

DESARROLLO DE LA EVALUACIÓN DE SEGURIDAD DE UN ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO DE CO₂ EN LA PENINSULA IBÉRICA

Hurtado Bezos, A.
Rodrigo Naharro, J.A.
Eguilior Díaz, S.
Recreo Jiménez, F.



Publicación disponible en el [Catálogo general de publicaciones oficiales](#)

© CIEMAT, 2024

ISSN: 2695-8864

NIPO: 152-24-020-7



Maquetación y Publicación:

Editorial CIEMAT

Avda. Complutense, 40 28040-MADRID

Correo: editorial@ciemat.es

[Novedades editoriales CIEMAT](#)

El CIEMAT no comparte necesariamente las opiniones y los juicios expuestos en este documento, cuya responsabilidad corresponde únicamente a los autores.

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Queda prohibida la reproducción total o parcial de cualquier parte de este libro por cualquier medio electrónico o mecánico, actual o futuro, sin autorización por escrito de la editorial.

No está permitida la publicación de este documento en cualquier dominio que no pertenezca al CIEMAT.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto PilotSTRATEGY, el cual ha recibido financiación procedente del Programa Marco "Horizonte 2020" (Agencia Ejecutiva Europea de Clima, Infraestructura y Medio Ambiente (CINEA), No. 101022664).

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	4
2	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA: LA CUENCA DEL EBRO	8
	2.1 ENTORNO GEOLÓGICO Y PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS.....	8
	2.2 CARACTERÍSTICAS DEL COMPLEJO DE ALMACENAMIENTO	10
3	IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS	20
	3.1 ESCENARIOS DE EVOLUCIÓN.....	23
	3.2 ESCENARIOS PERTURBADOS	31
	3.3 ESCENARIOS DE FUNCIONAMIENTO.....	37
	3.4 APLICACIÓN AL EMPLAZAMIENTO DE LOPÍN: SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ESCENARIOS.....	43
4	ANÁLISIS DE RIESGOS.....	45
	4.1 MODELOS ANALÍTICOS	45
	4.2 MODELO GLOBAL.....	57
5	CONCLUSIONES	72
6	BIBLIOGRAFÍA	73

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. a) Esquema geológico simplificado de la Península Ibérica (a partir de [5]). b) Esquema geológico de la parte nororiental de la Península Ibérica mostrando la zona de estudio en la parte central de la cuenca del Ebro y las cordilleras alpinas (modificado a partir de [6]).
- Figura 2. Columna litoestratigráfica simplificada del área de interés. Modificado de [8].
- Figura 3. Función de densidad de probabilidad de la permeabilidad (a) y la porosidad (b) en el caso base y los valores que definen las distribuciones.
- Figura 4. Ajustes de la función de densidad de probabilidad para la permeabilidad (a) y la porosidad (b) en el mejor caso, y los valores que definen las distribuciones.
- Figura 5. Fuga a través de pozos y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.
- Figura 6. Fuga a través de la formación sello y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.
- Figura 7. Fuga a través de fallas existentes y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.
- Figura 8. Superación de la extensión lateral prevista de la pluma de CO₂ y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.
- Figura 9. Migración de salmuera de formación fuera de los límites previstos y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.
- Figura 10. Acumulación de CO₂ en un reservorio secundario tras una migración vertical inesperada y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.
- Figura 11. Fuga como resultado de eventos sísmicos y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.
- Figura 12. Distorsión por una actividad posterior y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.
- Figura 13. Modificaciones de flujo y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.
- Figura 14. Pérdida de inyectividad" y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

- Figura 15. Capacidad de la formación almacén menor de lo prevista y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.
- Figura 16. Presurización del reservorio debido a una compartimentación inesperada y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.
- Figura 17. Sobrellenado accidental y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.
- Figura 18. Esquema de la evolución radial de la pluma de CO₂ y del frente de desecación durante la fase de inyección. Modificado de [34].
- Figura 19. Valor medio del alcance de la pluma de CO₂ (línea continua) y resultados de cada iteración (puntos) para las dos tasas de inyección consideradas: (a) 0,63 kg/s; y (b) 5,0 kg/s.
- Figura 20. Alcance máximo del frente de pluma de CO₂, considerando una tasa de inyección de CO₂ de 11 kg/s, para: el caso base y una potencia de 70 m del nivel de inyección (línea rosa); caso base y potencia de 90 m (línea verde); mejor caso y potencia de 70 m (línea azul); y mejor caso y potencia de 90 m (línea roja).
- Figura 21. Distribución espacial de las sobrepresiones generadas durante la inyección de CO₂ en los distintos casos considerados, considerando una tasa de inyección de CO₂ de 0,63 kg/s.
- Figura 22. Función de densidad de probabilidad del incremento máximo de presión esperable en los distintos casos estudiados para una tasa de inyección de: (a) 0,63 kg/s; y (b) 5,0 kg/s.
- Figura 23. Función de densidad de probabilidad del incremento máximo de presión esperable en los distintos casos estudiados para tasas de inyección de: (a) 11 kg/s; y (b) 20 kg/s.
- Figura 24. Resultados de los análisis de sensibilidad de los parámetros que influyen en el incremento de presión para el caso piloto (a), y el caso industrial (b).
- Figura 25. Ejemplo de red bayesiana aplicada a Lopín.
- Figura 26. (a) Función de densidad de probabilidad del aumento de presión en el caso base; (b) función de densidad de probabilidad del valor “k”; y (c) probabilidad de rotura para los valores mínimo, máximo y moda de “k”.
- Figura 27. Localización, con respecto al pozo de inyección, de la falla normal más próxima (≈ 400 m) y de las fallas inversas (≈ 6 km).

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Potencias características de las formaciones en el pozo EBRO-1.
Tabla 2.	Potencias características de las formaciones en el pozo EBRO-2.
Tabla 3.	Estadísticos de las funciones de distribución de probabilidad para la porosidad y permeabilidad del caso base.
Tabla 4.	Estadísticos de las funciones de distribución de probabilidad para la porosidad y permeabilidad del mejor caso.
Tabla 5.	Escenarios identificados de riesgo relacionados con la inyección de CO ₂ en la estructura de Lopín.
Tabla 6.	Escenarios seleccionados, y sus motivos de consideración o no, para el emplazamiento concreto de Lopín.
Tabla 7.	Resumen de las soluciones analíticas y semianalíticas aproximadas a utilizar en función de los valores de Γ y λ .
Tabla 8.	Valores asignados de potencia de la formación almacén, permeabilidad y porosidad para cada caso. Las tasas de inyección para cada uno de los casos son de 0,63 kg/s y 5,0 kg/s.

1 INTRODUCCIÓN

La cuenca del Ebro, una de las principales regiones geológicas de la península ibérica, ha sido objeto en los últimos años de diversos estudios ligados al almacenamiento geológico de CO₂, una estrategia clave en la mitigación del cambio climático.

Un aspecto crucial en la viabilidad de cualquier proyecto de almacenamiento geológico de CO₂ es el análisis y la gestión de los riesgos asociados. Este trabajo tiene como objetivo principal profundizar en la identificación de los principales escenarios de riesgo, tanto en condiciones normales de operación como en situaciones perturbadas. Se evalúan aspectos críticos como la extensión de la pluma de CO₂, el aumento de presión en el subsuelo y la posibilidad de fugas a través de las formaciones sello, fallas geológicas o pozos preexistentes.

A lo largo del informe se examinarán las características geológicas de la cuenca del Ebro, centrándose en su idoneidad como complejo de almacenamiento de CO₂. Se realizará una descripción detallada de su entorno geológico, incluyendo su estratigrafía y las estructuras relevantes, así como un análisis exhaustivo de los posibles riesgos asociados al almacenamiento de CO₂ en la región. Además, se abordará la identificación de escenarios de evolución y perturbación, evaluando las fugas potenciales y los incrementos de presión que podrían ocurrir en diferentes escenarios.

A través de un enfoque basado en estudios previos y modelos predictivos, se pretende aportar un análisis riguroso que ayude en la toma de decisiones para proyectos futuros de almacenamiento de carbono en la cuenca del Ebro.

2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA: LA CUENCA DEL EBRO

En esta sección se describen las principales características de la zona de estudio que comprende el complejo de almacenamiento de CO₂. Se abordarán tanto el entorno geológico en la cuenca del Ebro como aspectos específicos de la sedimentología y estratigrafía de la zona. También se analizarán los distintos elementos que forman el complejo de almacenamiento: formación almacén y sello con los parámetros clave de la formación almacén, como la porosidad y permeabilidad; las estructuras geológicas relevantes (fallas); las propiedades de las formaciones superiores y las características de la zona superficial y de los pozos profundos presentes en la misma.

2.1 ENTORNO GEOLÓGICO Y PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

La zona de estudio está situada cerca del borde meridional de la cuenca del Ebro (Figura 1). Hacia la parte central de dicha cuenca, la estructura se corresponde con un suave sinclinal [1], cuyo plegado acomodó la ligera reactivación de fallas de basamento NW-SE originadas en la extensión mesozoica [2].

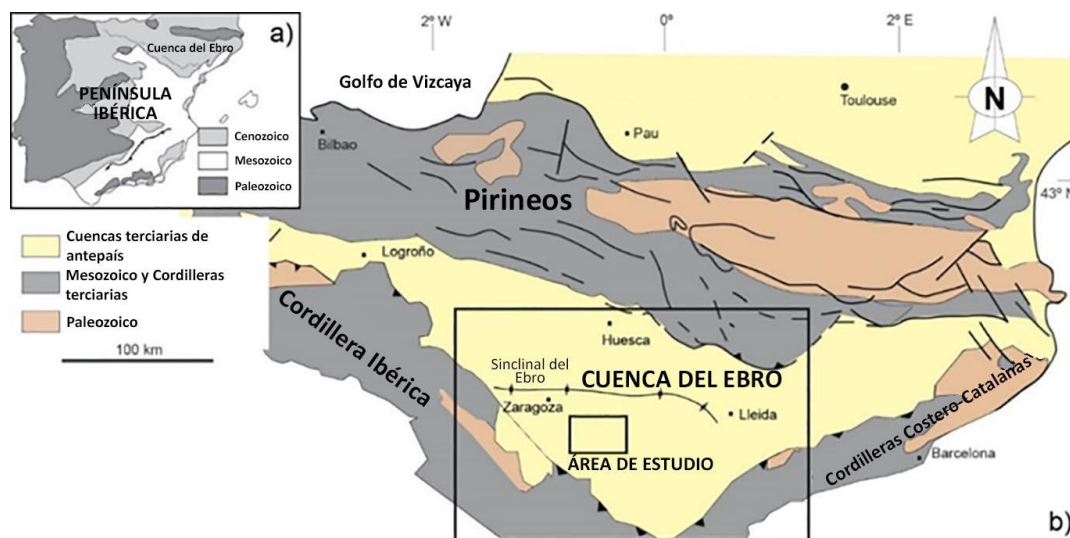


Figura 1. a) Esquema geológico simplificado de la Península Ibérica (a partir de [5]). b) Esquema geológico de la parte nororiental de la Península Ibérica mostrando la zona de estudio en la parte central de la cuenca del Ebro y las cordilleras alpinas (modificado a partir de [6]).

El basamento subyacente está formado por rocas paleozoicas con cierto grado de metamorfismo. Por encima del basamento hay sedimentos triásicos que incluyen dolomías, calizas y evaporitas del Buntsandstein y Muschelkalk, y evaporitas y lutitas del Keuper

(Figura 2). Las rocas jurásicas más antiguas están constituidas por dolomías recubiertas por una unidad de anhidrita con intercalaciones dolomíticas (Fm Lécera) [3, 4].

A esta secuencia se superponen varias secuencias carbonatadas (dolomías, calizas y calizas con margas intercaladas). A su vez, a ella se superponen depósitos carbonatados y detríticos cretácicos. La base de las rocas evaporíticas y detríticas cenozoicas es una inconformidad. Esta superficie erosiva corta los depósitos cretácicos y jurásicos.

El contacto del Buntsandstein (almacenamiento principal) con el Carbonífero es neto y ligeramente discordante. Tres formaciones del Triásico Inferior en facies Buntsandstein fueron descritas por [7] que, de abajo hacia arriba, son: Fm Aranda, Fm Carcalejos y la Fm Rané en facies Röt (Figura 2).

A partir de los registros de los pozos preexistentes, dentro del Proyecto PilotSTRATEGY [9-10] se ha dividido el almacén principal del Buntsandstein en tres partes que, de abajo hacia arriba, son las siguientes: i) B1 (conglomerados, areniscas y delgadas capas intermedias limosas/arcillosas); ii) B2 (una gruesa secuencia arcillosa/limosa con algunas intercalaciones de areniscas); y iii) B3 Fm Rané (sedimentos finos con evaporitas, consideradas como el sello primario, con aproximadamente 30 m de potencia).

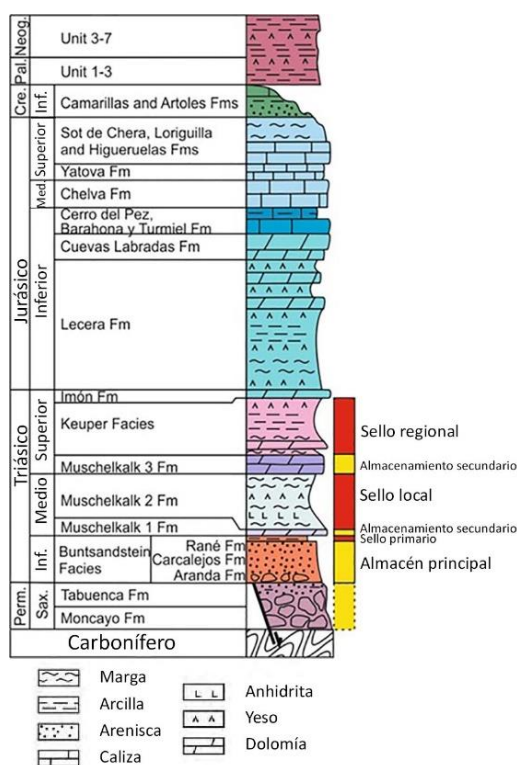


Figura 2. Columna litoestratigráfica simplificada del área de interés. Modificado de [8].

Estructuralmente, la orientación de las fallas normales NW-SE delimitan una serie de tres horst y cuatro graben con la misma orientación. El alcance de las fallas varía entre unas pocas

decenas de metros y unos 500 m [9], afectando una sucesión basal de rocas del basamento paleozoico, facies Buntsandstein y dolomías M1. Por encima, las evaporitas del Triásico Medio (M2) actúan como un nivel de desacoplamiento por encima del cual no se observa el fallamiento normal. La formación M2 está recubierta por las facies M3 y Keuper junto con las rocas del Jurásico (Cretácico). En la parte superior del perfil, los estratos cenozoicos se superponen a una discordancia [8].

Una explicación más detallada sobre la interpretación estructural del sistema de fallas en el complejo de almacenamiento de Lopín se expondrá en la sección 4.2.2.1.

2.2 CARACTERÍSTICAS DEL COMPLEJO DE ALMACENAMIENTO

El modelo conceptual desarrollado para llevar a cabo las evaluaciones de riesgo en esta primera fase del proyecto se basa en dos fuentes: i) los datos y modelos geológicos existentes procedentes de la caracterización del emplazamiento de Lopín; y ii) los enfoques conservativos desde el punto de vista de la seguridad del almacenamiento, que se aplican para llevar a cabo las evaluaciones probabilísticas utilizando modelos simplificados.

El escenario de evolución normal, que será la base de los estudios de los demás escenarios, corresponde a la evolución esperada del sistema, sin comportamientos imprevistos de los componentes del complejo de almacenamiento y sin fuerzas externas que actúen aparte de la presión de inyección.

El desarrollo del modelo conceptual para el análisis y evaluación de riesgos se basa en la estructura del complejo de almacenamiento. Se trata de un alto estructural que forma parte del basamento pre-alpino de la cuenca del Ebro. La trampa es un horst de basamento paralelo al margen septentrional de la Cordillera Ibérica (NW-SE), siendo una estructura limitada por fallas normales que afectan, además de a materiales paleozoicos, al Buntsandstein y al Muschelkalk M1 [9-10].

Así pues, el escenario de evolución normal se limitaría a la evolución de la pluma entre el nivel de inyección (Buntsandstein B1) y el nivel de sellado primario, lo que implica el desplazamiento del frente de inyección de CO₂ como un proceso de drenaje en el que el fluido no humectante (CO₂) desplaza al fluido salobre connato (salmuera). Este desplazamiento deja el fluido salobre connato en saturación residual en la zona de dos fases. Por lo tanto, el riesgo máximo de fuga corresponde al momento en que el CO₂ permanece como fase móvil separada y cuando las presiones sobre el medio son elevadas, es decir, durante el periodo de inyección. Éste es el período crítico para la evaluación del riesgo.

Si las presiones ejercidas durante la inyección son inferiores a la presión de fractura de la formación sello y/o a la presión de reactivación de las fracturas donde tiene lugar la inyección, los procesos mecánicos asociados (fuga a través de la formación sello y/o fuga a través de la fractura) no formarían parte del escenario de evolución normal. Sin embargo, el escenario de evolución normal en el emplazamiento de Lopín debería considerar la migración a través de las fallas normales que limitan el horst si la extensión de la pluma de CO₂ en el Buntsandstein B1/B2 alcanza estas fallas.

A continuación, se describirá con algo más de detalle los elementos que forman el complejo de almacenamiento.

2.2.1 ALMACÉN PRINCIPAL/SELLO

A partir de la evaluación de las unidades litoestratigráficas en términos de su función en el complejo de almacenamiento, la formación almacén se puede asignar al Triásico Inferior en la facies Buntsandstein B1 (reservorio principal), delimitado por la formación Buntsandstein B2, y culminando en la facies Röt en la parte superior como sello primario. Como almacenamientos secundarios se puede asignar las formaciones Muschelkalk M1 y M3, separadas por la formación Muschelkalk M2 (sello local), y un sello de carácter regional en el Triásico Superior en la facies Keuper (ver Figura 2).

El nivel principal de almacenamiento son las areniscas rojas del Buntsandstein B1, Fm Aranda, a 1.760 m con respecto a la superficie. A techo, el Buntsandstein B2, Fm Carcalejo, que se sitúa a 1.722 m y que forma parte del sello primario junto con la Fm Rané en facies Röt, a 1.696 m. El Buntsandstein conglomerático, a muro, no formaría parte del almacenamiento, a 1.835 m desde la superficie.

El espesor de la formación reservorio, Buntsandstein B1, oscila entre 20 m y 70 m al NE. El espesor medio de la formación de sello primaria, asignada inicialmente a la unidad Buntsandstein B2 más la Fm Rané en la facies Röt, estaría entre 71 m y 116 m llegando a un espesor máximo de 126 m.

El paquete litológico entre la capa evaporítica basal de aproximadamente 50 m de espesor de la Facies Röt y la formación Keuper de 350 m de espesor incluye las formaciones Muschelkalk M1, M2 y M3, de las cuales M1 y M3 son potenciales almacenamientos secundarios y M2 es un sello local. El recubrimiento por encima del nivel del sello regional (Keuper), cuya base estaría a 1.300 m de profundidad con respecto a la elevación de la superficie (-1.050 m s.n.m.), está formada por 670 m de materiales jurásicos y 230 m de materiales cenozoicos (900 m).

2.2.1.1 PÁRAMETRO DE FORMACIÓN ALMACÉN

2.2.1.1.1 Porosidad-Permeabilidad

Las características principales de las unidades B1, B2 y Röt/Rané (B3) se han obtenido a partir de los pozos Ebro-1 y Ebro-2, ya que tienen una mejor calidad de datos y alcanzan unas profundidades "similares" a las propuestas siendo, por lo tanto, los que mejor pueden representar las características de dichas unidades.

Dadas las características de las diferentes formaciones, para el modelo conceptual de la evaluación de riesgo se consideró, como formación almacén, la formación formada por la unión de la Unidad-B1 y los conglomerados de la Unidad-B1, tomando su espesor como espesor neto para porosidades >8 %. La unión de la Unidad-B2 y la formación Röt/Rané constituyen la formación del sello primario.

La Tabla 1 y la Tabla 2 muestran las potencias características de las formaciones en los pozos Ebro-1 y Ebro-2, respectivamente, así como sus espesores netos (porosidades > 8 %), que se utilizarán en los cálculos de evaluación de riesgos.

EBRO-1 FMS.	POTENCIA NETA (m)	POTENCIA TOTAL (m)	NtG* (%)
B1	87.95	140.62	62.55
B2	3.22	57.14	5.64
B3	1.51	5.92	25.51
TOTAL BUNTSANDSTEIN	92.68	203.68	45.50

*Net to Gross: relación Neta a Total.

Tabla 1. Potencias características de las formaciones en el pozo EBRO-1.

EBRO-2 FMS.	POTENCIA NETA (m)	POTENCIA TOTAL (m)	NtG*
B1	80.81	136.95	59.00
B2	9.17	52.39	17.50
B3	0.00	13.72	0.00
TOTAL BUNTSANDSTEIN	89.98	203.06	44.00

*Net to Gross: relación Neta a Total

Tabla 2. Potencias características de las formaciones en el pozo EBRO-2.

Para realizar las evaluaciones de riesgo, se han considerado que tanto la porosidad como la permeabilidad de la formación de almacenamiento son funciones de probabilidad. Para obtener estas funciones de densidad de probabilidad (PDF), se parte de las porosidades y

permeabilidades de las muestras analizadas en el laboratorio del IGME-CSIC. Dado que el número de muestras no es muy grande, se consideró *a priori* que la porosidad debería ajustarse a una distribución normal, mientras que la permeabilidad está mejor definida por una lognormal [11].

Se han realizado dos modelizaciones de las PDF que mejor se ajustan a los valores experimentales de porosidad y permeabilidad, teniendo en cuenta la condición de que los valores de porosidad deben ser superiores al 8 %. Con ellos definiremos dos casos:

- Caso base. Con los datos disponibles de porosidad y permeabilidad, los mejores ajustes, considerando una distribución Normal para la porosidad y una distribución LogNormal para la permeabilidad, se muestran en la Figura 3, estando definidas dichas distribuciones por los estadísticos de la Tabla 3.

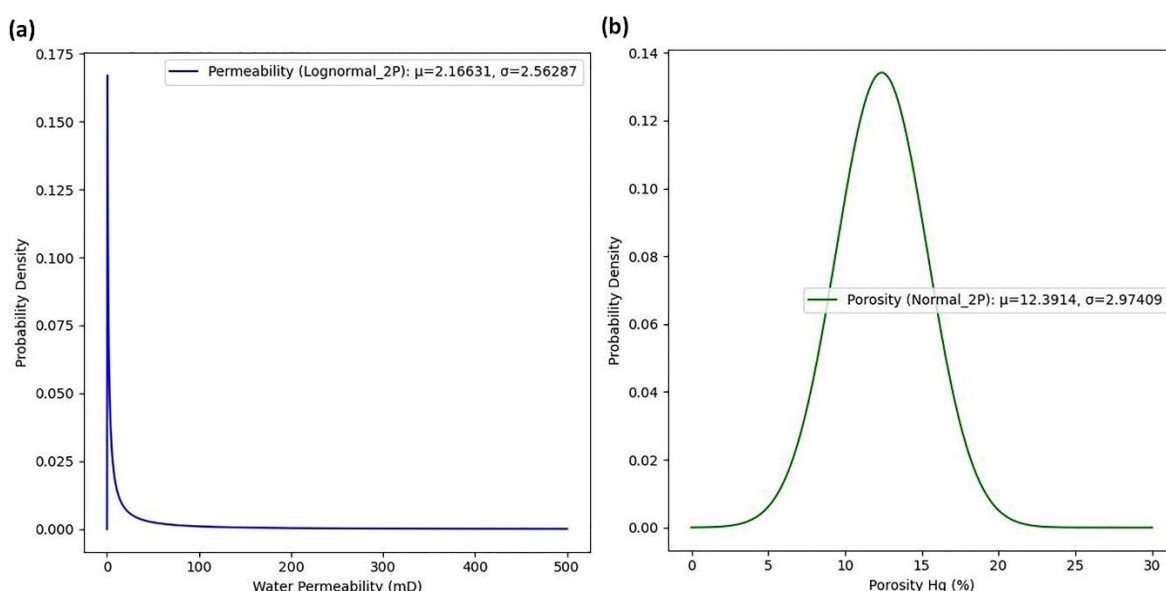


Figura 3. Función de densidad de probabilidad de la permeabilidad (a) y la porosidad (b) en el caso base y los valores que definen las distribuciones.

ESTADÍSTICO	POROSIDAD (%) (Distribución Normal)	PERMEABILIDAD (mD) (Distribución LogNormal)
μ	12.3914	2.1663
σ	2.9741	2.56287
Media	12.3914	232.8656
Desviación estándar	2.9741	6,209.9620
Mediana	12.3914	8.7260
Moda	12.3914	0.0123

Tabla 3. Estadísticos de las funciones de distribución de probabilidad para la porosidad y permeabilidad del caso base.

- Mejor caso. Este caso representa el ajuste más óptimo en términos de los riesgos que pueden derivarse de los datos. Matemáticamente, se ha realizado un "muestreo" obteniendo 100 datos de porosidad y permeabilidad a partir de los datos experimentales y utilizándolos para ajustar las PDFs de porosidad y permeabilidad que se muestran en la Figura 4 y Tabla 4.

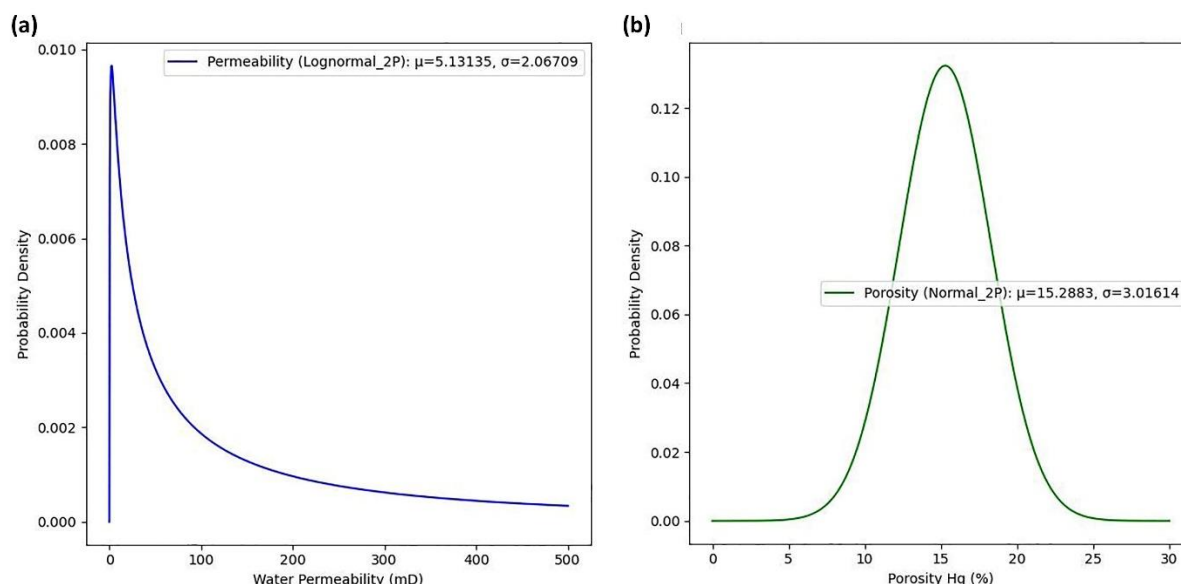


Figura 4. Ajustes de la función de densidad de probabilidad para la permeabilidad (a) y la porosidad (b) en el mejor caso, y los valores que definen las distribuciones.

ESTADÍSTICO	POROSIDAD (%) (Distribución Normal)	PERMEABILIDAD (mD) (Distribución LogNormal)
μ	15.2883	5.1314
σ	3.0161	2.0671
Media	15.2883	1,433.3656
Desviación estándar	3.0161	12,054.4733
Mediana	15.2883	169.2454
Moda	15.2883	2.3596

Tabla 4. Estadísticos de las funciones de distribución de probabilidad para la porosidad y permeabilidad del mejor caso.

2.2.1.1.2 Gradiente hidrogeológico

Desde el punto de vista del análisis de riesgos, otro aspecto importante a considerar es la presión hidrostática experimentada por la formación de almacenamiento, ya que la inyección de CO₂ provocará un aumento de presión que podría dar lugar a escenarios de riesgo por sobrepresión.

Los valores medidos de presión hidráulica en los pozos que atraviesan la Fm Buntsandstein, a partir de los valores de densidad del lodo de perforación [9] indican una sobrepresión dentro de dicha formación. Esta situación debe considerarse como una posible condición de riesgo si superara la resistencia mecánica de la Fm Rané (en la Facies Röt), que forma parte del sello primario, dada la baja permeabilidad prevista en el punto de inyección en la Unidad Aranda, Fm Buntsandstein B1, a -1.760 m s.n.m.

Aunque no se han identificado áreas específicas de recarga del acuífero Buntsandstein dentro de la Cuenca del Ebro en la zona de estudio, se supone que está hidráulicamente conectado con los afloramientos triásicos de los Pirineos en el margen norte y con los de la cordillera Ibérica en el margen sur [12].

Estaría justificada una investigación más detallada para evaluar una posible conexión hidráulica con los afloramientos del Buntsandstein en el borde occidental de la cuenca, concretamente los de la Sierra del Moncayo, a 2.222 m de altitud. Estos afloramientos forman un anticlinal de amplio buzamiento hacia el este bajo el Jurásico y Mioceno de la Cuenca del Ebro, a una distancia de 100 km del Barranco de Lopín (ver hoja del mapa geológico de España 1: 200.000, nº 32, Zaragoza; y hoja geológica 1:50.000, nº 352, Tabuenca).

La cartografía geológica muestra que el Buntsandstein se hunde en dirección este bajo las rocas jurásicas y miocenas hacia el valle del Ebro. Si la recarga del Buntsandstein se produjera en las alturas de la sierra del Moncayo, la carga hidráulica (columna de agua) sobre el acuífero en la nueva ubicación del pozo de Lopín sería superior a 4.000 m (400 bar), lo que permitiría (si hay continuidad en la formación Buntsandstein) la sobrepresión registrada.

2.2.1.1.3 Salinidades

La salinidad del acuífero del Buntsandstein se ha derivado de los pozos petrolíferos cercanos que presentan salinidades superiores a 65.000 ppm de NaCl, por lo que se consideran salmueras profundas. Los resultados de estos pozos muestran una clara correlación entre la salinidad del Buntsandstein y la profundidad. A partir de los valores ajustados mediante remuestreo (*bootstrap*) se desprende que, para la profundidad a la que se situará el pozo de inyección, el rango de salinidades para un intervalo de confianza del 95 % estará comprendido entre 113.600 y 183.400 ppm.

2.2.1.1.4 Temperatura

La temperatura media de la superficie en el área de Lopín es de 15 °C. El gradiente de temperatura se ha obtenido a partir de los datos de los pozos más representativos (Ebro-2, Ebro-1 y Lopín-1) de las condiciones del emplazamiento, obteniéndose una media del

gradiente de temperatura de 30,4 °C/km. Por lo tanto, la temperatura de la formación almacén, a 1.760 m con respecto a la superficie, sería de unos 69 °C.

2.2.2 FALLAS

En el acuífero salobre profundo donde tendría lugar la inyección, la fase libre de CO₂ tenderá a expandirse durante la inyección y ascenderá a la parte superior de la formación de almacenamiento por flotabilidad. La pluma de CO₂ migrará en sentido contrario al buzamiento, desplazando el agua del acuífero y extendiéndose radialmente desde el pozo de inyección. Desde el punto de inyección, situado en la intersección de las líneas sísmicas ZA-21 y ZA-20-N [9-10], la distancia que tendría que recorrer la pluma de CO₂ inyectado antes de intersectar alguna de las dos fallas NW-SE que delimitan el horst en el que se proyecta la inyección, sería de unos 600 m hacia la falla situada al norte y de unos 400 m hacia la falla al sur [9]. En cualquiera de los puntos de intersección, el CO₂ ascendería por la falla normal que delimita el horst y que recubre la Fm Muschelkalk M1, donde quedaría parcialmente atrapado como almacenamiento secundario y experimentaría una migración lateral impulsada por el flujo hidráulico en el acuífero M1, presumiblemente a velocidades muy bajas.

Suponiendo que estas fallas sean permeables, que es la hipótesis más conservadora a efectos de evaluación de riesgos, la migración de CO₂ se produciría preferentemente a lo largo del plano de falla, y subsidiariamente a través del plano de falla, en dirección ascensional hacia el contacto de la formación almacén M1 con la formación de sello (anhidritas, sales y lutitas) del Muschelkalk M2.

Las fallas normales presentan buzamientos tales que, en ambas direcciones de la posible migración de la pluma de CO₂, ésta se encontraría con una disposición de planos de falla del tipo descrito por [13] como *declined*.

Si las fallas normales atravesaran también el sello local M2 (hipótesis conservadora para maximizar el riesgo), el CO₂ alcanzaría el Muschelkalk M3. Al estar éste limitado a techo por el Keuper, con una potencia de unos 400 m y una permeabilidad muy baja, la migración preferente se produciría en la dirección de buzamiento del nivel M3, en sentido contrario al mismo.

En el contacto entre las formaciones M2 y M3, siendo esta última una potente formación principalmente dolomítica con intercalaciones de anhidritas o sales y/o margas/calizas que actúa como un nivel de almacén secundario, se produciría una acumulación temporal de CO₂. El CO₂ ocuparía preferentemente la parte más alta del nivel permeable debido a su flotabilidad, y la parte inferior tendría una saturación en CO₂ mucho menor.

Puesto que presumiblemente son fallas normales permeables, el desplazamiento del CO₂ sería probablemente rápido debido a la posible mayor permeabilidad de dichas fallas. Es dudoso que el nivel de permeabilidad de dichas fallas se haya visto influenciado por la posterior repetición compresiva durante la orogenia alpina. Además, si el volumen de inyección de CO₂ permitiera saturar el nivel Muschelkalk M3, el CO₂ podría, por migración lateral, alcanzar el contacto con las presuntas fallas inversas situadas en el extremo NW del perfil.

El escenario de fuga a través de Fallas s.s., que implica la migración del CO₂ por las fallas normales y por las fallas inversas, parece tener una muy baja probabilidad, pero daría lugar a que el CO₂ inyectado alcanzara los materiales neógenos del recubrimiento del Terciario, a unos 300 m desde la superficie [8, 10]. Esto supondría la afectación del acuífero jurásico de interés económico en la región. Por lo tanto, la posibilidad de que el flujo de CO₂ pudiera alcanzar el recubrimiento del Terciario obligaría a estudiar como escenario de evolución normal en este emplazamiento, un escenario normal ampliado debido al riesgo de fuga por falla que se tratará, en todo caso, como uno de los posibles escenarios alternativos.

2.2.3 FORMACIONES SUPERIORES

Por encima del techo del Keuper, a 905 m de profundidad en la columna del sondeo Lopín-1 [14], se disponen anhidritas y dolomías del Infralías, dolomicritas y dolomicroesparitas del Lías Inferior, calizas y calizas margosas del Lías Superior y Medio, calizas del Dogger, del Oxfordiense y del Kimmerilense (Jurásico Superior), un total de 670 m de materiales calcáreos más 230 m de materiales arcillosos y yesíferos del Terciario, lo que supone una potencia de unos 900 m desde el techo del sello regional hasta la superficie.

Las Fms Imón, Lécera, las dolomías del Jurásico Inferior y Medio y las anhidritas del Jurásico Superior (Dogger) quedan fosilizadas por materiales neógenos en discordancia erosiva, a unos 300 m desde la superficie [10].

Tomando la columna litoestratigráfica del pozo Lopín-1 como *proxy* para el pozo de inyección, el recubrimiento, formado por materiales del Lías Inferior, Lías Superior y Jurásico Superior, presenta un comportamiento hidrogeológico de un acuífero multicapa heterogéneo con porosidad secundaria por fisuración en calizas y dolomías, con acuicludos en los niveles del Jurásico Inferior (Formación Lécera) y Jurásico Superior (Malm). La Fm Imón, a techo del sello regional en facies Keuper, tiene comportamiento de acuífero. Los materiales arcillosos y yesíferos del Terciario (indiferenciados) serían una alternancia de capas de permeabilidad media o baja con un comportamiento de acuitardo [12].

El sistema acuífero del Jurásico está formado por dos acuíferos confinados: un acuífero inferior, del Lías (Jurásico Inferior), compuesto por formaciones carbonatadas con 300 m de espesor; y otro, superior, del Jurásico medio-superior (Dogger-Malm), también compuesto por formaciones carbonatadas de 80 m de potencia, separados verticalmente por 300 m de formaciones de margas-anhidritas. El límite superior del acuífero jurásico son las arcillas yesíferas rojas del Paleógeno, que actúa como formación confinante [12].

El acuífero del Liásico Inferior presenta las mejores propiedades hidráulicas, con transmisividades de hasta $1.000 \text{ m}^2/\text{día}$ y caudales de explotación de 100 L/s. El coeficiente de almacenamiento se estima en $5 \cdot 10^{-5}$ [15-16]. El acuífero superior Malm-Dogger presenta valores inferiores, con transmisividades medias de sólo $38 \text{ m}^2/\text{día}$ [12, 15-16].

La recarga se produce por infiltración directa de lluvia y nieve, e infiltración desde el cauce del río Ebro, y la recarga subterránea lateral, desde las formaciones circundantes, la Cordillera Ibérica al sur y la cordillera de los Pirineos al norte [12].

Existen algunas zonas de descarga vinculadas al acuífero regional del Jurásico Medio-Superior, como el manantial de la Virgen de la Magdalena, situado en Mediana de Aragón, con un caudal medio de 125 L/s. El acuífero inferior, del Lías (Jurásico Inferior), sólo aflora en el anticlinal de Belchite, 10 km al sur de la estructura de Lopín. Ambas zonas de descarga natural serían de potencial interés para la evaluación de riesgos ambientales en el contexto del escenario de evolución normal del complejo de almacenamiento en la estructura de Lopín.

La única zona de descarga regional identificada se encuentra a 90 km al NE, cerca de la ciudad de Lérida, y sólo compete al sistema acuífero superior (Jurásico y Cenozoico); en ningún caso al sistema acuífero profundo del Triásico donde tendría lugar la inyección de CO_2 [12].

2.2.4 ZONA SUPERFICIAL

El área donde se ubica la formación almacén se encuentra dentro de la depresión del Ebro, una región árida y poco poblada del noreste de España. El principal núcleo urbano es el municipio de Quinto, con una población aproximada de 1.869 habitantes [17] y una superficie de $118,40 \text{ km}^2$.

Según la clasificación climática de Köppen, la zona experimenta un clima semiárido frío (tipo BSk). Los inviernos son ligeramente fríos, con heladas nocturnas ocasionales, y las máximas medias rondan los 10°C . La niebla y las inversiones térmicas son frecuentes en diciembre y enero. Los veranos son calurosos, con temperaturas máximas que suelen superar los 30°C , a menudo los 35°C , e incluso los 40°C durante algunas olas de calor. Las temperaturas mínimas suelen permanecer por debajo de los 20°C , pero ocasionalmente pueden producirse noches

tropicales. Los vientos dominantes son el cierzo (frío y seco, del noroeste) y el bochorno (cálido y húmedo, del este). El cierzo puede ser fuerte durante todo el año, especialmente entre octubre y abril. Las precipitaciones son escasas, con totales anuales que apenas superan los 300 mm, concentrándose principalmente en primavera y otoño, mientras que los inviernos y veranos son secos. Esta zona corresponde a una superficie impermeable ocupada principalmente por materiales terciarios.

En cuanto a los recursos hídricos superficiales, cabe destacar que:

- No hay acuíferos superficiales en la zona.
- Las aguas subterráneas se encuentran a gran profundidad.
- El río Ebro es la principal fuente de agua para el consumo humano y la agricultura.

Respecto a los pozos profundos presentes en la zona se han identificado un total de 13, siendo el más cercano al pozo de inyección Lopín-1, a unos 10 km. Los pozos restantes se encuentran a más de 20 km del punto de inyección, ubicados al noreste o sureste de éste.

3 IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

Los escenarios se identificaron mediante un proceso sistemático de elicitación de expertos basado en reuniones celebradas con el equipo del Ebro dentro del proyecto PilotSTRATEGY [18]. Los resultados se cotejaron con las listas establecidas de Características, Eventos y Procesos (FEP, por sus siglas en inglés) [19] relevantes para los sistemas de almacenamiento geológico de CO₂, y se compararon con los escenarios de riesgo y las incertidumbres identificadas en otros proyectos. Posteriormente, para cada escenario se abordaron también los siguientes aspectos:

- La identificación de patrones plausibles de fuga (temporales y/o espaciales).
- La comprensión de los mecanismos por los que podrían producirse dichos escenarios.
- La determinación de los impactos ambientales asociados a cada uno de estos escenarios.

Durante el proceso de identificación de los escenarios, se desarrolló un pequeño número de escenarios, ampliamente representativos y significativos, incluyendo los principales tipos de impactos que podrían ocurrir. Esta identificación abarcó todos los posibles escenarios, incluidos aquellos particularmente improbables que ocurran y que, por lo tanto, pueden ser "descartados" en análisis posteriores.

Se enumeran a continuación los escenarios identificados:

- Escenarios de evolución
 - Fugas a través de pozos:
 - Fugas desde un pozo en operación.
 - Fugas desde un pozo abandonado.
 - Fugas a través de la formación sello:
 - Debido a la fracturación de la roca sello por sobrepresión => Pérdida de la integridad mecánica de la roca sello, lo que puede dar lugar a escenarios de riesgo por la migración del CO₂:
 - Sobrepresión local alrededor del pozo de inyección.
 - Sobrepresión del reservorio (a escala regional).

- Debido a deficiencias en el sellado de la roca sello:
 - A través de una zona de mayor permeabilidad (fuga difusiva debida a la presencia de una zona de alta permeabilidad no detectada).
 - A través de discontinuidades (fracturas, fallas) presentes en la roca sello.
- Fugas a través de fallas existentes
- Superación de la extensión lateral prevista de la pluma de CO₂:
 - Vías de fuga inesperadas.
 - Interacción con otros recursos.
- Migración de la salmuera de formación fuera de los límites previstos. Aumento del desplazamiento de formaciones de alta salinidad:
 - Interacción con otros recursos.
- Acumulación de CO₂ en un reservorio secundario debido a una migración vertical inesperada.
- Escenarios perturbados
 - Fugas debidas a fenómenos sísmicos (naturales o inducidos). La sismicidad puede causar pérdidas de integridad mecánica en la formación de almacenamiento y otras estructuras del subsuelo (particularmente en los pozos):
 - Fracturación, creación/reactivación de fallas.
 - Pérdida de contención del pozo.
 - Distorsión por una actividad posterior.
 - Alteraciones del flujo. Debidas a cambios en el flujo de aguas subterráneas, dentro del reservorio o en otras capas del complejo de almacenamiento.
- Escenarios de funcionamiento
 - Pérdida de inyectividad:
 - Inyectividad reducida debido a cambios químicos / reactividad:

- Porosidad reducida debido a la precipitación química.
 - Cambios físicos debidos a reacciones químicas.
- Capacidad de almacenamiento inferior a la prevista.
- Presurización del reservorio debido a una compartimentación inesperada
- Sobrellenado accidental.

TIPO DE ESCENARIOS	ESCENARIOS IDENTIFICADOS
DE EVOLUCIÓN	Fuga a través de pozos
DE EVOLUCIÓN	Fuga a través de la formación sello
DE EVOLUCIÓN	Fuga a través de fallas existentes
DE EVOLUCIÓN	Superación de la extensión lateral prevista (CO ₂)
DE EVOLUCIÓN	Migración de salmuera de formación fuera de los límites previstos
DE EVOLUCIÓN	Acumulación de CO ₂ en un reservorio secundario tras una migración vertical inesperada
PERTURBADOS	Fuga como resultado de eventos sísmicos
PERTURBADOS	Distorsión por una actividad posterior
PERTURBADOS	Modificaciones de flujo
DE FUNCIONAMIENTO	Pérdida de inyectividad
DE FUNCIONAMIENTO	Capacidad de la formación almacén menor de lo prevista
DE FUNCIONAMIENTO	Presurización del reservorio por una compartimentación inesperada
DE FUNCIONAMIENTO	Sobrellenado accidental

Tabla 5. Escenarios identificados de riesgo relacionados con la inyección de CO₂ en la estructura de Lopín.

La Tabla 5 resume los escenarios de riesgo identificados asociados a la inyección de CO₂ en la estructura de Lopín. Estos escenarios se clasifican en tres tipos principales:

- Escenarios de evolución. Estos escenarios representan el transcurso normal o esperado de los acontecimientos durante la inyección de CO₂, teniendo en cuenta los posibles problemas derivados de las inherentes características geológicas.
- Escenarios perturbados. Estos escenarios describen acontecimientos que podrían perturbar el funcionamiento previsto del complejo de almacenamiento de CO₂, pudiendo producirse fugas u otras consecuencias imprevistas.
- Escenarios de funcionamiento. Estos escenarios se centran en la eficiencia del complejo de almacenamiento a lo largo del proceso de inyección industrial. Se

consideran los posibles mecanismos de degradación dentro del complejo de almacenamiento que podrían comprometer su capacidad para albergar CO₂ a lo largo del tiempo.

Posteriormente, los FEP se han utilizado para representar, de un modo fácilmente comprensible, las relaciones entre las causas potenciales (a veces denominadas "amenazas") de los riesgos y las posibles consecuencias [20].

Las causas ilustran las distintas formas en las que podría producirse el riesgo. Una vez que el escenario tiene lugar, puede haber varias formas en las que el suceso se desarrolle hasta llegar a la consecuencia final. Cada consecuencia dará lugar a una gravedad específica del impacto, que puede afectar a diversos receptores (p. ej. las personas, el medio ambiente, etc.) [20].

3.1 ESCENARIOS DE EVOLUCIÓN

3.1.1 Fuga a través de pozos

La Figura 5 muestra un diagrama de pajarita (*bow-tie*) que representa los FEP asociados a este escenario, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

En caso de fuga de CO₂ a través de un pozo operativo o abandonado, las principales causas potenciales relacionadas son:

- Construcción inadecuada del pozo. Comprende el diseño, el revestimiento, la perforación y/o la terminación del pozo (p. ej., materiales inapropiados, trabajos de cementación inadecuados, hueco situado entre la tubería de revestimiento y el pozo), ya que todo ello determina el comportamiento de un pozo, tanto durante su operación como posteriormente a su clausura; y/o
- Fallo de uno o más elementos de barrera de pozo (p. ej. corrosión en el revestimiento del pozo, defectuoso revestimiento del pozo de inyección). Una causa específica de fuga de CO₂ a través de un pozo abandonado está relacionada con una inexistente o inadecuada remediación del pozo. Las medidas correctoras adoptadas tras el cierre de un complejo de almacenamiento de CO₂ podrían no alcanzar los niveles exigidos, modificando en consecuencia el comportamiento y la seguridad de dicho almacenamiento.

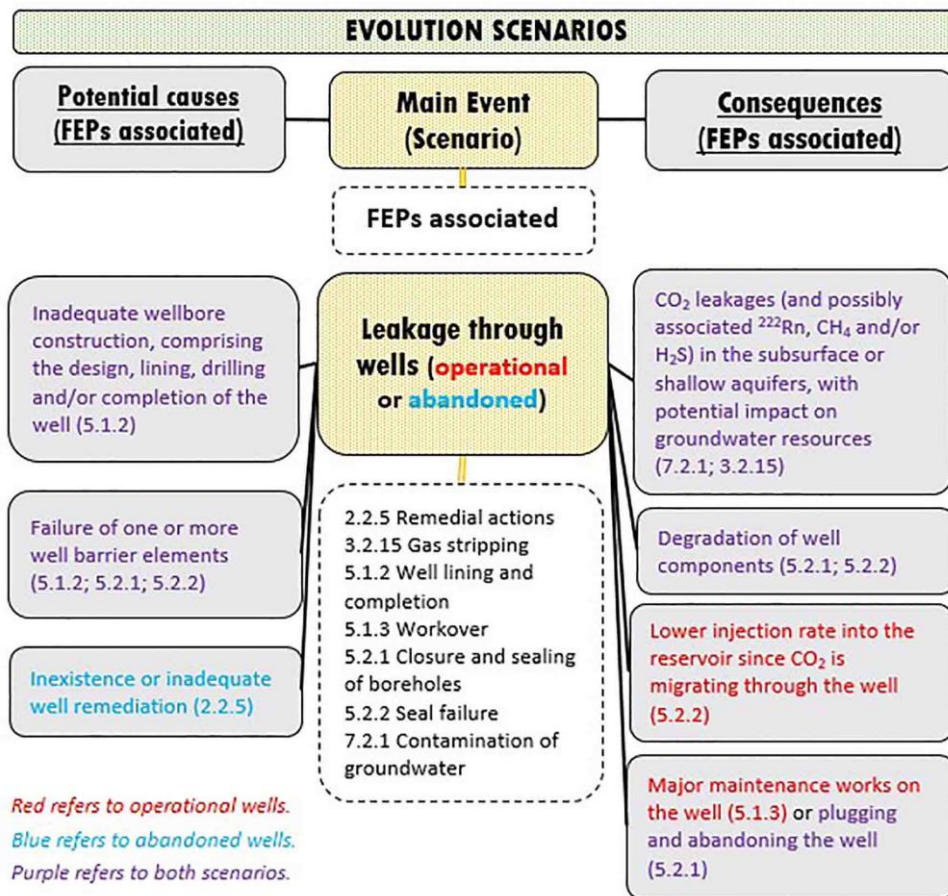


Figura 5. Fuga a través de pozos y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

Las principales consecuencias relacionadas en caso de fuga de CO₂ a través de un pozo operativo o abandonado son:

- El potencial impacto en las aguas subterráneas (acuíferos subsuperficiales o poco profundos) debido a las fugas de CO₂ que, a su vez, podrían transportar gases que pueden suponer un riesgo importante (p. ej. ²²²Rn asociado, CH₄ y/o H₂ S); y/o
- Degradación de los componentes del pozo (p. ej. corrosión del revestimiento, fragilización de los materiales del pozo). La exposición al CO₂ puede provocar la corrosión de los revestimientos metálicos y fragilizar los materiales que componen el pozo. Esta degradación afecta directamente a las propiedades de cierre y sellado, pudiendo comprometer la capacidad del pozo para contener el gas a largo plazo y creando posibles vías adicionales de fuga para el CO₂.

Otra consecuencia adicional de las fugas de CO₂ de un pozo operativo está relacionada con una menor tasa de inyección en el reservorio, ya que parte del CO₂ se escaparía a través de la

estructura del pozo en lugar de dirigirse hacia la zona de almacenamiento. Esto podría afectar la eficiencia y seguridad del proceso de inyección.

En caso de fugas de CO₂, otras consecuencias secundarias están relacionadas con la necesidad de realizar importantes obras de mantenimiento en el caso de pozos operativos para restaurar su integridad y evitar pérdidas adicionales. En el caso de pozos abandonados, las fugas podrían requerir trabajos adicionales de taponamiento y abandono definitivo para asegurar la contención del CO₂.

3.1.2 FUGA A TRAVÉS DE LA FORMACIÓN SELLO

La Figura 6 muestra un diagrama de pajarita que representa los FEP asociados a este escenario, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

En caso de fuga de CO₂ a través de la formación sello debido a la fractura de la roca sello por sobrepresión, este incremento de presión podría causar una pérdida de la integridad mecánica de la roca sello, lo que podría dar lugar a los siguientes escenarios de riesgo:

- Una sobrepresión local alrededor del pozo de inyección debido a la baja permeabilidad de la formación de almacenamiento, y especialmente al principio de la inyección [21-22].
- Una sobrepresión del reservorio (escala regional), que se extenderá de decenas a centenares de km teniendo en cuenta las escalas temporales de los proyectos de almacenamiento de CO₂ [23].

Si la fuga de CO₂ se produce a través de la formación sello debido a su deficiencia de sellado, esta fuga puede producirse a través de una zona de mayor permeabilidad (fuga difusiva debida a la presencia de una zona de alta permeabilidad no detectada), o a través de discontinuidades (fracturas, fallas) presentes en la roca sello. Esta falta de integridad en la formación sello puede deberse a las características intrínsecas propias de dicha formación. Además, también puede deberse a la existencia de heterogeneidades dentro de la roca sello (p. ej. la existencia de formaciones relativamente permeables dentro de una secuencia de roca sello impermeable, que podrían actuar como vías de fuga de CO₂ desde un pozo defectuoso) [24]. Además, este escenario puede estar relacionado con las características (p. ej. zonas de fractura/falla) de la roca sello que no se detectaron durante la fase de investigación del complejo de almacenamiento de CO₂.

La principal consecuencia relacionada en el caso de fuga de CO₂ a través de la formación sello debido a la fractura de la roca sello por sobrepresión es que la sobrepresión excesiva puede inducir microsismicidad e incluso sismicidad sentida. Si la fuga a través de la formación sello se debe a la fractura de la roca sello por sobrepresión o a la deficiencia de sellado de la roca sello, las consecuencias asociadas son:

- El impacto potencial en los recursos de aguas subterráneas (acuíferos subsuperficiales o poco profundos) debido a los escapes de CO₂, que a su vez pueden llevar asociados ²²²Rn, CH₄ y/o H₂ S.
- La creación de vías de transporte laterales y/o verticales para la migración del CO₂ o la posible reactivación de fracturas/fallas.

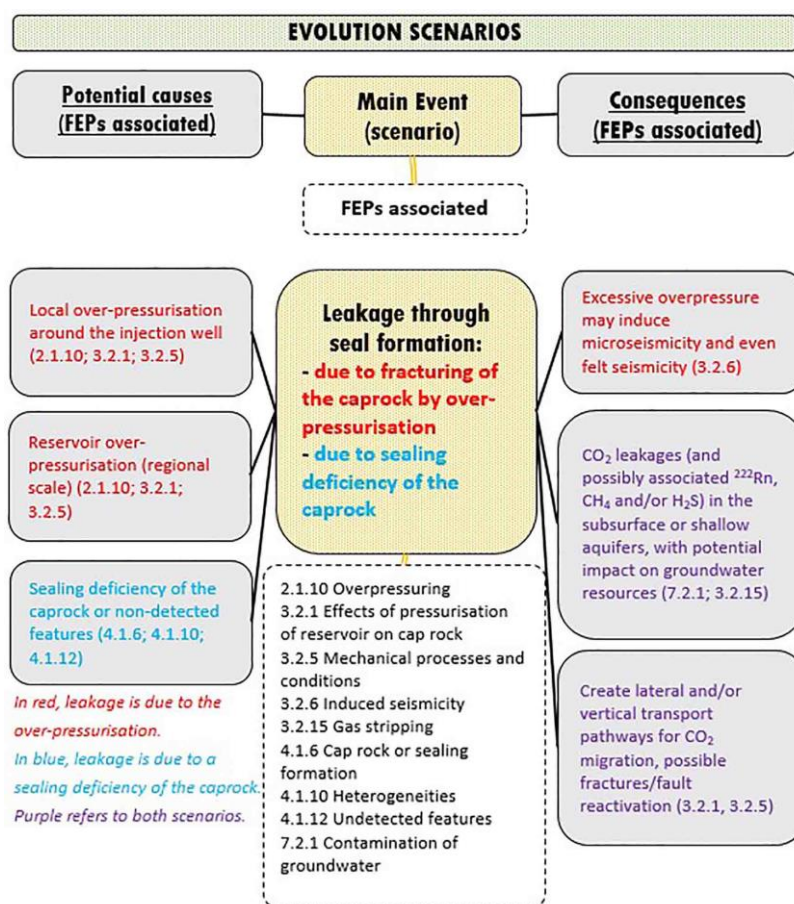


Figura 6. Fuga a través de la formación sello y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

3.1.3 FUGA A TRAVÉS DE FALLAS EXISTENTES

La Figura 7 muestra un diagrama de pajarita que representa los FEP asociados a este escenario, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

En el caso de fuga de CO₂ a través de fallas existentes, ésta puede deberse a:

- Que la pluma de CO₂ haya alcanzado las fallas existentes del complejo de almacenamiento debido a los procesos relacionados con el transporte de CO₂ en el agua de formación (p. ej., advección, dispersión y difusión molecular); y/o
- La existencia de zonas de fractura/falla no observadas/interpretadas a partir de los datos sísmicos.

La principal consecuencia relacionada en el caso de fugas de CO₂ a través de fallas existentes es el impacto potencial sobre los recursos de aguas subterráneas (acuíferos subsuperficiales o poco profundos) debido a las fugas de CO₂, que a su vez pueden llevar asociadas ²²²Rn, CH₄ y/o H₂S.

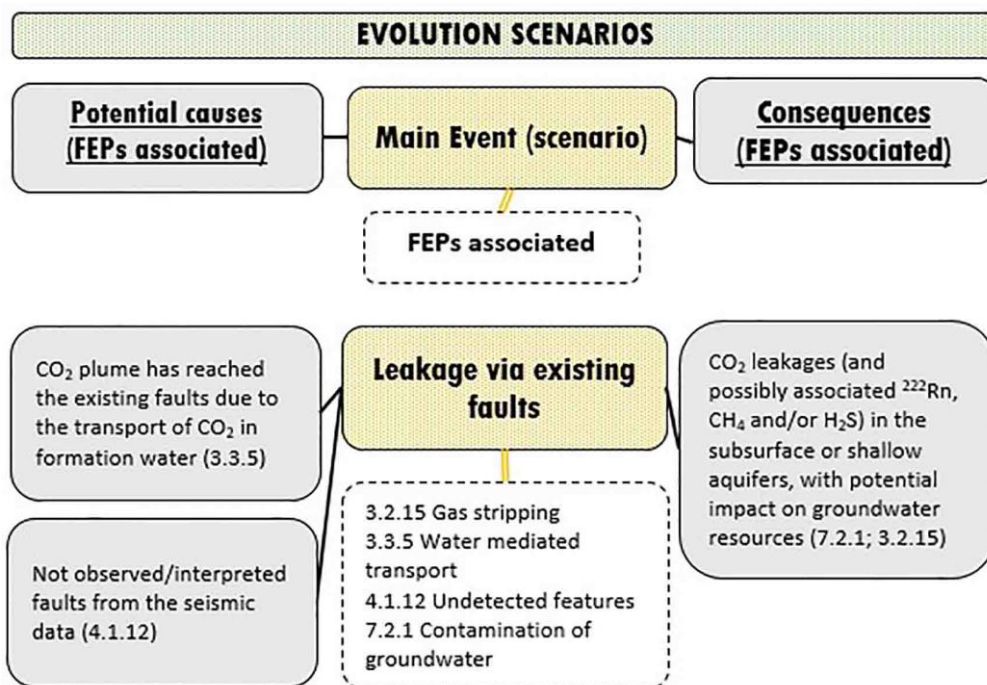


Figura 7. Fuga a través de fallas existentes y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

3.1.4 SUPERACIÓN DE LA EXTENSIÓN LATERAL PREVISTA DE LA PLUMA DE CO₂

La Figura 8 muestra un diagrama de pajarita que representa los FEP asociados a este escenario, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

La migración lateral de CO₂ puede ser superior a la prevista inicialmente, lo que puede deberse principalmente a la existencia de vías de fuga no previstas. En consecuencia, este escenario puede producirse por:

- Altas tasas de inyección de CO₂.
- Aumento de la velocidad del flujo de agua del reservorio, ya que dicho incremento de velocidad provoca una mayor migración lateral de la pluma de CO₂ al fluir el agua y el CO₂ en la misma dirección, provocando así que el CO₂ migre a mayores distancias [25].
- La existencia de incertidumbres en el modelo geológico del reservorio (p. ej. heterogeneidad, pozos/fallas/fracturas no identificadas, existencia de zonas inesperadas de flujo).

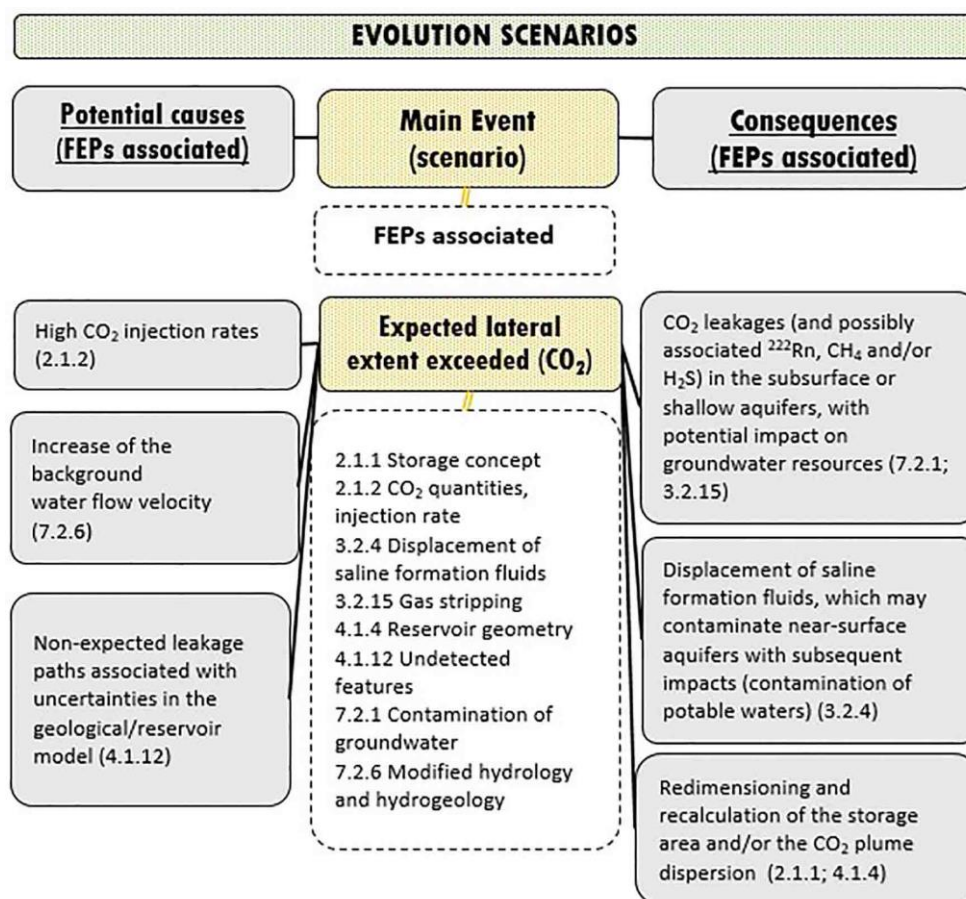


Figura 8. Superación de la extensión lateral prevista de la pluma de CO₂ y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

Las principales consecuencias relacionadas con este exceso lateral de la pluma de CO₂ son:

- El impacto potencial sobre las aguas subterráneas (acuíferos subsuperficiales o poco profundos) debido a las fugas de CO₂, que a su vez pueden llevar asociadas ²²²Rn, CH₄ y/o H₂S;
- El desplazamiento de fluidos salinos de la formación almacén, que pueden contaminar los acuíferos cercanos a la superficie con la consiguiente contaminación de los suministros de agua potable; y/o
- Redimensionamiento y nuevo cálculo del área de almacenamiento de CO₂ y/o del tamaño de la pluma de CO₂. En este caso, es necesario realizar una evaluación de la interacción de las operaciones de almacenamiento de CO₂ con otros recursos del subsuelo (p. ej. petróleo y gas convencionales, hidrocarburos no convencionales, carbón, aguas subterráneas potables, yacimientos geotérmicos) [26], pero estos recursos no parecen estar presentes en la estructura de Lopín.

3.1.5 MIGRACIÓN DE LA SALMUERA DE FORMACIÓN FUERA DE LOS LÍMITES PREVISTOS

La Figura 9 muestra un diagrama de pajarita que representa los FEP asociados a este escenario, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

La migración de la salmuera de formación fuera de los límites previstos puede deberse a:

- La onda de presión creada por la inyección de CO₂, la cual viaja mucho más lejos que el frente físico de CO₂, por lo que provoca el desplazamiento de fluidos salinos de la formación en lugares situados fuera del área de almacenamiento de CO₂;
- La baja permeabilidad de la roca sello, que también podría permitir una fuga importante de salmuera más allá de la formación de almacenamiento, ya sea verticalmente hacia arriba y/o hacia abajo [27]; y/o
- La existencia de vías de alta conductividad (p. ej. pozos abandonados mal sellados, pozos huérfanos, fallas/fracturas permeables no identificadas).

La principal consecuencia relacionada de este escenario es que, al producirse la intrusión del flujo ascendente de salmuera en los acuíferos que contienen recursos de aguas subterráneas, éstas pueden degradarse por efecto de la salmuera (p. ej. posible salinización de los recursos de agua dulce) [28].

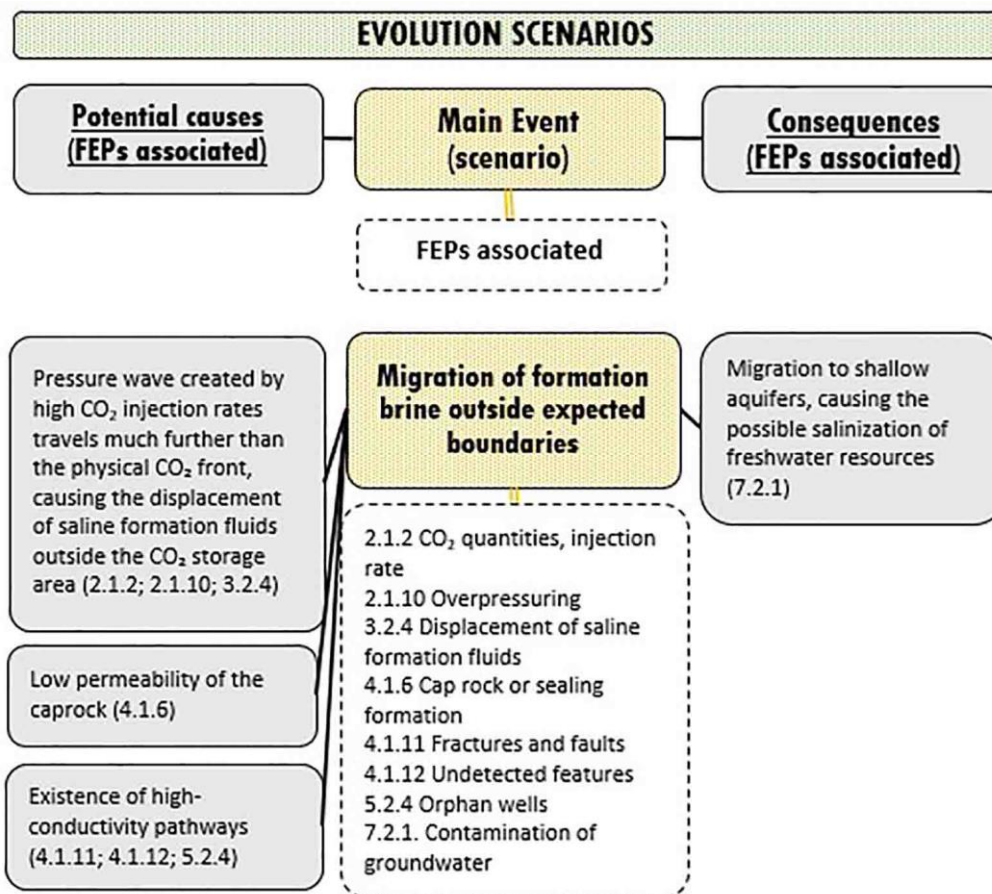


Figura 9. Migración de salmuera de formación fuera de los límites previstos y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

3.1.6 ACUMULACIÓN DE CO₂ EN UN RESERVORIO SECUNDARIO TRAS UNA MIGRACIÓN VERTICAL INESPERADA

La Figura 10 muestra un diagrama de pajarita que representa los FEP asociados a este escenario, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

La acumulación de CO₂ en un reservorio secundario tras una migración vertical inesperada puede deberse a la presencia de heterogeneidades que pueden dar lugar a variaciones direccionales de la permeabilidad, por lo tanto, afectando a la movilidad del CO₂ en la roca, que podría acumularse en un reservorio secundario.

La principal consecuencia asociada a este escenario es que la fuga de CO₂ del reservorio principal podría migrar no sólo al reservorio secundario, sino también a otras vías conductivas (pozos, fracturas, fallas). En consecuencia, puede haber un impacto potencial en los recursos de aguas subterráneas (acuíferos subterráneos o poco profundos) debido a la fuga de CO₂,

que a su vez puede transportar gases que pueden suponer un riesgo significativo (p. ej. ^{222}Rn asociado, CH_4 y/o H_2S). Otras consecuencias secundarias relacionadas con este escenario son:

- Redimensionamiento y nuevo cálculo del área de almacenamiento de CO_2 y/o del tamaño de la pluma de CO_2 .
- Desplazamiento de los fluidos de formación salinos existentes en el reservorio secundario.

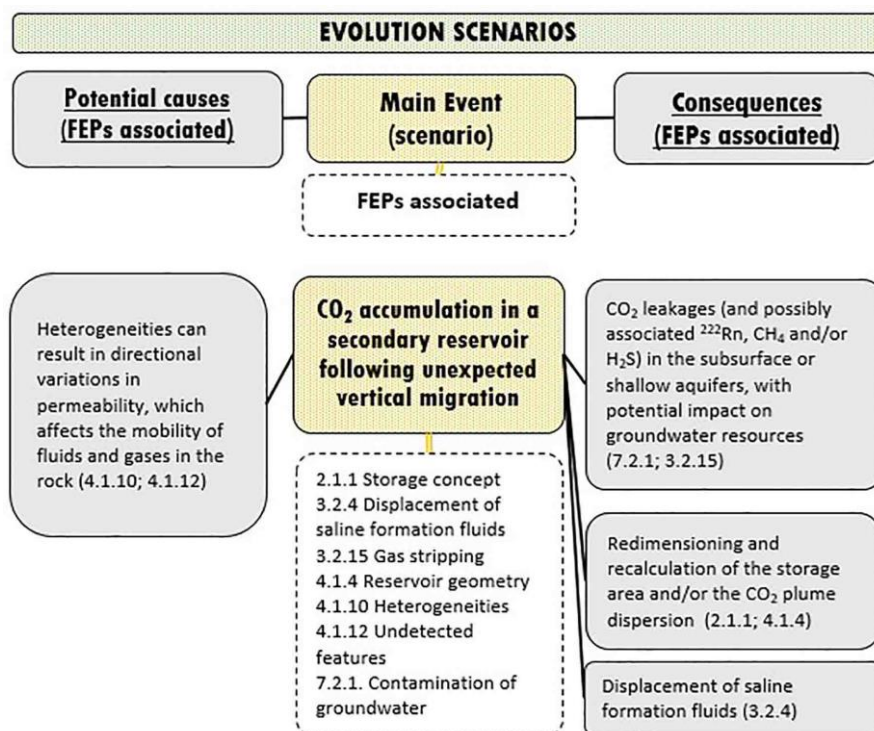


Figura 10. Acumulación de CO_2 en un reservorio secundario tras una migración vertical inesperada y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

3.2 ESCENARIOS PERTURBADOS

3.2.1 FUGA COMO RESULTADO DE EVENTOS SÍSMICOS

La Figura 11 muestra un diagrama de pajarita que representa los FEP asociados a este escenario, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

Las fugas de CO_2 debidas a eventos sísmicos pueden tener un origen natural (sismicidad natural) o inducido (sismicidad inducida). La sismicidad natural se produce cuando, en una

zona determinada, se produce un aumento anormal de los eventos sísmicos en relación con los registrados históricamente. La sismicidad inducida es la causada por la inyección de CO₂, lo que podría implicar la pérdida de integridad mecánica del reservorio y generar sismicidad inducida en otras estructuras del subsuelo (particularmente en los pozos).

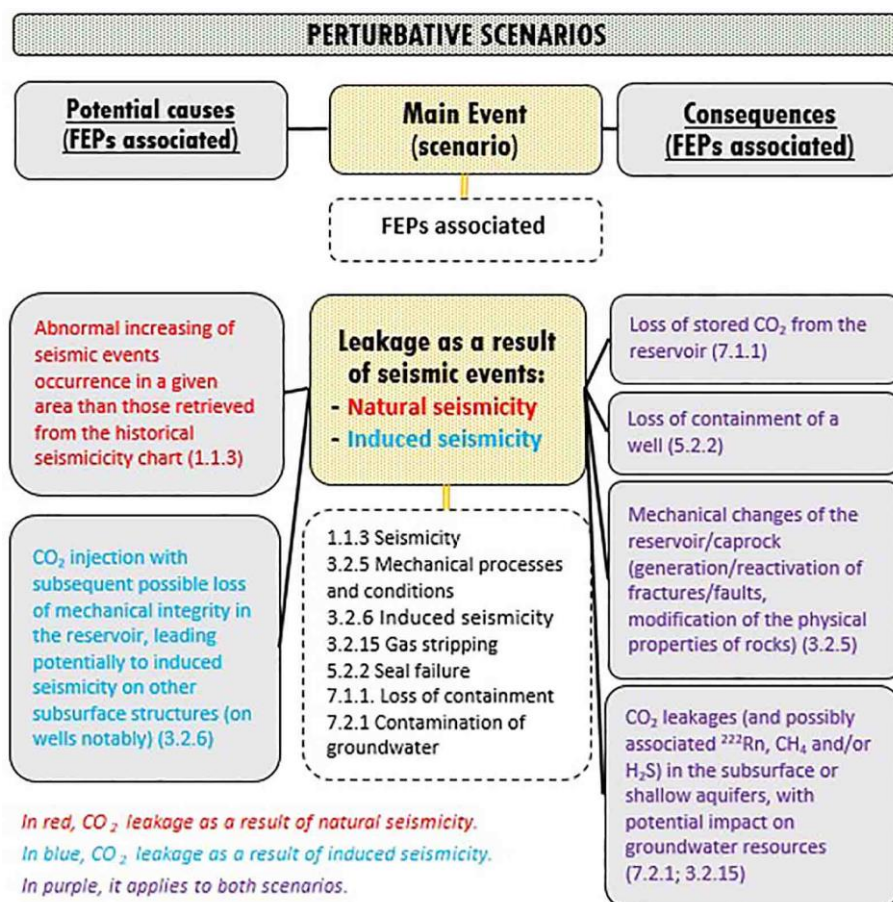


Figura 11. Fuga como resultado de eventos sísmicos y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

Existen diversas consecuencias relacionadas con las fugas de CO₂ debidas a fenómenos sísmicos, como:

- Pérdida del CO₂ almacenado del reservorio;
- Creación de fracturas nuevas. Si la presión de inyección excede la resistencia de las rocas, pueden generarse fracturas nuevas. Estas fracturas pueden actuar como vías preferenciales para el escape de CO₂, comprometiendo la contención del almacenamiento.
- Reactivación de fallas preexistentes: Incluso en áreas con baja actividad sísmica histórica, puede haber fallas geológicas dormidas o no detectadas. La reactivación de estas fallas durante la inyección puede generar fugas hacia capas superiores o hacia

la superficie. Las fallas reactivadas también pueden aumentar la permeabilidad local, alterando el comportamiento del flujo del CO₂ en el subsuelo.

- Pérdida de contención del pozo. Los pozos de inyección, tanto los activos como los sellados (en caso de haber pozos abandonados en la zona), representan un riesgo significativo de fuga si su integridad se ve comprometida. Las vibraciones sísmicas inducidas, aunque sean de baja magnitud, pueden afectar el cemento que sella los pozos o dañar la tubería, permitiendo la migración de CO₂ hacia capas no deseadas o incluso hacia la superficie. La interacción entre las tensiones generadas por el CO₂ inyectado y las tensiones existentes en los pozos es crítica para garantizar la seguridad del almacenamiento a largo plazo.
- Cambios en las propiedades geomecánicas del reservorio (p. ej. generación/reactivación de fracturas/fallas, cambios en las propiedades físicas de las rocas, cambios en las vías de migración; y/o
- El impacto potencial en los recursos de aguas subterráneas (acuíferos subsuperficiales o poco profundos) debido a fugas de CO₂, que a su vez pueden transportar gases que pueden suponer un riesgo importante (p. ej. ²²²Rn asociado, CH₄ y/o H₂S).

3.2.2 DISTORSIÓN POR UNA ACTIVIDAD POSTERIOR

La Figura 12 muestra un diagrama de pajarita que representa los FEP asociados a este escenario, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

Existe la posibilidad de que futuras actividades industriales o geológicas puedan interferir con el almacenamiento de CO₂. Entre ellas podemos citar las siguientes:

- Perforación de nuevos pozos: En el futuro, podría haber exploraciones geológicas para otros fines (hidrocarburos, investigación científica o incluso nuevos desarrollos tecnológicos). La perforación de nuevos pozos podría penetrar la formación de almacenamiento o las capas de sello, comprometiendo la contención del CO₂ almacenado.
- Impacto en infraestructuras: Si se desarrollan nuevas infraestructuras (por ejemplo, infraestructura energética o minera) en las proximidades del almacenamiento, esto podría generar riesgos adicionales. Las vibraciones, movimientos del suelo o

perforaciones relacionadas con actividades industriales podrían perturbar las condiciones de almacenamiento.

- Actividades que alteren la dinámica del subsuelo: Aunque no se esperan actualmente otros usos del subsuelo en la zona, cualquier actividad futura que modifique la presión o las condiciones térmicas del sistema podría afectar la estabilidad del almacenamiento de CO₂.

Además, la interrupción brusca del almacenamiento de CO₂ causada por una actividad posterior puede deberse a un control administrativo diferente del complejo de almacenamiento tras su cierre. Este cambio administrativo podría provocar una falta de concienciación y/o conocimiento sobre los detalles del complejo de almacenamiento de CO₂, lo que posiblemente provocaría una distorsión inadvertida en el futuro. Otra causa de distorsión podría estar relacionada con acciones humanas deliberadas (p. ej. intrusión malintencionada y sabotaje), ya que dichas acciones están relacionadas con el grado de conocimiento de la existencia, ubicación y/o naturaleza del complejo de almacenamiento de CO₂.

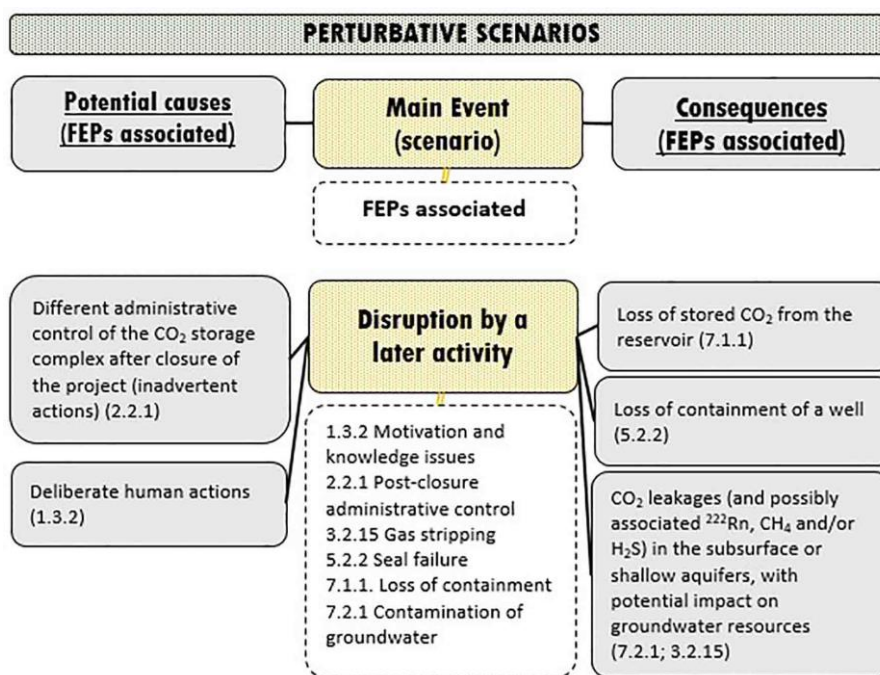


Figura 12. Distorsión por una actividad posterior y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

Las consecuencias derivadas de la interrupción brusca del almacenamiento de CO₂ son múltiples, tales como:

- Pérdida del CO₂ almacenado del reservorio;

- Pérdida de contención de un pozo, comprometiendo en consecuencia su correcto funcionamiento; y/o
- El impacto potencial en los recursos de aguas subterráneas (acuíferos subsuperficiales o poco profundos) debido a fugas de CO₂, que a su vez pueden transportar gases asociados que pueden constituir un riesgo importante (p. ej. ²²²Rn, CH₄ y/o H₂S).

3.2.3 MODIFICACIONES DE FLUJO

La Figura 13 muestra un diagrama de pajarita que representa los FEP asociados a este escenario, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

Este escenario se refiere a las modificaciones en el flujo de aguas subterráneas, dentro de la formación de almacenamiento o en otras capas del complejo de almacenamiento. Las causas relacionadas pueden deberse a:

- Altas tasas de inyección de CO₂;
- Disolución y/o precipitación de minerales debido a la inyección de CO₂, ya que la reacción del CO₂ con la roca almacén modificará, entre otras características, el flujo de fluidos (dirección o velocidad), la porosidad y permeabilidad del reservorio, las propiedades mecánicas y la capacidad de almacenamiento de CO₂;
- La existencia de vías que provoquen modificaciones del flujo dentro o fuera del reservorio (p. ej. pozos abandonados deficientemente sellados, pozos huérfanos, fallas/fracturas permeables no identificadas); y/o
- Cambios mecánicos del reservorio/roca sello (p. ej. generación/reactivación de fracturas/fallas, modificación de las propiedades físicas de las rocas debido a la inyección de CO₂).

Las consecuencias relacionadas con este escenario incluyen:

- Modificaciones del flujo, tanto en la hidrogeología profunda como en la hidrología próxima a la superficie, debido a las altas tasas de inyección de CO₂. La inyección de CO₂ genera un frente de presión que puede desplazar fluidos preexistentes en la formación. En grandes volúmenes, este desplazamiento podría afectar la dirección y velocidad del flujo de las aguas subterráneas dentro de la formación. En casos

extremos, el CO₂ podría llegar a movilizar sales o metales disueltos en el agua, afectando la calidad del agua subterránea.

- Impacto en capas adyacentes: Si el CO₂ migra a capas adyacentes a través de fallas o fracturas, podría alterar los patrones de flujo en otras formaciones del subsuelo, como acuíferos de agua dulce cercanos.
- Redimensionamiento y nuevo cálculo del área de almacenamiento de CO₂ y/o del tamaño de la pluma de CO₂, ya que ambas características pueden requerir nuevas reconsideraciones por las modificaciones del régimen de flujo; y/o
- Impacto potencial en los recursos de aguas subterráneas (acuíferos subsuperficiales o poco profundos) debido a las fugas de CO₂ inducidas por el régimen de flujo modificado, que a su vez pueden transportar gases asociados que pueden constituir un riesgo importante (p. ej. ²²²Rn, CH₄ y/o H₂S).

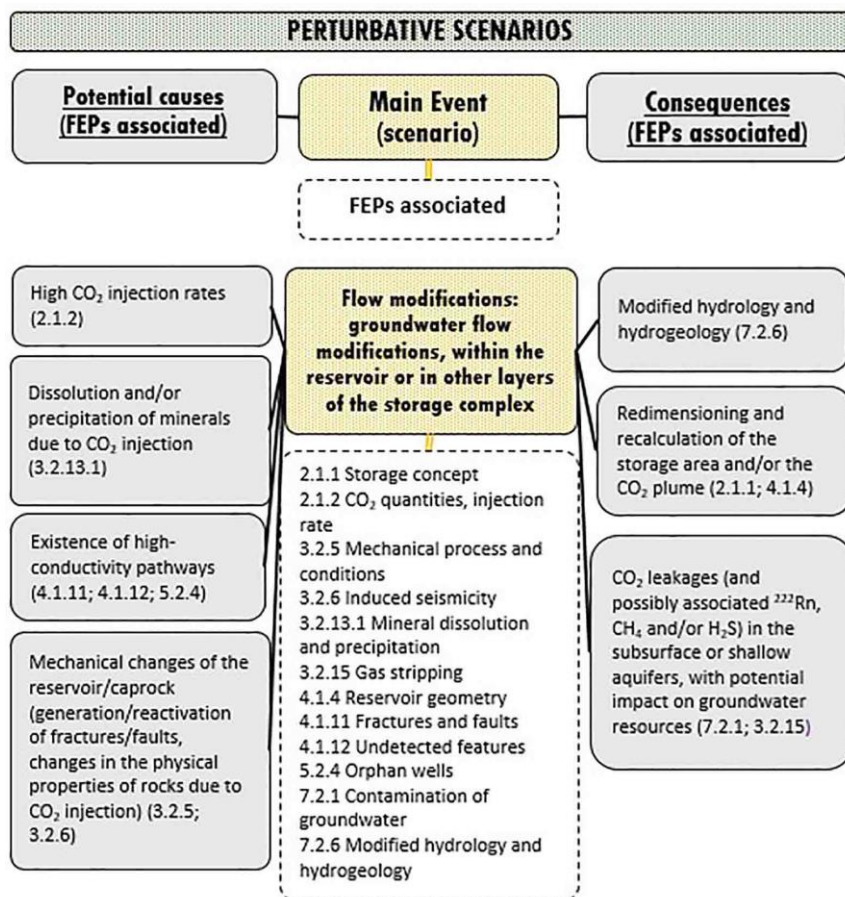


Figura 13. Modificaciones de flujo y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

3.3 ESCENARIOS DE FUNCIONAMIENTO

3.3.1 *PÉRDIDA DE INYECTIVIDAD*

La Figura 14 muestra un diagrama de pajarita que representa los FEP asociados en relación con este escenario, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

Este escenario se refiere a la dificultad o incapacidad de inyectar más CO₂ en el acuífero y puede ser debido a varios factores ligados a una inyectividad reducida debido a cambios químicos/reactividad:

- Porosidad reducida debido a la precipitación química. Durante la inyección de CO₂, se forma ácido carbónico (H₂CO₃) al reaccionar el CO₂ disuelto con el agua salina. Este ácido puede reaccionar con los minerales del acuífero, especialmente los que contienen carbonatos, generando la precipitación de minerales como calcita (CaCO₃). La precipitación de estos minerales puede reducir el espacio de los poros del acuífero, disminuyendo su capacidad de almacenar más CO₂ y reduciendo la permeabilidad del sistema. La pérdida de porosidad afecta directamente la inyectividad, impidiendo que se mantengan los volúmenes de inyección previstos.
- Cambios físicos debidos a reacciones químicas. Además de la precipitación, otras reacciones químicas pueden generar nuevos minerales o alterar la estructura de los existentes, afectando la conectividad entre poros (permeabilidad). La disolución de minerales o la formación de nuevas fases minerales podrían cambiar las propiedades físicas de las rocas, creando zonas de baja permeabilidad o incluso fracturas que alteran la dinámica del flujo de CO₂. La precipitación de minerales como la anhidrita (CaSO₄) o el yeso (CaSO₄·2H₂O) puede ocurrir en acuíferos con presencia de sulfatos, generando bloqueos en los poros.
- Una obstrucción física de los poros por migración de partículas finas y compactación de la roca (las partículas finas se definen típicamente como partículas móviles de un diámetro equivalente < 40 µm) en el complejo de almacenamiento de CO₂ (incluyendo tanto el reservorio como la roca sello).
- Deformación del pozo (la inyección de agua en arenas blandas suele provocar producción de arena, relleno del pozo y taponamiento cercano al mismo, acompañado de una grave pérdida de inyectividad con el tiempo) [29];.

- Hinchamiento de la arcilla, que se produce cuando los minerales arcillosos presentes en el reservorio pueden hincharse hasta el punto de reducir la inyectividad [29].
- El impacto de heterogeneidades geológicas, como puede ser la presencia de capas alternas con propiedades mecánicas distintas, la presencia de fallas y/o la compartimentación del reservorio.

Las principales consecuencias asociadas a la reducción de la inyectividad son:

- Tasas de inyección de CO₂ más bajas, provocando una inyectividad insuficiente para los objetivos del proyecto de almacenamiento.
- Los pozos requerirán de intervenciones más frecuentes (estimulación o lavado con agua dulce) y puede ser necesario un pozo de respaldo adicional para resolver esta reducción de la inyectividad.

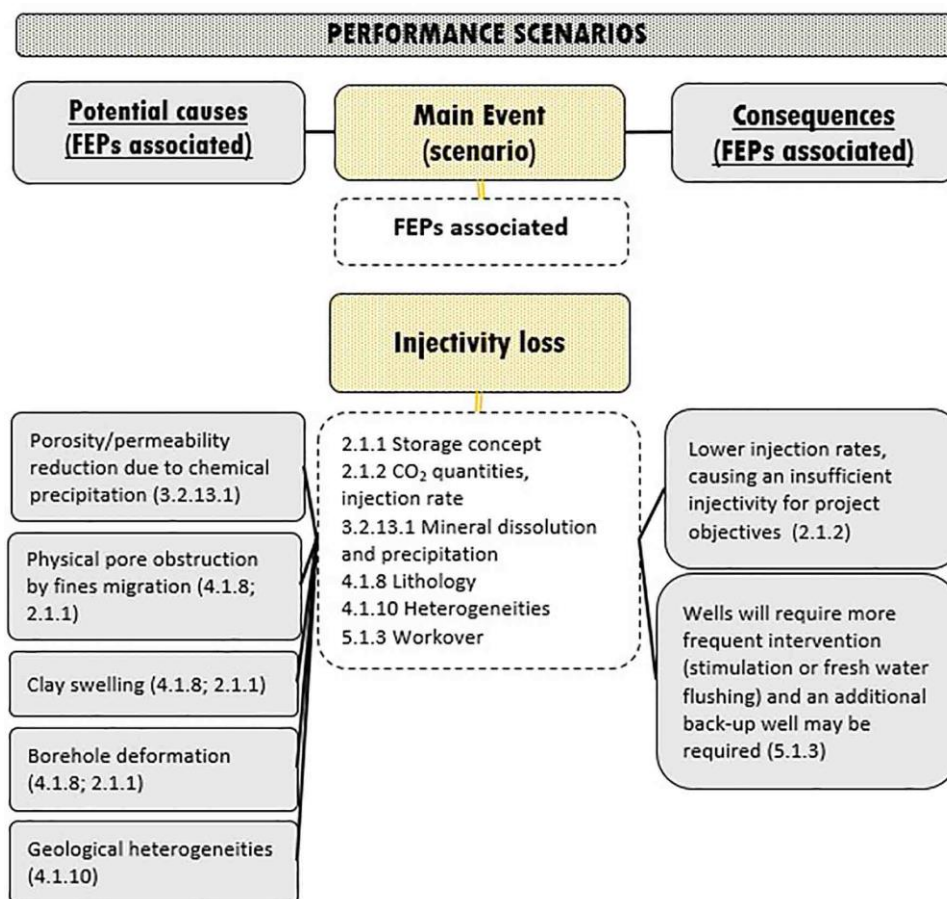


Figura 14. Pérdida de inyectividad" y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

3.3.2 CAPACIDAD DE LA FORMACIÓN ALMACÉN MENOR DE LO PREVISTA

La Figura 15 muestra un diagrama de pajarita que representa los FEP asociados a este escenario, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

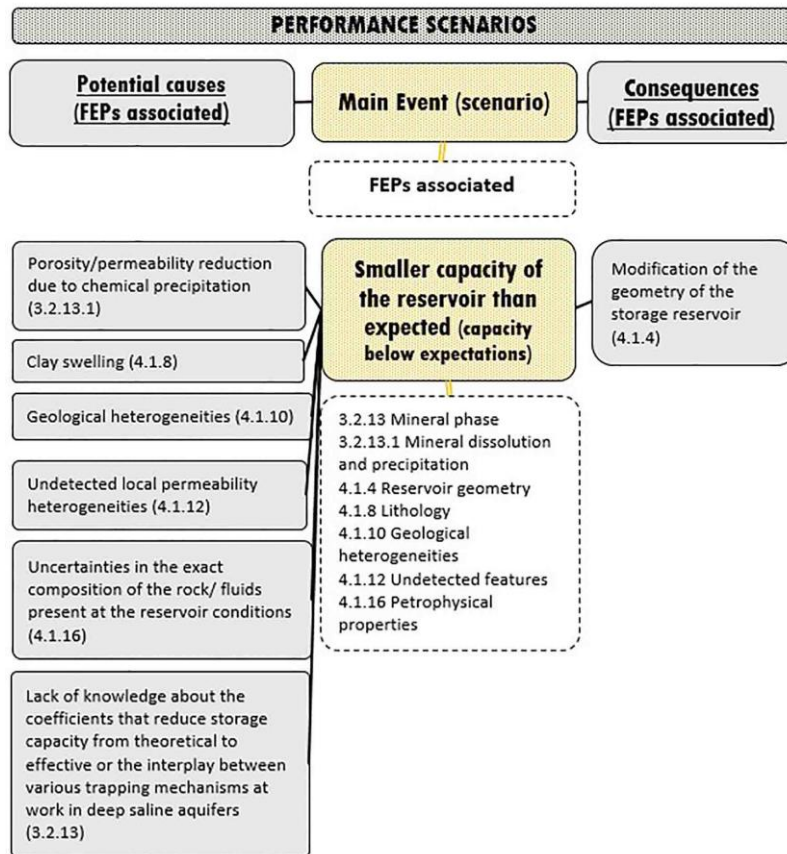


Figura 15. Capacidad de la formación almacén menor de lo prevista y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

Este escenario puede ocurrir si las propiedades geológicas del acuífero han sido mal estimadas o no se han tenido en cuenta ciertos factores, como la conectividad entre poros, fracturas o fallas. En consecuencia, las posibles causas pueden deberse a:

- Si la porosidad o permeabilidad efectiva del acuífero es menor de lo previsto, o si las reacciones químicas (p.ej. hinchamiento de los minerales arcillosos presentes en el reservorio) reducen significativamente la capacidad de almacenamiento, el volumen de CO₂ que se puede inyectar será inferior al estimado.
- Si se descubren barreras geológicas internas, como capas de baja permeabilidad o sellos no detectados, esto podría restringir el flujo de CO₂, limitando el área disponible

para el almacenamiento. En este sentido, cabe señalar que los datos relativos a los acuíferos salinos profundos suelen ser escasos y de baja resolución espacial.

- Si el CO₂ no se disuelve en el agua salina tan eficientemente como se esperaba, dejando una mayor proporción de CO₂ en fase libre, lo que ocupa más espacio.
- Incertidumbres sobre la composición exacta de la roca y/o los fluidos presentes en el reservorio.
- Desconocimiento de los coeficientes que reducen la capacidad de almacenamiento teórica a la efectiva, o de los diversos mecanismos de atrapamiento y su interacción que actúan en los acuíferos salinos profundos [30].

La principal consecuencia derivada de que la capacidad del reservorio sea menor de la esperada es la modificación de la geometría del reservorio, con la consiguiente reducción de su capacidad global de almacenamiento.

3.3.3 PRESURIZACIÓN DEL RESERVORIO DEBIDO A UNA COMPARTIMENTACIÓN INESPERADA

La Figura 16 muestra un diagrama de pajarita que representa los FEP asociados a este escenario, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

Este escenario se refiere a la sobrepresión que puede producirse en la formación almacén debida a una compartimentación inesperada, que generalmente puede deberse a heterogeneidades geológicas no detectadas, ya sean estructurales y/o estratigráficas. Durante la inyección de CO₂, la presión en la formación almacén debe ser cuidadosamente monitoreada para evitar que alcance niveles que puedan comprometer la integridad del sellado o desencadenar/alterar fallas geológicas.

Las principales consecuencias relacionadas con este escenario son:

- Reducción de la capacidad original estimada del reservorio, ya que los distintos compartimentos configuran una nueva geometría (distribución espacial, profundidad y topografía de la parte superior) del reservorio. Si durante las operaciones de inyección se descubre que el acuífero está compartimentado, es decir, que no es continuo debido a barreras geológicas (p. ej. fallas selladas o capas de baja permeabilidad), el CO₂ no podrá dispersarse tan ampliamente como se había planificado;

- Un aumento local de la presión, que puede superar los límites de seguridad y generar fugas o fracturas en el sistema, comprometiendo tanto la capacidad de almacenamiento como la seguridad del proceso;
- Tasas de inyección diferentes debido a la existencia de nuevos compartimentos dentro de la formación de almacenamiento;
- Redimensionamiento y nuevo cálculo del área de almacenamiento y/o de la dispersión de la pluma de CO₂, ya que ambas características podrían verse modificadas por la presencia de los nuevos compartimentos dentro del reservorio; y/o
- Abandono prematuro del complejo de almacenamiento de CO₂.

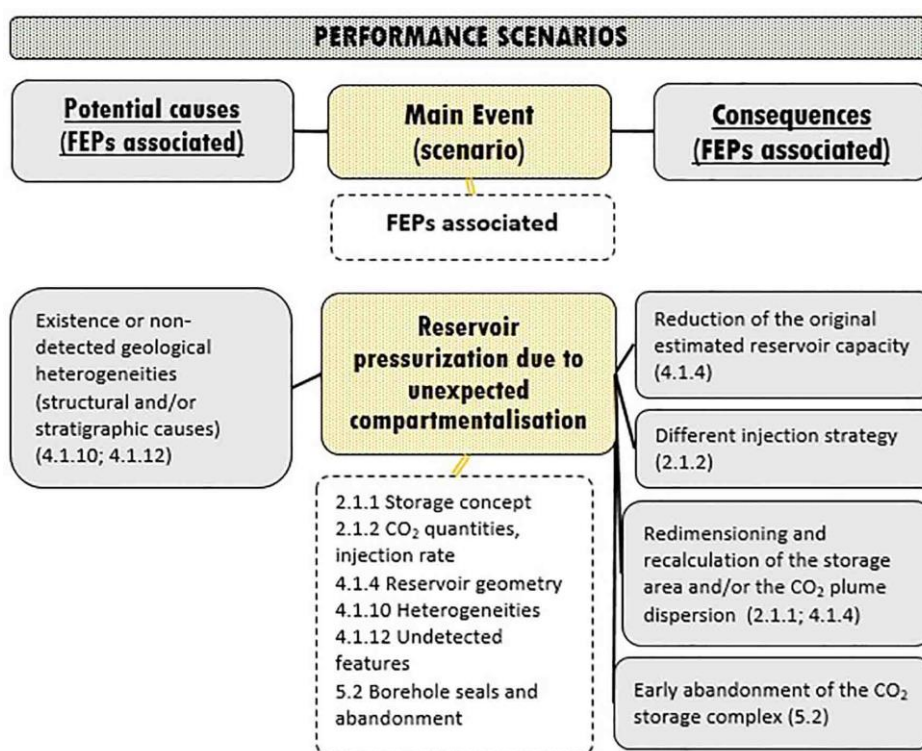


Figura 16. Presurización del reservorio debido a una compartimentación inesperada y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

3.3.4 SOBRELLENADO ACCIDENTAL

La Figura 17 muestra un diagrama de pajarita que representa los FEP asociados a este escenario, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

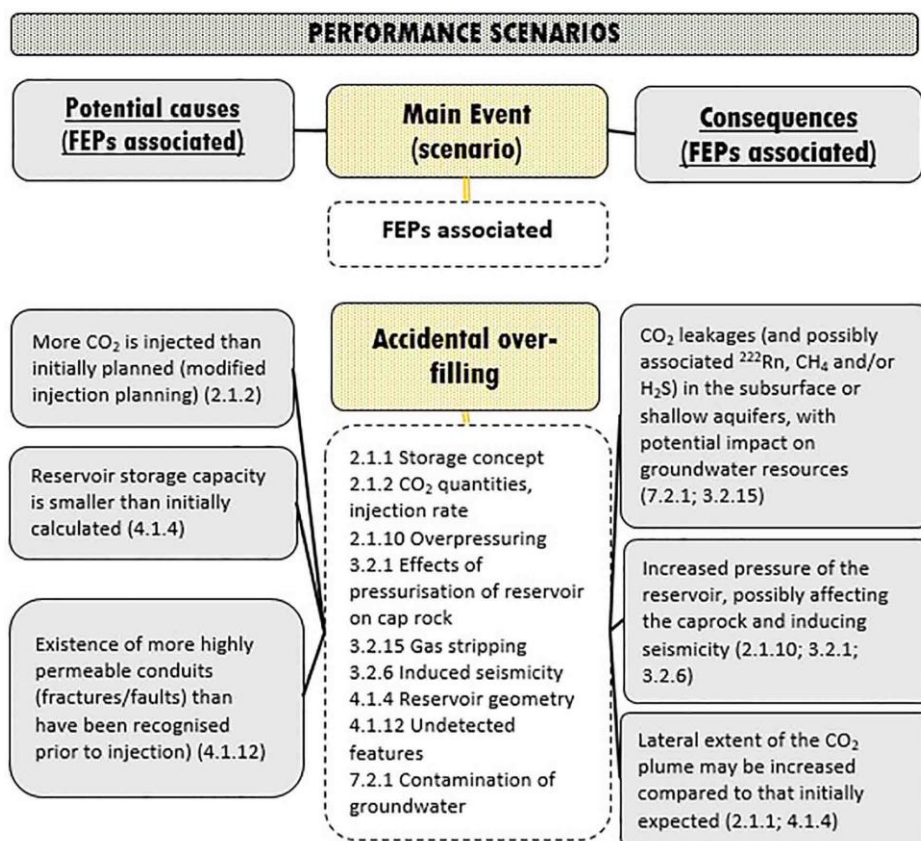


Figura 17. Sobrellenado accidental y FEP asociados, incluyendo también las causas potenciales y las consecuencias, así como sus FEP relacionados.

Este escenario trata del sobrellenado accidental de la formación de almacenamiento, lo cual puede deberse a:

- La inyección de una mayor cantidad de CO₂ de la que el acuífero puede almacenar de manera segura (plan de inyección modificado);
- La capacidad de almacenamiento del reservorio es inferior a la calculada inicialmente; y/o
- La existencia de conductos más permeables (fracturas/fallas) que los reconocidos antes de la inyección de CO₂, lo que puede provocar un sobrellenado accidental.

Las principales consecuencias derivadas de un sobrellenado accidental del reservorio son:

- El impacto potencial en los recursos de aguas subterráneas (acuíferos subsuperficiales o poco profundos) debido al sobrellenado y las consiguientes fugas de CO₂, que a su vez pueden transportar gases asociados que pueden suponer un riesgo importante (p. ej. ²²²Rn, CH₄ y/o H₂S);
- Aumento excesivo de la presión: Si la inyección sobrepasa la capacidad del reservorio, la presión podría superar los niveles críticos, aumentando el riesgo de fracturar la roca

sello (*caprock*) que impide que el CO₂ escape hacia la superficie o a otros estratos permeables.

- Escape de CO₂ hacia formaciones adyacentes: Si el acuífero se sobrellena, el CO₂ puede migrar hacia otras formaciones geológicas a través de fallas, fracturas o caminos preferenciales, comprometiendo la seguridad del almacenamiento.
- Movimientos sísmicos inducidos: La inyección excesiva de CO₂ puede inducir sismicidad si se genera una acumulación de tensión en las rocas adyacentes. Esto puede ocurrir cuando la presión en el reservorio afecta las fallas geológicas cercanas, lo que potencialmente podría desencadenar eventos sísmicos.

3.4 APLICACIÓN AL EMPLAZAMIENTO DE LOPÍN: SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ESCENARIOS

Una vez definidos los posibles escenarios de riesgo asociados al almacenamiento geológico de CO₂, se procede a un proceso de selección y clasificación para identificar aquellos que presentan mayor relevancia y probabilidad de ocurrencia en el emplazamiento concreto de Lopín. Este análisis no solo permite priorizar escenarios en función de su impacto potencial, sino que también facilita la planificación de medidas de mitigación y la toma de decisiones durante la fase de inyección y monitorización del CO₂.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el emplazamiento de Lopín que reflejan los escenarios seleccionados en función de su evolución temporal y espacial y su relevancia en el contexto geológico y operacional de este emplazamiento Tabla 6

En resumen, se han expuesto los elementos clave para un análisis preliminar de riesgos en el contexto del almacenamiento geológico de CO₂ en Lopín. Se ha puesto especial énfasis en los escenarios más inciertos y relevantes, asociados tanto a la evolución del sistema, a posibles perturbaciones externas que pueda sufrir y al comportamiento durante la inyección del CO₂.

Estos escenarios destacan la necesidad de una caracterización geológica detallada y una planificación rigurosa de las operaciones de inyección, así como de un sistema de monitoreo exhaustivo y constante, para garantizar la seguridad a largo plazo del almacenamiento y la protección de los ecosistemas circundantes.

En conjunto, esta apartado proporciona una base sólida para la evaluación de riesgos, pero debe complementarse con estudios más detallados que aborden la incertidumbre inherente de los sistemas geológicos y los impactos ambientales, asegurando la viabilidad y sostenibilidad del proyecto..

ESCENARIO		RIESGO	¿SE CONSIDERA?
DE EVOLUCIÓN	Fugas a través de pozos en funcionamiento		Sólo se tendrán en cuenta en la fase posterior a la inyección. Se asume que un pozo moderno cuenta con todas las medidas de seguridad para el almacenamiento de CO ₂
DE EVOLUCIÓN	Fugas a través de pozos abandonados		Sí, ya que el sondeo Lopín-1 se encuentra a unos 10 km
DE EVOLUCIÓN	Fugas a través de la formación sello debido a su fracturación por sobrepresión		Sí, se estimarán las sobrepresiones provocadas por la inyección de CO ₂ y el riesgo asociado de fracturación de la roca sello
DE EVOLUCIÓN	Fugas a través de la formación sello debido a deficiencias en el sellado a través de zonas de mayor permeabilidad		La primera etapa del análisis no tiene en cuenta la posibilidad de fugas a través de zonas preexistentes de alta permeabilidad
DE EVOLUCIÓN	Fugas a través de la formación sello debido a deficiencias en el sellado a través de discontinuidades (fracturas, fallas) presentes en la roca sello		Sí, se tratarán como fugas a través de las fallas existentes
DE EVOLUCIÓN	Fugas a través de fallas existentes		Sí, debido a las fallas localicadas al SW
DE EVOLUCIÓN	Superación de la extensión lateral prevista de la pluma de CO ₂		No está previsto para el caso de una inyección piloto, limitada a 100.000 t de CO ₂
DE EVOLUCIÓN	Migración de la salmuera de formación fuera de los límites previstos		No está previsto para el caso de una inyección piloto, y tampoco se considera su interacción con otros recursos geológicos en la zona
DE EVOLUCIÓN	Acumulación de CO ₂ en un reservorio secundario debido a una migración vertical		Sí, se considerará en la segunda ronda y estará vinculado al escenario de fugas a través de fallas, ya que el posible almacenamiento secundario intersecta con un conjunto de fallas que atraviesan el sello secundario
PERTURBADO	Fugas debidas a fenómenos sísmicos (naturales o inducidos) que puedan originar nuevas fracturas		No se va a considerar ningún escenario asociado a eventos sísmicos durante la primera fase de la evaluación de riesgos. El nivel de actividad sísmica en torno a Lopín es relativamente bajo, concentrándose principalmente en las sierras que rodean la cuenca del Ebro. Dentro de la zona de Lopín, sólo se han localizado 15 eventos desde 1900, siendo el primero de ellos en 1993. El evento de mayor magnitud (2,6) se produjo el 11-04-1996. Si se considera una zona extendida, la magnitud máxima calculada es de 4,1 para un evento situado a 30 km al sur de la zona de Lopín. Para ambas zonas, el nivel de actividad está bien caracterizado y no supone una amenaza para el almacenamiento de CO ₂
PERTURBADO	Fugas debidas a fenómenos sísmicos (naturales o inducidos) que puedan reactivar fallas preexistentes		No se va a considerar ningún escenario asociado a eventos sísmicos durante la primera fase de la evaluación de riesgos. El nivel de actividad sísmica en torno a Lopín es relativamente bajo, concentrándose principalmente en las sierras que rodean la cuenca del Ebro. Dentro de la zona de Lopín, sólo se han localizado 15 eventos desde 1900, siendo el primero de ellos en 1993. El evento de mayor magnitud (2,6) se produjo el 11-04-1996. Si se considera una zona extendida, la magnitud máxima calculada es de 4,1 para un evento situado a 30 km al sur de la zona de Lopín. Para ambas zonas, el nivel de actividad está bien caracterizado y no supone una amenaza para el almacenamiento de CO ₂
PERTURBADO	Fugas debidas a fenómenos sísmicos (naturales o inducidos) que puedan suponer la pérdida de contención del pozo		No se va a considerar ningún escenario asociado a eventos sísmicos durante la primera fase de la evaluación de riesgos. El nivel de actividad sísmica en torno a Lopín es relativamente bajo, concentrándose principalmente en las sierras que rodean la cuenca del Ebro. Dentro de la zona de Lopín, sólo se han localizado 15 eventos desde 1900, siendo el primero de ellos en 1993. El evento de mayor magnitud (2,6) se produjo el 11-04-1996. Si se considera una zona extendida, la magnitud máxima calculada es de 4,1 para un evento situado a 30 km al sur de la zona de Lopín. Para ambas zonas, el nivel de actividad está bien caracterizado y no supone una amenaza para el almacenamiento de CO ₂
PERTURBADO	Distorsión por una actividad posterior		No, ya que no se consideran otros recursos geológicos potencialmente explotables en la zona (se excluye la geotermia por las bajas temperaturas de la zona)
PERTURBADO	Alteraciones del flujo		No se esperan alteraciones para una inyección piloto limitada a 100.000 t de CO ₂ (limitación de la Directiva 2009/31/CE)
FUNCIONAMIENTO	Pérdida de inyectividad		No se van a considerar estos tres escenarios (ligados a las actividades técnicas de inyección) directamente sino a través de los escenarios de riesgo a los que puedan dar lugar y que ya han sido indicados
FUNCIONAMIENTO	Presurización del reservorio debido a una compartimentación inesperada		No se van a considerar estos tres escenarios (ligados a las actividades técnicas de inyección) directamente sino a través de los escenarios de riesgo a los que puedan dar lugar y que ya han sido indicados
FUNCIONAMIENTO	Sobrellenado accidental		No se van a considerar estos tres escenarios (ligados a las actividades técnicas de inyección) directamente sino a través de los escenarios de riesgo a los que puedan dar lugar y que ya han sido indicados

Tabla 6. Escenarios seleccionados, y sus motivos de consideración o no, para el emplazamiento concreto de Lopín.

4 ANÁLISIS DE RIESGOS

Esta sección describe el desarrollo de un modelo cuantitativo de evaluación de riesgos para el sistema de almacenamiento de CO₂. El modelo utiliza una red bayesiana para integrar todos los datos disponibles del sistema, lo que permite una evaluación exhaustiva del riesgo del sistema. El comportamiento de la red se validó frente a los cálculos cualitativos derivados de la metodología inicial de selección de emplazamientos [31]. Posteriormente, se incorporaron los resultados de modelos cuantitativos para la migración de la pluma de CO₂ durante la inyección y la evolución del frente de presión (independiente de la pluma). También se incluyeron submodelos de fugas y probabilidades asociadas, que abarcan los principales riesgos (fracturas/fallas y pozos/sondeos). Por último, y aplicando la red bayesiana, el modelo arroja funciones de riesgo de probabilidad cuantitativa para todo el sistema de almacenamiento de CO₂ y sus subsistemas individuales (almacenamiento y sello primario, contención secundaria y dispersión cerca de la superficie).

Se ha demostrado que los riesgos asociados al almacenamiento geológico de CO₂ son mayores durante la fase de inyección [32]. Esto se debe a que el proceso de inyección implica un aumento de la presión de los poros, lo que puede desencadenar actividad sísmica y reactivar fracturas. Además, durante esta fase inicial, los procesos que conducen al atrapamiento permanente del CO₂ dentro del yacimiento aún no han tenido tiempo suficiente para actuar [31]. Por consiguiente, la evaluación de riesgos se ha centrado en la fase de inyección.

4.1 MODELOS ANALÍTICOS

Las principales perturbaciones del sistema están relacionadas con la propagación de la pluma de CO₂ y las sobrepresiones inducidas. La morfología de la pluma, su extensión dentro del reservorio, y la distribución de las sobrepresiones en la formación de almacenamiento son factores clave que determinan, en una primera aproximación, los riesgos de fuga del CO₂ desde la formación almacén. Ambos aspectos pueden modelarse mediante aproximaciones analíticas o semianalíticas, lo que facilita su utilización en evaluaciones preliminares de riesgo. A continuación, se presentan los modelos empleados en este estudio.

4.1.1 EXTENSIÓN DE LA PLUMA DE CO₂

El primer paso para calcular la probabilidad del riesgo dinámico de fuga consiste en obtener la evolución temporal de la pluma de CO₂ inyectado. Durante la inyección de CO₂, el desplazamiento se debe a un proceso de drenaje en el que el fluido no humectante - CO₂ - desplaza al fluido salobre connato. Este desplazamiento deja el fluido salobre connato en

saturación residual en la zona bifásica. Posteriormente, para estimar los riesgos del sistema, es necesario incluir la interacción de la pluma de CO_2 y el frente de desecación con las posibles vías de flujo o elementos de riesgo, identificados en la IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS.

Para poder realizar simulaciones MonteCarlo y tener en cuenta las incertidumbres, los análisis de riesgos recurren a enfoques analíticos o semianalíticos capaces de reflejar el comportamiento a escala global del CO_2 y la migración de fluidos connatos. En todos los casos, la inyección y posterior migración de la fase libre de CO_2 en un acuífero salobre profundo se regirá por el equilibrio entre la flotabilidad y la dispersión viscosa [33]. Los modelos aplicados en esta primera fase de la evaluación de riesgos en el emplazamiento de Lopín se basan en dos estudios que se describen a continuación y cuyo esquema típico de evolución de la pluma de CO_2 se muestra en la Figura 18.

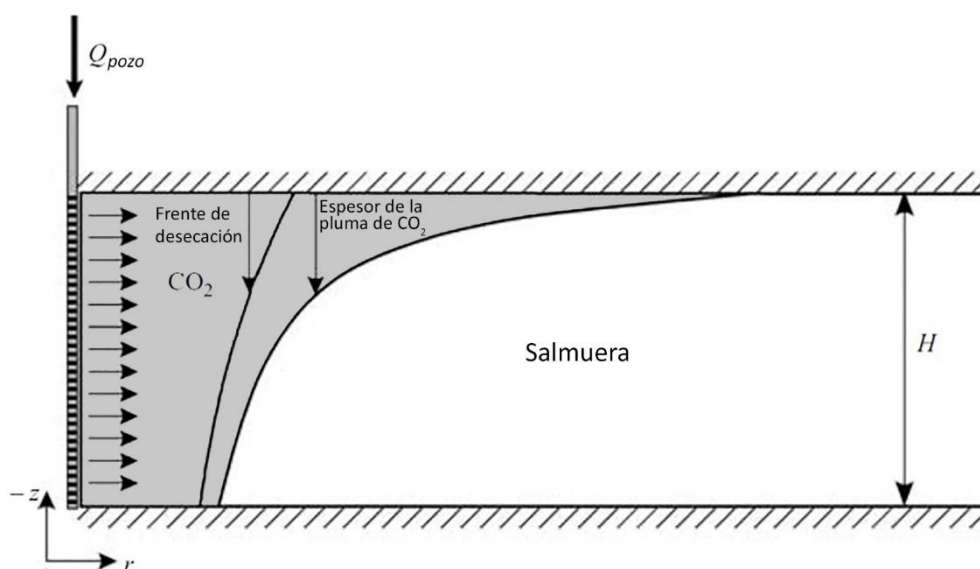


Figura 18. Esquema de la evolución radial de la pluma de CO_2 y del frente de desecación durante la fase de inyección. Modificado de [34].

Las principales aproximaciones consideradas para obtener las soluciones simplificadas son las siguientes [34-36]:

- La inyección de CO_2 se realiza a través de un único pozo en un acuífero plano, horizontalmente homogéneo y confinado en la parte superior e inferior por capas impermeables. También se considera la condición de equilibrio vertical, que es apropiada para sistemas en los que la escala vertical es mucho menor que la horizontal. En estas condiciones, el acuífero puede considerarse horizontal durante el período de inyección, ya que, como la escala horizontal es mucho mayor que la vertical, es apropiado asumir que el flujo es esencialmente horizontal.

- Se asume que el problema tiene simetría radial. Se ha demostrado que la simetría radial se mantiene incluso con perturbaciones, como puede ser la inclusión de un pozo abandonado con fugas en el sistema. El problema se limita a casos en los que el acuífero puede tomarse como horizontal y en los que otros efectos de flujo, como el flujo regional de agua subterránea, son lo suficientemente pequeños como para que el patrón de desplazamiento alrededor del pozo sea radialmente simétrico.
- Aproximación de "interfaz nítida". Es decir, el CO₂ y la salmuera están separados por una interfaz nítida.
- Presión capilar insignificante.
- Las viscosidades de los fluidos permanecen constantes.
- El fluido llena completamente la cavidad, es decir, se satisface que $S_c + S_{cw} = 1$.
- Fluido inyectado: CO₂ seco. Esto permite que el CO₂ evapore el agua residual, dando lugar a un frente de desecación (ver Figura 18). La fracción volumétrica de CO₂ en la salmuera residual viene dada por β_1 [-]. Por otro lado, suponemos que la salmuera puede evaporarse en la fase de CO₂, con la fracción volumétrica de vapor de agua en la fase de CO₂ dada por β_2 [-].

El "número de gravedad" (Γ) proporciona el alcance de las diferentes aproximaciones, tratándose de un parámetro adimensional que mide la relación entre las fuerzas gravitacionales y las fuerzas viscosas en un emplazamiento [37] y viene dado por la Eq. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

$$\Gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta \rho \cdot g \cdot \lambda_w \cdot k \cdot B^2}{Q_{well}} \quad \text{Eq. 1}$$

Donde: $\Delta \rho$ es la diferencia de densidad [ML⁻³]; g es la aceleración debida a la gravedad [LT⁻²]; λ_w es la movilidad del agua definida como la relación entre su permeabilidad relativa y la viscosidad del fluido ($\lambda_w = k_{rw} / \mu_w$); k es la permeabilidad intrínseca [L²]; B es el espesor total de la formación [L]; y Q_{well} es la tasa de inyección volumétrica [L³T⁻¹].

En los casos en que es factible despreciar la flotabilidad, la solución obtenida suponiendo que $\Gamma \rightarrow 0$ es aplicable. Estos casos son escenarios que corresponden a inyecciones industriales y con tasas de inyección relativamente altas, baja permeabilidad y/o acuíferos poco potentes, en los que la ecuación se transforma en una ecuación diferencial de primer orden. Desde un punto de vista práctico, el valor $\Gamma=0,5$ puede elegirse como límite razonable a partir del cual no puede despreciarse la flotabilidad. Para estos casos, la evolución de la pluma viene dada por la aproximación de Nordbotten [34].

Para aquellos casos en los que $\Gamma > 0,5$ y, por tanto, no es despreciable, no es posible simplificar dicho parámetro en las expresiones para el avance de la pluma de CO_2 . Esto conduce a la imposibilidad de obtener una expresión totalmente analítica. Para estos casos, la evolución de la pluma de CO_2 vendrá dada por la aproximación de Houseworth [35].

La modelización de la evolución de la pluma de CO_2 permitirá estimar el alcance máximo esperado para las condiciones impuestas durante la simulación, lo que es esencial en la estimación del riesgo, ya que determina el espacio de sucesos dentro del cual pueden situarse los elementos de riesgo. Las ecuaciones resultantes serán válidas durante el tiempo de inyección del CO_2 . Una modelización apropiada de la evolución de la pluma de CO_2 , tras el cese de la inyección, requerirá una consideración más cuidadosa de la flotabilidad.

Por lo tanto, las dos aproximaciones consideradas son:

- **NORDBOTTEN.** Una solución para el caso en que la flotabilidad actúa para separar los fluidos pero no desempeña ningún otro papel significativo [34].

Cuando la flotabilidad es despreciable en comparación con la viscosidad (fuerzas viscosas), la solución se reduce a la ecuación radial de Buckley-Leverett. Para los casos en los que las fuerzas viscosas son las dominantes, el sistema está bien descrito por la solución de la ecuación radial de Buckley-Leverett, sujeta a la segregación flotante de los fluidos, lo cual fue demostrado por [36]. En este caso, el número de gravedad, Γ , tiende a cero y las aproximaciones desarrolladas para la evolución de la pluma durante el periodo de inyección permiten, además, obtener el frente de secado que se crea en las proximidades del pozo de inyección.

La solución es válida para valores de $\lambda \geq 1$ (Eq. 2)

$$\lambda = \frac{\mu_w}{k_w} \frac{k_{nr}}{\mu_{nr}} = \frac{1}{\text{Mobility ratio}} \quad \text{Eq. 2}$$

Suponiendo $\Gamma=0$, se puede obtener una expresión explícita para el frente de avance de la pluma de CO_2 y el frente de desecación (ver Figura 18).

- **HOUSEWORTH:** Obtiene expresiones semianalíticas que reproducen las soluciones de autosimilitud de las ecuaciones de la interfaz nítida con bastante precisión en todo el espacio de parámetros (Γ, λ) . Los principales supuestos [35] son:
 - Equilibrio vertical e incompresibilidad.
 - La suposición de que los efectos de capilaridad son despreciables implica que los fluidos se segregan en función de la densidad.

- La ecuación gobernante se desarrolla utilizando la aproximación de equilibrio vertical, que asume una distribución de presión estática. Esto conduce a un campo de flujo totalmente horizontal. Además, se supone una segregación gravitacional completa, lo que significa que sólo fluye una fase en cualquier punto. Esta suposición permite desarrollar la ecuación de gobierno en términos de la altura de la interfase libre.

Se obtienen soluciones analíticas y semianalíticas aproximadas mediante un método de extrapolación a partir de las situaciones límites ajustadas (MBE, por sus siglas en inglés). Estas soluciones son válidas para diferentes rangos de valores de los parámetros Γ y λ (Eq. 3):

$$\Gamma = \frac{2\pi \Delta\rho g H^2 k}{Q_{well} \mu_w} \quad \text{Eq. 3}$$

$$\text{MBE1: } \frac{\Gamma}{\lambda-1} \ll 1; \lambda \gg 1$$

$$\text{MBE2: } \frac{\Gamma}{\lambda-1} \gg 1; \lambda \text{ small value}$$

El resumen de las soluciones se muestra en la Tabla 7.

VALOR	$\lambda \leq 2$	$\lambda > 2$
$\Gamma / (\lambda - 1) \leq 1 / 15$	MBE2	MBE1
$1 / 5 \leq \Gamma / (\lambda - 1)$	MBE2	MBE2
$1 / 15 < \Gamma / (\lambda - 1) < 1 / 5$	MBE2	Media ponderada MBE1-MBE2

Tabla 7. Resumen de las soluciones analíticas y semianalíticas aproximadas a utilizar en función de los valores de Γ y λ .

Media ponderada MBE1-MBE2 (Eq. 4):

$$\overline{\text{MBE}} = \frac{\lambda-1-5\Gamma}{10\Gamma} \text{MBE1} + \frac{15\Gamma-\lambda+1}{10\Gamma} \text{MBE2} \quad \text{Eq. 4}$$

En general, el conjunto de soluciones MBE se encuentra en estrecha concordancia cuantitativa con la solución numérica en todo el espacio de parámetros.

4.1.1.1 RESULTADOS CASO PILOTO

El caso a escala piloto se corresponde con una inyección que no supera las 100.000 toneladas de CO₂. Los resultados del frente de evolución de la pluma de CO₂ se han calculado a partir del modelo y de los valores de los parámetros presentados en la CARACTERÍSTICAS DEL COMPLEJO DE ALMACENAMIENTO, donde se han considerado varios casos para estimar la importancia de las tasas de inyección y la potencia del acuífero (Tabla 8). Se consideró que la

tasa de inyección inicial era aquella a la que se inyectarían las 100.000 t de CO₂ a lo largo de 5 años, que es el periodo cubierto por un proyecto de investigación, lo que equivale a una tasa de inyección de 0,63 kg/s. Además, también se consideró una tasa de 5,0 kg/s, la cual se aproxima más a una tasa de inyección industrial.

DATO	CASO BASE	MEJOR CASO	CASO BASE	MEJOR CASO
Potencia Fm. (m)	70.00	70.00	90.00	90.00
Permeabilidad- μ (m ²)	$2,14 \cdot 10^{-15}$	$5,06 \cdot 10^{-15}$	$2,14 \cdot 10^{-15}$	$5,06 \cdot 10^{-15}$
Permeabilidad- σ (m ²)	$2,53 \cdot 10^{-15}$	$2,04 \cdot 10^{-15}$	$2,53 \cdot 10^{-15}$	$2,04 \cdot 10^{-15}$
Porosidad- μ (%)	12.39	15.29	12.39	15.29
Porosidad- σ (%)	2.97	3.02	2.97	3.02
Tasa de inyección (kg/s)	0,63 y 5,00	0,63 y 5,00	0,63 y 5,00	0,63 y 5,00

Tabla 8. Valores asignados de potencia de la formación almacén, permeabilidad y porosidad para cada caso. Las tasas de inyección para cada uno de los casos son de 0,63 kg/s y 5,0 kg/s.

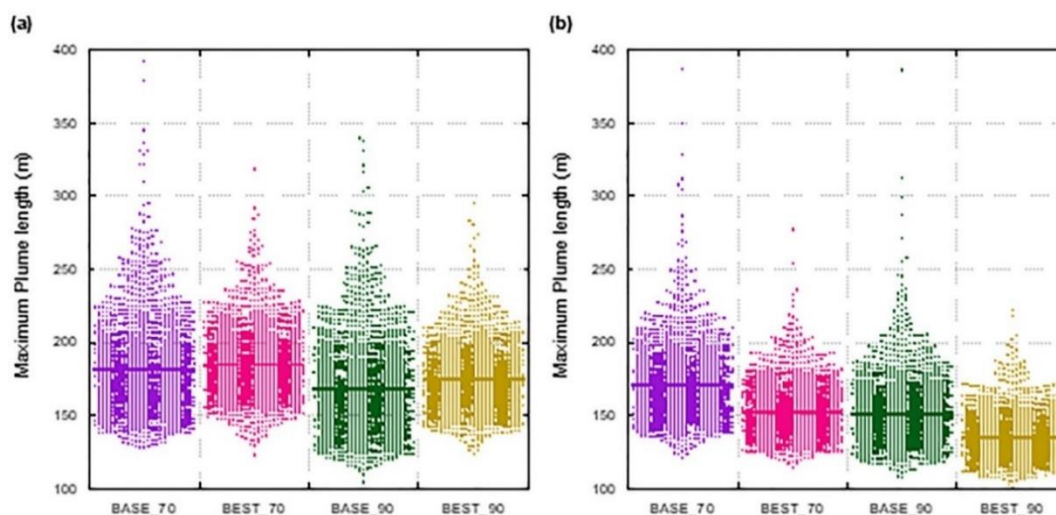


Figura 19. Valor medio del alcance de la pluma de CO₂ (línea continua) y resultados de cada iteración (puntos) para las dos tasas de inyección consideradas: (a) 0,63 kg/s; y (b) 5,0 kg/s.

Para las simulaciones de Monte Carlo en las que $\Gamma < 0,5$, las soluciones de la evolución de la pluma de CO₂ se obtienen utilizando la aproximación de Nordboten, mientras que para $\Gamma > 0,5$ se utiliza la aproximación de Houseworth. La diferencia entre ambas aproximaciones puede apreciarse en la Figura 19 donde se muestran los resultados del alcance máximo de la pluma de CO₂ para tasas de inyección de 0,63 kg/s y 5,0 kg/s, que, dependiendo del caso, se describen mediante una u otra aproximación. Los resultados del alcance máximo de la pluma de CO₂ en simulaciones Monte Carlo con $\Gamma < 0,5$ para tasas de inyección de 0,63 kg/s, muestran

distancias promedio de 170-180 m si la potencia de la formación de inyección B1 es de 70 m y de 155-175 m si la potencia es de 90 m, pero con dispersiones que pueden alcanzar los 350-400 m (ver Figura 19a). Sin embargo, para tasas de inyección de 5,0 kg/s y $\Gamma > 0,5$, las distancias disminuyen hasta los 150-165 m con una potencia de 70 m, y hasta los 145-150 m con una potencia de 90 m (ver Figura 19b).

La diferencia en la forma de la pluma de CO₂, en función de Γ , puede observarse de tal modo que, para el caso industrial (Γ puede aproximarse a cero) la pluma avanza más como un pistón, mientras que para valores de $\Gamma > 0,5$ hay un frente que se extiende más bajo la formación sello debido a las diferentes relaciones entre las fuerzas.

4.1.1.2 RESULTADOS CASO INDUSTRIAL

Para el caso industrial se utilizó el valor estimado de capacidad de la formación almacén, 13 Mt de CO₂, y, en función de las emisiones de las industrias cercanas, se eligieron dos tasas de inyección: 11 kg/s, que permitiría inyectar aproximadamente el 50 % de dichas emisiones anuales cada año, y 20 kg/s, que implicaría la inyección de prácticamente el 100 % de las emisiones cada año.

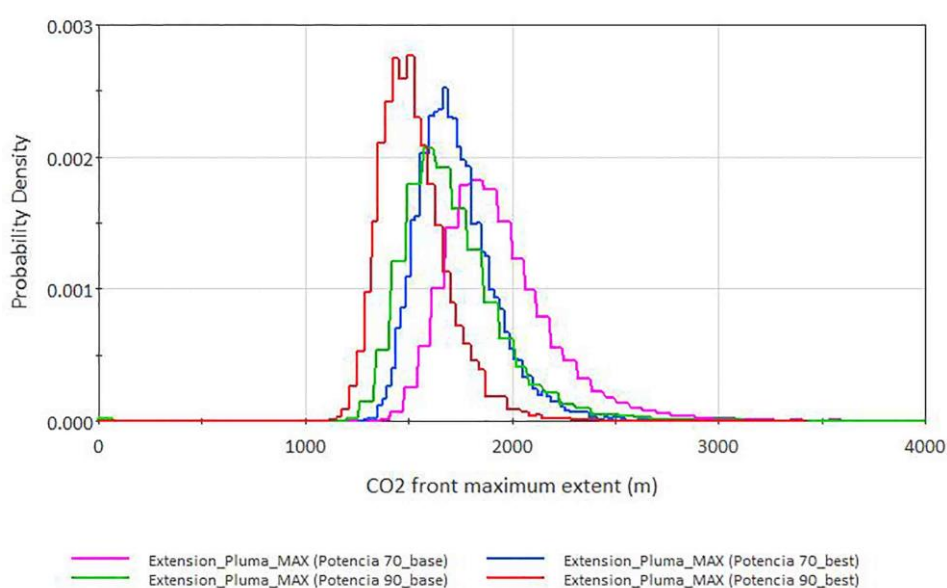


Figura 20. Alcance máximo del frente de pluma de CO₂, considerando una tasa de inyección de CO₂ de 11 kg/s, para: el caso base y una potencia de 70 m del nivel de inyección (línea rosa); caso base y potencia de 90 m (línea verde); mejor caso y potencia de 70 m (línea azul); y mejor caso y potencia de 90 m (línea roja).

Para estos casos, la aproximación de Nordbotten es siempre válida. En la Figura 20 se muestran los alcances máximos de la pluma de CO₂ cuando la tasa de inyección de CO₂ es de 11 kg/s. Dicha pluma puede variar su alcance en función del caso considerado (caso base o

mejor caso) y de la potencia del nivel de inyección (70 o 90 m). La máxima distancia alcanzada por la pluma de CO₂ puede superar los 3.000 m considerando el caso base y una potencia de 70 m del nivel de inyección, aunque la probabilidad asociada es muy baja.

4.1.2 SOBREPRESIONES INDUCIDAS

La tasa de inyección, unida a las características del emplazamiento, produce un amplio espectro de variaciones en los incrementos de presión. Esto está estrechamente relacionado con los riesgos asociados al comportamiento de la roca sello y de las posibles fallas existentes. El uso de modelos analíticos o semianalíticos permite obtener una primera aproximación de las sobrepresiones medias del reservorio y apoyar el análisis y la evaluación del riesgo de los posibles emplazamientos de almacenamiento de CO₂ [38-41].

Muchas de estas aproximaciones suponen que tanto los fluidos implicados en el almacenamiento como en la formación geológica son incompresibles. Como resultado, los cálculos de la distribución de presión requieren la especificación de un radio de influencia. Así, Zhou et al. (2008) desarrollaron un método aproximado semianalítico para estimar el aumento de presión utilizando la capacidad de almacenamiento en función de la compresibilidad de la formación [42]. En este trabajo se ha utilizado la aproximación de [43], la cual trata de un modelo analítico que depende de la viscosidad y densidad de los fluidos que intervienen en el proceso. En este caso, también se considera la presencia de pequeñas compresibilidades en los fluidos y en la roca, en lugar del radio de influencia utilizado en las aproximaciones anteriores. Además, en esta aproximación la presión vertical media de los fluidos varía con el logaritmo de la distancia al pozo en las regiones donde está presente una única fase, y linealmente en las regiones donde coexisten ambas fases. Se eligió este método analítico desarrollado por [43] en lugar de un método semianalítico porque, a pesar de su mayor precisión, la complejidad que introduce y la necesidad de una mayor cantidad de datos, hacen que la solución analítica sea la mejor opción en esta fase del análisis de riesgos del emplazamiento de Lopín.

Entre los métodos analíticos, el modelo Mathias [43] se considera el más preciso porque tiene en cuenta la compresión del fluido y de la formación en el sistema de la formación de almacenamiento. Estos factores pueden ser especialmente importantes a largo plazo. Si no se tuvieran en cuenta, pueden producirse errores significativos en los análisis de riesgos [39, 44]. El modelo supone que las fuerzas capilares son despreciables en toda la formación de almacenamiento, que el CO₂ y la salmuera están separados por una interfaz nítida situada a una altura “h” de la base de la formación, y que si sólo uno de los fluidos está presente, la saturación de ese fluido es igual a la unidad (es decir, totalmente saturado en él).

Este modelo también asume que tanto la permeabilidad relativa como la viscosidad son constantes en cada una de las zonas en que se divide la formación de almacenamiento, y que los fluidos y la formación porosa son ligeramente compresibles. Por último, no tiene en cuenta las variaciones de densidad con la profundidad dentro de la roca de la formación almacén, suponiendo además que la compresibilidad permanece constante en todo el reservorio.

Las sobrepresiones en cabeza de pozo son la primera perturbación a la que debe hacer frente el complejo de almacenamiento. Para que el CO₂ penetre en la formación de almacenamiento, es necesario generar una sobrepresión que supere la presión local alrededor del pozo inyector y desplace así la salmuera connata que satura el espacio poroso [45]. Bajo las condiciones impuestas de modelización y análisis, la zona próxima al pozo de inyección será la más impactada por la inyección de CO₂ [46]. Al igual que en el estudio de extensión de la pluma de CO₂, se consideraron varias opciones, tal y como se describió en la Tabla 8.

A partir de los datos de la Tabla 8 y la CARACTERÍSTICAS DEL COMPLEJO DE ALMACENAMIENTO, y con el modelo físico seleccionado, se han calculado las sobrepresiones asociadas a un proceso de inyección de CO₂ en el complejo de almacenamiento de Lopín. Dado que la tasa de inyección es un parámetro tecnológico clave para la ingeniería de inyección y para la toma de decisiones relativas a la seguridad adecuada del sellado del acuífero salino profundo, se han comparado los resultados para cuatro tasas de inyección que pueden cubrir un rango adecuado tanto para el caso piloto como para el industrial. Para la estimación de las sobrepresiones se ha introducido el modelo de Mathias [38, 43] en GoldSim® con el fin de obtener los valores correspondientes a los diferentes escenarios considerados.

4.1.2.1 RESULTADOS CASO PILOTO

Desde el punto de vista de la disipación del frente de presión en la formación de almacenamiento en función de la distancia al pozo de inyección (Figura 21), la disipación se da como una combinación de un proceso exponencial en la parte más cercana al pozo de inyección y un proceso lineal para valores de radio mayores (valores de sobrepresión significativamente menores). La disipación exponencial es, en sí misma, un elemento de seguridad del proceso.

Desde el punto de vista de las simulaciones probabilísticas, la Figura 22 muestra las funciones de densidad de probabilidad asociadas con el incremento máximo de presión esperado para los diferentes casos y tasas de inyección. Estos resultados muestran que el valor de la permeabilidad es un parámetro fundamental en las sobrepresiones alcanzadas, obteniéndose valores de sobrepresión media significativamente mayores en el caso base (menor valor de permeabilidad media) y siendo la dispersión también mucho mayor. Las mayores

sobrepresiones (ver Figura 22) y, por tanto, los mayores riesgos de fractura de la formación de sello, se localizan alrededor del pozo de inyección. Para el caso base, con una tasa de inyección de 0,63 kg/s y una potencia de 70 o 90 m del nivel de inyección, el incremento medio de presión es de 1-3 MPa, pudiéndose alcanzar los 20 MPa (200 bar). Para el mejor caso, con una tasa de 0,63 kg/s y una potencia de 70 o 90 m del nivel de inyección, el incremento medio de presión disminuye (0,5-1,5 MPa), pudiéndose alcanzar únicamente los 3,5-4,5 MPa (34-45 bar). Sin embargo, para el caso base, con una tasa de inyección de 5,0 kg/s y 70 o 90 m de potencia del nivel de inyección, el incremento medio de presión es de 20-65 MPa, pudiéndose superar los 100 MPa (1.000 bar). Para el mejor caso, con una tasa de 5,0 kg/s y una potencia de 70 o 90 m del nivel de inyección, el incremento medio de presión también disminuye (20-25 MPa), pudiéndose sobrepasar los 80 MPa (800 bar).

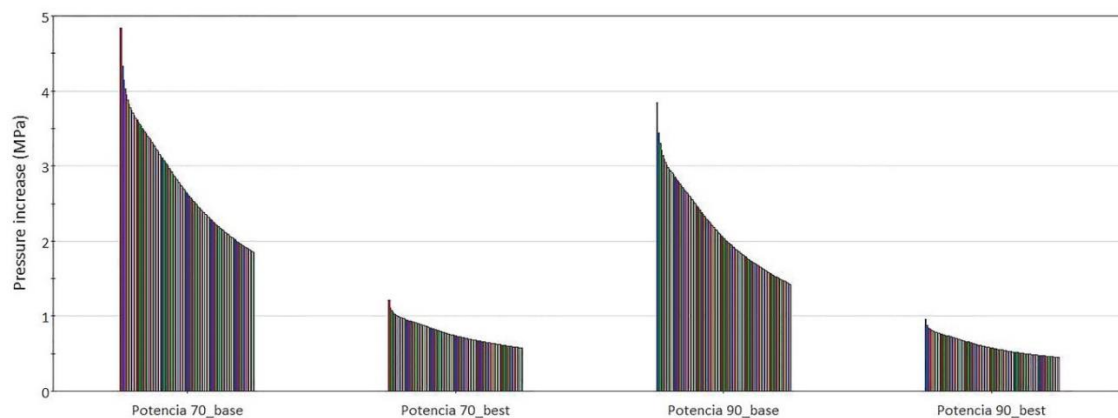


Figura 21. Distribución espacial de las sobrepresiones generadas durante la inyección de CO_2 en los distintos casos considerados, considerando una tasa de inyección de CO_2 de 0,63 kg/s.

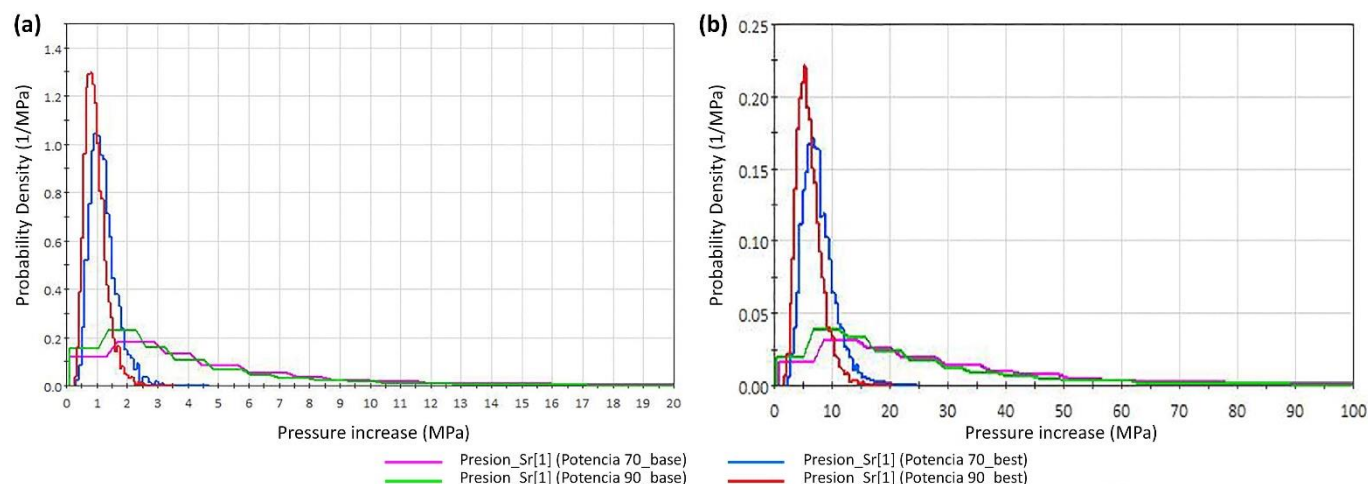


Figura 22. Función de densidad de probabilidad del incremento máximo de presión esperable en los distintos casos estudiados para una tasa de inyección de: (a) 0,63 kg/s; y (b) 5,0 kg/s.

Estos valores de presión externa sobre un acuífero ya naturalmente sobrepresionado, pueden dar lugar a un escenario de Fuga a través de la Formación Sello debido a fracturación de la roca de sello por pérdida de la integridad mecánica y podrían llevar a los escenarios de evolución indicados en la IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS.

Actualmente no hay información sobre las capacidades mecánicas del nivel de sello primario que permitan evaluar su resistencia ante estas presiones inducidas. En estos casos la presión de fractura de la formación sello puede aproximarse utilizando la siguiente expresión desarrollada por [46] (Eq. 5):

$$\text{Presión de Fractura (MPa)} = 0.8 \cdot [23(\text{MPa/km}) \cdot (\text{Profundidad(km)} + h(\text{km}))] \quad \text{Eq. 5}$$

Donde: 23 MPa/km es el gradiente de presiones supuesto; 0,8 es un coeficiente que se obtiene experimentalmente y está basado en la experiencia de expertos en campo; Profundidad (km) es la profundidad a la que se encuentra la parte superior de la formación de almacenamiento; y h(km) es el espesor de la formación de almacenamiento.

En caso de que la sobrepresión superara la resistencia mecánica del nivel de sello, se entraría en un escenario de fuga a través de la formación del sello.

4.1.2.2 RESULTADO CASO INDUSTRIAL

Las tasas de inyección anuales se seleccionaron en función de las emisiones de CO₂ de las industrias cercanas que pueden utilizar el emplazamiento de Lopín para el almacenamiento geológico del CO₂. Así, se eligieron dos tasas: 11 kg/s, que inyectarían aproximadamente el 50 % de las emisiones anuales, y 20 kg/s, que implicarían la inyección de prácticamente el 100 % de las emisiones. La duración de la inyección vendrá determinada por la capacidad máxima estimada del emplazamiento, que es de 13 Mt de CO₂.

La Figura 23 muestra las funciones de densidad de probabilidad de los aumentos máximos de presión para las dos tasas de inyección. En el caso industrial, la probabilidad de que la sobrepresión que se pueda alcanzar sea muy elevada (>100 MPa) no es despreciable para los estudios con la permeabilidad asociada al caso base. De lo anterior se desprende la necesidad de mejorar su caracterización para poder estimar las sobrepresiones con mayor precisión, reduciendo así las incertidumbres y, por tanto, los riesgos asociados a las mismas.

Al igual que sucedía para el caso piloto, la evolución espacial del frente de presión en la formación de almacenamiento en función de la distancia al pozo de inyección, para los distintos casos considerados, muestra que las mayores sobrepresiones y, por tanto, los mayores riesgos de fractura, se localizan alrededor del pozo de inyección. Dicha sobrepresión

también varía en función de la potencia de la formación almacén y de los valores de permeabilidad considerados.

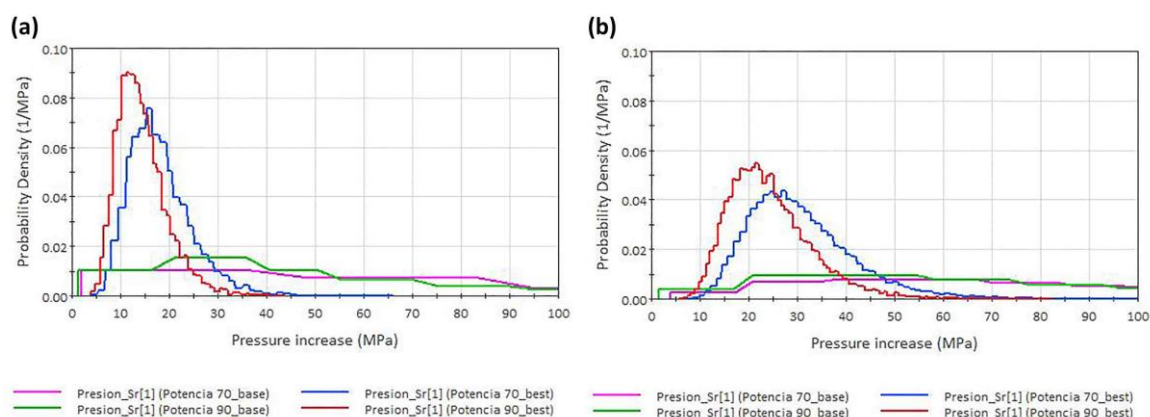


Figura 23. Función de densidad de probabilidad del incremento máximo de presión esperable en los distintos casos estudiados para tasas de inyección de: (a) 11 kg/s; y (b) 20 kg/s.

4.1.2.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La Figura 24 muestra el análisis de sensibilidad del aumento máximo de presión con los parámetros definidos por las funciones de distribución. Para la tasa de inyección, se consideró una función de distribución de probabilidad uniforme entre los valores de 0,4 kg/s y 5,0 kg/s para el caso piloto, y de 11 kg/s y 20 kg/s para el caso industrial. De los dos gráficos se puede concluir que, a medida que aumenta la tasa de inyección, la permeabilidad se convierte en el parámetro más relevante para los resultados de sobrepresión, por lo que mejorar su caracterización es esencial para pasar a escenarios de inyección industrial. Para la evaluación final del riesgo asociado a estas sobrepresiones, estos estudios deben complementarse con la introducción de la componente geomecánica, que aporta valores sobre el estado tensional de la cuenca y los límites del sistema.

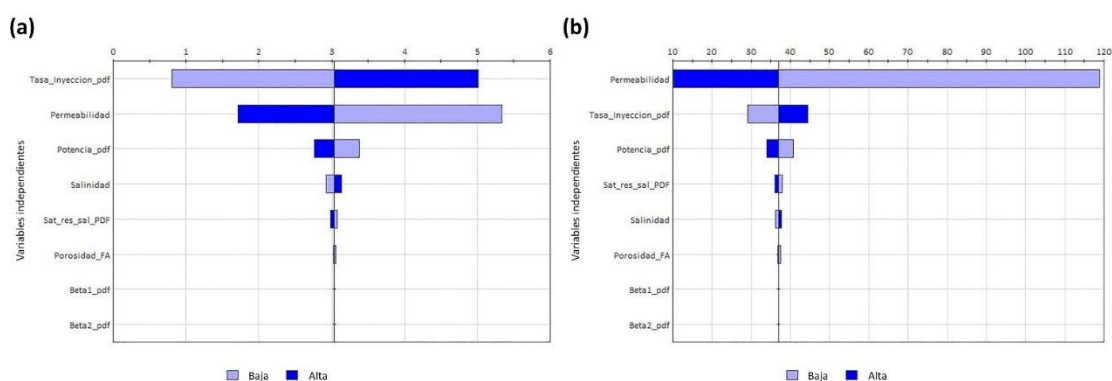


Figura 24. Resultados de los análisis de sensibilidad de los parámetros que influyen en el incremento de presión para el caso piloto (a), y el caso industrial (b).

Después de la permeabilidad y la tasa de inyección, el siguiente factor más importante para determinar la magnitud de las sobrepresiones es la potencia (H) de la formación de almacenamiento. La Figura 24 muestra que cuanto mayor es la potencia del reservorio, menores son las sobrepresiones generadas durante el periodo de inyección.

4.2 MODELO GLOBAL

El modelo global de evaluación de riesgos del complejo de almacenamiento geológico de CO₂ de Lopín se basa en redes bayesianas (*Bayesian Belief Network*, BBN por sus siglas en inglés) [47]. Dadas las indudables ventajas de esta herramienta para el análisis de sistemas complejos y la toma de decisiones, se ha aplicado al complejo de almacenamiento de Lopín al objeto de estimar su seguridad. Ello ha permitido expresar, en lenguaje probabilístico, las primeras aproximaciones que se han realizado para estimar la seguridad del emplazamiento y que provienen del método de Selección y Clasificación de Formaciones (SCF, por sus siglas en inglés) que, basado en el análisis de riesgos para la salud, la seguridad y el medio ambiente (HSE, por sus siglas en inglés), permite evaluar los riesgos derivados de posibles fugas de CO₂ en un posible emplazamiento de almacenamiento geológico de CO₂.

4.2.1 ESCENARIO DE EVOLUCIÓN NORMAL

Para aplicar las BBN y construir un modelo completo de evaluación de riesgos del sistema [48], fue necesario desglosarlo en los subsistemas que se describen a continuación, con descripciones específicas del emplazamiento de Lopín en la IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS:

- El subsistema de almacenamiento, que abarca la formación de almacenamiento y la formación sello.
- El subsistema de la Geosfera Superior, que comprende los acuíferos y acuitardos situados por encima del reservorio y por debajo del subsistema de la biosfera.
- Un subsistema Biosfera, donde se produce la interacción de las posibles fugas de CO₂ del almacenamiento con las aguas potables, subterráneas y superficiales, con la biota y los ecosistemas, y donde se materializan los riesgos. Este subsistema además incluye los pozos y sondeos que llegan a estos niveles, sus sellos y tuberías de revestimiento.

El modelo de riesgo global evaluará exhaustivamente la eficacia del almacenamiento de CO₂ en el emplazamiento de Lopín, para lo cual se tendrá en cuenta:

- Las características geológicas, hidrogeológicas y geofísicas del emplazamiento y la zona circundante, incluidas las estructuras regionales significativas.
- Los patrones de flujo hidrogeológico a escala de cuenca, las propiedades de flujo y transporte del CO₂ y los gradientes de presión, la temperatura y la concentración de las fases móviles (CO₂, agua y salmuera).

En Lopín, el área de evaluación de riesgos debe cubrir un área alrededor del punto de inyección tal que la extensión lateral supere significativamente el área de migración de CO₂ a lo largo de 10.000 años y también el área perturbada por el campo de presiones debido a la inyección de CO₂. El radio inicial del campo próximo a considerar podría estimarse a partir del volumen total de CO₂ a inyectar (100.000 t de CO₂ en el caso piloto debido a la limitación de la Directiva 2009/31/CE) y de las aproximaciones para la extensión de la pluma de CO₂ y la evolución del campo de presiones esbozadas anteriormente.

Las componentes geológicas del modelo del sistema se refieren a la determinación y cuantificación de los mecanismos de atrapamiento, la identificación de las posibles vías de fuga de CO₂ y la definición de sus propiedades de transporte, y se definirán combinando unidades estratigráficas de la columna litológica para definir unidades hidrogeológicas o unidades de flujo dentro del radio de evaluación.

El paso inicial en la evaluación de la seguridad a largo plazo de Lopín se inició durante el proceso de selección de emplazamientos utilizando el método SCF mencionado anteriormente. La metodología está adaptada a emplazamientos con datos disponibles limitados y se basa fundamentalmente en datos generales basados en bibliografía y en la opinión de expertos, en función del nivel de caracterización de los emplazamientos.

Para avanzar en la evaluación del riesgo del emplazamiento seleccionado en la fase anterior mediante la metodología SCF, se ha aplicado una metodología basada en redes bayesianas (Figura 25), la cual facilita la transición de los modelos cualitativos iniciales a los modelos cuantitativos finales, atravesando etapas intermedias de combinaciones de ambos tipos de estimaciones de probabilidad.

El modelo de red bayesiana está específicamente concebido para estimar la probabilidad de fuga del sistema desde las fases iniciales de un proyecto, en las que pueden faltar muchos datos. Para superar este desafío, el modelo complementa la información cuantitativa disponible con información cualitativa, a menudo procedente de juicios de expertos (EJ), para evaluar las condiciones iniciales y proporcionar respuestas óptimas. Esta fase inicial de evaluación de riesgos avanzará en una transición gradual, supeditada al avance de los estudios de caracterización y la generación de modelos, a lo largo de toda la vida del proyecto hacia

estimaciones más cuantitativas, lo que conlleva una sustitución gradual de las estimaciones cualitativas por modelos físicos, químicos y/o matemáticos.

Figura 25. Ejemplo de red bayesiana aplicada a Lopín.

4.2.1.1.1 Fuga a través de la formación sello

En el escenario de evolución normal, la fuga a través de la formación del sello primario estará vinculada a la generación de sobrepresiones inducidas por la presión de inyección, y los mecanismos por los que se produciría la pérdida de integridad de la formación sello podrían ser:

- Fractura de la roca sello o pérdida de su integridad mecánica por sobrepresión.
- Sobrepresión local de la roca sello alrededor del pozo de inyección debido a la presión de inyección.
- Sobrepresión del emplazamiento (escala regional).

Tal y como se indicó anteriormente (sección 2.2.1), los valores de presión hidráulica en la Fm Buntsandstein [12] indican que dicha formación está sobrepresionada. Esta situación debería considerarse como una condición de riesgo potencial de exceder la resistencia mecánica de la Formación Rané (en la Facies Röt), que forma parte del sello primario, dada la baja permeabilidad estimada a partir de los datos disponibles en el punto de inyección en la Unidad

Aranda, Fm Buntsandstein B1. Además, la posible discontinuidad sinsedimentaria de la Formación Rané en la facies Röt y su moderado espesor (< 50 m) subrayan la necesidad de considerar el comportamiento del sello primario como componente del complejo de almacenamiento tanto en su estado inalterado como considerando que puede producirse una pérdida de su integridad, estableciéndose dos variantes el escenario de evolución normal. Para estimar *a priori* la posibilidad de fallo del sello debido a la sobrepresión se evaluará el efecto combinado de la presión de inyección, potenciado por la sobrepresión en el Buntsandstein B1, y los valores de permeabilidad en el punto de inyección [49].

La probabilidad de fractura de la roca como consecuencia del aumento de presión por la inyección de CO₂, requiere la utilización de una función de probabilidad que relacione el aumento de presión con la probabilidad de rotura. En ausencia de datos específicos sobre las condiciones de la roca sello, será necesario suponer una relación lineal entre el aumento de presión y la probabilidad de rotura.

Se supone una función de probabilidad dada por la Eq. 6:

$$\mathcal{P}_r[\text{rupture}] = k \cdot \Delta P \quad \text{Eq. 6}$$

Donde: $\mathcal{P}_r[\text{rupture}]$ es la probabilidad de rotura; ΔP es el aumento de presión; k es una constante que determina la sensibilidad de la probabilidad de rotura al aumento de presión.

El valor de " k " puede variar ampliamente en función de numerosos factores, como el tipo de roca, su composición, las condiciones geológicas y los mecanismos específicos que intervienen en el proceso de rotura. Su determinación suele implicar datos empíricos, experimentos de laboratorio y, posiblemente, la elaboración de modelos teóricos.

En general, los valores " k " relativamente pequeños indican que los aumentos limitados de presión sólo tienen un impacto menor en la probabilidad de rotura. Sin embargo, el rango real de valores " k " puede variar significativamente en función del contexto y de las características específicas del complejo de almacenamiento de CO₂. Resulta por tanto esencial consultar bibliografía, estudios o a expertos en la materia para determinar los valores típicos o esperados de " k " para cada aplicación específica o contexto geológico concreto. Además, los datos empíricos y los estudios de modelización específicos del emplazamiento o del tipo de roca pueden aportar información valiosa sobre el intervalo adecuado de valores de " k ".

En el caso concreto objeto de estudio, la determinación de un valor " k " específico para rocas no muy competentes implicaría tener en cuenta diversos factores, como las propiedades geológicas de la roca, las condiciones de tensión dentro de la roca y su respuesta a los cambios de presión. Para las rocas poco competentes, que son relativamente débiles y propensas a fracturarse, los valores " k " pueden ser de moderados a altos en comparación con

los tipos de roca más competentes. A continuación, se exponen algunas consideraciones que pueden influir en la elección de un valor " k " para rocas poco competentes:

- Propiedades geológicas: la composición, porosidad, permeabilidad y distribución granulométrica de la roca pueden influir tanto en su respuesta a los cambios de presión como en su propensión a la rotura.
- Condiciones de tensión: las condiciones de tensión existentes en la roca, incluyendo la magnitud y la orientación de las tensiones, pueden afectar a la forma en que responde a la presión adicional por la inyección de CO_2 .
- Mecánica de la fractura: la presencia de fracturas preexistentes, juntas o planos de estratificación dentro de la roca, puede influir significativamente en su susceptibilidad a la rotura bajo un aumento de presión.
- Datos experimentales: los datos empíricos procedentes de experimentos de laboratorio o de observaciones sobre el terreno del comportamiento de las rocas bajo presión pueden aportar información valiosa sobre la relación entre los aumentos de presión y la probabilidad de rotura.
- Modelización y simulación: la modelización numérica y los estudios de simulación pueden ayudar a comprender el comportamiento de rocas poco competentes en condiciones de presión variables y pueden proporcionar estimaciones de los valores " k ".

Teniendo en cuenta estas consideraciones, es evidente que crear una función de probabilidad de los valores " k " para rocas poco competentes implica tener en cuenta la variabilidad y la incertidumbre inherentes a las propiedades geológicas y los comportamientos.

En la Figura 26 se puede visualizar la función de densidad de la función de entrada de aumento de presión en el caso base y su relación con las funciones de probabilidad de rotura para diferentes valores de " k ". Se selecciona el mínimo, el máximo y la moda (valor más probable) de la distribución de valores " k ". A continuación, se calcula y se traza las probabilidades de rotura para cada uno de estos valores " k " seleccionados.

El uso de funciones que representan la probabilidad de fallo de la roca sello con el aumento de la presión puede acoplarse a la red bayesiana que representa el riesgo del sistema. Utilizando este enfoque metodológico, se puede obtener el aumento del riesgo de fractura de la roca sello debido al aumento de presión por la inyección de CO_2 . Los resultados obtenidos indican que no es realista considerar que la sobrepresión del emplazamiento calculada para el caso

piloto pueda afectar al sellado regional, dado el volumen y la tasa de inyección de CO₂ que se prevé: 100.000 toneladas en 5 años.

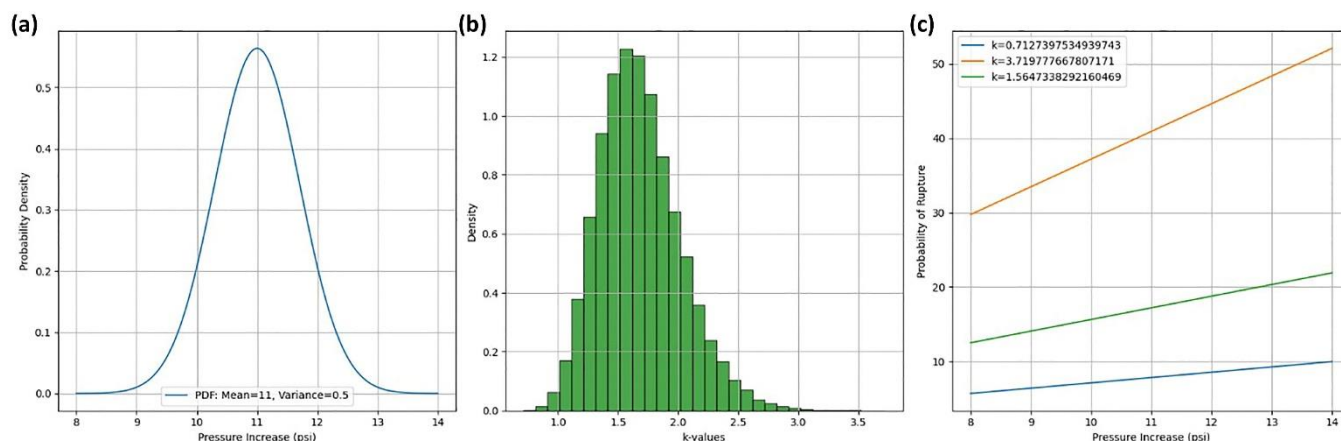


Figura 26. (a) Función de densidad de probabilidad del aumento de presión en el caso base; (b) función de densidad de probabilidad del valor “k”; y (c) probabilidad de rotura para los valores mínimo, máximo y moda de “k”.

4.2.1.1.2 Fuga a través de los pozos existentes

Los pozos profundos cercanos o dentro del complejo de almacenamiento tienen la capacidad para actuar como vía de escape y constituir elementos de riesgo para la seguridad, a largo plazo, del almacenamiento geológico de CO₂. Respecto a la consideración de la fuga a través de alguno de los pozos profundos existentes en la zona en el escenario de evolución normal para estimar su probabilidad se ha tenido en cuenta que el pozo de inyección, que se proyecta en la confluencia de las líneas sísmicas ZA-3 y ZA-3 PROL [9-10], está a unos 10 km al noroeste del pozo Lopín-1, que sería el más cercano. El resto de los pozos que podrían considerarse como elementos de riesgo potencial de fuga del CO₂ están situados a más de 20 km al noreste o sureste del pozo de inyección, no existiendo conocimiento de pozos al oeste del área de interés, salvo el del pozo Zuera-1 situado a más de 48 km al NW [10].

El pozo Lopín-1, que penetra en la formación Buntsandstein hasta una profundidad aproximada de 32 m, es el más cercano y podría ser el principal elemento de riesgo en el escenario de evolución normal. Durante la fase de inyección los resultados de las modelizaciones muestran que la extensión de la pluma de CO₂ tanto para el caso piloto como para el industrial no se extiende lo suficiente como para interactuar con el pozo Lopín-1. Para evaluar el riesgo de que la pluma lo alcance durante la fase de post-inyección, sería necesario conocer en detalle el flujo subsuperficial en la formación Buntsandstein para evaluar dicha potencial conexión. Los estudios disponibles descartan la presencia de flujos hidráulicos en la formación almacén que pudiesen interaccionar con la pluma de CO₂ una vez finalizada la

inyección. Por lo tanto, la probabilidad del escenario de riesgo a través de los pozos existentes puede considerarse despreciable y, por tanto, no introduce ningún riesgo adicional en el escenario de evolución normal.

4.2.2 ESCENARIO DE FUGA A TRAVÉS DE FALLAS

Dado el sistema de fallas presente dentro del complejo de almacenamiento de CO₂ de Lopín, unas fallas normales con orientación NW-SE, y un sistema de fallas inversas, situado al W-SW de las líneas sísmicas ZA-3 y ZA-7 [8, 10] que no afloran en superficie pero que atraviesan el sello regional del Keuper, se ha considerado necesario analizar en más detalle el escenario de fuga a través de fallas. El escenario de fuga por falla se originaría bien en la rotura del nivel del sello primario (Fm Buntsandstein B2 más la facies Röt) por la sobrepresión generada por la inyección en un Buntsandstein B1 de muy baja permeabilidad; o bien en la migración del CO₂ desde el nivel B1-B2 por las fallas normales que delimitan el horst donde se realizaría la inyección. En este escenario podrían entrar en juego las fallas inversas al SW del punto de inyección [8, 10] si la pluma de CO₂ superara el nivel M2 y se expandiese en el nivel M3 hasta alcanzar la falla inversa, donde podría migrar por los planos de falla hasta el contacto Jurásico (Cretácico) – Terciario, que finaliza a unos 300 m de la superficie topográfica.

Dentro del emplazamiento de Lopín, el escenario de fuga a través de fallas cobra sentido en función del volumen de CO₂ inyectado. Para volúmenes de inyección superiores a un cierto valor que habrá que dimensionar mediante la modelización de la evolución de la pluma (eventualmente, el volumen que admita el nivel de inyección Buntsandstein B1), la probabilidad de que el CO₂ rebase este nivel y ascienda por las fallas normales que delimitan el horst, supere el nivel Buntsandstein B2 más la facies Röt (formación de sello primario) y la Fm Muschelkalk M1 (potencial almacén secundario), aumenta con el volumen de CO₂ inyectado.

En el nivel M1, el CO₂ estaría sujeto a una migración lateral, impulsada, a su vez, por la diferencia de presiones entre la zona de fuga en la formación B1 y la presión en la formación receptora M1 y, de existir, por el flujo hidráulico en el acuífero M1. No se dispone de información acerca de tal flujo hidráulico, si bien, debido a la disposición general de la cuenca, la mayor probabilidad es que tuviera componente SE, en sentido contrario a la presunta ubicación de las fallas inversas anteriormente citadas, que atravesarían el sello regional del Keuper.

4.2.2.1 INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL DEL SISTEMA DE FALLAS ENLOPÍN

Los dos tipos de fallas que estructuran el complejo de almacenamiento y que podrían intersectar o puentear los niveles de sello, tanto el local como el regional en Facies Keuper, son:

- Fallas normales con dirección NW-SE y alto buzamiento ($> 60^\circ$) que delimitan los bloques horst y graben, afectando a las formaciones Buntsandstein B1 (almacén principal), al Buntsandstein B2 más la Fm Rané en facies Röt (sello primario), y la formación Muschelkalk M1 (posible almacén secundario), potencialmente puentear la formación de sello primario. Son fallas potencialmente permeables por su génesis tensional asociada a la distensión mesozoica y estarían fosilizadas por el Muschelkalk M2 (facies evaporítica y sello local).

El recorrido de las fallas varía entre unas pocas decenas de metros y unos 200 m, excepto la penúltima falla en el extremo norte del perfil ZA-07 que presenta un recorrido de unos 500 m. La distancia entre ellas suele rondar los 2 km y no supera los 2,5 km en dirección NE-SW [8]. La posible afectación al nivel Muschelkalk M2 (sello local), no queda establecida claramente en los estudios disponibles.

Si las fallas normales que delimitan el horst atravesaran también el sello local M2 (hipótesis conservadora desde el punto de vista de la evaluación de riesgos), el CO₂ alcanzaría el Muschelkalk M3, un posible nivel almacén secundario, donde sufriría una migración lateral, impulsada por la diferencia de presiones entre la zona de fuga en la formación B1 y la presión en la formación receptora M3 y el flujo subterráneo en el acuífero M3. Se desconocen los detalles del mismo, aunque la mayor probabilidad es que el flujo tuviera componente SE. Esta evolución constituiría una variante del Escenario de Evolución Normal con sello en el Keuper.

Estas fallas normales fueron objeto de un reajuego posterior durante los esfuerzos compresivos de la orogenia alpina, lo que podría modificar la consideración inicial como fallas permeables. El comportamiento hidrogeológico de este sistema de fallas normales reajugado posteriormente, podría requerir un análisis individualizado de cada una de las fallas próximas al punto de inyección.

- Fallas inversas que afectan a los depósitos mesozoicos suprayacentes a la facies evaporítica del Muschelkalk M2 (sello local). Serían fallas potencialmente impermeables o de baja permeabilidad al tener su origen en los esfuerzos compresivos de la orogenia alpina, y afectarían a los depósitos mesozoicos suprayacentes a la facies evaporítica del Muschelkalk M2 (sello local). Están bien representadas en los

perfiles sísmicos ZA-3 y ZA-3 PROL [10] y también en los perfiles sísmicos ZA-7 y ZA-7 PROL [8]. Atraviesan el sello regional en facies Keuper, lo que les conferiría un rol importante en el Escenario de Fuga por Falla de darse las condiciones anteriormente señaladas.

Estas fallas quedan fosilizadas por los materiales neógenos del recubrimiento del Terciario, en discordancia erosiva, a unos 300 m desde la superficie, lo que podría disminuir su implicación en el riesgo potencial de fuga directa a la superficie.

Los cortes geológicos levantados por las líneas sísmicas próximas al nuevo emplazamiento permiten visualizar la estructura y la disposición de las fallas, normales e inversas, que potencialmente definen el escenario de fuga a través de falla.

La parte SW de los perfiles sísmicos ZA-7 y ZA-3 se caracteriza por fallas inversas que afectan los depósitos mesozoicos suprayacentes y también a la facies evaporítica M2. Estas fallas inversas se nuclean en los puntos más altos de la falla normal anterior, apareciendo como parejas de fallas inversas con vergencia opuesta y un anticlinal asociado [9-10].

El primer sistema de fracturas inversas aparece al SW del actual sondeo Lopín-1, a unos 6 km de distancia del mismo, desapareciendo al E del sondeo de Lopín-1 [10]. Estas estructuras están orientadas NW-SE y NE-SW [2, 50-52], alineadas paralelas a los frentes de deformación ibérico y catalán, respectivamente [10].

4.2.2.2 DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO

Para volúmenes de inyección superiores a un valor que habría que determinar teniendo en cuenta las capacidades de los niveles Buntsandstein B1 y B2, y de los almacenes secundarios Muschelkalk M1 y Muschelkalk M3, existe la posibilidad de una migración lateral del CO₂ por las dolomías de la Fm Muschelkalk M3 hacia el contacto con las fallas inversas anteriormente citadas que atraviesan el sello regional en facies Keuper. En todo caso, se establecería una competencia entre el flujo lateral de CO₂ controlado por el transporte advectivo del agua subterránea hacia el SE en M3 y la flotabilidad del CO₂, ya al margen del efecto de la presión de inyección, por el plano de la falla inversa, en dirección ascendente.

Este sería el marco del escenario de fuga a través de falla, ya que estas fallas quedan fosilizadas a sólo 300 m de la superficie por materiales del recubrimiento del Terciario que se comportan hidrogeológicamente como un acuitardo.

La fuga de CO₂ en este sistema de fracturas respondería a tres procesos:

1. migración ascensional a lo largo del plano de la falla normal que delimita el horst desde la formación almacén B1, puenteando el sello primario B2 + Röt, o por rotura del sello primario por sobrepresión durante la inyección, hasta el nivel M2,
2. migración lateral en los niveles M2 (sello secundario) y M3 (almacén secundario), y
3. flujo mitigado hacia la superficie por el plano de las fallas inversas que se inician a techo del nivel M1 y atraviesan los niveles M2, M3 y Keuper (sello regional).

El nivel de caracterización de las fallas que se asumen en el emplazamiento de Lopín no permite entrar en disquisiciones acerca del potencial comportamiento hidrodinámico de las mismas en relación al eventual transporte de CO₂, por lo que limitaremos este análisis a su potencial comportamiento como “permeables” o “impermeables” basado en su origen tectónico, siguiendo la nomenclatura y los trabajos de [53-54].

Lo más destacable sería la potencial participación de las fallas inversas si se alcanzara la base de las mismas, al SW del punto de inyección.

Para dilucidar esta posibilidad, es necesario, en primer lugar, modelizar la migración del CO₂ para distintos volúmenes y tasas de inyección.

4.2.2.2.1 Fuga a través de fallas normales

El escenario alternativo de fuga a través de falla, si se consideran solo las fracturas que delimitan el horst, podría ser una extensión del escenario de evolución normal en el que dichas fallas normales atraviesan el nivel M1 y parcialmente el sello local Muschelkalk M2.

Si el CO₂ alcanzara también el Muschelkalk M3, superando el nivel almacén secundario M2, y el volumen de la inyección de CO₂ fuera tal que permitiera que se saturara el Muschelkalk M3, por migración lateral y eventualmente contra el flujo subterráneo en este último, podría alcanzar el contacto con las fallas inversas situadas en el extremo NW del perfil por las líneas símicas ZA-7 y ZA-7 PROL. Éste sería el escenario de fuga a través de fallas s.s.

En el nivel M3, el CO₂ acumulado se desplazaría en sentido horizontal ya que el sello en facies Keuper dificultaría su ascensión vertical. Esta última formación no es homogénea y, de hecho, se compone de tres niveles, cada uno de ellos con un comportamiento hidrogeológico diferente: i) una unidad evaporítica inferior (K-1), formada por halita con intercalaciones lutíticas y anhidriticas; ii) una unidad lutítica intermedia (K-2); y iii) una unidad evaporítica superior (K-3), constituida por anhidrita [3, 55].

4.2.2.2.2 Fuga a través de fallas inversas

Estas fallas representarían la componente primordial de un potencial escenario de fuga por fallas en el emplazamiento de Lopín en la medida en que solo a través de ellas es posible que el CO₂ inyectado alcance el acuífero jurásico y el acuífero multicapa del Cenozoico, con comportamiento global de acuitardo, pero conectado hidráulicamente con el acuífero somero de la cuenca del Ebro.

Lo más significativo de este tipo de fallas para el emplazamiento de Lopín, es que atraviesan el sello regional, en facies Keuper y podrían comprometer la estanqueidad a largo plazo del complejo de almacenamiento. El cortejo de fallas inversas que evidencian las líneas sísmicas ZA-3 y ZA-3_PROL y que se representan con un espaciado de unos 5 km o menos, adquieren un mayor interés en relación al punto de inyección, situado a unos 6.000 m de dichas líneas sísmicas. Las fallas inversas que podrían ser de interés en la evaluación de seguridad del emplazamiento en Lopín para el proyecto PilotStrategy, serían las dos situadas en la prolongación hacia el SW de la línea sísmica ZA-3, una con buzamiento al NE y la otra con buzamiento al SW [8, 10].

Si tomáramos la pauta de distribución para el horst de inyección la del actual sondeo Lopín-1 (Perfil sísmico ZA-7), las presuntas fallas inversas conectarían, virtualmente en un mismo punto, con la formación M3 a unos 6 km del punto de inyección, actuando, eventualmente, como conductos de baja permeabilidad hasta el límite superior de sus planos de falla, a 300 m de la superficie, fosilizadas por los materiales del Cretácico Inferior y cenozoicos [10]. Es una distancia considerable para una inyección piloto de tan solo 100.000 t de CO₂ y podría no tenerse en cuenta en esta evaluación preliminar del riesgo, pero no así para una inyección de tipo industrial, superior a 1 M de toneladas.

Como, en rigor, no es factible trasladar la disposición del entorno del sondeo Lopín-1 a la del proyectado sondeo de inyección, habrá que estudiarla con detenimiento en una posible evaluación definitiva de la seguridad a largo plazo y siempre que la inyección excediera del nivel de piloto (100.000 t de CO₂).

No obstante, la importancia de estas fallas en el análisis del riesgo de fuga de CO₂ a la superficie queda notablemente reducida al estar fosilizadas por materiales neógenos en discordancia erosiva, a unos 300 m desde la superficie.

4.2.2.3 MODELIZACIÓN DEL ESCENARIO DE FUGA A TRAVÉS DE FALLAS INVERSAS

El volumen de CO₂ que podría fugar a través de las fracturas normales que delimitan el horst del complejo de almacenamiento dependerá del grado de permeabilidad de las mismas. Una

vez el CO₂ ascienda por el plano de la falla sufrirá procesos de migración lateral en los niveles atravesados (M2 y M3) en función de las características de las distintas capas, principalmente de su permeabilidad, y de las diferencias de presión con la zona de fuga (Figura 27).

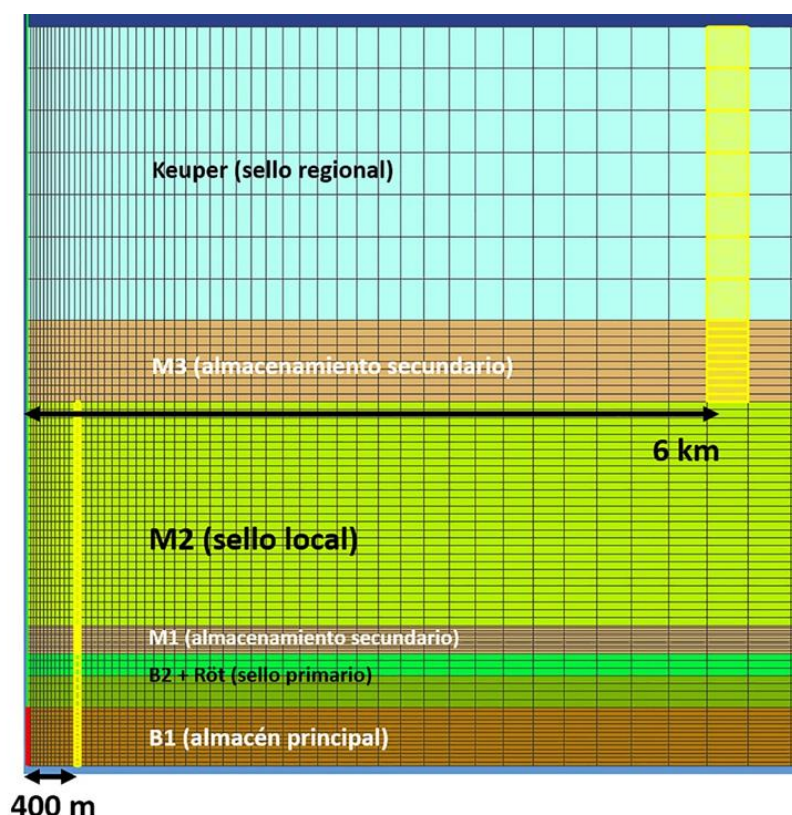


Figura 27. Localización, con respecto al pozo de inyección, de la falla normal más próxima (≈ 400 m) y de las fallas inversas (≈ 6 km).

Dado el nivel de caracterización actual del complejo de almacenamiento se desconoce el grado de permeabilidad de dichas fallas inversas. Si la falla se comportara como impermeable o semipermeable, siguiendo la nomenclatura y los trabajos de [13, 53-54], y fuera del tipo *declined*, la falla podría actuar como un sello estructural adicional para la migración y captura de CO₂. Al redirigir el movimiento de la pluma (desde la pendiente ascendente a lo largo de la falla), la falla también hace que el CO₂ se acumule hasta el punto final de saturación de fase a lo largo de la falla. Esto maximizaría la captura por saturación residual [13]. Si la falla impermeable o semipermeable fuera del tipo *inclined* la migración del CO₂ acumulado en el nivel M2, inicialmente, y en M3, con posterioridad, ascendería por el plano de falla al cabo de cierto tiempo, del orden de los cientos de años [13].

Por el contrario, si la falla es una falla permeable, ésta se convierte en una vía de migración del CO₂ hacia el límite superior del complejo de almacenamiento (falla *inclined*) o aumenta la

anchura de la pluma del CO₂ (falla *declined*). En este último caso, la columna de CO₂ atraviesa un área mayor, lo que mejoraría la eficiencia de captura de saturación residual [13].

Al encontrar la falla, la columna de CO₂ tendría dos tipos de comportamiento: a lo largo de la falla y a través de ella. La migración principal es paralela al plano de estratificación ya que la anisotropía y el buzamiento del mismo determinan el flujo preferencial de la fase CO₂. La migración de CO₂ hacia arriba a lo largo de la falla conductora crea una fuente virtual, desde la cual el CO₂ migra hacia estratos más permeables. Esto aumenta el área de contacto de la columna de CO₂ con los niveles permeables, lo que da como resultado una mayor captura de saturación residual [13].

En el caso que nos ocupa, son, probablemente, fallas de baja permeabilidad, aunque presumiblemente, no totalmente impermeables, de tipo *declined* e *inclined* ya que tienen vergencias opuestas, y el flujo se canalizaría preferentemente por la más permeable.

En ambos supuestos, una falla de tipo *inclined* o *declined* la presión en la parte inferior de esa falla antes de la inyección de CO₂ sería de unos 17 MPa y en la parte superior, donde quedan fosilizadas por materiales neógenos, a unos 300 m desde la superficie, la presión sería de 3 MPa (30 atm). Teniendo en cuenta que el desnivel que salva el plano de falla son unos 1.300 m, el gradiente sería de 14 MPa/1.300 m, algo por encima de la presión hidrostática, diferencia que se va disipando hacia la superficie.

De las propiedades petrofísicas de una falla, la más relevante en la evaluación de la migración de CO₂ es la permeabilidad. También la apertura de la falla es esencial para determinar su funcionamiento bien como una estructura conductora, bien como un sello. Ambas propiedades (así como su distribución a lo largo del plano de falla) son desconocidas y, probablemente, no puedan determinarse en el proyecto PilotStrategy.

Como se ha apuntado anteriormente, para el escenario de evolución normal se ha descrito la evolución temporal de la pluma del CO₂ inyectado distinguiendo dos casos en función del volumen de CO₂ a inyectar y de su tasa de inyección: i) caso piloto; y ii) caso industrial o comercial.

En el caso piloto de inyección, donde se está limitado a 100.000 T, la pluma de CO₂ no llega a alcanzar las fallas normales, por lo que no hay ningún riesgo asociado a este escenario. Para el caso industrial, tal y como ya se ha indicado, las tasas anuales de inyección se han seleccionado teniendo en cuenta las emisiones de CO₂ que producen las empresas cercanas al emplazamiento y que eventualmente pudieran utilizarlo como almacenamiento geológico de CO₂. La capacidad máxima estimada del complejo de almacenamiento es de 13 Mt CO₂. Se eligieron inicialmente dos tasas: 11 kg/s, que permitiría inyectar aproximadamente el 50 % de

las emisiones anuales, y 20 kg/s, que implicaría la inyección del 100 % de las emisiones en un año, aunque esta última se descartó por superar las sobrepresiones inducidas la presión de ruptura del *caprock*. La inyección se haría, al igual que en el caso piloto, a lo largo del mismo nivel Buntsandstein B1. Se ha llevado a cabo un estudio previo del posible alcance de la pluma de CO₂ en el nivel M3, que es el que conecta con las fallas inversas que atraviesan el Keuper. En función de los resultados obtenidos se puede estimar la probabilidad del escenario y la necesidad de realizar estudios más detallados. Estas simulaciones se han realizado con el software TOUGH2 a través de la interfaz gráfica PetraSim® y, para ello, se han utilizado los mismos parámetros que para las simulaciones del caso de evolución normal.

Teniendo en cuenta ambas tasas de inyección, y dada la incertidumbre en relación con la finalización de las fallas normales dentro del nivel M2, se han modelizado las fallas normales como conductos permeables que van desde la base de la formación de inyección B1 hasta la base de la Fm Muschelkalk M3. Por lo tanto, se ha considerado que: i) la falla normal se ubica a una distancia de 400 m; ii) la potencia del nivel de inyección B1 es de 70 m; y iii) la falla normal se ha considerado abierta o semiabierta, según los valores de permeabilidad y porosidad propuestos por [56], para contemplar así las incertidumbres inherentes a las limitaciones de la ausencia de caracterización en campo. De este modo, se ha considerado que: i) en el caso de la falla normal abierta, los valores de permeabilidad y porosidad son de 10^{-12} m^2 y 50 %, respectivamente; y ii) en el caso de la falla normal semiabierta, los valores de permeabilidad y porosidad son de 10^{-14} m^2 y 20 %, respectivamente. El objetivo de estas simulaciones es estudiar si la extensión de la pluma de CO₂ alcanza las fallas inversas, situadas a más de 6 km del punto de inyección. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

La mayor distancia alcanzada por la pluma de CO₂, así como el mayor grado de saturación del gas, han sido obtenidos en el caso de que la falla normal se considere abierta. En este supuesto, la pluma de CO₂ ascendería preferentemente por el plano de falla superando los niveles del Buntsandstein B2, la Fm Rané en facies Röt, el Muschelkalk M1 y el Muschelkalk M2, hasta alcanzar el contacto Muschelkalk M3/Keuper con un grado de saturación de hasta el 66 %; siendo el alcance de la misma de 2.356 m (Figura 28).

Consecuentemente, dado que la distancia a las fallas inversas desde el punto de fuga es muy superior a las longitudes de la pluma de CO₂ en el contacto M3/Keuper, el escenario no supondría, por tanto, riesgo alguno al medioambiente al no llegar la fuga de CO₂ a la superficie.

En los casos analizados anteriormente, se puede afirmar que el CO₂ inyectado no alcanzaría el contacto Jurásico – Cenozoico ni el acuífero somero de la Cuenca del Ebro, no representando, por tanto, riesgo medioambiental.

Respecto a las sobrepresiones, la mayor sobrepresión generada por la inyección de CO₂ a la tasa de 11 kg/s ha sido obtenida en el caso de que la falla normal se considere semiabierta, dada su menor permeabilidad. En este caso, se superaría los $3,42 \cdot 10^7$ Pa (34,2 MPa, 342 bar) en el sello primario (Buntsandstein B2 + facies Röt), lo que podría comprometer su integridad mecánica. En el contacto M3/Keuper, las sobrepresiones inducidas por la inyección sobrepasan los $2,12 \cdot 10^7$ Pa (21,2 MPa, 212 bar).

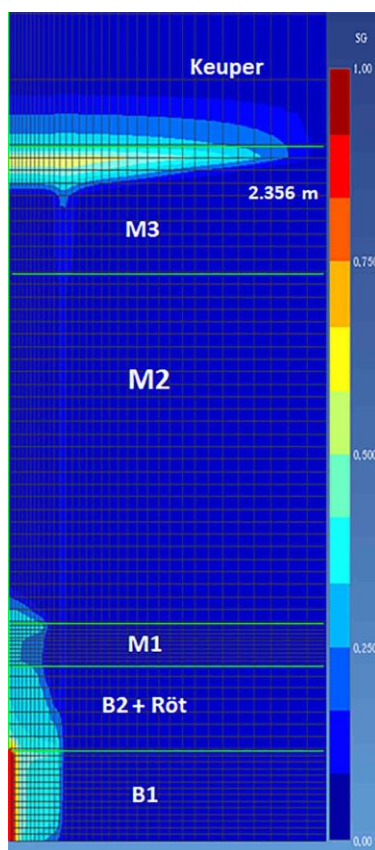


Figura 28. Extensión de la pluma de CO₂ considerando, para el mejor caso, la falla normal abierta, una tasa de inyección de 11 kg/s y una potencia del nivel de inyección de 70 m.

De las anteriores simulaciones se desprende la necesidad de mejorar la caracterización geomecánica del sello primario para poder estimar el riesgo de ruptura debido a las sobrepresiones con mayor precisión, reduciendo así las incertidumbres y, por tanto, pudiendo fijar de manera más precisa las tasas límite de inyección.

5 CONCLUSIONES

Este estudio se centra en el análisis y evaluación de riesgos asociados al almacenamiento geológico de CO₂ en el emplazamiento de Lopín, ubicado en la cuenca del Ebro, considerando dos escenarios principales: uno piloto limitado según la normativa vigente a una inyección de 100.000 toneladas de CO₂, y otro de tipo industrial, con una inyección definida por la capacidad estimada del emplazamiento. La evaluación de riesgos se ha realizado mediante simulaciones Monte-Carlo y modelos basados en redes bayesianas, considerando diferentes conjuntos de parámetros y tasas de inyección. La evaluación de riesgos ha permitido determinar los factores críticos para garantizar la seguridad a largo plazo del almacenamiento de CO₂ y las incertidumbres que deben abordarse en futuras investigaciones.

Del análisis y evaluación de los riesgos del emplazamiento se obtiene que en el escenario piloto las condiciones de seguridad cumplen con los requisitos de la Directiva 2009/31/CE. No obstante, el estudio sugiere la necesidad de ampliar la caracterización geomecánica del emplazamiento para optimizar la estimación de las tasas de inyección en un posible escenario industrial. En éste, las tasas de inyección más elevadas, especialmente en condiciones de permeabilidad desfavorables, aumentan significativamente la probabilidad de alcanzar valores no admisibles de sobrepresión (>100 MPa). Los estudios realizados establecen que a medida que la tasa de inyección aumenta, la permeabilidad se convierte cada vez más en el factor más determinante en la evolución de las sobrepresiones, principalmente ligado al nivel de incertidumbre que introduce. Por ellos se recomienda mejorar la caracterización de la permeabilidad y realizar un análisis geomecánico más exhaustivo, que incorpore el estado de tensión actual de la cuenca y los límites estructurales del sistema.

Además, aunque los pozos profundos existentes se encuentran alejados del punto de inyección, los estudios también reflejan la necesidad de realizar un análisis detallado de los flujos hidrogeológicos regionales, particularmente en las formaciones Buntsandstein y Muschelkalk, para evaluar su posible interacción con la pluma de CO₂, sobre todo en la fase de post-inyección.

Adicionalmente también resulta necesaria una caracterización más profunda de las fallas normales que limitan el área de almacenamiento. Determinar el comportamiento de estas fallas respecto al flujo de CO₂ (selladas, semipermeables o permeables) es esencial para poder tomar decisiones dentro del marco de la conexión existente entre los riesgos de la formación almacén y la estimación de la capacidad de almacenamiento óptima.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Quirantes J, 1978. Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de Los Monegros. Institución Fernando El Católico (C.S.I.C.), Diputación Provincial de Zaragoza, 200 pp.
- [2] Arlegui L, Simón JL, 2001. Geometry and distribution of regional joint sets in a non-homogeneous stress field: case study in the Ebro basin (Spain). *J. Struct. Geol.* 23:297–313.
- [3] Jurado MJ, 1990. El Triásico y Liásico basal evaporíticos del subsuelo de la cuenca del Ebro. En: Ortí, F., Salvany, J.M. (Eds.), *Formaciones evaporíticas de la Cuenca del Ebro y cadenas periféricas y de la zona de Levante*. Enresa, pp. 21-28.
- [4] Gomez JJ, Goy A, Barrón E, 2007. Events around the Triassic-Jurassic boundary in northern and eastern Spain. A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 244:89-110, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.06.025>
- [5] Soto R, Larrasoaña JC, Arlegui LE, Beamud E, Oliva-Urcia B, Simón JL, 2009. Reliability of magnetic fabric of weakly deformed mudrocks as a palaeostress indicator in compressive settings. *Journal of Structural Geology* 31(5):512-522.
- [6] Soto R, Larrasoaña JC, Beamud E, Garcés M, 2016. Early-Middle Miocene subtle compressional deformation in the Ebro foreland basin (northern Spain); insights from magnetic fabrics. *Comptes Rendus Geoscience* 348:213-223.
- [7] Arche A, López-Gómez J, Marzo M, Vargas H, 2004. The siliciclastic Permian-Triassic deposits in Central and northeastern Iberian Peninsula (Iberian, Ebro and Catalan basins): a proposal for correlation. *Geologica Acta* 2(4):305-320.
- [8] Ayala C, Benjumea B, Mediato JF, García-Crespo J, Clariana P, Soto R, Rubio F, Rey-Moral C, Pueyo EL, Martín-León J, García AG, Fernández-Canteli P, Martínez-Orio R, 2023. Developing a new innovative methodology to integrate geophysical techniques into characterization of potential CO₂ storage sites: Lopín structure (southern Ebro Basin, Spain). *Geological Society, London, Special Publications*, 528, 227-243. <https://doi.org/10.1144/SP528-2022-70>
- [9] Wilkinson M, 2023. Deliverable 2.7 – Conceptual Geological Models of the Portugal, Spain and France. PilotSTRATEGY projet, Grant Agreement No. 101022664.

- [10] Moreno I, García J, Mediato JF, Fernández-Canteli P, Benjumea B, Rubio F, Ayala C, García DM, Martínez J, Rey C, Clariana P, del Moral B, Berrezueta ER, Ordóñez B, Fernández de Arévalo E, Soto R, López J, García A, Llorente JM, Castillo M, Pueyo E, 2023. Deliverable 2.7 Geological Models - ANNEXES: EBRO BASIN SPAIN. PilotSTRATEGY project, Grant Agreement: 101022664.
- [11] Li Y, LeBoeuf EJ, Basu PK, Mahadevan S, 2005. Stochastic modeling of the permeability of randomly generated porous media. *Advances in Water Resources* 28(8):835-844.
- [12] Mathurin F, Carneiro J, López-Gutiérrez J, Matos C, Moreno I, 2023. WP2 - Deliverable 2.11. Report on the regional hydrogeology of the three study areas: Paris Basin (France), Lusitanian Basin (Portugal) and Ebro Basin (Spain). EU H2020 PilotSTRATEGY project 101022664, 155 pp.
- [13] Chang KW, Bryant SL, 2008. The effect of faults on dynamics of CO₂ plumes. Presented at the 9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-9), Washington, D.C., November 16-20, 2008.
- [14] Lanaja JM, 1987. Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España. IGME, 465 pp.
- [15] IGME-DGA, 2009. Memoria de la actividad 2: apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. Demarcación Hidrográfica del Ebro. 2009. Proyecto: encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Servicio de Información Documental del IGME. Código 63809. http://info.igme.es/SidPDF/139000/918/139918_0000031.pdf
- [16] IGME-DGA, 2010. Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Actividad 4: Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descargas por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico Demarcación Hidrográfica del EBRO. Servicio de Información Documental del IGME. Código 64040. http://info.igme.es/SidPDF/148000/21/148021_0000002.pdf
- [17] INE, 2023. Instituto Nacional de Estadística. Cifras oficiales de población de los municipios españoles en aplicación de la Ley de Bases del Régimen Local (Art. 17). Municipio de Quinto.
- [18] Proyecto PilotSTRATEGY. <https://pilotstrategy.eu/>

- [19] Savage D, Maul PR, Benbow S, Walke RC, 2004. A generic FEP database for the assessment of long-term performance and safety of the geological storage of CO₂. Quintessa Report QRS -1060A-1, 73 pp.
- [20] Duguid A, Glier J, Heinrichs M, Hawkins J, Peterson R, Mishra S, 2021. Practical leakage risk assessment for CO₂ assisted enhanced oil recovery and geologic storage in Ohio's depleted oil fields. *Int J Greenh Gas Control* 109:103338.
- [21] Vilarrasa V, Bolster D, Olivella S, Carrera J, 2010. Coupled hydromechanical modelling of CO₂ sequestration in deep saline aquifers. *Int J Greenh Gas Control* 4:910-919.
- [22] Yamamoto S, Miyoshi S, Sato S, Suzuki K, 2013. Study on geomechanical stability of the aquifer-caprock system during CO₂ sequestration by coupled hydromechanical modelling. *Energy Procedia* 37:3989-3996.
- [23] Rinaldi AP, Jeanne P, Rutqvist J, Cappa F, Guglielmi Y, 2014. Effects of fault-zone architecture on earthquake magnitude and gas leakage related to CO₂ injection in a multi-layered sedimentary system. *Greenhouse Gases: Science and Technology* 4:99–120.
- [24] RISCS, 2010. Research into impacts and safety in CO₂ storage (RISCS). A guide to potential impacts of leakage from CO₂ storage, 70 pp.
- [25] Awag M, Mackay E, Ghanbari S, 2023. The impact of background water flow on the early migration of a CO₂ plume in a tilted aquifer during the post-injection period. *Advances in Geo-Energy Research* 9:125-135.
- [26] Field BD, Bachub S, Basava-Reddi, Bunch MA, Funnell R, Holloway S, Richardson R, 2013. Interaction of CO₂ with subsurface resources. *Energy Procedia* 37:7741-7746.
- [27] Tillner E, Kempka T, Nakaten B, Kühn M, 2013. Brine migration through fault zones: 3D numerical simulations for a prospective CO₂ storage site in Northeast Germany. *Int J Greenh Gas Control* 19:689-703.
- [28] Oldenburg CM, Rinaldi AP, 2011. Buoyancy effects on upward brine displacement caused by CO₂ Injection. *Transp Porous Med* 87:525-540.
- [29] Torsæter M, Cerasi P, 2018. Geological and geomechanical factors impacting loss of near-well permeability during CO₂ injection. *Int J Greenh Gas Control* 76:193-199.

- [30] Bachu S, Bonijoly D, Bradshaw J, Burruss R, Holloway S, Christensen NP, Mathiassen OM, 2007. CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps. *Int J Greenh Gas Control* 1: 430-443.
- [31] Hurtado A, Eguilior S, Rodrigo-Naharro J, Ma L, Recreo F, 2021. Risk Assessment and Mitigation Tools. In: de Dios, JC, Mishra, S, Poletto, F, Ramos, A (eds) CO₂ Injection in the Network of Carbonate Fractures. *Petroleum Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62986-1_7
- [32] Kivi IR, Makhnenko RY, Oldenburg CM, Rutqvist J, Vilarrasa V, 2022. Multi-layered systems for permanent geologic storage of CO₂ at the gigatonne scale. *Geophysical Research Letters* 49, e2022GL100443. <https://doi.org/10.1029/2022GL100443>
- [33] Hesse MA, Tchelepi HA, Orr Jr FM, 2006. Scaling analysis of the migration of CO₂ in saline aquifers. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (SPE 102796)*, San Antonio, Texas, USA, 2006.
- [34] Nordbotten JM, Celia MA, 2006. Analysis of plume extent using analytical solutions for CO₂ storage. In *Proceedings of the XVI International Conference on Computational Methods in Water Resources*, ed. P.J. Binning, P. Engesgaard, H. Dahle, G. Pinder, and W. Gray. Copenhagen, Denmark, June 2006.
- [35] Houseworth JE, 2012. Matched Boundary Extrapolation Solutions for CO₂ Well-Injection into a Saline Aquifer. *Transp Porous Med* 91, 813-831. <https://doi.org/10.1007/s11242-011-9874-y>
- [36] Nordbotten JM, Celia MA, 2006. Similarity solutions for fluid injection in confined aquifers. *Journal of Fluid Mechanics* 561:307-327. doi:10.1017/S0022112006000802
- [37] Kumar N, 2008. CO₂ sequestration: understanding the plume dynamics and estimating risk. Thesis Degree of Master of Science in Engineering, The University of Texas at Austin, May 2008.
- [38] Mathias SA, Hardisty PE, Trudell M, Zimmerman R, 2008. Pressure buildup during CO₂ injection in brine aquifers using the Forchheimer equation. *Virtual Conference on Climate Change and CO₂ Storage*. London: Imperial College London and Second Nature
- [39] Vilarrasa, V, 2012. Thermo-Hydro-Mechanical Impacts of Carbon Dioxide (CO₂) Injection in Deep Saline Aquifers. *Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona*. Thesis. Available in: <http://hdl.handle.net/10803/96669>

- [40] Wu H, Bai B, Li X, Gao S, Liu M, Wang, L, 2016. An explicit integral solution for pressure build-up during CO₂ injection into infinite saline aquifers. *Greenhouse Gas: Science and Technology* 6(5):633-647. <https://doi.org/10.1002/ghg.1601>
- [41] Wu H, Bai B, Li X, 2018. An advanced analytical solution for pressure build-up during CO₂ injection into infinite saline aquifers: The role of compressibility. *Advances in Water Resources* 112:95-105. <https://doi.org/10.1016/j.adwatres.2017.12.010>
- [42] Zhou Q, Birkholzaer JT, Tsang CF, Rutqvist J, 2008. A method for quick assessment of CO₂ storage capacity in closed and semi-closed saline formations. *Int. J. Greenhouse Gas Control* 2(4):626-639.
- [43] Mathias SA, Hardisty P, Trudell M, Zimmerman R, 2009. Approximate Solutions for Pressure buildup during CO₂ injection in brine aquifers. *Transport in Porous Media* 79:265-284. <https://doi.org/10.1007/s11242-008-9316-7>
- [44] Vilarrasa V, Carrera J, Bolster D, Dentz M, 2013. Semianalytical Solution for Plume Shape and Pressure Evolution During Injection in Deep Saline Formations. *Transp Porous Med* 97(1):43-65. <https://doi.org/10.1007/s11242-012-0109-7>
- [45] Valle Falcones LM, 2015. Caracterización de parámetros petrofísicos relacionados con la capacidad de almacenamiento de CO₂ en el acuífero salino profundo de Hontomín (Burgos). Tesis Doctoral, E.T.S.I. de Minas y Energía (UPM). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.38071>
- [46] Callas C, Saltzer SD, Davis JS, Hashemi SS, Kovscek AR, Okoroafor ER, Wen G, Zoback MD, Benson SM, 2022. Criteria and workflow for selecting depleted hydrocarbon reservoirs for carbon storage. *Applied Energy* 324, 119668. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119668>
- [47] Heckerman D, 1997. Bayesian Networks for Data Mining. *Data Mining and Knowledge Discovery* 1:79-119. <https://doi.org/10.1023/A:1009730122752>
- [48] Hurtado A, Eguilior S, Recreo F, 2014. Methodological development of a probabilistic model for CO₂ geological storage safety assessment. *Int J Energy Environ Eng* 5:84. <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0084-6>
- [49] Hurtado A, Recreo F, Eguilior S, 2015. Metodología de evaluación de riesgos y su aplicación a un almacenamiento geológico de CO₂. Editorial, Ciemat. ISBN: 978-84-7834-746-9. DLCD/33733

- [50] Butillé M, Ferrer O, Granado P, Roca E, Muñoz JA, Ballesteros JC, Gimenez A, Vallejo RA, González P, 2012. Evidencias de deformaciones salinas en las sucesiones mesozoicas del sector sur de la Cuenca del Ebro. *Geotemas* 13:492-495.
- [51] Mediato JF, García-Crespo J, Izquierdo E, García-Lobón JL, Ayala C, Pueyo EL, Molinero R, 2017. Three-dimensional reconstruction of the Caspe geological structure (Spain) for evaluation as a potential CO₂ storage site. *Energy Procedia* 114:4486–4493.
- [52] Izquierdo-Llavall E, Ayala C, Pueyo EL, Casas-Sainz AM, Oliva-Urcia B, Rubio F, Rodríguez-Pintó A, Rey-Moral C, Mediato JF, García-Crespo J, 2019. Basement-cover relationships and their along-strike changes in the Linking Zone (Iberian Range, Spain): a combined structural and gravimetric study. *Tectonics* 38:2934-2960. <https://doi.org/10.1029/2018TC005422>
- [53] Chang KW, 2007. A simulation study of injected CO₂ migration in the faulted reservoir. Thesis. University of Texas at Austin May 2007.
- [54] Chang KW, Minkoff SE, Bryant SL, 2008. Modeling Leakage through Faults of CO₂ Stored in an Aquifer. SPE 115929, SPE ATCE, Denver, CO, 2008.
- [55] Jurado MJ, 1989. El Triásico del subsuelo de la Cuenca del Ebro, Tesis Doctoral Universidad de Barcelona, 259 pp.
- [56] Ban S, Liu H, Mao H, Shi X, Qiu X, Liu M, Min Z, Song Y, Wei X, 2023. Numerical Tracking of Natural Gas Migration in Underground Gas Storage with Multilayered Sandstone and Fault-Bearing Caprocks. *Energies* 16:4936. <https://doi.org/10.3390/en16134936>

