estructura en profundidad.

Se deben cuantificar las propiedades principales de la formación almacén tales como la profundidad, temperatura, presión, espesor, porosidad, permeabilidad, permeabilidad relativa y características de los fluidos de la formación. Asimismo, también hay que cuantificar las propiedades principales de la roca sello, entre las cuales podemos mencionar: profundidad, espesor, temperatura, presión, permeabilidad, porosidad, presión capilar de entrada (es aquella presión que permitiría que entrasen fluidos a los poros de la roca sello), composición mineral, propiedades geomecánicas, existencia de fracturas a escalas relevantes, continuidad lateral, etc.

Por último, es importante determinar el ambiente deposicional (sedimentario) de las formaciones almacén y sello así como de las formaciones supra e infrayacentes, para poder extrapolar las propiedades a áreas más amplias. Si existen formaciones más someras que pudieran actuar como almacenes secundarios o como sello en caso de fugas, será necesario estudiarlas también.

- b) Hidrogeología (en particular existencia de acuíferos destinados al consumo) determinando también el régimen hidrodinámico existente obteniendo datos del flujo regional de agua subterránea.

Esta información proporcionará información sobre el movimiento de los fluidos y la interacción de estos dentro del sistema. Es una fuente de datos primaria que se relaciona directamente con el modelado de los gradientes de presión y temperatura, y el flujo de agua subterránea y la salinidad que sea su vez se relaciona con la evaluación del confinamiento, capacidad, integridad e hidrodinámica de la formación. Mediante estos estudios se podrá comprender el posible impacto de una fuga de CO₂ en el sistema de agua subterránea y se podrán definir las medidas correctoras y preventivas que se deben adoptar.

- c) Ingeniería de los depósitos o estructura geológica del lugar del almacenamiento realizando cálculos volumétricos del volumen de poro para la inyección de CO₂ y la capacidad final de almacenamiento, incluyendo las condiciones de presión y temperatura, el comportamiento de la presión/volumen en función de la inyectividad de la formación, la tasa de inyección acumulada y el tiempo de inyección.

La ingeniería de los depósitos permite la evaluación de las características y movimiento de los fluidos dentro de un medio poroso profundo. El conocimiento de estas características es primordial para la evaluación del almacén y sobre todo para la determinación de la inyectividad e integridad. Estos parámetros se utilizarán conjuntamente con los datos geológicos para desarrollar el modelo estático y la simulación dinámica. Una vez realizada la simulación y vistos los resultados se puede decidir la mejor opción.

Los estudios petrofísicos permitirán conocer las propiedades de las rocas mediante muestras físicas y medidas digitales (logs). Determinarán las propiedades físicas y químicas de las rocas así como su composición mineral y la interacción de estos elementos con los fluidos en el almacén. Estos estudios se relacionan directamente con la fase de modelado del sello, y las facies y secuencias estratigráficas que influyen en la evaluación de la inyectividad, capacidad, integridad y confinamiento del almacén. Los logs definirán las propiedades de una manera más general que las muestras físicas debido a que se realizan suposiciones en la definición de las unidades. El sesgo en el muestreo petrofísico se resolverá una vez iniciadas las exploraciones particulares para el almacenamiento.

- d) Geoquímica (tasas de disolución, tasas de mineralización).

Se estudian los componentes químicos de las rocas a un nivel elemental y mineralógico incluyendo el estudio de la composición de los fluidos en la roca y su relación con los componentes de la roca. La evaluación de los componentes geoquímicos está implícita en todos los muestreos realizados, en la petrofísica, en el análisis de testigos, y en las pruebas de perforación. Proporcionan información sobre la manera en la que la introducción del CO₂ interactuará con la roca y los fluidos del almacén pudiendo causar la disolución o la

precipitación de minerales, así como también la interacción de los fluidos con la roca sello y el cemento de los pozos.

e) Geomecánica.

Estimación de parámetros para las formaciones de interés tales como la permeabilidad, la compresibilidad de la roca, los módulos de Young y ratios de Poisson, los esfuerzos de tensión y compresión, los esfuerzos verticales totales, los esfuerzos horizontales máximos y mínimos in-situ, la presión de fractura, la presión de reactivación de fracturas, la presión de *fault valving*, etc.

Se estudiara la naturaleza mecánica de las rocas y su respuesta a cambios físicos como pueden ser el cambio de presión localizado en el almacén (punto de inyección) y el régimen de esfuerzos regional. Estos parámetros son importantes para la evaluación de la estanqueidad y en la capacidad del almacén ya que se deben establecer parámetros de máxima presión y de fracturamiento del almacén. La formación almacén se encuentra en estado de equilibrio en términos de las fuerzas que interactúan en el medio y su respuesta geomecánica a cualquier variación en las condiciones de esfuerzo puede producir un cambio en la estabilidad mecánica de las rocas. Algunas regiones son geológicamente más estables y soportaran esfuerzos mayores mientras que otras pueden estar en un estado crítico de esfuerzos por lo que se puede haber una reactivación en el subsuelo.

Existen muchas técnicas por las que se puede medir el régimen de esfuerzos su naturaleza en las fallas mediante los que se puede predecir el comportamiento al ocurrir algún cambio. También existen tecnologías mediante las cuales se puede monitorizar e identificar el momento en el que se alcance un estado crítico permitiendo la intervención en los parámetros que influyen en ese cambio. Estos estudios son importantes en la caracterización de cualquier complejo de almacenamiento así como para el desarrollo del proyecto debido a los incrementos de presión y al movimiento de fluidos bajo presión hacia regiones con esfuerzos críticos.

f) Sismicidad.

Se debe determinar la sismicidad base natural para poder realizar una evaluación potencial de los sismos inducidos y determinar el ruido microsísmico de fondo. La mayor parte de los sismos se producen debido a los movimientos dinámicos de la corteza terrestre causados por la tectónica de placas y los esfuerzos diferenciales existentes en las placas oceánicas y continentales. Estos esfuerzos y sus efectos se pueden medir y monitorear con gran exactitud utilizando la tecnología actual. Existe un red sísmica mundial que permite la medición y localización de los sismos por lo que su existencia y el estado de esfuerzos existentes es conocido y está documentado, mediante estos datos se puede establecer una caracterización de la línea base de la sismicidad.

En términos del complejo de almacenamiento, la presencia de sistemas de fallas y fracturas pre-existentes se puede identificar mediante datos de reflexión sísmica en 2D y 3D, por lo que puede ser necesario adquirir e interpretar estos datos. Además, con los estudios de geomecánica se puede determinar si esos rasgos estructurales pueden representar un peligro para la integridad del almacén. Hay que tener en cuenta que existen fallas que no se pueden detectar mediante estos métodos pero que pueden afectar la idoneidad en la localización del almacén o de los pozos. También es necesario estudiar la posible sismicidad inducida debida a la inyección de fluidos y a los cambios en la presión del almacén para evaluar los riesgos debidos a esta.

- g) Presencia y estado de vías de paso naturales o artificiales, incluidos pozos y perforaciones que puedan influir o producir fugas del volumen del gas inyectado (p.ej. pozos abandonados).

El conocimiento y la predicción de posibles vías de paso para el movimiento del CO₂ en la formación almacén es de vital importancia en la caracterización del sitio. Determinará la integridad del sitio y se relaciona con todos los datos adquiridos y su análisis. Vías de paso naturales incluirían rasgos geológicos que pudieran servir de conducto a formaciones geológicas suprayacentes fuera de la zona de almacén y por las cuales pudiera haber un escape de CO₂. Estos rasgos incluyen fallas, variaciones en la calidad del sello, presencia/ausencia de sello, la estructura de la base del sello, intrusiones arenosas en el sello, etc. La predicción del comportamiento de las fallas dependerá de la calidad, tipo y resolución de los datos sísmicos obtenidos, ayudado, en parte, por el modelo geomecánico y los datos de los sondeos.

La determinación de la calidad del sello se deriva directamente de mediciones de laboratorio de las muestras y de estudios petrofísicos.

La definición de la trampa estructural también dependerá de la resolución de los datos adquiridos y de la interpretación de los logs de sondeos y su correlación con las interpretaciones sísmicas.

En la siguiente tabla se muestran algunos de los datos que se pueden obtener y su utilidad para la evaluación de parámetros del subsuelo del almacén.

Datos	Evaluación
Geológicos	
Modelos digital 3D y base de datos. Software comercial (principalmente de compañías O&G)	Mapa del subsuelo detallado (estratigrafía, estructuras, litofacies, ambiente paleo-deposicional, modelo sísmico/tectónico)
Almacén	
Modelos digital 3D y base de datos.	Geometría de la unidad hidráulica y propiedades de flujo dinámico
Reportes con fotografías de sondeos, descripciones, documentación de muestreos, manejo de muestras, procedimientos analíticos y resultados	Análisis de testigos de la roca almacén y sello (microfósiles, petrografía, disposición de partículas arcillosas, paleofacies, porosidad, permeabilidad simple, permeabilidad relativa, presión capilar, parámetros de resistencia de la roca, mineralogía, litología, contenido de gases nobles, etc.)
Reportes de resultados analíticos y de modelado	Pruebas hidráulicas en pozos
Geoquímica y fluidos	
Reportes de muestreo de fluidos y análisis composicional	Salinidad y composición del agua.
Reportes de muestreo de fluidos y análisis composicional	Composición de hidrocarburos y comportamiento PVT del almacén
Reportes del modelado de la planta de captura	Tasa de inyección y composición
Geofísica y sondeos	
Sísmica	2D,3D, VSP, inter-pozo, etc.
Eléctrica	Línea base de tomografía eléctrica y respuesta dinámica subsecuente
Sísmica	Línea base de sismicidad "ruido" y señal, respuesta dinámica subsecuente.
Localización y diseño de sondeos (y abandono de los mismos)	Evaluación de la integridad de pozos
Logs de Sondeos (rayos gamma, porosidad, sísmico, densidad, etc.)	Log de <i>wireline</i>
Geomecánica	
Datos geomecánicos	Presión de poro, esfuerzos in situ, régimen de esfuerzos regional, resistencia de la roca almacén y sello, resultados de pruebas de fuga.
Superficie	
Inclinómetros e imágenes de satélite (onshore)	Deformación superficial de base (movimientos verticales o inclinaciones)
Muestreo de gases.(es crítico el espaciado y localización de los puntos de medida; se debe priorizar los puntos de posible fuga y determinar un flujo base que puede variar órdenes de magnitud debido a variaciones estacionales y condiciones meteorológicas)	Flujo de gases y línea base.
Socioeconómicos	
Reportes	Infraestructuras, economía, régimen legal, análisis de riesgos por fugas en superficie debidas a las actividades de almacenamiento

Normalmente, la combinación de datos sísmicos, sondeos y geología de superficie son la fuente primaria para la construcción de los modelos geológicos y proveerlos de parámetros litológicos significativos. Los sondeos proporcionan información de litología y profundidades de las formaciones, mientras que la sísmica proporcionan información espacial para interpretar las formaciones en un área mayor y determinan planos de falla y zonas de fractura que pueden intersectar a la formación almacén. Hay que considerar que un pozo de sondeo puede ser una fuente de escape de CO₂ por lo que se debe evaluar la necesidad de hacer el sondeo así como también se debe contemplar la posibilidad de utilizarlo para monitorización o inyección en la fase de producción. Los pozos antiguos no se deben considerar a priori como riesgos ambientales, pero necesitan especial atención y se deben considerar en la caracterización del sitio ya que las técnicas y especificaciones de sellado de los pozos difieren con las utilizadas actualmente y pueden suponer un punto de fuga.

Se debe poner especial atención en la recopilación de datos de la roca sello y almacén y describir sus propiedades relativas al confinamiento del almacén. En el caso de rocas que hayan contenido hidrocarburos en el tiempo geológico, estos estudios se centrarán en la caracterización geomecánica de la roca sello y de cualquier plano de falla preexistente dentro de ella para estimar valores umbral de presión de fracturamiento o reactivación de fracturas en el reservorio. Para rocas que no hayan contenido hidrocarburos, existen otros indicadores que pueden confirmar el confinamiento como una discontinuidad en la salinidad de la roca que separa aguas más salinas de menos salinas. Para esto se necesita realizar un muestreo de fluidos por encima y por debajo de la roca sello realizando análisis de salinidad y perfiles de la composición. Otros indicadores son: la existencia de una discontinuidad en presión o temperatura y la existencia de un gradiente pronunciado en el contenido de gases nobles en la roca sello lo que significaría que la difusión de estos gases está limitada y por lo tanto la roca sello tiene un alto potencial de confinación.

En caso de no se confirme alguna de estas variaciones, se pueden realizar pruebas de sondeo como las de inyección y de interferencia vertical.

Si las pruebas de sondeos no son concluyentes, se debe asumir que la roca sello presenta propiedades de fuga y se debe de caracterizar más ampliamente. En este caso se deben analizar las capas suprayacentes que puedan funcionar como barrera múltiple o de atenuación (con lo que habría que caracterizar estas múltiples rocas sello).

Si se dispone de sísmica acústica de buena resolución se pueden identificar rasgos de fugas naturales (chimeneas, bolsas de gas, etc.) asociados con la migración de fluidos.

Las mediciones y técnicas de monitorización para la adquisición de datos más recomendables y económicamente eficientes variaran según el emplazamiento y la experiencia del promotor. Es necesario realizar un análisis de riesgos conjuntamente con el programa de monitorización así como un análisis de coste-beneficio de actividades alternativas a fin de poder seleccionar y optimizar la selección de las actividades de monitorización.

El Anexo 1 también menciona que se deberán documentar las siguientes características de las proximidades del complejo:

- a) Zonas que circundan el complejo de almacenamiento susceptibles de estar afectadas por el almacenamiento de CO₂ en el lugar de almacenamiento;

Será necesario conocer la naturaleza de la superficie terrestre en la zona (topografía, vías de comunicación, etc.) ya que condicionara la facilidad para el desarrollo, acceso y explotación del

proyecto así como para la toma de datos y la calidad de estos. También afectara a los métodos de monitorización que puedan ser utilizados, las medidas preventivas que se puedan aplicar y los impactos que pueda tener una fuga en la zona.

- b) Distribución de la población en la región en la que se sitúa el lugar de almacenamiento;

Un aspecto muy importante a considerar es la localización y la concentración de la población en las zonas adyacentes al proyecto, principalmente para la realización del análisis de riesgos e incertidumbres. La posibilidad y el impacto potencial de una fuga deben de ser considerados por la autoridad competente previo a la aprobación del permiso. Se debe considerar en el escenario del peor de los casos el terreno local (planicie, valles, etc.) y se debe valorar la posibilidad de dispersión y/o concentración de CO₂ en caso de fuga. Asimismo, se debe considerar también el impacto potencial de una fuga en los acuíferos de la zona.

- c) Proximidad de recursos naturales valiosos (en particular, zonas incluidas en la red Natura 2000 de conformidad con la Directiva 79/409/CEE del Consejo, de 2 de abril de 1979, relativa a la conservación de las aves silvestres y la Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres, acuíferos de agua potable e hidrocarburos);

Es necesario documentar todos los recursos naturales valiosos en las proximidades del complejo de almacenamiento y evaluar cuidadosamente el riesgo que pueden tener a la exposición estos recursos en caso de fuga de CO₂.

- d) Actividades en torno al complejo de almacenamiento e interacciones posibles con estas actividades (por ejemplo, exploración, producción y almacenamiento de hidrocarburos, explotación geotérmica de los acuíferos y utilización de reservas freáticas);

Se deben considerar los posibles conflictos que puedan surgir con otros recursos del subsuelo como puede ser: usos en superficie, uso de espacio de poro y afecciones causadas por una posible fuga de CO₂ en la utilización de esos recursos.

- Petróleo y Gas: La pluma de CO₂ puede contaminar la producción de hidrocarburos incrementando los costes para los productores. Por otro lado, puede incrementar la presión regional del reservorio beneficiando la producción. Se puede reducir el espacio de poro disponible para almacenes naturales de gas.
- Metano en capas de carbón: Se puede dar una contaminación de la producción de hidrocarburos incrementando los costes. La inyección puede producir un aumento de presión regional en el reservorio decreciendo la producción.
- Minería de carbón: El CO₂ puede esterilizar las operaciones de minería y crear condiciones inseguras.
- Aire comprimido: Se puede reducir el espacio de poro disponible para el almacenamiento de aire comprimido.
- Agua subterránea: Puede contaminar acuíferos.
- Gasificación de carbón del subsuelo: Se puede dar la extinción de los procesos de gasificación y la limitación de las operaciones.
- Sal: Creación de condiciones inseguras para la minería
- Geotermia: El CO₂ puede afectar las operaciones tanto en superficie como en profundidad incrementando costes, también se puede incrementar la presión regional beneficiando la producción.

Se deben evaluar aquellos puntos que sean relevantes al complejo de almacenamiento cuando se solicita el permiso. En las fases finales de la caracterización, se podrán identificar otros posibles conflictos con los diferentes usos del subsuelo. El operador debe documentar estos posibles conflictos e incluirlos como parte de la solicitud del permiso. Por su parte, la autoridad competente puede minimizar estos conflictos a la hora de conceder el permiso evitando la proximidad de diferentes actividades o promoviendo acuerdos entre las diferentes compañías.

- e) Proximidad de la fuente o fuentes potenciales de CO₂ (en particular, estimación de la masa potencial total de CO₂ económicamente disponible para el almacenamiento) y redes de transporte adecuadas.

El suministro y las fuentes de CO₂ son importantes para la determinación del tamaño y la naturaleza de los mecanismos de entrapamiento del CO₂ en el sitio. Algunos sitios pueden ser viables comercialmente a una tasa de inyección baja mientras otros lo serán a tasas altas, además de que algunos tendrán más capacidad que otros. Las características geológicas determinarán si un sitio es adecuado o no y las propiedades del almacén determinarán el número de posibles pozos cumpliendo, por lo tanto, ciertas condiciones de suministro de CO₂. El cambio en las condiciones de suministro durante el proceso de caracterización del almacén puede afectar la relevancia de los resultados ya que un sitio válido para el almacenamiento puede no serlo debido a que, técnica o comercialmente, no cumpla con las condiciones de suministro de CO₂. La proximidad es un punto importante mientras se desarrolla la red de transporte de CO₂ con la que, una vez establecida esta, lo que importará será la distancia a esta red.

Cabe mencionar que una herramienta muy útil y atractiva para cartografiar la idoneidad de un emplazamiento en una región es mediante un sistema de información geográfica, el cual permite la adición de una serie de mapas regionales y locales en los que se pueden incluir los datos obtenidos tanto del subsuelo como los de superficie y analizar los datos obtenidos superponiendo capas pudiendo establecer la idoneidad para la prospección del sitio. A continuación se presenta una tabla con algunos parámetros a determinar que se pueden incluir en un SIG en la determinación inicial del sitio.

La siguiente tabla muestra algunos de los parámetros que se pueden incluir en un SIG y su utilización.

Parámetro	Notas
Capacidad de almacenamiento y estanqueidad	
<ul style="list-style-type: none"> • Fallas que atraviesan la formación almacén hasta el punto relevante más profundo de la columna de notas • Fallas que se extiendan de las formaciones secundarias de almacenamiento al punto relevante más profundo de la columna de notas 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de agua subterránea destinada al consumo • Superficie • Otras zonas subterráneas vulnerables dentro del área de permiso y fuera de la pluma de CO₂ del caso base • Offshore: línea base de lodos
Intensidad de fallamiento y microfracturamiento de la roca sello	Es necesario una caracterización detallada de la roca sello
Aquitardos y acuicludos sobre el umbral de espesor e integridad	Sobre la formación almacén. Se deben definir los valores umbral de espesor e integridad y analizar la calidad de los datos existentes y de las estimaciones interpoladas
Acuitardos y acuicludos que hayan alojado hidrocarburos o contengan una discontinuidad observable de concentración de fluidos (ej. Sales disueltas) o gas (ej. Helio) a través de su espesor	Es necesario un muestreo cuidadoso de gases nativos del material de los núcleos en sondeos nuevos de exploración y delimitación.
Capas de evaporitas con espesores mayores al umbral que sobreyacen a la formación almacén	Determinación del espesor umbral
Capas de carbón con espesores mayores al umbral que sobreyacen a la formación almacén	Determinación del espesor umbral. Las capas de carbón atenúan el CO ₂ , pero hay que considerar el metano inducido.
Presencia de un sistema multicapa sobre la formación almacén	Secuencia de varias formaciones almacén y atenuantes
Sondeos abandonados que requieran remediación/resellado dentro del área de la formación almacén	Puede implicar una disminución en la idoneidad del sitio. A determinar por expertos locales.
Profundidad de la formación almacén	Discretizar las profundidades en clases
Volumen de poro de la formación almacén	Determinado por la porosidad/espesor de la formación almacén dentro de los límites del área.
Conceptos de almacenamiento considerados viables	Inyección de CO ₂ pre-disuelto, equilibrio de presión de la formación, producción/inyección balanceada.
Propiedades de superficie de la zona de almacenamiento	
Legislación	Registros públicos de zonificación, ordenación y regulación
Accesibilidad y disponibilidad de infraestructuras y logística	Líneas de comunicación, fuentes de CO ₂ , líneas de energía, etc.
Usos conflictivos	Geotermia, aire comprimido, minería, carbón, etc.
Monitorización en zona del almacén	Estudios sísmicos periódicos
Monitorización en zonas someras e indicadores de superficie	Sísmica superficial, pozos de monitorización, muestreo de gas en suelos, teledetección, etc.
Posibles peligros geológicos futuros y eventos climáticos extremos durante el periodo de inyección y post-inyección	Deslizamientos, derrumbes, inundaciones, volcanismo, etc.
Eventos sísmicos estadísticamente predecibles que sobrepasen el umbral establecido (a determinar) dentro del periodo mínimo de almacenamiento (a determinar) dentro del área de permiso.	Consistente con lo anterior

Etapa 2: Creación del modelo geológico estático tridimensional.

A partir de los datos obtenidos en la etapa 1, se elaborará un modelo geológico estático tridimensional, o un conjunto de tales modelos, correspondiente al complejo de almacenamiento propuesto, incluida la roca sello, y las zonas y fluidos conectados hidráulicamente, utilizando simuladores informáticos de la estructura geológica del lugar del almacenamiento. Se realizará un modelo 3D del subsuelo detallado incluyendo la estratigrafía, estructuras, litofacies, ambiente paleo-deposicional, modelo sísmico/tectónico de la zona de estudio, y su base de datos. Existe software comercial avanzado suministrado por la industria del petróleo y gas, minería, geofísica y geología que se puede utilizar para el almacenamiento de CO₂. Este software suele ser bastante elevado de precio, aun así, existe software asequible e incluso libre. La cantidad de datos necesarios para la construcción del modelo dependerá del perfil de riesgo del sitio y su heterogeneidad esperada dados el ambiente deposicional y estructural de la zona. En cualquier caso los datos se deberán extrapolar a todo el complejo de almacenamiento usando técnicas geoestadísticas existentes tanto en los simuladores como en la preparación previa de los datos que se alimentan a estos simuladores. La incertidumbre asociada con los parámetros utilizados y los errores asociados a la extrapolación deben ser evaluados y documentados a la hora de desarrollar el modelo estático. Este modelo se debe considerar como un paso para describir y atribuir las condiciones del subsuelo previas a la simulación de la inyección del fluido. Para la obtención de este modelo, existen una serie de retos principales para poder realizar el modelado entre los que se pueden mencionar:

- La obtención de datos suficientes específicos del sitio, tanto los ya existentes como la adquisición de nuevos datos.
- El uso y la generación de modelos específicos o analógicos derivados de las características geológicas (mapas paleogeográficos específicos o aproximados, distribución real del reservorio o distribuciones probabilísticas).
- La naturaleza del modelo: representación de las condiciones medias, representación de condiciones de alta o baja gama, representación de todas las condiciones con un alto número de estudios de sensibilidad, integración de varias condiciones o rangos dentro de la diversidad de los tipos de datos geológicos.

El modelo o modelos geológicos estáticos de la tierra caracterizarán el complejo en términos de:

- a) Estructura geológica física de la trampa determinando la geometría de la interface entre la roca almacén y sello y la descripción y modelado de la estratigrafía sobreyacente incluyendo roca sello, sellos secundarios y horizontes permeables que puedan servir de almacenes secundarios o zonas de atenuación del CO₂.
- b) Propiedades geomecánicas, geoquímicas y de migración de fluidos de la estructura geológica del lugar del almacenamiento, cobertura (roca sello, formaciones estancas, horizontes porosos y permeables) y formaciones circundantes. La estimación correcta de estas propiedades es esencial para realizar un modelo estático completo y robusto además de que servirán para la realización del modelo dinámico.
- c) Caracterización del sistema de fracturas y presencia de toda vía de migración de fluidos tanto naturales como de origen humano para poder asegurar el confinamiento del almacén.
- d) Superficie (extensión) y altura (espesor) del complejo de almacenamiento ya que esto influirá en la factibilidad para la utilización de dicho almacén.

- e) Volumen de espacio del poro (incluida la distribución de la porosidad), esto influirá en la capacidad de inyección que se puede tener el él.
- f) Distribución básica del fluido en la situación de referencia.
- g) Pozos existentes dentro de la zona de almacenamiento que pueden actuar como posibles puntos de fuga o como puntos de inyección y monitorización.
- h) Cualquier otra característica relevante.

Conforme lo anterior hay que considerar que la extensión lateral del modelo geológico debe de ser mayor al área de permiso y se mostrarán los límites de todas las unidades confinantes y sello. La profundidad del modelo debe ser mayor a la profundidad máxima del almacén dentro del área de permiso.

La incertidumbre asociada a cada uno de los parámetros utilizados para elaborar el modelo se evaluará a través de una serie de hipótesis para cada parámetro y calculando los intervalos de confianza adecuados. Asimismo, se evaluarán las incertidumbres asociadas al modelo propiamente dicho.

Se debe poner especial interés en evaluar la incertidumbre relacionada a las características y parámetros que tienen un impacto en la capacidad de almacenamiento y de confinamiento, así como en los parámetros que tengan una fuerte influencia en los modelos dinámicos. Es necesario evaluar escenarios con el mejor y peor caso relativos a la capacidad, la inyectividad, y el confinamiento así como el potencial para poder realizar el monitoreo y la verificación. Los parámetros se deben ir calibrando y refinando conforme se avance en la investigación y durante la fase de explotación para reducir las incertidumbres del modelo.

Cabe resaltar que para la realización del modelo geológico se deben estudiar y analizar los siguientes puntos:

1.- Cartografía de la estructura geológica:

La definición de la estructura del almacén es fundamental en la caracterización del mismo y es una parte distintiva del modelado. Este elemento dependerá de la adquisición de datos y el análisis de los elementos procedentes de la interpretación de sondeos y de su correlación con las interpretaciones sísmicas y los análisis de tiempo-profundidad empleados. Las estimaciones erróneas en la estructura geológica de la trampa pueden llevar a: una migración del fluido en otra dirección, a una tasa de migración superior o inferior, o a una sobre o infraestimación de los volúmenes de almacenamiento.

2.- Correlación de pozos:

Mediante la correlación de los pozos se puede modelar las facies y secuencias estratigráficas y obtener modelos de la estructura en profundidad. Estas correlaciones intentan identificar las relaciones espaciales y temporales existentes entre las secuencias geológicas entre pozos adyacentes, mediante el análisis de los testigos, logs y datos bioestratigráficos integrándolo con superficies y atributos identificados en sísmica. Las líneas de correlación intentaran definir cuales secuencias estratigráficas se depositaron al mismo tiempo en las regiones adyacentes. Lateralmente, las litologías variaran en un momento dado en el tiempo geológico por lo que las correlaciones no son sencillas por lo que se requiere tener mucha experiencia en la interpretación y el modelado de la secuencia estratigráfica. Las correlaciones tienden a discretizar paquetes de rocas en el tiempo los cuales forman unidades de flujo que son

fundamentales para la caracterización del sitio. Si estas correlaciones son incorrectas el CO₂ puede fluir en direcciones no esperadas o intersectar barreras que puedan causar un aumento en la presión. Por otro lado, en caso de necesitar reducir la presión es necesario localizar los sondeos que puedan servir a este propósito dentro la secuencia estratigráfica más favorable.

3.- Mallado del modelo 3D:

Es necesario establecer la escala a la que el modelo será procesado y utilizado en las simulaciones dinámicas. Este mallado puede ser a baja o alta resolución dependiendo de las necesidades de salida y el grado de madurez que tenga el modelo en el proceso de caracterización de la estructura. Inicialmente se pueden realizar mallados a baja escala para tener una idea general de los parámetros que pueden influir en mayor grado y centrarse así en asegurar que serán lo más precisos posible. Hay que tener en cuenta que los modelos de baja escala pueden distorsionar las tasas de flujo, tiempos de recorrido y saturación por lo que se tienen que tener cuidado en su utilización para los análisis de sensibilidad, no obstante inicialmente son muy útiles para el cálculo de parámetros iniciales. Posteriormente, se tendrán que realizar los modelos a escalas mayores para calibrar los parámetros y poder hacer el análisis de sensibilidad.

4.- Datos sedimentológicos, petrográficos y de permeabilidad/porosidad:

Esta información se obtiene de los análisis físicos de la roca y de la información derivada de los logs. Conllevan la realización del modelo geomecánico, del potencial de sello, petrofísico, de facies, etc. que a su vez influirán en todos los elementos en la fase de evaluación. Para poder determinar patrones, tendencias y relaciones se requiere una calibración en cada intervalo geológico entre la información derivada de los testigos y la información digital extrapolada de los logs pudiéndose comparar con otros estudios más amplios a fin de obtener mayor confianza en las interpretaciones y resultados.

5.- Heterogeneidad/Homogeneidad, continuidad, y características de flujo del reservorio:

Estas características se relacionan con la eficacia del almacén y están incluidas en la fase de evaluación de la inyectividad. Dependerán de los ambientes deposicionales y los procesos diagenéticos que hayan sufrido las rocas. La interpretación y construcción del modelo estático en términos de los patrones y ambientes deposicionales y la cartografía y correlación de las unidades de flujo afectaran la caracterización del flujo del fluido.

6.- Espesor, extensión y capacidad del sello:

La calidad del sello es el elemento más importante en el proceso de selección ya que si no se puede demostrar la capacidad de confinamiento, es muy difícil que se obtenga la aprobación del permiso. La determinación del potencial del sello dependerá de los datos adquiridos y los análisis realizados. La caracterización del sello dependerá del detalle y del nivel al que se lleve la evaluación del proyecto. Normalmente no habrá mucha información física del sello en los intervalos de los sondeos, por lo que no habrá mediciones analíticas cuantitativas de la capacidad e integridad; en este caso es necesario recurrir a evidencias cualitativas y observacionales (logs, correlaciones, descripciones litológicas, etc.). Para poder hacer una evaluación definitiva de la calidad del sello serán necesarios datos físicos de sondeo en el intervalo para poder permitir realizar estimaciones de capacidad e integridad geológica del sello.

7.- Vías de migración:

Es importante determinar las vías de migración y celdas de drenaje para cualquier almacenamiento, especialmente si es en un acuífero salino para poder comprender las implicaciones de una fuga inesperada de CO₂ en una trampa estructural.

8.- Actualización del modelo geológico:

Se debe actualizar el modelo geológico durante todas las fases de exploración y desarrollo del sitio de almacenamiento conforme se vayan obteniendo datos más fiables que aborden asuntos críticos asociados a la caracterización del complejo de almacenamiento. Es necesario una actualización y revisión iterativa del modelo geológico y de la simulación durante toda la vida del proyecto. De esta forma, con cada actualización, el modelo estático será más preciso y podrá predecir y definir mejor las características del subsuelo.

9.- Geomecánica:

Es necesaria para poder anticipar asuntos como la reactivación de fallas y el fallo de la roca sello o almacén. Se deben incorporar los regímenes de esfuerzos locales y regionales así como examinar los gradientes de fracturación locales, la fábrica y mineralogía de las rocas. Muestras físicas de roca permitirán comprender las posibilidades de que una roca sometida a diferentes presiones y regímenes de esfuerzos pueda fallar.

10.- Geoquímica:

Puede haber precipitación o disolución de los minerales de las rocas con los cambios en la química del agua de la formación al introducir CO_2 . Será necesario obtener muestras específicas en el sitio del agua de la formación para poder evaluar esto la posibilidad de cambios geoquímicos y composicionales en las rocas y fluidos del almacén y sello. Al ser difícil la obtención de datos físicos se puede realizar idealizaciones en pequeñas muestras. Para mejorar la predicción de la interacción con la roca y el agua de la formación se pueden realizar modelos que se integren directamente con las simulaciones del modelo geológico, con lo que se podrá evaluar el impacto del cambio en las condiciones químicas del agua con las variaciones mineralógicas y litológicas existentes en la estructura.

Etapa 3: Caracterización del comportamiento dinámico del almacenamiento, caracterización de la sensibilidad, evaluación del riesgo.

Las caracterizaciones y la evaluación de la seguridad se basarán en una modelización dinámica, que incluirá simulaciones de inyección de CO₂ a diversos intervalos de tiempo en el lugar de almacenamiento, utilizando el modelo geológico estático tridimensional en el simulador del complejo de almacenamiento construido en la etapa 2.

Etapa 3.1: Caracterización del comportamiento dinámico del almacenamiento.

El modelo dinámico del complejo de almacenamiento identificará la extensión, duración e impacto de la migración de la pluma de CO₂ en el sistema. Se debe simular una variedad de escenarios tomando en cuenta el tiempo de la inyección de CO₂ en el sitio de almacenamiento para identificar los aspectos más relevantes para la caracterización dinámica del almacén. Las herramientas de modelado que existen actualmente son muy potentes y permiten la construcción de productos muy sofisticados, posibilitando la obtención de interpretaciones técnicamente sólidas basadas en pocos datos con lo que hay que tener precaución a la hora de hacer estas simulaciones.

Deberán tenerse en cuenta al menos los siguientes factores:

- a) Tasas de inyección posibles y propiedades del flujo de CO₂;
- b) eficacia de la modelización de procesos acoplados (es decir, la forma en que interactúan los distintos efectos en el simulador);
- c) procesos reactivos (es decir, cómo se incorporan al modelo las reacciones in situ del CO₂ inyectado con los minerales);
- d) simulador de depósito utilizado (podría ser necesario recurrir a varias simulaciones para validar ciertas conclusiones);
- e) simulaciones a corto y a largo plazo (para determinar el destino y el comportamiento futuro del CO₂ a lo largo de décadas y milenios, así como el índice de disolución del CO₂ en el agua).

La modelización dinámica facilitará la siguiente información:

- a) Presión y temperatura de la formación de almacenamiento en función de la tasa de inyección y de la cantidad de inyecciones acumulada con el tiempo;
- b) extensión y espesor de la zona de difusión de CO₂ en función del tiempo;
- c) naturaleza del flujo de CO₂ en la estructura geológica del lugar del almacenamiento, incluido el comportamiento de las diferentes fases;
- d) mecanismos e índices de confinamiento del CO₂ (incluidos los puntos de rebosamiento y las formaciones estancas laterales y verticales);
- e) sistemas de confinamiento secundarios con que cuenta el complejo de almacenamiento;
- f) capacidad de almacenamiento y gradientes de presión de la estructura geológica del lugar del almacenamiento;
- g) riesgo de fractura de la formación o formaciones de almacenamiento y de la roca sello;
- h) riesgo de penetración de CO₂ en la roca sello;
- i) riesgo de fuga de la estructura geológica del lugar del almacenamiento (por ejemplo, por pozos abandonados o sellados de manera inadecuada);
- j) tasa de migración (en los depósitos abiertos);
- k) tasas de sellado/relleno de las fracturas;
- l) cambios de la química de los fluidos y reacciones subsiguientes en la formación o formaciones (por ejemplo, modificación del pH, formación de minerales), e inclusión de la modelización reactiva para evaluar los efectos;

- m) desplazamiento de los fluidos en la formación;
- n) incremento de la sismicidad y elevación al nivel de superficie.

Es necesario realizar varias simulaciones dinámicas de flujo y de modelos geomecánicos que sean consistentes con el modelo geológico propuesto. Estos modelos representarán tan solo una parte del dominio del modelo geológico donde se presume que migrara el CO₂ o donde puedan ocurrir respuestas geomecánicas debidas a aumentos de presión. Este modelo permitirá predecir el flujo de CO₂ desde el pozo de inyección en la formación almacén durante el tiempo de inyección y describirá la evolución a largo plazo de la pluma de CO₂ durante y una vez terminada la inyección. El modelo dinámico debe dar estimaciones cuantitativas del volumen, concentración y distribución espacial del CO₂ en una resolución temporal determinada.

Estas simulaciones serán la principal herramienta para predecir los impactos de la operación de inyección. Se deben planificar y ejecutar teniendo en cuenta que serán un componente crítico conforme a las siguientes tareas:

1.- Desarrollo de un programa de sondeos específico para el sitio, incluyendo el número, localización y temporización de los pozos de inyección.

2.- Predecir la evolución de la pluma de CO₂ y de las propiedades de la formación almacén:

- Comportamiento de la presión y temperatura en el tiempo.
- Extensión superficial y vertical de la pluma de CO₂ en el tiempo incluyendo la tasa de migración, el entrapamiento capilar y el desplazamiento de fluidos.
- Naturaleza del flujo de CO₂ en el reservorio incluyendo el comportamiento de fases y los cambios en la química de los fluidos de la formación y reacciones esperadas (cambios en pH, formación de minerales).
- Eficiencia de los sistemas de confinamiento secundarios y de captura de CO₂ (solubilidad y captura mineral) incluyendo puntos de fuga y sellos laterales y verticales.

3.- Evaluar la probabilidad y tasas de fuga relativas a los riesgos.

- Entrada de CO₂ a la roca sello (por presión, o degradación)
- Escape a través de pozos inadecuadamente sellados
- Flujos hacia arriba del CO₂ o fluidos de la formación a través de fracturas y zonas de falla.

4.- Evaluar la integridad del almacén en relación con la capacidad.

5.- Evaluar el efecto de medidas correctoras, restringiendo la presión del almacén y roca sello mediante la liberación de flujos del almacén.

6.- Evaluación de las medidas de monitorización (localización de los pozos de observación y propiedades a medir)

Etapa 3.2: Caracterización de la sensibilidad.

Se realizarán múltiples simulaciones para determinar la sensibilidad de la evaluación de las hipótesis utilizadas en relación con algunos parámetros. Las simulaciones se basarán en la

modificación de los parámetros del modelo o modelos geológicos estáticos de la tierra y en la modificación de las funciones de la tasa de flujo y las hipótesis del ejercicio de modelización dinámica. La evaluación de riesgos tendrá en cuenta toda sensibilidad significativa.

Es necesario realizar múltiples simulaciones basadas en diferentes suposiciones geoestadísticas de la geología para poder estimar la variabilidad de los parámetros principales. La resolución de las simulaciones debe reflejar la fiabilidad de los datos. Esta dependerá también de la capacidad del simulador y de la resolución del modelo geológico.

El tiempo de simulación se debe extender más allá del periodo de inyección y post-inyección hasta la transferencia de responsabilidades. Las simulaciones se revisaran y actualizaran previamente a la transferencia de responsabilidades para asegurar que las condiciones de cierre se han cumplido, lo que significa que se tiene un conocimiento suficiente y detallado del sistema de almacenamiento de CO₂ para poder evaluar su comportamiento futuro.

Los resultados de las simulaciones deben de ser reproducibles y verificables. Sin embargo, hay que tener en cuenta que simuladores diferentes producirán simulaciones distintas dependiendo del modelo físico y de los algoritmos numéricos utilizados, por lo cual será necesario que se especifique el simulador que fue empleado y se proporcionen las variables estimadas y los datos de entrada utilizados para las simulaciones numéricas.

Etapa 3.3: Evaluación de riesgos.

La evaluación de riesgos de un almacén geológico y la caracterización del complejo tendrá que aprovechar, integrar y evaluar todos los aspectos de la caracterización del almacén para garantizar que se ha realizado una evaluación adecuada y apropiada.

La evaluación de riesgos incluirá, entre otros aspectos, los siguientes:

3.3.1 Caracterización de riesgos:

La caracterización de riesgos se llevará a cabo determinando el riesgo de fuga del complejo de almacenamiento, establecido a través de la modelización dinámica y de la caracterización de la seguridad arriba descritas. Para ello deberán tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Las vías de fuga potenciales;
- b) la caracterización y cuantificación de las fugas en el caso de vías de fugas identificadas (tasas de flujo);
- c) los parámetros críticos de las posibles fugas (por ejemplo, presión máxima de la estructura geológica del lugar del almacenamiento, tasa máxima de inyección, temperatura, sensibilidad del modelo o modelos geológicos estáticos en el caso de las diversas hipótesis);
- d) los efectos secundarios del almacenamiento de CO₂, en particular el desplazamiento de los fluidos contenidos en las formaciones y las nuevas sustancias originadas por el almacenamiento de CO₂;
- e) cualquier otro factor que pueda representar un riesgo para la salud humana o para el medio ambiente (por ejemplo, estructuras físicas asociadas al proyecto).

La caracterización de riesgos considerará toda la variedad de condiciones de explotación posibles, para comprobar la seguridad del complejo de almacenamiento. Los principales riesgos incluyen fugas geológicas, fugas asociadas a rasgos humanos y riesgos asociados a la movilización de otros gases y fluidos por el CO₂. Los modelos y los análisis de sensibilidad se utilizarán para crear escenarios simulando los diferentes mecanismos de riesgos y determinando los parámetros críticos que puedan resultar en una fuga de CO₂ al exterior. Más

allá de los riesgos primarios, es importante considerar algunos efectos secundarios que se deben estudiar:

a) Integridad del sello y de las fallas:

Para poder determinar la calidad del sello es necesario obtener datos de sondeo del intervalo para poder hacer las estimaciones de la capacidad e integridad, una vez obtenido esto, las características geológicas del sello se pueden extrapolar fuera del área del sondeo.

Al ser muy difícil que las fallas sean cortadas por el sondeo, su integridad se determinará mediante modelización y la evaluación predictiva de las fallas, que, a su vez dependerá de la calidad de los datos sísmicos y de las observaciones. Para modelar una falla es necesario obtener sísmica 3D además de utilizar la información de pozos cercanos para poder realizar la correlación de datos litológicos con el plano de falla, permitiendo una estimación de las posibles litologías yuxtapuestas por la falla y, por lo tanto, la posibilidad de transmisión de fluidos a través de esta. Al evaluar la integridad de una falla hay que tener en cuenta que:

- La relación entre el desplazamiento de la falla y el espesor del sello también ayudan a determinar la integridad de la falla y del sello.
- Una falla puede tener baja integridad si existe material molido de las rocas adyacentes en el plano de falla ya que se puede actuar como un conducto para los fluidos.
- Las fallas perpendiculares a la dirección del régimen de esfuerzos regional son compresivas y pueden ejercer de sello, mientras que las paralelas al régimen de esfuerzos son extensionales podrían tener fugas.
- Las fallas son una muestra de debilidad de la corteza terrestre y pueden reactivarse a lo largo del tiempo geológico. Las fallas se comportan de manera diferente con el tiempo, es decir, si una falla tuvo fugas en un periodo pasado no necesariamente las tendrá actualmente, esto agrega una dificultad en el asesoramiento de la integridad de las fallas.

b) Incremento de presión local y regional en el subsuelo:

El incremento de la presión es un efecto secundario a la introducción de fluidos adicionales en el subsuelo. Si esto representa un riesgo significativo dependerá de la fábrica de la roca, el régimen de esfuerzos regional, el volumen y la tasa de inyección de CO₂ y las características del flujo en el almacén. Si el almacén es un sistema cerrado localmente, es muy posible que haya un incremento de presión mientras que si es abierto el frente de presión se propagará alrededor del pozo de inyección y llevará a que haya un desplazamiento de fluidos en los bordes del almacén. Los sitios de almacenamiento deben de tener una presión máxima establecida y regulada que no deben exceder y puede existir al respecto una regulación más amplia a la que se tendrá que acoger el promotor. A este respecto, la presión se puede monitorear con válvulas de presión en el pozo, teniendo en cuenta que la fiabilidad de las válvulas con el tiempo constituirá un factor de riesgo. Si en los modelos geológico y dinámico se estima que puede haber un incremento de presión este se podrá remediar mediante la extracción de agua de la formación mediante pozos de alivio en cuyo caso se tendrá que considerar la producción y el subsecuente uso o eliminación del agua.

c) Evaluación geoquímica de nuevas sustancias.

La formación de nuevas sustancias al inyectar CO₂ es otro punto a tomar en cuenta. Será necesario hacer una evaluación geoquímica del agua de la formación y de la mineralogía de la roca para poder predecir la posible interacción del CO₂ con estas. Para poder determinar lo anterior se requiere el muestreo del agua y de la roca. Se debe considerar también la posibilidad de que el CO₂ contamine el agua de la formación precipitando minerales que taponen los poros reduciendo la permeabilidad. Otros riesgos geoquímicos a tener en cuenta

pueden ser un cambio en el pH y la movilización de compuestos orgánicos peligrosos y metales pesados que pueden contaminar acuíferos en caso de fuga.

3.3.2 Evaluación de la exposición:

Se basará en las características del medio ambiente y en la distribución y actividades de la población que se asienta sobre el complejo de almacenamiento, así como en el comportamiento y el destino posibles de la fuga de CO₂ de las vías de fuga potenciales identificadas en la etapa 3.3.1.

Este punto se refiere al proceso de describir las fuentes y vías por las que un riego puede entrar en el ecosistema, estimar su magnitud, frecuencia y duración de la exposición al riesgo y describir la localización, cantidad y características de las poblaciones expuestas (humana y no humana). Cabe repetir que los principales mecanismos para que el CO₂ almacenado alcance a la población es mediante fugas en el pozo, a través de fallas y a los acuíferos. La posibilidad de que ocurran estos eventos y su impacto debe de ser una parte integral de la evaluación de riesgos.

3.3.3 Evaluación de los efectos:

Se basará en la sensibilidad de especies, comunidades o hábitats particulares en relación con los potenciales episodios de fugas identificados en la etapa 3.3.1. En su caso, tendrá en cuenta los efectos de una exposición a concentraciones elevadas de CO₂ en la biosfera (en particular, suelos, sedimentos marinos y aguas bálticas (asfixia; hipercapnia) y de la reducción del pH en estos entornos como consecuencia de la fuga de CO₂). Asimismo, incluirá una evaluación de los efectos de otras sustancias que puedan estar presentes en las fugas de CO₂ (impurezas presentes en el flujo de inyección o nuevas sustancias originadas por el almacenamiento de CO₂). Estos efectos se analizarán a distintas escalas espaciales y temporales y con relación a fugas de amplitud variable.

Este punto se refiere a la estimación las posibilidades de que se afecte a la población humana, a otros organismos o un ecosistema completo cuando son expuestos a un riesgo bajo uno o más de los escenarios descritos en la evaluación de exposición. Estos efectos pueden ser cambios en la apariencia, actividad, salud y tamaño de población. Los efectos a la exposición de CO₂ dependerán de la tasa de fuga del CO₂ al ecosistema. El CO₂ al ser un material no inflamable, en pequeñas cantidades puede no ser nocivo y sus efectos serán mínimos o inexistentes, sin embargo si se da una tasa mayor y prolongada en el tiempo su acumulación en ciertas áreas puede causar asfixia y efectos relacionados. Si se libera CO₂ en un pozo a una tasa muy alta y a mucha presión este cambio de presión y temperatura puede causar el congelamiento de las áreas adyacentes. Un escape de CO₂ en el mar (offshore) podría afectar al ecosistema incrementando la mortalidad y la reducción de tasas de calcificación, reproducción, crecimiento, suministro de oxígeno en el agua y movilidad; además pueden existir otras sustancias que causen efectos más significativos.

3.3.4 Caracterización de riesgos:

Incluirá una evaluación de la seguridad e integridad del lugar de almacenamiento a corto y largo plazo y, en particular, una evaluación del riesgo de fuga en las condiciones de utilización previstas, y sus posibles repercusiones para el medio ambiente y la salud humana en el peor de los casos. La caracterización de riesgos se apoyará en la evaluación de los riesgos, de la exposición y de los efectos. Incluirá también una evaluación de las fuentes de incertidumbre

observadas durante las etapas de caracterización y evaluación del lugar de almacenamiento y, cuando sea posible, una descripción de las posibilidades de disminuir la incertidumbre.

3- Aspectos relevantes del ANEXO II

Criterios para el establecimiento y actualización del plan de seguimiento contemplado en el artículo 19.2, así como para el seguimiento posterior al cierre

1. Establecimiento y actualización del plan de seguimiento

El plan de seguimiento contemplado en el artículo 19, apartado 2, se establecerá conforme al análisis de evaluación del riesgo realizado en la etapa 3 del anexo I, y se actualizará con objeto de cumplir las condiciones establecidas en el artículo 19, apartado 1, de conformidad con los siguientes criterios:

1.1 Elaboración del plan: El plan de seguimiento detallará la forma en que se llevará a cabo dicho seguimiento en las principales etapas del proyecto y, en particular, el seguimiento de las distintas fases (comienzo, explotación y posterior al cierre). Se especificarán los siguientes aspectos en relación con cada una de las fases:

- a) Parámetros controlados;
- b) tecnología de seguimiento utilizada y razones de su elección;
- c) localización de los controles y justificación del muestreo espacial;
- d) frecuencia de aplicación y justificación del muestreo temporal.

Los parámetros objeto del control se elegirán de manera que respondan a los objetivos del seguimiento. No obstante, en cualquier caso el plan incluirá el seguimiento continuo o esporádico de los elementos siguientes:

- a) Emisiones fugitivas de CO₂ en la instalación de inyección;
- b) flujo volumétrico de CO₂ en las cabezas de pozo de inyección;
- c) presión y temperatura del CO₂ en las cabezas de pozo de inyección (con objeto de determinar el flujo másico);
- d) análisis químico de las materias inyectadas;
- e) temperatura y presión del depósito (para determinar el comportamiento y el estado de las fases de CO₂).

La elección de las técnicas de seguimiento se basará en las mejores prácticas disponibles en el momento de la concepción. Deberán tenerse en cuenta y, en su caso, aplicarse, las siguientes soluciones:

- a) Tecnologías que permitan detectar la presencia, la localización y las vías de migración de CO₂ en las formaciones subterráneas y en la superficie;
- b) tecnologías que faciliten información acerca del comportamiento volumen-presión y de la distribución vertical y en superficie de la saturación de pluma de CO₂, para perfeccionar la simulación numérica en tres dimensiones a los modelos geológicos tridimensionales de la formación del almacenamiento establecidos de conformidad con lo dispuesto en el artículo 9 de esta ley y en el anexo I;
- c) tecnologías que puedan aplicarse en una amplia extensión espacial, con el fin de obtener información sobre posibles vías de fuga aún no detectadas en todo el complejo de almacenamiento y en la zona circundante, en el caso de irregularidades significativas o de migración de CO₂ fuera del complejo de almacenamiento.

1.2 Actualización del plan: Se reunirán e interpretarán todos los datos obtenidos del seguimiento. Los resultados observados se compararán con el comportamiento previsto en la simulación dinámica volumen-presión y saturación en tres dimensiones emprendida en el

contexto de la caracterización de la seguridad de conformidad con el artículo 10, apartado 2, y con el anexo I, etapa 3.

En caso de existir una desviación significativa entre el comportamiento observado y el previsto, deberá volverse a calibrar el modelo tridimensional para que refleje el comportamiento observado. El nuevo calibrado se basará en los datos obtenidos del plan de seguimiento, así como en los datos adicionales obtenidos en su caso para mejorar la fiabilidad de las hipótesis del recalibrado.

Deberán repetirse las etapas 2 y 3 del anexo I utilizando el modelo o modelos tridimensionales recalibrados, con el fin de obtener nuevas hipótesis de riesgos y tasas de flujo y revisar y actualizar la evaluación de riesgos.

En caso de que las comparaciones y el recalibrado de los modelos revelen la existencia de nuevas fuentes de CO₂, vías de paso y tasas de flujo u observen desviaciones significativas con respecto a las evaluaciones anteriores, el plan de seguimiento se actualizará en consonancia.

2. Seguimiento posterior al cierre

El seguimiento posterior al cierre se basará en la información recogida y modelizada durante la aplicación del plan de seguimiento contemplado en el artículo 19 de esta ley y en el punto 1.2 del presente anexo. Servirá en particular para facilitar la información necesaria para la decisión contemplada en el artículo 24.

Bibliografía:

- DIRECTIVA 2009/31/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 relativa al almacenamiento geológico de dióxido de carbono y por la que se modifican la Directiva 85/337/CEE el Consejo, las Directivas 2000/60/CE, 2001/80/CE, 2004/35/CE, 2006/12/CE, 2008/1/CE y el Reglamento (CE) no 1013/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo.
- Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de almacenamiento geológico de dióxido de carbono.
- CO2QUALSTORE, Guideline for Selection and Qualification of Sites and Projects for Geological Storage of CO₂. DNV Report No.: 2009-1425.
- Implementation of Directive 2009/31/EC on the Geological Storage of Carbon Dioxide, Guidance Document 2, EU.