



Potencial de España para implementar CDR a gran escala

Informe

Marzo de 2026

A collaboration between

carbon



globalfactor 

Acerca de las evaluaciones de preparación para la eliminación de carbono

Muchos gobiernos ya se han comprometido con el objetivo de cero emisiones netas. Además, el IPCC prevé que se necesitarán cientos de miles de millones de toneladas de CDR para estabilizar las temperaturas globales muy por debajo de los 2 °C. Sin embargo, pocos gobiernos, si es que hay alguno, cuentan actualmente con un plan sólido para desarrollar y desplegar la eliminación de dióxido de carbono atmosférico (en adelante CDR, por sus siglas en inglés) con la capacidad necesaria para contrarrestar las emisiones restantes en el punto de cero emisiones netas. La mayoría de las previsiones de la CDR son a escala mundial, por lo que no sirven para informar la planificación y el diseño de políticas de la CDR a nivel nacional. Se carece de datos para determinar lo que es factible a nivel de cada país.

Inspiradas en las evaluaciones de preparación para las energías renovables publicadas por la Agencia Internacional de Energías Renovables, nuestras evaluaciones de preparación para la eliminación de carbono (en adelante CRRA, por sus siglas en inglés) pretenden llenar este vacío de información para ayudar a los responsables políticos nacionales a complementar sus estrategias climáticas con objetivos de la CDR ambiciosos pero realistas. El objetivo de las CRRA es estimar el potencial de implementación de la CDR a nivel nacional y elaborar hojas de ruta específicas para cada país con las partes interesadas locales, con el fin de ayudar a los responsables de la toma de decisiones a comprender las oportunidades y las medidas necesarias para aprovecharlas.

Agradecimientos

Este informe ha sido elaborado por Global Factor con el apoyo de Carbon Gap, utilizando la metodología y los materiales de CRRA de Carbon Gap.

Los autores desean expresar su especial agradecimiento a las partes interesadas que fueron entrevistadas como parte de

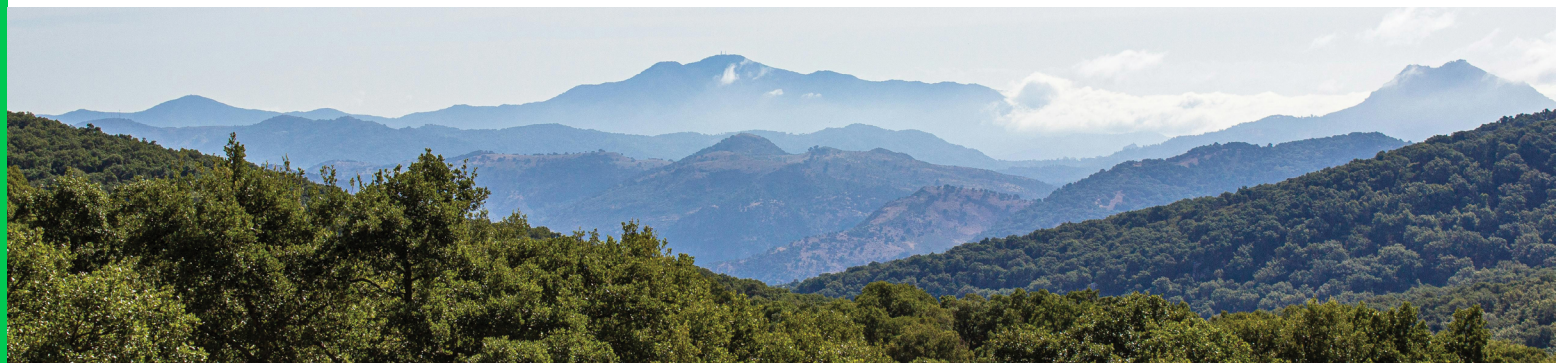
la elaboración de este informe de referencia sobre la CDR en España. Los autores también desean dar las gracias a los numerosos expertos que generosamente proporcionaron datos y conocimientos, así como los revisores externos, entre los que se encuentran Liam Adam Bullock (IGME-CSIC) y la profesora Asunción Cámara Obregón (Universidad de Oviedo), por sus valiosas aportaciones y a la Fundación Grantham por hacer posible este proyecto.

Aviso legal

Este documento presenta una estimación cuantificada del potencial de España para el despliegue de métodos de CDR. Dado que la mayoría de los métodos evaluados en este informe se encuentran aún en fases iniciales de desarrollo, la evaluación incluye importantes incertidumbres: algunos métodos pueden no resultar viables, mientras que otros que se excluyen en este informe pueden desarrollarse más rápido de lo esperado.

Dado que la CDR es todavía un tema relativamente nuevo, no siempre se dispone de datos precisos y fiables procedentes de fuentes oficiales. Entre las principales carencias figuran la cartografía detallada del almacenamiento geológico, la integración de los recursos terrestres y marinos y la evaluación regional de los beneficios colaterales y las compensaciones. En el caso de métodos como la mejora de la alcalinidad del océano o la mineralización a gran escala, la falta de datos de campo impide realizar estimaciones sólidas. Las incertidumbres en el suministro de biomasa, la dinámica del carbono del suelo y la estabilidad de los sumideros de los ecosistemas limitan aún más la precisión. Además, la ausencia de marcos armonizados de seguimiento y notificación reduce la comparabilidad y la pertinencia de las políticas. En consecuencia, el análisis de este informe incluye hipótesis formuladas por el equipo del proyecto para estimar el potencial de despliegue. Estas se exponen de forma transparente a lo largo del texto.

Global Factor y Carbon Gap no se hacen responsables del uso de este informe y su contenido, incluidas las acciones o decisiones tomadas como resultado de dicho uso.



Resumen ejecutivo

En su Sexto Informe de Evaluación (AR6, 2022), el IPCC estimó que para alcanzar y mantener el objetivo de cero emisiones netas y cumplir así los objetivos climáticos del Acuerdo de París, sería necesario eliminar de la atmósfera entre 5 y 10 gigatoneladas de CO₂ cada año hasta 2050. Desde entonces, los nuevos retrasos en la reducción de las emisiones han contribuido a agotar el presupuesto de carbono restante más rápido de lo previsto. Como resultado, el mundo pronto entrará en un exceso, lo que reforzará la necesidad de una eliminación de dióxido de carbono (CDR) a gran escala.

Europa, junto con otros grandes emisores históricos y economías desarrolladas, tiene un papel especial que desempeñar en la ampliación de la CDR, combinando la responsabilidad y la capacidad para hacerlo. En este contexto, España se perfila como un caso especial, ya que se considera que es el país con mayor potencial de CDR de Europa. Sin embargo, España también se encuentra entre los países menos avanzados en el desarrollo de proyectos de CDR y en la aplicación de una combinación de políticas adecuada.

Este informe ofrece una primera visión cuantificada del potencial de España para desplegar la CDR con el fin de apoyar al país en su rápido avance hacia una estrategia de CDR ambiciosa pero responsable. Basándose en un análisis ascendente de los recursos disponibles en España, este estudio estima el potencial teórico y realista para implementar diversos métodos de CDR hasta 2050. Reconociendo que el despliegue de la CDR no es únicamente un reto técnico, el informe también analiza la «geografía social» en torno a la CDR, recabando las perspectivas de las partes interesadas, incluidas las del público a través de un debate ciudadano.

La evaluación sigue seis pasos clave:

1. Identificación y selección de métodos CDR relevantes;
2. Cartografía de los recursos disponibles para la CDR, incluyendo la electricidad renovable, el calor residual, la biomasa, la tierra, el agua y la capacidad de almacenamiento geológico, entre otros;
3. Estimación del potencial teórico máximo de CDR.
4. Evaluación del panorama normativo, económico y político de España.
5. Análisis de las actitudes sociales hacia el despliegue de la CDR en España, basado en entrevistas con las partes interesadas y un panel de ciudadanos.
6. Estimación del potencial realista de la CDR para 2050 basada en tres escenarios.

Principales resultados sobre el potencial de CDR en España

El informe revisa una serie de métodos de CDR —agrupados en gestión de ecosistemas, conversión de biomasa, enfoques geoquímicos y sintéticos— y evalúa su potencial teórico y realista respectivo basándose en los recursos disponibles en España. Esta evaluación exhaustiva conduce a un **potencial teórico máximo de CDR de ~196 Mt de CO₂ al año para 2050**, suponiendo que todos los recursos físicos y naturales disponibles se dedicaran íntegramente a fines de CDR, tras descontar los usos prioritarios descritos en la sección 4.1. Tal nivel de movilización de recursos no sería alcanzable en condiciones reales, pero proporciona un punto de referencia para comprender la capacidad técnica de España para eliminar carbono. El potencial teórico está dominado por los métodos basados en los ecosistemas, en particular la forestación/reforestación (~50,24 Mt CO₂) y la mejora de la gestión forestal (~31 Mt CO₂), que en conjunto representan más de la mitad del total.

Para evaluar **la capacidad realista** de España **para el despliegue de CDR**, se desarrollaron tres escenarios: conservador, de referencia y ambicioso (Figura 1). Los tres escenarios difieren principalmente en el ritmo de desarrollo tecnológico, la disponibilidad de energía renovable y el grado de apoyo institucional y aceptación social.

El **escenario conservador** supone una lenta adopción tecnológica y un apoyo financiero y político limitado. El despliegue sigue restringido a iniciativas voluntarias, reforestación y producción de biochar, limitado por la escasa financiación, la baja concienciación social y la ausencia de infraestructuras de almacenamiento de CO₂ a gran escala. El escenario conservador alcanza casi **17 Mt de CO₂ al año** para 2050, un nivel insuficiente para cumplir el objetivo de neutralidad en carbono de España, incluso con el sumidero natural previsto de 9 MtCO₂/año.

El **escenario de referencia** asume incentivos políticos moderados y mejoras graduales en la gestión del suelo y la disponibilidad de energías renovables, lo que permite la integración parcial de instalaciones BECCS y DACCS vinculadas a los clústeres industriales existentes, aunque sigue viéndose obstaculizado por la incertidumbre normativa y la competencia por el suelo y la biomasa. El escenario de referencia logra una eliminación de **~52 Mt de CO₂ al año** para 2050. Esto cerraría la brecha de emisiones residuales de España para 2050 de 29 Mt de CO₂ identificada en la Estrategia de descarbonización a largo plazo¹, que también prevé que los sumideros naturales absorban 37 MtCO₂e^a para esa fecha, logrando así emisiones netas negativas.

a. Dado que las proyecciones oficiales no distinguen entre la CDR deliberada y la absorción natural, este estudio estimó la superficie disponible para los métodos de CDR considerados, calculó su potencial de absorción y lo restó de los 37 MtCO₂ para determinar el sumidero «natural» restante.

El **escenario ambicioso** prevé un fuerte compromiso político, una inversión pública temprana en redes de transporte y almacenamiento de CO₂, mecanismos de certificación claros en el marco del próximo Marco de Certificación de Eliminación de Carbono de la UE y una amplia aceptación social. En este contexto, el despliegue de la CDR alcanza una escala significativa, con una eliminación de casi **69 Mt de CO₂** al año para 2050, lo que permitiría a España alcanzar un nivel neto negativo en gran medida.

En todos los escenarios, los métodos de gestión de ecosistemas representan más del 70 % de la capacidad de eliminación realista de España a mediados de siglo, lo que los convierte en los mayores contribuyentes al potencial global de CDR. Además de los métodos de CDR, se ha incluido la absorción de sumideros naturales para tener en cuenta las absorciones que, aunque no son adicionales, también contribuirían a los objetivos de emisiones netas cero. Los valores obtenidos para los sumideros naturales provienen de estimaciones de absorción por ecosistemas naturales, excluyendo la CDR.

Los factores limitantes más recurrentes para el despliegue de la CDR son la escasez de almacenamiento geológico caracterizado, la gobernanza fragmentada, la limitada estandarización de las metodologías de monitoreo, reporte y verificación y los elevados costes operativos de los métodos sintéticos, todos los cuales deben abordarse para permitir la escalabilidad a largo plazo.

La **calculadora CARE** de Carbon Gap indica que, dependiendo de los escenarios (que reflejan las negociaciones dentro y fuera de la UE), **España debería aspirar a una capacidad de CDR de entre 137 y más de 350 MtCO₂ /año a mediados de siglo**. Por lo tanto, es esencial comprender qué parte de esa capacidad se puede alcanzar.

Conclusiones clave

1. El potencial realista de la CDR en España demuestra que esta tecnología podría contribuir de manera significativa a los objetivos climáticos del país. Para 2050, tanto el escenario de referencia como el ambicioso revelan volúmenes de CDR que podrían permitir alcanzar el objetivo de cero emisiones netas dentro de las emisiones residuales previstas estimadas por el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) y podrían permitir a España alcanzar un saldo negativo.

2. La capacidad de almacenamiento geológico es el cuello de botella crítico para el DACCS y el BECCS en España. Los sitios de almacenamiento siguen estando poco caracterizados y no existe una infraestructura dedicada al transporte de CO₂. Sin una política industrial acelerada y a gran escala para ampliar y alinear el almacenamiento y el transporte con el potencial de captura, el despliegue seguirá estando limitado. La competencia con los proyectos de CCS, tanto en capacidad como en infraestructura, reduce aún más la disponibilidad, lo que socava la eliminación

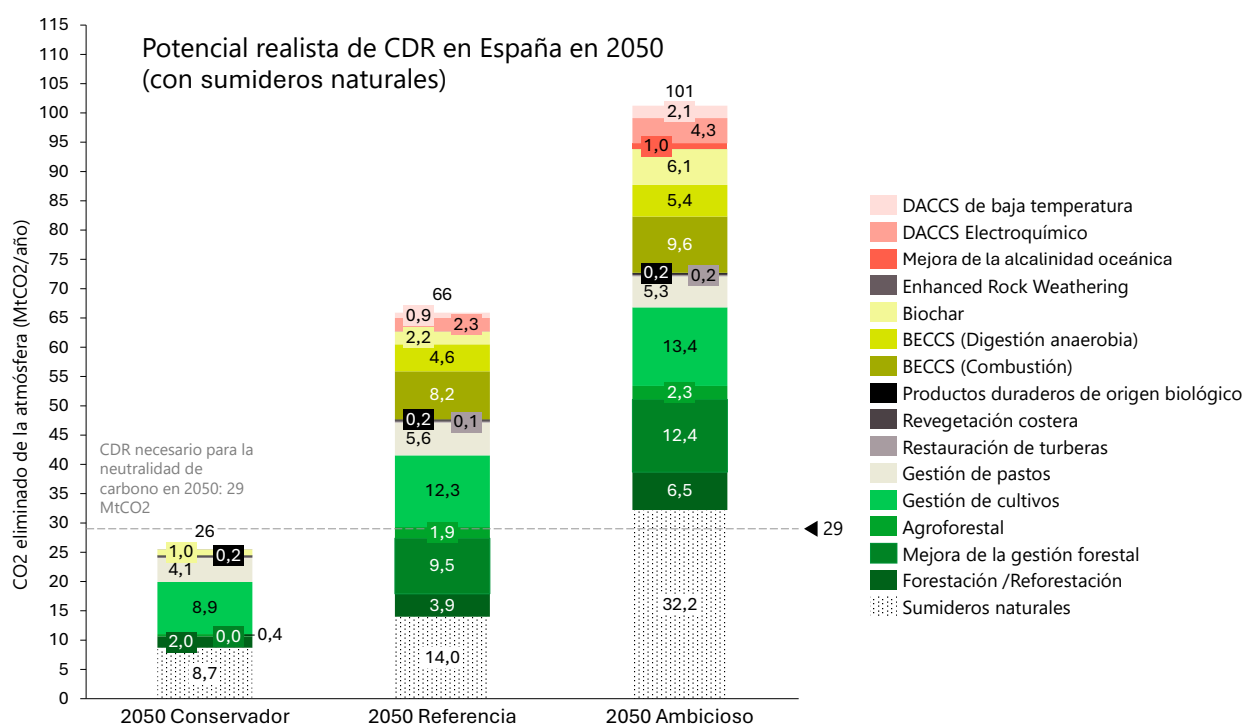


Figura 1. Potencial realista de CDR de España en los escenarios conservador, de referencia y ambicioso en 2050.

segura y escalable del carbono.

3. La ausencia de marcos normativos y de gobernanza nacionales sobre la CDR ralentiza el desarrollo de una estrategia coherente en materia de CDR y el desarrollo de infraestructuras de almacenamiento de CO₂. Esta falta de claridad retrasa las decisiones de inversión y complica los procesos de concesión de permisos, lo que supone un obstáculo importante para el avance de la eliminación de carbono a gran escala. Se necesitan evaluaciones geológicas aceleradas, la construcción de infraestructuras y una planificación coordinada a largo plazo para liberar la capacidad de España de desplegar la CDR a gran escala.

4. La mayoría de los métodos de CDR son posibles en España. La movilización de una cartera diversificada de métodos de CDR distribuye el riesgo y la presión sobre los recursos. También proporciona flexibilidad a los mercados de absorción y a las estructuras de gobernanza. Sin embargo, una cartera diversificada de CDR requiere una coordinación significativa entre el gobierno central, las regiones y la industria para garantizar que todos los métodos potenciales se desarrollen en todo su potencial.

5. Se espera que España aumente su capacidad de secuestro de carbono mediante una mayor cobertura forestal y prácticas agrícolas más sostenibles. España avanza hacia un uso más sostenible del suelo, con una reducción moderada de las tierras agrícolas y una expansión forestal que podría alcanzar los 18,4-19,1 Mha en 2050. Las zonas forestales no gestionadas y las tierras no boscosas ofrecen un alto potencial de reforestación y restauración con fines de CDR. El potencial de la agricultura será menor, pero más resistente, con un fuerte potencial para la aplicación de métodos de CDR. Los pastos podrían reducirse a entre 11,1 y 12,4 Mha, transformándose en parte en bosques. Sin embargo, el riesgo de incendios forestales y la competencia por el uso de la tierra pueden

aumentar el riesgo de reversión y el potencial de captura del sumidero natural.

6. El marco climático de España se enfrenta a una aplicación desigual y a la falta de incentivos, coordinación y concienciación pública. Las partes interesadas consideran en general que las soluciones basadas en la naturaleza son las más viables a corto plazo, y el apoyo público es mayor para los métodos de CDR basados en los ecosistemas, como la reforestación, el secuestro de carbono en el suelo y el biochar. La aceptación es moderada en el caso de los métodos geoquímicos y baja en el de los métodos tecnológicos o marinos, aunque aumenta cuando los proyectos aportan beneficios colaterales locales visibles, como la mejora de la biodiversidad o el empleo rural. Los métodos tecnológicos siguen siendo prometedores, pero siguen estando limitados por el coste, la madurez tecnológica y las lagunas normativas. De cara al futuro, España necesita una estrategia nacional que integre soluciones de CDR naturales y tecnológicas, respaldada por la ciencia, la inversión y una sólida colaboración público-privada.

Los escenarios potenciales realistas de CDR que se presentan en este informe no deben interpretarse como previsiones, sino como vías ilustrativas. Aunque los tres escenarios realistas deberían ser viables, el nivel real de CDR alcanzado en España en 2030, 2040 y 2050 dependerá de los niveles de inversión pública y privada, las decisiones estratégicas, la aceptación social y la evolución de los mercados relevantes.

Las medidas concretas necesarias para alcanzar el potencial de CDR de España se describen en una hoja de ruta independiente que se basa en las conclusiones de este informe de referencia.



Índice

Resumen ejecutivo	3
Lista de abreviaturas	7
1. Introducción	8
2. Vías de CDR y sus recursos requeridos	9
2.1 Diversidad de métodos de CDR.....	9
2.2 Métodos CDR seleccionados.....	13
2.3 Recursos requeridos para los métodos de CDR seleccionados.....	14
3. Recursos y materias primas de España	15
3.1 Energía.....	15
3.2 Agua.....	20
3.3. Tierra.....	23
3.4 Zonas marinas costera.....	27
3.5 Condiciones naturales.....	29
3.6 Materias primas de biomasa.....	30
3.7 Recursos minerales.....	33
3.8 Almacenamiento de CO ₂	36
3.9 Infraestructura de CO ₂	42
3.10 Zonas restringidas.....	45
4. Potencial teórico de CDR (lo que se podría hacer)	46
4.1 Metodología para el potencial teórico de CDR.....	46
4.2 Potencial teórico de CDR en España.....	46
4.3 Asignación de recursos en el potencial teórico de CDR.....	49
5. Política actual	52
5.1 CDR dentro de la estrategia climática del país.....	52
5.2 Marcos jurídicos relevantes para la CDR.....	53
5.3 Apoyo a la I+D y la innovación.....	54
5.4 En el horizonte.....	54
5.5 Conclusiones sobre la política actual.....	55
6. Geografía social de España	56
6.1 Visión general.....	56
6.2 Entrevistas a las partes interesadas.....	59
6.3 Panel ciudadano.....	60
7. Potencial realista de España para implementar la CDR (lo que se podría hacer)	64
7.1 Metodología para el potencial realista de CDR.....	64
7.2 Escenarios realistas del potencial de CDR.....	64
7.3 Asignación de recursos.....	67
7.4 Una trayectoria de cero emisiones netas comparable para España.....	77
Conclusiones	78
Anexo A: Tabla de potenciales realistas de CDR	80
Anexo B: Disponibilidad de recursos en los escenarios realistas de CDR	82
Anexo C: Biomasa	83
C1. Consumo actual de biomasa.....	83
C2. Distribución de la biomasa entre las diferentes vías de valorización y conversión energética.....	84
Anexo D: Curvas exponenciales para estimar las tasas de inyección de CO₂	85
Anexo E: Mapas adicionales del capítulo 3	86
Referencias	88

Lista de abreviaturas

ACV	Análisis ciclo de vida
AEMA	Agencia Europea de Medio Ambiente
BaU	"Business as usual"
bcm	Mil millones de metros cúbicos
BECCS	Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono
CAPEX	Gastos de capital
CCS	Captura y almacenamiento de carbono
CCUS	Captura, utilización y almacenamiento de carbono
CDR	Eliminación de dióxido de carbono
CHP	Cogeneración
CL	Límites de carbono
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente
COP	Conferencia de las Partes
CRCF	Marco de Certificación de Eliminación de Carbono
DAC	Captura directa de aire
DACCS	Captura y almacenamiento directo de carbono atmosférico
DOCCS	Captura y almacenamiento directo de carbono oceánico
ERW	Meteorización mejorada de rocas
ESR	Reglamento sobre el reparto del esfuerzo
ETS	Sistema de comercio de derechos de emisión
EUR	Euro (€)
FMI	Fondo Monetario Internacional
GEI	Gases de efecto invernadero
Gt	Gigatonelada
GW	Gigavatios
IEA	Agencia Internacional de la Energía
I+D+i	Investigación, desarrollo e innovación
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
km	Kilómetro
km ²	Kilómetros cuadrados

Kt	Kilotonelada
kV	Kilovoltio
LULUCF	Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura
m ³	Metros cúbicos
mcm	Millones de metros cúbicos
mm	Milímetro
MRV	Monitoreo, reporte y verificación
Mt	Millones de toneladas
MtCO ₂	millones de toneladas de dióxido de carbono
MTK	Unión Central de Productores Agrícolas y Forestales
Mtpa	Millones de toneladas al año
MW	Megavatios
NDC	Contribución determinada a nivel nacional
NTC	Capacidad neta de transferencia
OAE	Mejora de la alcalinidad oceánica
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OPEX	Gastos operativos
OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte
pH	Potencial del hidrógeno
PIB	Producto interior bruto
PNIEC	Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
QGIS	Sistema de Información Geográfica
S-DAC	Captura directa de aire con sorbente sólido
SMR	Reactores modulares pequeños
SRL	Nivel de madurez para el almacenamiento
t	Toneladas (métricas)
TRL	Nivel de madurez tecnológica
TSO	Operador del sistema de transmisión
TWh	Teravatio-hora
UE	Unión Europea
USD	Dólar estadounidense (\$)
VCM	Mercado voluntario de carbono
WEM	Con medidas existentes
ZEE	Zona Económica Europea

1. Introducción

El cambio climático es uno de los retos más importantes del siglo XXI, ya que pone en peligro los ecosistemas, la salud humana, las economías y la seguridad mundial. En respuesta a ello, el Acuerdo de París de 2015 comprometió a los signatarios a

mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de los 2 °C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático.²

Para alcanzar estos objetivos no solo es necesario reducir de forma rápida y drástica las emisiones en todos los sectores, sino también eliminar el dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera para compensar las emisiones residuales. Con una probabilidad del 70 % de que el umbral de 1,5 °C se supere temporalmente entre 2025 y 2029³, la CDR se considera cada vez más una herramienta fundamental, no solo para equilibrar las emisiones, sino también para revertir activamente el exceso de temperatura. Su papel será esencial durante el resto de este siglo para ayudar a que las temperaturas globales vuelvan a estar dentro de límites seguros.

La CDR se refiere a los procesos antropogénicos utilizados para eliminar el CO₂ de la atmósfera y almacenarlo para evitar un mayor calentamiento. La CDR no es una alternativa a la reducción de emisiones, sino un complemento necesario, especialmente en industrias difíciles de descarbonizar, como la agricultura, la aviación y la industria pesada⁴. Los métodos de CDR van desde soluciones biológicas y basadas en la naturaleza hasta procesos tecnológicos que separan física y químicamente el CO₂ directamente del aire y lo almacenan de forma duradera en formaciones geológicas subterráneas.

A pesar de su creciente reconocimiento, la CDR se enfrenta a importantes incertidumbres en cuanto a su madurez técnica, viabilidad económica, riesgos medioambientales y aceptación pública. Las evaluaciones específicas de cada país son fundamentales para adaptar las soluciones al contexto socioeconómico y geográfico local, mejorando así la viabilidad y la eficacia de estas soluciones.

La Unión Europea (UE) se ha comprometido a alcanzar la neutralidad en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para 2050 y a ser netamente negativa a partir de entonces⁵ y, como Estado miembro, España debe trazar su propio camino hacia este objetivo. El país ya se enfrenta a inundaciones destructivas, olas de calor récord e incendios forestales cada vez más graves, mientras que algunas zonas del este corren el riesgo de convertirse en semidesérticas o

desérticas. Estos impactos amenazan a las comunidades, la agricultura y la seguridad hídrica a largo plazo. En este contexto, una acción climática más firme no solo consiste en cumplir con las obligaciones de la UE, sino que es una cuestión de supervivencia nacional. Cada paso que da España para reducir las emisiones, aumentar la resiliencia y apoyar los esfuerzos climáticos europeos en general protege directamente a sus propias comunidades, paisajes y prosperidad a largo plazo.

España fue seleccionada para el proyecto *Carbon Removal Readiness Assessment* (CRRA) debido a su considerable potencial teórico de CDR^{5,6}, su diálogo nacional en fase inicial sobre el tema y la necesidad de estrategias adaptadas que reflejen sus condiciones socioeconómicas y geográficas específicas.

Este informe aborda una laguna importante en la bibliografía al evaluar la preparación de España para la CDR, identificando las capacidades, barreras y oportunidades existentes. Ofrece información útil para los responsables políticos, los investigadores multidisciplinares y las partes interesadas que aspiran a integrar la CDR en las estrategias climáticas nacionales, promoviendo la contribución de España a los objetivos climáticos globales y al desarrollo sostenible.

Este informe se ha elaborado utilizando un enfoque ascendente, que ha incluido investigación documental, entrevistas con partes interesadas nacionales relevantes y la participación pública a través de un panel ciudadano.

El capítulo 2 describe los distintos métodos de CDR disponibles y los seleccionados para este estudio. A continuación, el capítulo 3 describe el panorama geográfico de España, incluidos los recursos y materias primas actuales y futuros necesarios para implementar la CDR. En el capítulo 4 se presenta una estimación preliminar del potencial de la CDR basada únicamente en los recursos físicos, el denominado potencial «teórico». A continuación, los capítulos 5 y 6 describen la geografía social de España mediante el análisis del panorama socioeconómico, normativo y político para describir los resultados de las entrevistas a las partes interesadas y al panel ciudadano. Por último, el capítulo 7 presenta la estimación del potencial de CDR en diversos escenarios, teniendo en cuenta los resultados de la geografía física y social. El informe concluye con recomendaciones específicas para los responsables políticos, los investigadores y las partes interesadas, con el objetivo de integrar la CDR en las estrategias climáticas nacionales y promover la contribución de España a los objetivos climáticos globales.

2. Vías de CDR y sus recursos requeridos

La definición de CDR de este informe se basa en tres principios clave:

1. El CO₂ capturado debe proceder de la atmósfera (o los océanos), no de fuentes fósiles.
2. El almacenamiento posterior debe ser duradero en escalas temporales relevantes para el clima (normalmente décadas, siglos o milenios), ya sea en productos geológicos, terrestres, oceánicos o duraderos.
3. La eliminación debe ser el resultado de la intervención humana, además del ciclo natural del carbono de la Tierra⁷.

Es importante distinguir claramente la CDR de otros conceptos relacionados, como la captura y utilización de carbono (CCU) y la captura y almacenamiento de carbono (CCS). Aunque la CCU y la CCS comparten algunos componentes con ciertos métodos de CDR, no siempre dan lugar a una eliminación neta duradera del CO₂ de la atmósfera, como se ilustra en Figura 2.

2.1 Diversidad de métodos de CDR

Los métodos de CDR son esenciales para neutralizar las emisiones residuales de los sectores difíciles de reducir y para lograr la estabilización climática a largo plazo. Su eficacia depende no solo de la cantidad de CO₂ eliminada, sino también de la durabilidad del almacenamiento, la escalabilidad y la aceptabilidad social.

Los métodos de CDR se pueden clasificar en cuatro categorías principales: gestión mejorada de los ecosistemas, conversión/preservación de la biomasa, eliminación geoquímica del carbono y eliminación sintética del carbono, como se muestra en Figura 3. En las siguientes secciones se ofrece una breve descripción de cada método de CDR.

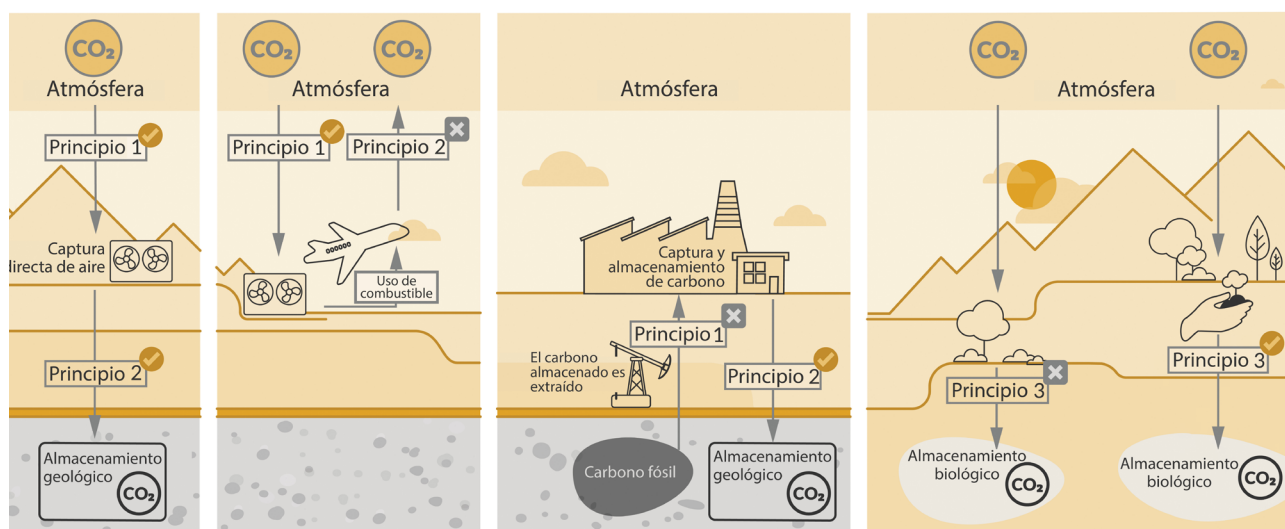


Figura 2. Diferencias entre CDR, CCU, CCS y los procesos naturales de sumideros de carbono. La imagen A ilustra la captura directa de aire (DAC) con almacenamiento geológico permanente, una configuración que cumple los tres principios básicos de la eliminación de dióxido de carbono. Por el contrario, la imagen B muestra la DAC en la que el CO₂ capturado se utiliza en productos de corta duración, como los combustibles, por lo que no cumple el principio 2 sobre durabilidad. La imagen C muestra la captura y el almacenamiento geológico de CO₂ derivado de combustibles fósiles, lo que no cumple el principio 1, ya que no elimina el carbono que ya se encuentra en la atmósfera. La imagen D presenta procesos naturales como el crecimiento de los árboles, que no cumplen el principio 3 a menos que se potencien activamente mediante la intervención humana (figura del informe State of CDR, 2024).

RIESGO DE REVERSIÓN	DURACIÓN DEL ALMACENAMIENTO (años)	MADUREZ				
Muy alto	Décadas	Alto	BLUE CARBON	Carbono almacenado en ecosistemas costeros y marinos: manglares, pastos marinos, marismas, etc.		■ Gestión mejorada del ecosistema
			RESTAURACIÓN MANGLARES Y TURBERAS	El carbono se retiene en plantas anegadas o turba rica en carbono.		■ Conversión/conservación de biomasa
			FORESTACIÓN, REFORESTACIÓN, GESTIÓN FORESTAL MEJORADA Y AGROSILVICULTURA	El carbono se captura mediante la fotosíntesis y se almacena en la madera, las raíces y el suelo.		■ Sintético eliminación de carbono
			ALMACENAMIENTO EN SUELO (CARBON FARMING)	El carbono es capturado por las plantas y almacenado como materia orgánica en los suelos.		■ Eliminación geoquímica de carbono
			PRODUCTOS DE CARBONO Y DE BASE BIOLÓGICA	El carbono se puede utilizar para fabricar diversos productos, como diamantes, plásticos, etc.†		
	Siglos	Bajo	HUNDIMIENTO Y ENTIERRO TERRESTRE DE BIOMASA	El carbono presente en la biomasa puede almacenarse si se entierra en condiciones adecuadas.		
			HUNDIMIENTO Y ENTIERRO MARINO DE BIOMASA	La biomasa marina se cultiva y luego se hunde en el fondo del océano.		
		Moderado	BIOCHAR	La pirólisis convierte la biomasa en biocarbón estable que puede almacenarse en suelos o productos.		
		Bajo	METEORIZACIÓN DE ROCAS (ERW)	La erosión de determinadas rocas absorbe carbono y lo almacena en forma de iones disueltos.		
			AUMENTO ALCALINIDAD OCEANOS (OAE)	El aumento de la alcalinidad del agua incrementa su capacidad para absorber carbono.		
	Milenios	Moderado	BIOENERGÍA CON CAPTURA DE CO2 BECCS	El carbono biogénico se captura y almacena geológicamente*.		
			CAPTURA DIRECTA DEL AIRE (DACCS)	El carbono se captura directamente del aire y se almacena geológicamente*.		
		Bajo	CAPTURA DIRECTA EN OCEANOS (DOCCS)	El carbono se captura directamente del océano y se almacena geológicamente*.		
			ALMACENAMIENTO DE BIOACEITES	La biomasa se piroliza para crear un aceite rico en carbono que puede almacenarse geológicamente*.		
		Moderado	MINERALIZACIÓN DE CARBONO	El carbono reacciona con los minerales para formar sustancias químicamente estables, como los carbonatos, por ejemplo, en el hormigón.†		
Insignificante	Cientos de milenios					

† El riesgo de reversión para casos de uso específicos, como los productos, puede ser significativamente menor si se interrumpe el uso del producto.

*El almacenamiento geológico incluye diversos procesos, entre ellos la mineralización en el lecho rocoso.

Figura 3. Métodos de CDR con su respectiva duración de almacenamiento y grado de preparación para su implementación (Carbon Gap).

2.1.1 Gestión mejorada de los ecosistemas

Los métodos de CDR basados en la gestión mejorada de los ecosistemas aumentan la cantidad de carbono secuestrado y retenido tanto en los ecosistemas naturales como en los gestionados. Al optimizar el uso de la tierra o restaurar los ecosistemas degradados o alterados, estos enfoques refuerzan la capacidad de los paisajes para funcionar como sumideros de carbono. Los métodos de esta categoría incluyen:

1. La forestación, reforestación y revegetación (ARR)

se refiere a un conjunto de actividades destinadas a establecer, restaurar o mejorar la cubierta vegetal en una zona determinada: la forestación consiste en crear bosques en tierras que históricamente no tenían cubierta forestal; la reforestación se centra en restaurar bosques en tierras que anteriormente tenían cobertura forestal pero la perdieron por causas naturales o humanas; y la revegetación es un concepto más amplio que incluye el establecimiento de árboles, arbustos o vegetación herbácea para rehabilitar áreas degradadas, lo que ayuda a restaurar la función del ecosistema y el almacenamiento de carbono.

2. La gestión forestal mejorada (IFM) mejora las prácticas forestales para aumentar la captura de carbono en los ecosistemas forestales, lo que incluye períodos de rotación más largos, una reducción de la tala y la conservación de los bosques antiguos.

3. La agrosilvicultura en España se ejemplifica con la dehesa, un sistema de uso del suelo que integra árboles y arbustos en los sistemas agrícolas y ganaderos. Este modelo combina las actividades de pastoreo con la vegetación perenne, lo que mejora la resiliencia del ecosistema, aumenta la biodiversidad, mejora la productividad y refuerza el almacenamiento de carbono.

4. Secuestro de carbono en el suelo:

a. La gestión de las tierras de cultivo abarca prácticas agrícolas que mejoran el almacenamiento de carbono en el suelo y la salud del suelo, incluyendo la siembra directa, la labranza cero o de conservación para reducir la alteración del suelo y el uso de cubierta vegetal permanente o estacional. Estas prácticas aumentan las aportaciones de carbono orgánico, limitan las pérdidas de carbono y mejoran la resiliencia y la productividad de los sistemas de tierras de cultivo.

b. La gestión de pastos se refiere a las prácticas de gestión ganadera, como el pastoreo rotativo, que mejoran la salud del suelo y aumentan el almacenamiento de carbono al promover la regeneración de los pastos y mejorar la resiliencia de los ecosistemas de pastizales.

5. La restauración de humedales y turberas mediante la restauración hidrológica de humedales y turberas degradados permite recuperar sus condiciones naturales, lo que los convierte de fuentes de carbono en sumideros de carbono.

6. La revegetación costera se centra en la restauración y conservación de los ecosistemas costeros, como los manglares, las marismas salinas y las praderas marinas, que capturan y almacenan de forma natural grandes cantidades de carbono en la biomasa y los sedimentos.

2.1.2 Conversión/preservación de la biomasa

Los métodos de CDR basados en la biomasa aprovechan la capacidad natural de las plantas para absorber el CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis, almacenándolo en su biomasa: hojas, tallos, raíces y otros tejidos orgánicos. Para evitar que este carbono vuelva a la atmósfera a través de la descomposición natural o la combustión, estos enfoques intervienen deliberadamente en el ciclo del carbono. La biomasa se procesa intencionadamente de manera que se estabilice o se secuestre permanentemente el carbono capturado, garantizando su almacenamiento a largo plazo. Los métodos incluidos en esta categoría son:

1. Los productos biológicos duraderos se refieren al carbono almacenado en materiales como la madera y los bioplásticos. Estos productos retrasan la liberación de carbono al prolongar el ciclo de vida del carbono derivado de la biomasa.

2. El biochar se produce mediante la pirólisis de la biomasa en condiciones de bajo oxígeno, lo que da como resultado un material duro y rico en carbono. Cuando se aplica a suelos o materiales, el biochar resiste la descomposición y almacena carbono durante décadas o milenios.

3. El almacenamiento de bioaceite convierte la biomasa en bioaceite mediante pirólisis y lo inyecta en formaciones geológicas estables. Este método captura el carbono líquido bajo tierra durante cientos o miles de años.

4. El hundimiento de biomasa marina cultiva o recolecta algas y otra biomasa marina, depositándola en capas oceánicas profundas (>1000 m). Esto acelera la bomba de carbono natural y captura el carbono durante siglos o milenios.

5. El enterramiento de biomasa terrestre consiste en recolectar biomasa vegetal y enterrarla en entornos artificiales con bajo nivel de oxígeno para evitar su descomposición. Este método almacena el carbono absorbido mediante la fotosíntesis en un depósito estable durante largos periodos de tiempo.

6. La captura y almacenamiento de carbono biológico (BECCS) combina el uso de biomasa con la captura de CO₂ y el almacenamiento geológico. Evita la liberación de CO₂ procedente de la combustión o el procesamiento de la biomasa, lo que permite emisiones netas negativas.

a. La BECCS con combustión captura el CO₂ de la combustión de biomasa en centrales eléctricas o plantas industriales y lo almacena bajo tierra, al tiempo que genera energía utilizable.

b. La BECCS con digestión anaerobia/fermentación captura el CO₂ liberado durante la descomposición de la biomasa para la producción de biogás o etanol, y lo desvía para garantizar su almacenamiento geológico.

2.1.3 Eliminación geoquímica del carbono

Los métodos geoquímicos y oceánicos aceleran o mejoran las interacciones químicas naturales entre el dióxido de carbono y las rocas o minerales reactivos. En la naturaleza, estas reacciones se desarrollan lentamente a escala geológica. Sin embargo, al aumentar la superficie de los materiales reactivos, normalmente mediante trituración, y aplicarlos a entornos terrestres o marinos, se puede mejorar significativamente la velocidad de conversión y almacenamiento de CO₂. Los métodos clave incluyen:

1. La meteorización mejorada de rocas (ERW) aplica rocas finamente molidas o materiales ricos en minerales alcalinos a los suelos, donde reaccionan con el CO₂ ambiental para formar carbonatos estables, secuestrando el carbono durante largos periodos de tiempo.

2. El aumento de la alcalinidad oceánica (OAE) aumenta la alcalinidad del agua de mar para acelerar la absorción natural de CO₂, convirtiéndolo en iones bicarbonato y carbonato estables.

a. La OAE mineral consiste en disolver minerales alcalinos (por ejemplo, olivino, cal) en el agua de mar para aumentar la alcalinidad y mejorar la absorción de CO₂.

b. La OAE electroquímica utiliza la electricidad para modificar la química del agua de mar, aumentando su alcalinidad y, por lo tanto, su capacidad para absorber y retener CO₂.

3. La mineralización del carbono facilita la reacción del CO₂ con rocas ricas en calcio o magnesio para formar carbonatos sólidos. Esto puede ocurrir en reactores controlados (ex situ) o dentro de formaciones geológicas (in situ), lo que permite el almacenamiento permanente de carbono.

4. La fertilización oceánica añade nutrientes a las regiones oceánicas para estimular el crecimiento del fitoplancton y la absorción de CO₂. Se puede realizar con hierro, nitrógeno, fósforo o afloramiento artificial. En general, los resultados son variables y pueden implicar riesgos ecológicos y una rápida liberación de carbono.

2.1.4 Eliminación sintética de carbono

La eliminación sintética de carbono abarca sistemas diseñados para extraer CO₂ de la atmósfera o los océanos y almacenarlo de forma permanente. Los dos enfoques principales de esta categoría son la captura y almacenamiento directo de carbono del aire (DACCS) y la captura y almacenamiento directo de carbono del océano (DOCCS). Ambos ofrecen la ventaja de un secuestro de carbono medible y a largo plazo.

1. La captura y almacenamiento directo de carbono del aire (DACCS) consiste en capturar el CO₂ directamente del aire ambiente utilizando sorbentes sólidos o disolventes líquidos. Una vez capturado, el CO₂ se libera mediante la aplicación de calor, presión o reacciones químicas, lo que da lugar a una corriente de CO₂ purificado. A continuación, este CO₂ concentrado se comprime y se almacena en formaciones geológicas u otros sitios de secuestro a largo plazo.

a. La DACCS electroquímica utiliza reacciones electroquímicas para capturar y liberar CO₂ de forma selectiva.

b. La DACCS por oscilación de humedad emplea sorbentes que adsorben el CO₂ en condiciones secas y lo liberan cuando se exponen a la humedad.

c. La DACCS de bucle mineral captura el CO₂ haciéndolo reaccionar con minerales ricos en Ca o Mg, formando carbonatos estables como la calcita o la magnesita.

d. La DACCS de baja temperatura (<120 °C) se basa en sorbentes sólidos, como carbones activados, zeolitas, sílice o estructuras metalorgánicas (MOF), a menudo funcionalizados con aminas. Estos materiales capturan el CO₂ mediante adsorción física o química, y la regeneración se consigue normalmente mediante adsorción por oscilación de temperatura (TSA) o adsorción por oscilación de presión (PSA), siendo la primera más común debido a sus menores requisitos energéticos. Estos sistemas funcionan a temperaturas moderadas (80-120 °C)^a y pueden utilizar calor de baja calidad o residual, lo que ofrece un enfoque más eficiente desde el punto de vista energético.

e. Los DACCS de alta temperatura (>300 °C) implican procesos basados en líquidos, como el bucle de calcio o sodio, en los que el CO₂ se absorbe en soluciones alcalinas (por ejemplo, KOH, NaOH, Ca(OH)₂) y posteriormente se libera durante la regeneración a alta temperatura (300-900 °C)⁸. Aunque esta técnica está bien establecida y es robusta, su elevada demanda térmica aumenta significativamente los costes energéticos, aunque la integración con fuentes de calor renovables puede mejorar su viabilidad.

2. Direct Ocean Carbon Capture and Storage (DOCCS) targets CO₂ dissolved in seawater, where it exists in large quantities as part of the ocean's inorganic carbon pool. The pH swing method alters chemical equilibria to release CO₂ from solution, allowing it to be captured and stored permanently.

2.2 Métodos CDR seleccionados

En teoría, todos los métodos de CDR podrían aplicarse en España. Por lo tanto, muy pocos métodos de CDR se excluyeron de este estudio desde el principio (Figura 4). Los métodos de CDR más adecuados para las condiciones naturales de España son la forestación/reforestación, el secuestro de carbono en el suelo, el biochar y BECCS.

El almacenamiento de bioaceite ha sido descartado debido a limitaciones económicas y de escalabilidad. Si bien los riesgos de reversión, como la migración o la liberación de gases de efecto invernadero, se consideran bajos y manejables mediante perforaciones y monitoreos estándar, los costes combinados de producción, transporte, inyección y desarrollo tecnológico siguen siendo prohibitivos⁹. Las pirólisis móviles capaces de procesar biomasa a gran escala aún se encuentran en fase de desarrollo, lo que limita aún más su viabilidad. Como resultado, a pesar de su bajo perfil de riesgo, el almacenamiento de bioaceite no se considera una opción competitiva para la eliminación de carbono. Además, no se han identificado estudios, iniciativas o proyectos sobre pozos de inyección o enterramiento de biomasa en España y, dada la falta de referencias técnicas, estos enfoques no se han explorado más a fondo en esta evaluación.

Se excluyó el hundimiento de biomasa marina porque no se dan las condiciones oceanográficas específicas necesarias para el almacenamiento de carbono a largo plazo. El hundimiento eficaz de la biomasa depende de aguas profundas muy estables, con bajo contenido de oxígeno y mínima mezcla vertical, y estas condiciones no son características de los mares que rodean España. Incluso si existieran tales condiciones, los riesgos medioambientales (como el impacto desconocido en la vida marina debido a la



Figura 4. Resumen de los métodos de CDR incluidos y excluidos de la evaluación.

contaminación por nutrientes, la alteración de los ciclos y el equilibrio naturales y el agotamiento del oxígeno) son una preocupación importante^{10,11,12,13}.

Se consideró la fertilización oceánica, pero finalmente se descartó. Es incompatible con la restauración de *Posidonia oceánica*, ya que el enriquecimiento de nutrientes puede provocar la proliferación de algas, reducir la claridad del agua y socavar la recuperación de las praderas marinas. En su lugar, se dio prioridad a detener la degradación continua de las praderas marinas^{5,6}.

Por el contrario, se ha incluido la DACCS porque, a pesar de sus costes actuales, es una tecnología estratégica a largo plazo en los escenarios de neutralidad climática europeos, no depende de la disponibilidad de biomasa, utiliza una superficie limitada y se espera que sus costes disminuyan a medida que la tecnología madure.

2.3 Recursos requeridos para los métodos de CDR seleccionados

Para evaluar el potencial de implementación de cada método de CDR, es esencial comprender sus requisitos de recursos – como el uso de agua, la superficie de tierra y el consumo de energía – por tonelada neta de CO₂ eliminada. Sin embargo, cuantificar con precisión estos insumos presenta dos retos clave:

- La diversidad de los métodos de CDR, cada uno con múltiples variantes que difieren significativamente en cuanto a diseño, escala y parámetros operativos.
- La disponibilidad limitada de datos fiables, ya que la mayoría de los métodos se encuentran en fases iniciales de desarrollo y carecen de pruebas sólidas basadas en el terreno.

Además, la comparación de métodos requiere una base coherente. Dado que todos los enfoques de CDR generan algunas emisiones de GEI durante su funcionamiento, los requisitos de recursos deben evaluarse por tonelada neta de CO₂ eliminada, teniendo en cuenta las emisiones restadas de los volúmenes brutos de eliminación. Esto convierte al análisis del ciclo de vida (ACV) en una herramienta crucial para generar datos fiables y significativos.

La literatura científica ofrece información valiosa, sobre todo por su transparencia metodológica y su rigurosa revisión por pares. Sin embargo, la mayoría de los estudios se basan en experimentos a escala de laboratorio o en modelos, a menudo basados en conjuntos de datos limitados. Como resultado, su aplicabilidad a las condiciones del mundo real sigue siendo incierta, y pocos incluyen ACV exhaustivos.

Los datos operativos de las empresas – las que desarrollan proyectos piloto o implementaciones a escala comercial – son escasos, pero cada vez más disponibles. Por ejemplo, los expedientes de solicitud presentados al fondo Frontier^b proporcionan métricas de rendimiento de proyectos reales. Si bien estas cifras reflejan con mayor precisión las capacidades tecnológicas actuales, a menudo son autodeclaradas y carecen de revisión por pares, lo que las convierte en «declarativas» por naturaleza.

Para superar estas limitaciones y crear una base de datos sólida sobre los requisitos de recursos, Carbon Gap se asoció con RMI, el Rocky Mountain Institute. El conjunto de datos resultante se basa en tres fuentes complementarias: literatura científica revisada por pares, solicitudes del fondo Frontier disponibles públicamente (en tres cohortes) y encuestas directas realizadas a operadores activos de CDR.

La base de datos seguirá evolucionando tras la publicación de este informe, pero en el momento de su publicación incluye:

- 442 puntos de datos obtenidos de 129 artículos científicos;
- 200 puntos de datos obtenidos de 113 archivos de Frontier;
- 330 puntos de datos obtenidos de 57 respuestas a encuestas.

Se puede acceder a la base de datos desde el [sitio web de la CRRA](#).

Los datos se recopilaron para obtener valores consolidados para cada uno de los recursos necesarios para los métodos de CDR. Estos valores se utilizan en el resto del informe para estimar el potencial de los métodos de CDR basándose en las materias primas disponibles. Cuando los valores no están disponibles en la base de datos o si hay valores alternativos más relevantes para el contexto nacional, se indican explícitamente, junto con su fuente.

b. Frontier es un compromiso de mercado anticipado respaldado por importantes empresas privadas para apoyar el desarrollo y la implantación temprana de tecnologías de CDR mediante la compra anticipada de créditos de CDR.

3. Recursos y materias primas de España

Este capítulo evalúa la disponibilidad de los recursos físicos y materias primas necesarios para desplegar los métodos seleccionados de CDR. Se determina su nivel actual de disponibilidad y las perspectivas para el futuro previsible (crecimiento, estancamiento o declive), y siempre que es posible, también se caracteriza la distribución geográfica de cada recurso. El alcance de este capítulo se refiere a la disponibilidad a nivel nacional y será necesario trabajar en el futuro para analizar contextos regionales y más locales.

3.1 Energía

La disponibilidad energética en España alcanzó los **1.864 TWh** en 2023, con una generación eléctrica de **286 TWh**. Las proyecciones para 2050 varían ampliamente: en el caso más conservador, la demanda de electricidad crece un 22 %,

mientras que en el más ambicioso crece 2,56 veces y se suministra casi en su totalidad por renovables. El potencial de calor residual, estimado en **22 TWh** en 2015, se prevé que disminuya a **10,52-21 TWh** para 2050 debido a la reducción del uso de combustibles fósiles y la fuerte electrificación industrial. Para la CDR, la disponibilidad de electricidad y residuos en 2050 se estimó en hasta **22-31 TWh** y **6-21 TWh**, respectivamente.

La Figura 5 muestra el balance de flujo energético de España en 2023¹⁰. Los productos petrolíferos dominan la mezcla energética (alrededor del 50 %), seguidos por el gas natural (19 %) y las renovables (14 %), mientras que el uso de combustibles sólidos y residuos no renovables es considerablemente menor. La generación eléctrica (**286 TWh**) representa aproximadamente el 14 % de la energía disponible, con pérdidas de transmisión del 22 %. La energía nuclear y otras fuentes renovables suministraron el 70 % de la electricidad española en 2023^{10,14}.

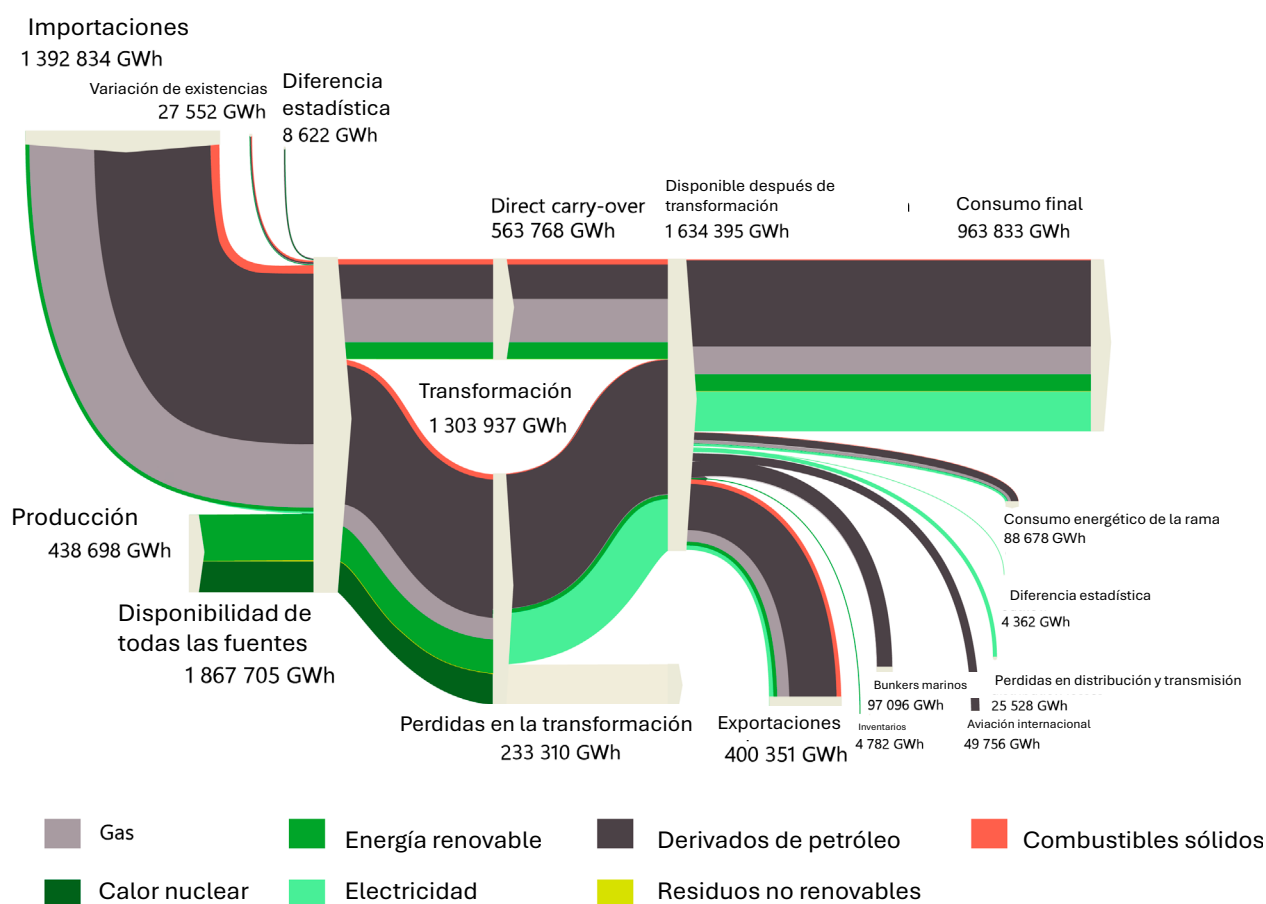


Figura 5. Diagrama de flujo del balance energético en España en 2023¹⁰.

3.1.1 Electricidad

Se espera que la electricidad desempeñe un papel crucial en la descarbonización de España. La generación de electricidad renovable aumentó del 33-40 % entre 2010 y 2019 al 43-51 % entre 2020 y 2023, lo que revela el compromiso del país con la descarbonización de su red eléctrica. La mayor parte de la electricidad generada (51-56 %) es utilizada por los sectores residencial, comercial y de servicios públicos (recogida en la Figura 6 como «Otros»). Le sigue el sector industrial, que representa entre el 24 y el 27 % del consumo total.

Escenarios eléctricos

Para estimar la disponibilidad futura de electricidad para CDR, se desarrollaron cuatro escenarios 2050 como parte de este estudio (Tabla 1). Estos escenarios consideran dos dimensiones clave: la generación y el consumo total de electricidad (bajo frente a alto), y la evolución de la mezcla de generación (estable frente a significativamente alterada por la integración de fuentes renovables). En cuanto al nivel de generación y consumo:

- Los escenarios de baja generación/consumo asumen que la demanda eléctrica se mantiene en gran medida estable, creciendo de forma constante en línea con las tendencias históricas. Esto sirve como proyección de referencia, similar a las desarrolladas por MITECO¹⁵.

- Los escenarios de alta generación incorporan la adopción generalizada de vehículos eléctricos y el crecimiento de la industria del hidrógeno verde, ambos impulsando un fuerte aumento de la demanda eléctrica. Estas proyecciones se basan en estudios del sector eléctrico español¹⁶.

En cuanto a la combinación de generación eléctrica, se consideran dos vías:

- Business as usual (BAU): donde la composición actual permanece sin cambios.
- Dinámica de Bajo Carbono (DBC): lo que implica una exclusión total de fuentes de energía nucleares o fósiles.

Los escenarios de generación eléctrica para España hasta 2050 se muestran en la Figura 7, destacando diferentes vías energéticas: gas natural, otras no renovables, nuclear y renovables, incluidos los biocombustibles.

Para 2050:

- El escenario E1 mantiene una mezcla equilibrada, con las energías renovables y los biocombustibles aportando aproximadamente el 35 %, el gas natural alrededor del 30 % y la energía nuclear alrededor del 25 %.
- El escenario E2 describe un sistema que se convertirá casi en su totalidad en renovables para 2050, con las energías renovables y los biocombustibles contribuyendo con más del 90 %, y los combustibles fósiles y la energía nuclear casi eliminados.

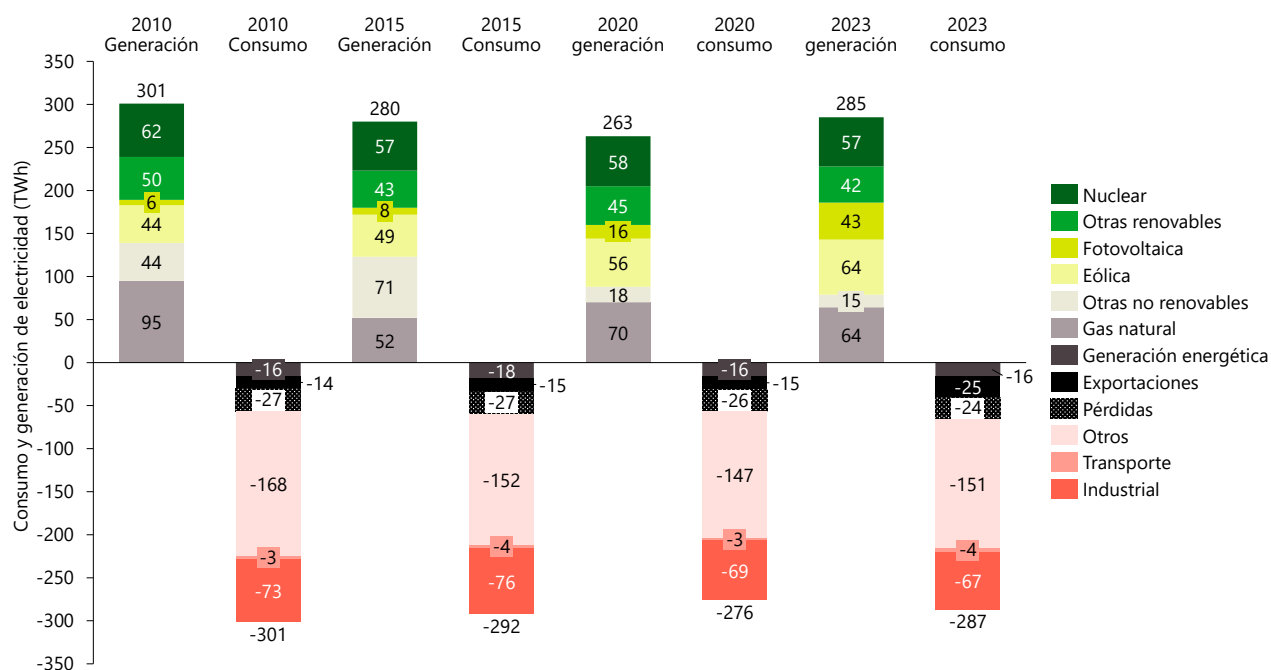


Figura 6. Generación y consumo histórico de electricidad en España (2010-2023). «Otro» se refiere a los sectores residencial, comercial y de servicios públicos¹⁰.

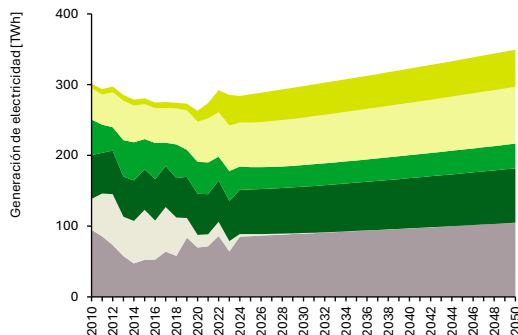
Escenario	Generación/ demanda esperada de electricidad	Composición esperada de electricidad	Descripción
E1: Electricidad estable y composición estable	Bajo	Business as usual (BAU)	La generación/demanda de electricidad aumenta un 22 % para 2050 según las proyecciones del MITECO ¹⁵ , mientras que la composición de la generación eléctrica se mantiene constante.
E2: Electricidad estable, composición renovable	Bajo	Dinámica de Bajo Carbono (DBC)	La generación/demanda de electricidad aumenta un 22 % para 2050 según las proyecciones de MITECO ¹⁵ y está completamente abastecida con fuentes renovables.
E3: Alta electricidad, composición estable	Alto	BAU	La generación/demanda eléctrica aumenta un 256 % para 2050, según las proyecciones estimadas para el sector eléctrico español ¹⁶ , mientras que la composición de la generación eléctrica se mantiene constante.
E4: Alta electricidad, composición renovable	Alto	DBC	La generación/demanda eléctrica aumenta un 256 % para 2050, según las proyecciones estimadas para el sector eléctrico español ¹⁶ , y se abastece completamente con fuentes renovables.

Tabla 1. Descripción de los escenarios para la generación, el consumo y la mezcla de generación eléctrica en España para 2050.

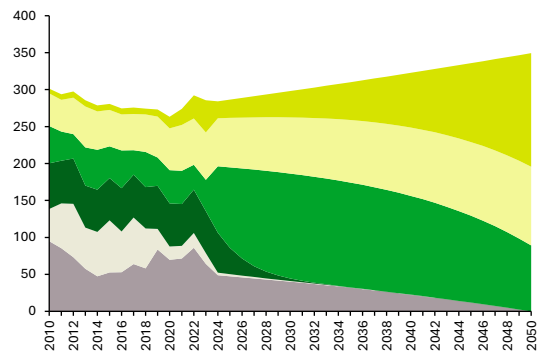
- El escenario E3 muestra un aumento moderado en las energías renovables, alcanzando alrededor del 45 % para 2050, mientras que el gas natural y la nuclear siguen desempeñando papeles significativos, contribuyendo con aproximadamente un 30 % y un 20 % respectivamente.

- El escenario E4 es el más ambicioso en términos de despliegue de energías renovables, donde las renovables y los biocombustibles representan más del 95 % de la generación eléctrica para 2050, con un uso solo marginal de la energía nuclear y los combustibles fósiles.

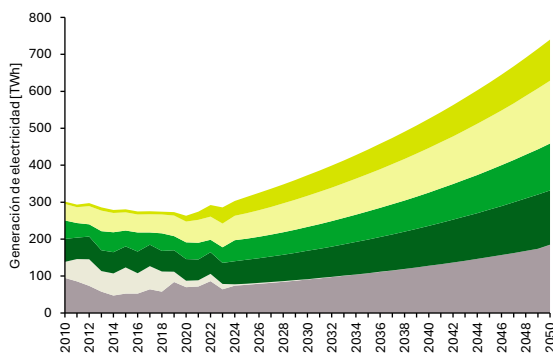
Escenario E1: electricidad estable, mix estable



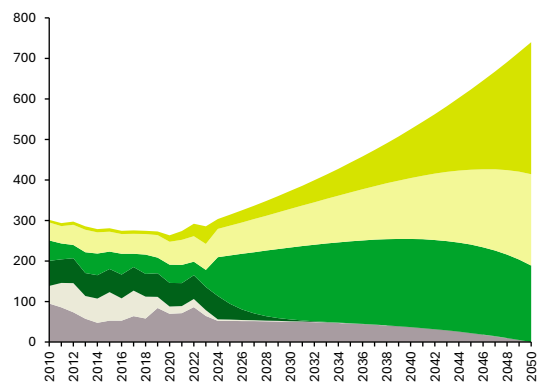
Escenario E2: electricidad estable, mix renovable



Escenario E3: electricidad alta, mix eléctrico estable



Escenario E4: electricidad alta, mix renovable



Fotovoltaica Eólica Otras energías renovables y biocombustibles Nuclear Otras energías no renovables Gas natural

Figura 7. Escenarios de generación eléctrica en España para 2050.

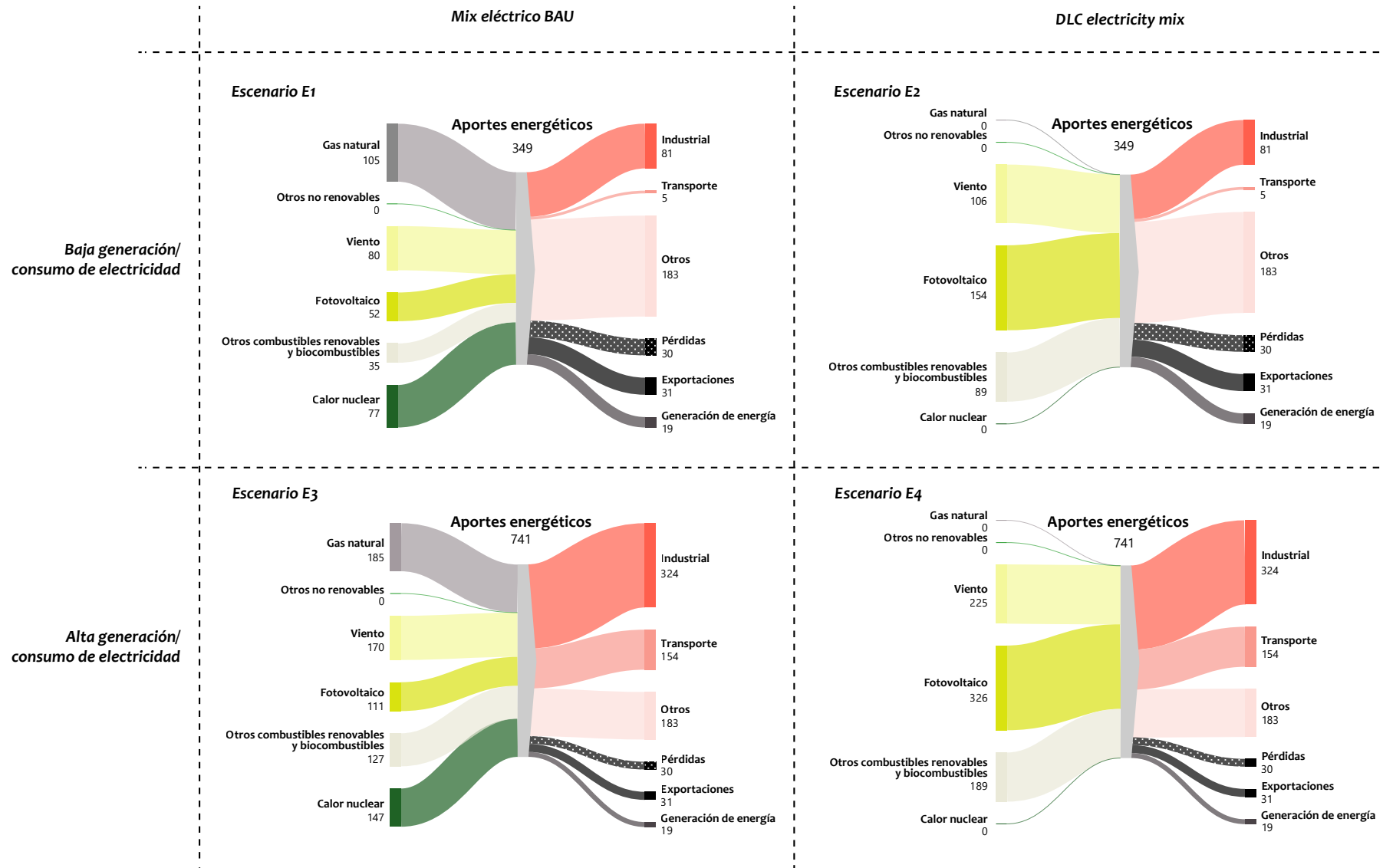


Figura 8. Balance eléctrico previsto en España para 2050 según los escenarios analizados. Datos en TWh. «Otros» se refiere a los sectores residencial, comercial y de servicios públicos.

En general, los escenarios reflejan diferentes niveles de ambición en la descarbonización, con los Escenarios E2 y E4 apuntando a una dependencia casi total de las energías renovables. El balance eléctrico de España en 2050 según los escenarios analizados se muestra en la Figura 8. Se estima que la **disponibilidad máxima teórica** de electricidad disponible para CDR es de **31 TWh** para 2050, basándose en la suposición de que solo la electricidad que se espera exportar estaría disponible para CDR. La disponibilidad realista se describe en cambio en la sección 7.3.1.

3.1.2 Energía térmica

El calor es vital para varios métodos tecnológicos de CDR, impulsando los procesos químicos para la captura y regeneración del CO₂. Diferentes métodos de CDR tienen distintos requisitos térmicos; por ejemplo, la Captura Directa de Carbono en Aire con Sorbente Sólido (S-DAC) necesita

calor de baja calidad, típicamente entre 80 °C y 100 °C, para la regeneración del sorbente, mientras que la Captura Directa de Aire con Disolvente Líquido (L-DAC) requiere calor de mucha mayor calidad, que oscila entre 300 °C y 900 °C. Una fuente importante de calor para aplicaciones de CDR es el calor residual, especialmente procedente de procesos industriales.

No se dispone de estadísticas oficiales sobre la generación de energía térmica en España, pero un estudio de 2015¹⁷ lo estimó en **23 TWh**. La mayor proporción (41 %) provino de gases de descarga a 100-200 °C, seguido de gases de alta temperatura (500-1000 °C) con un 20 %. Por sector, el hierro y el acero contribuyeron al 42 % del total, y la industria de minerales no metálicos (cemento, vidrio, cerámica, etc.) aportó el 34 % (Figura 9). Un estudio de 2021 indica que el potencial actual de calor residual sigue siendo en general coherente con las estimaciones de 2015¹⁸.

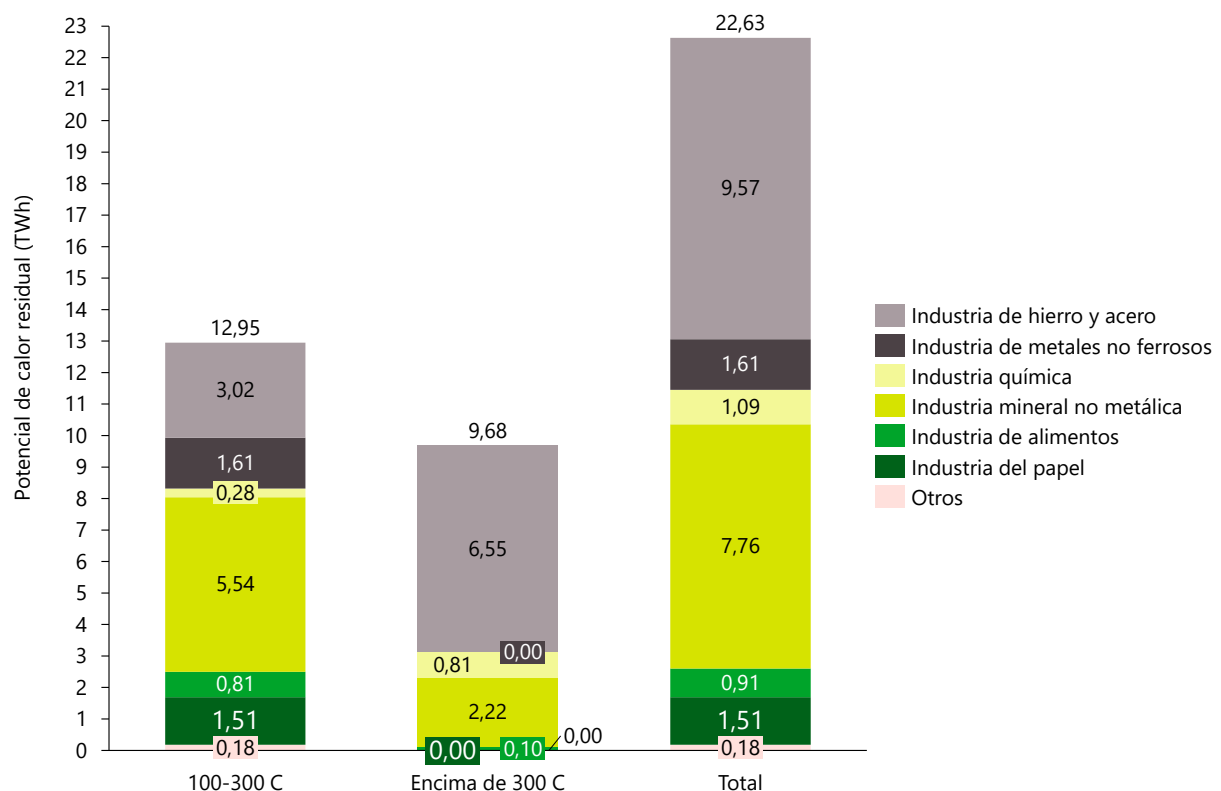


Figura 9. Estimación del calor residual actual de España por sector de origen^{17,18}.

Escenario	Descripción
T1: Procesos térmicos estables	Los procesos térmicos se mantienen en los niveles actuales (Figura 10), pero las nuevas tecnologías reducen las pérdidas en un 7 %, lo que se traduce en menos calor residual ¹⁹ .
T2: Procesos térmicos decrecientes	Los procesos térmicos caen aproximadamente un 50 % suponiendo que España cumpla con los objetivos de descarbonización de la industria, impulsados principalmente por la electrificación ²⁰ .

Tabla 2. Descripción de los escenarios para procesos térmicos y calor residual asociado en España para 2050.

Escenarios de energía térmica

No se encontraron proyecciones oficiales para la generación o uso de calor residual en España. Por lo tanto, el potencial térmico residual de España hasta 2050 se estimó mediante dos escenarios desarrollados como parte de este estudio y derivados de la combinación de perspectivas alternativas de energía térmica, como se muestra en la Tabla 2.

La Figura 10 presenta el potencial estimado de calor residual de España para 2050. El Escenario T1 ofrece un potencial de

desperdicio de **21,05 TWh** y el Escenario T2 de **10,52 TWh**, siendo la mayoría el calor de baja calidad (~57 %), con **12 TWh** en el Escenario T1 y **6 TWh** en el Escenario T2.

Se espera que la **disponibilidad máxima teórica** de calor residual disponible para la CDR para 2050 sea inferior a los niveles actuales y se estima en **~21 TWh** (**12 TWh** para calor de baja calidad y **9 TWh** para calor de alta calidad, suponiendo, según el Escenario T1, que la demanda térmica se mantenga en los niveles actuales pero que las nuevas tecnologías la reduzcan un 7 %, lo que daría lugar a menos calor residual.

Escenarios de energía térmica para 2050

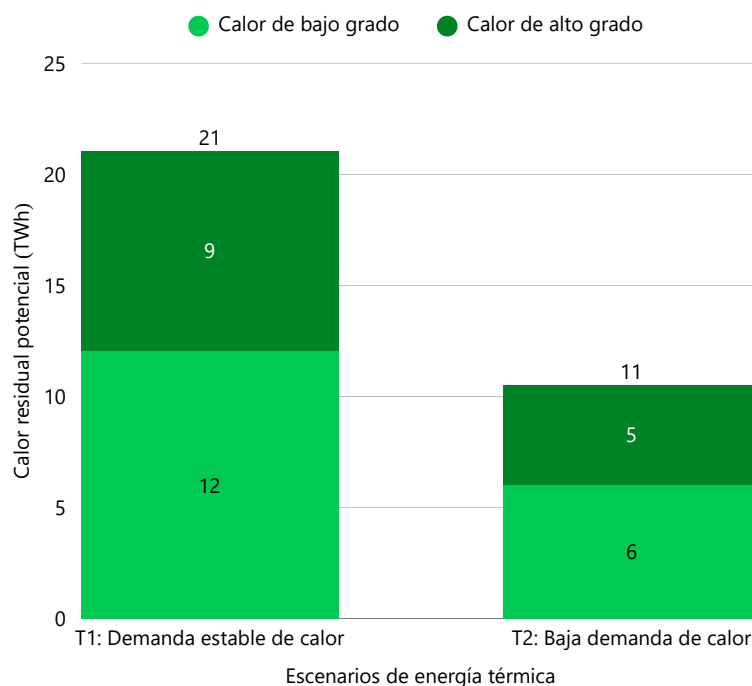


Figura 10. Potencial de calor residual estimado en España para 2050. En el bajo grado, el calor se refiere a temperaturas por debajo de 300 °C.

Recurso	Estimado actual	2030	2040	2050
Electricidad (TWh)	286	298-373	323-525	349-740
Renovable	150	142-317	155 – 300	168-740
No renovable	136	56-168	23 – 236	0-332
Disponibilidad máxima teórica para CDR	25	26,6	28,8	31
Calor residual (TWh)	22,6	18,9-22,3	14,7 – 21,7	10,5-21,1
Bajo grado	12,96	10,85-12,78	8,44-12,41	6,03-12,05
Alto grado	9,67	8,1-9,54	6,3-9,27	4,5-9
Disponibilidad máxima teórica para CDR	22,63	22,31	21,68	21

Tabla 3. Resumen de la disponibilidad energética actual y prevista en España según los escenarios de electricidad y energía térmica desarrollados. También se muestra la disponibilidad máxima teórica de energía para la CDR.

3.1.3 Conclusiones

La disponibilidad actual y proyectada de energía eléctrica y térmica en España, tal como se describe en los escenarios anteriores, se resume en la Tabla 3. La electricidad muestra un claro cambio hacia las renovables, con la generación excedente (exportaciones) asumida como utilizable para la CDR, alcanzando entre **22 y 31 TWh**. La energía térmica, en cambio, disminuye drásticamente, proporcionando solo entre **6 y 21 TWh** para la CDR en 2050. En general, se espera que la electricidad renovable impulse el sistema energético futuro, mientras que el calor sigue siendo un contribuyente secundario pero relevante en la futura mezcla energética de España.

3.2 Agua

La climatología, la geografía y la geomorfología distintivas de España crean importantes disparidades regionales en la disponibilidad y el uso del agua (Figura 11). Estos factores influyen tanto en la disponibilidad de recursos hídricos como en el grado de explotación **en relación con el agua total disponible**, que oscila entre **el 23 % del agua total disponible** en las regiones del norte y **el 50 % del agua total disponible** en el sur y el suroeste, donde el clima es más árido¹⁰.

España cuenta con unos **100.000 millones de metros cúbicos (bcm) al año** de recursos hídricos, distribuidos en un 73 % de aguas superficiales, un 24 % de aguas subterráneas y un 3 % de otras fuentes (incluida el agua desalinizada)¹⁶. La agricultura es el consumidor dominante, con aproximadamente el 79 % del suministro total, seguida de los hogares, con un 21 %. El consumo doméstico medio se estima en unos 120 litros por habitante y día.

Debido a la particular climatología del país, todas las cuencas fluviales están reguladas con múltiples presas y trasvases. España es **líder europeo en recuperación de aguas residuales**, con una tasa media de recuperación del 10 % en zonas urbanas para aguas grises y negras. La tasa de recuperación es aún mayor en zonas con escasez de agua, como Murcia, donde son frecuentes las actividades que requieren un uso intensivo de agua, como la agricultura. Este fuerte enfoque en la recuperación refleja el alto consumo de agua de España, el más alto de Europa y el quinto a nivel mundial, combinado con unas precipitaciones limitadas (excepto en zonas como el País Vasco y Navarra), lo que impulsa una fuerte inversión en el ahorro y la gestión del agua.

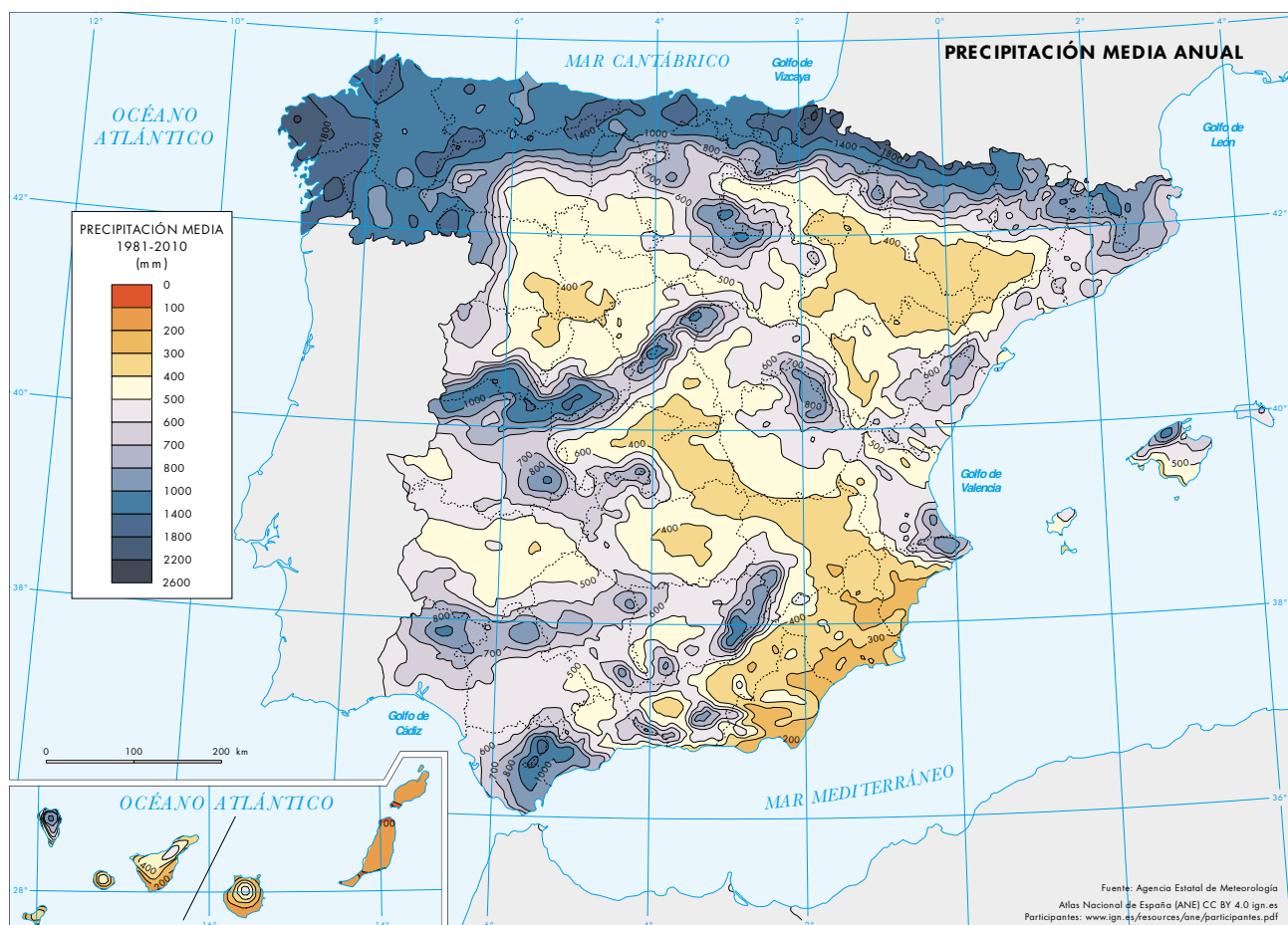


Figura 11. Precipitación media en España (mm) para el periodo 1981-2010. Fuente: AEMET.

Recurso	Estimación actual	2030	2040	2050
Agua (bcm)	111	108,7-111,1	108-111,4	106,2-111,5
Agua superficial	80,5	79,7-80,5	79,3-80,5	77,9-80,5
Aguas subterráneas	29,5	28-29,5	27,7-29,5	27,3-29,5
Otros (incluida la desalinizada)	1	1-1,2	1-1,4	1-1,6

Tabla 4. Resumen de la disponibilidad actual y prevista de agua en España.

La tabla 4 resume la disponibilidad actual y prevista de agua en España en diferentes escenarios. Siendo realistas, se espera una disminución gradual de la disponibilidad tanto de agua superficial como subterránea, agravada por el aumento de la demanda de agua (tanto para uso doméstico como agrícola). Para compensar estas reducciones, se prevé un aumento del agua desalinizada, cuyos volúmenes dependerán en gran medida del suministro eléctrico y de la eficiencia de las membranas.

España consume actualmente unos 30,38 bcm/año¹⁶, lo que representa menos de un tercio del recurso (~27,5 %). Para compensar la disminución constante prevista del agua disponible, junto con los posibles efectos del cambio climático, el MITECO ha establecido objetivos de reducción del consumo hasta 2050, con el fin de reducir el consumo actual a 26,335 bcm, lo que representa una reducción del 15 %.

En lo que respecta a los recursos hídricos, el principal reto para la CDR es la distribución desigual, que podría impedir el despliegue de determinados métodos en las regiones donde ya escasea el agua. Algunos métodos de CDR, como ciertas tecnologías DACCS, requieren grandes volúmenes de agua y necesitarán una correspondencia espacial entre la disponibilidad de agua y la proximidad al almacenamiento geológico de CO₂. La ERW también depende de las precipitaciones para que las reacciones geoquímicas se produzcan en plazos significativos.

3.3 Tierra

La tierra es un recurso esencial para la CDR, ya que actúa tanto como sumidero de carbono como base para diversas soluciones tecnológicas. Cada categoría de tierra ofrece un potencial específico: la tierra cultivable es adecuada para el biochar, el ERW y las prácticas de cultivo de carbono;

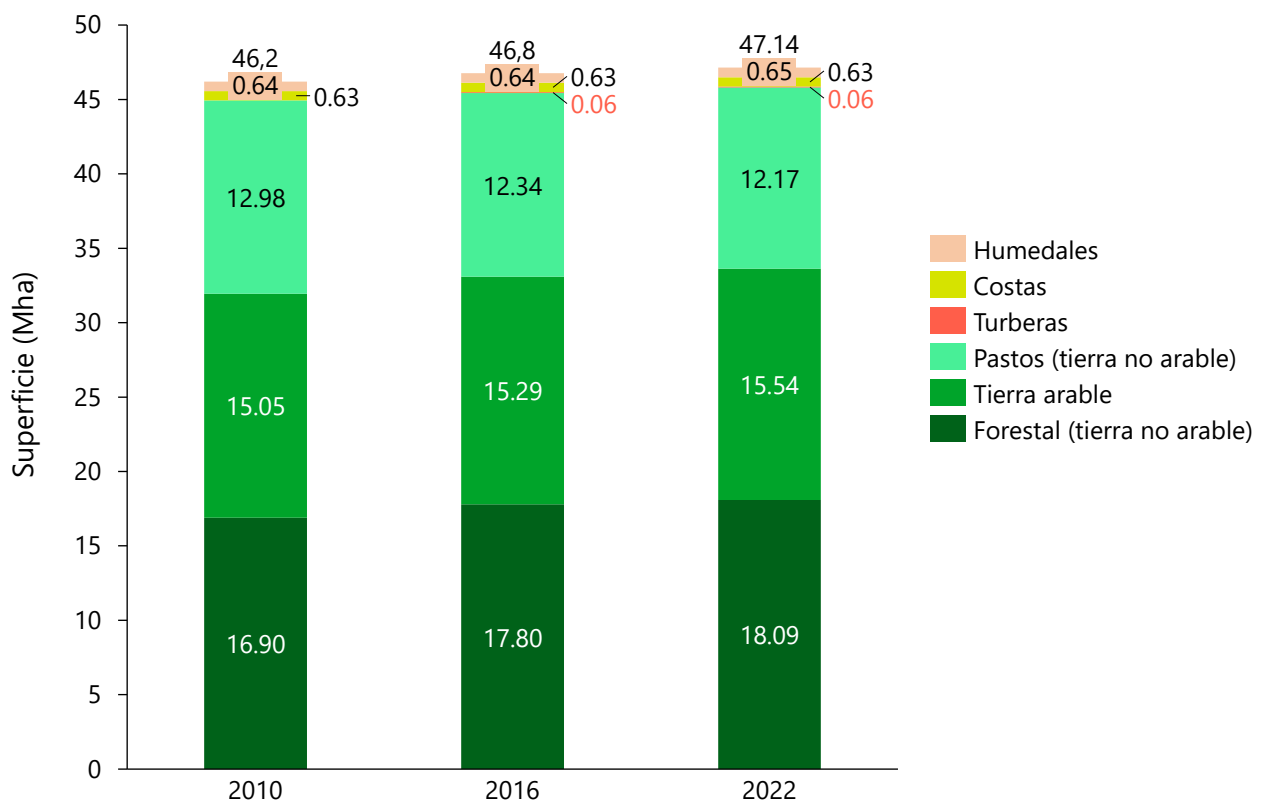


Figura 12. Uso del suelo en España en 2022 y de 2010 a 2022. Datos: Tablas comunes de información para el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero²².

la tierra no cultivable para la forestación/reforestación o las soluciones tecnológicas de CDR; los humedales para la restauración; y las zonas costeras para la restauración de marismas o pastos marinos. La superficie total de España es de **50,6 Mha**²¹, distribuida entre los tipos de tierra que se muestran en la figura 12 (excepto las zonas urbanas y las tierras no rurales).

Desde 2010, las zonas forestales de España se han expandido (2010-2022), impulsadas por el abandono rural y el declive de la agricultura y la ganadería. Para 2050, se espera que el uso del suelo cambie moderadamente hacia un equilibrio más sostenible: las tierras agrícolas (especialmente los cultivos anuales) disminuirán ligeramente debido al abandono rural, el cambio climático y la reforestación, mientras que los cultivos permanentes y orgánicos se expandirán.

3.3.1 Tierras forestales

España cuenta con una extensa cobertura forestal. En 2022, los terrenos forestales arbolados cubrían el 38,5 % de la superficie total de España, algo más de **18 Mha**²³. Esta extensa cobertura supone una importante oportunidad para la captura de carbono mediante una mejor gestión forestal. Cabe destacar que, en 2022, aproximadamente 12,9 Mha (el 70 % de los terrenos forestales arbolados) no están gestionados, como se puede observar en la figura 13, lo que representa un potencial sin explotar para la mitigación del cambio climático.

Las superficies forestales incluyen tanto zonas arboladas (es decir, bosques) como zonas no arboladas, estas últimas con carácter forestal, pero sin una cobertura arbórea significativa, dominadas por matorrales, pastizales naturales o tierras áridas. Las tierras no boscosas cubren alrededor del 17,9 % del país – más de 9 Mha en 2023 – y ofrecen un alto potencial de reforestación²³. En un escenario de cambio rápido, la superficie forestal total podría superar **los 19 Mha** en 2050, con alrededor **de 8,4 Mha** de terrenos forestales no boscosos que ofrecen grandes oportunidades de CDR mediante la reforestación, la restauración y la mejora de la gestión de los pastos. La tabla 5 muestra que este escenario añade 1 Mha de nuevos bosques (de 18,09 a 19,09 Mha), aunque solo 14,92 Mha contarían para la CDR, ya que el resto ya está gestionado. Dado que la estrategia oficial de España solo prevé un aumento de 0,6 Mha para 2050, la vía de cambio rápido casi duplica esa ambición. El resultado sería un menor número de zonas agrícolas, pero más sostenibles²⁴, lo que impulsaría la captura de carbono y la resiliencia climática.

3.3.2 Tierras de cultivo

En España predominan los cultivos tradicionales mediterráneos. La figura 14 muestra la distribución de la superficie agrícola por tipo de cultivo en 2022. Destacan los cereales (37,5 %), seguidos de los olivares (17 %) y los viñedos (7,6 %). Otros cultivos, como los industriales, los frutos secos, los forrajeros y los frutales frescos, ocupan proporciones menores.

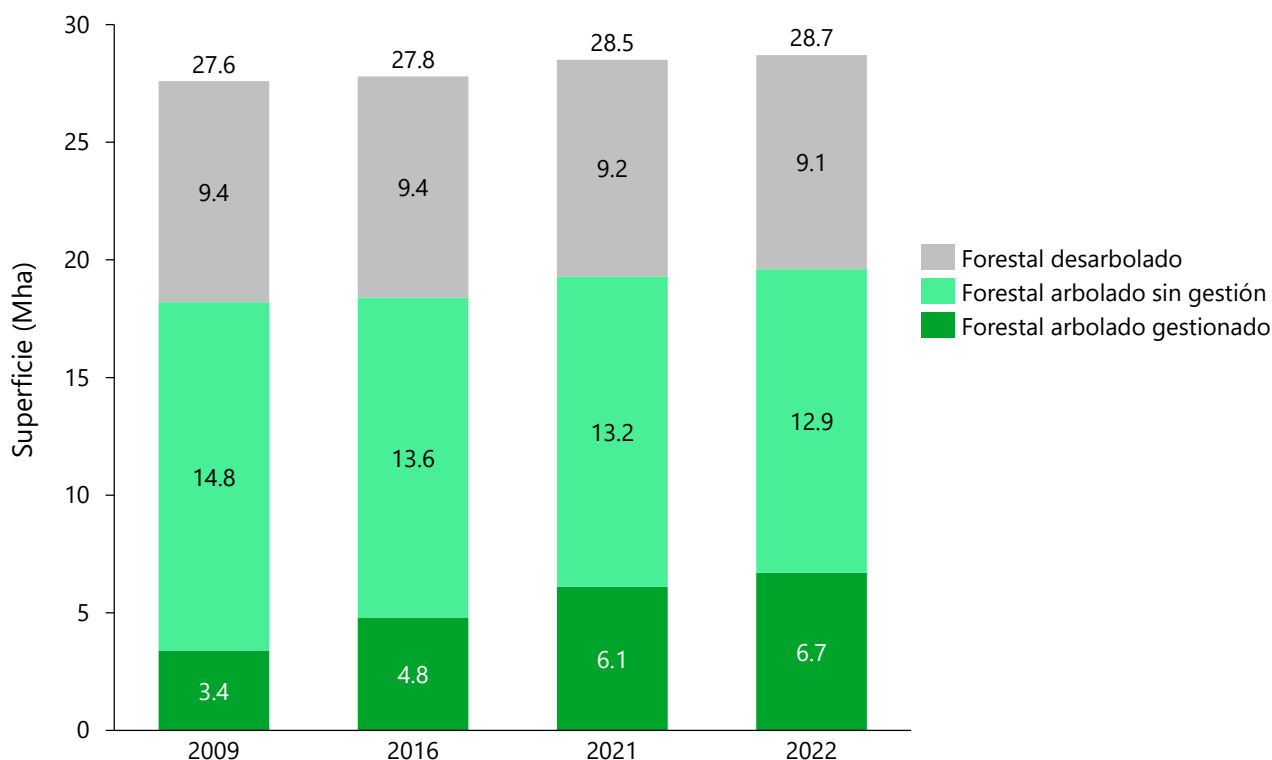


Figura 13. Superficie forestal en España en los últimos años, datos del Anuario de Estadísticas Forestales del MITECO²³.

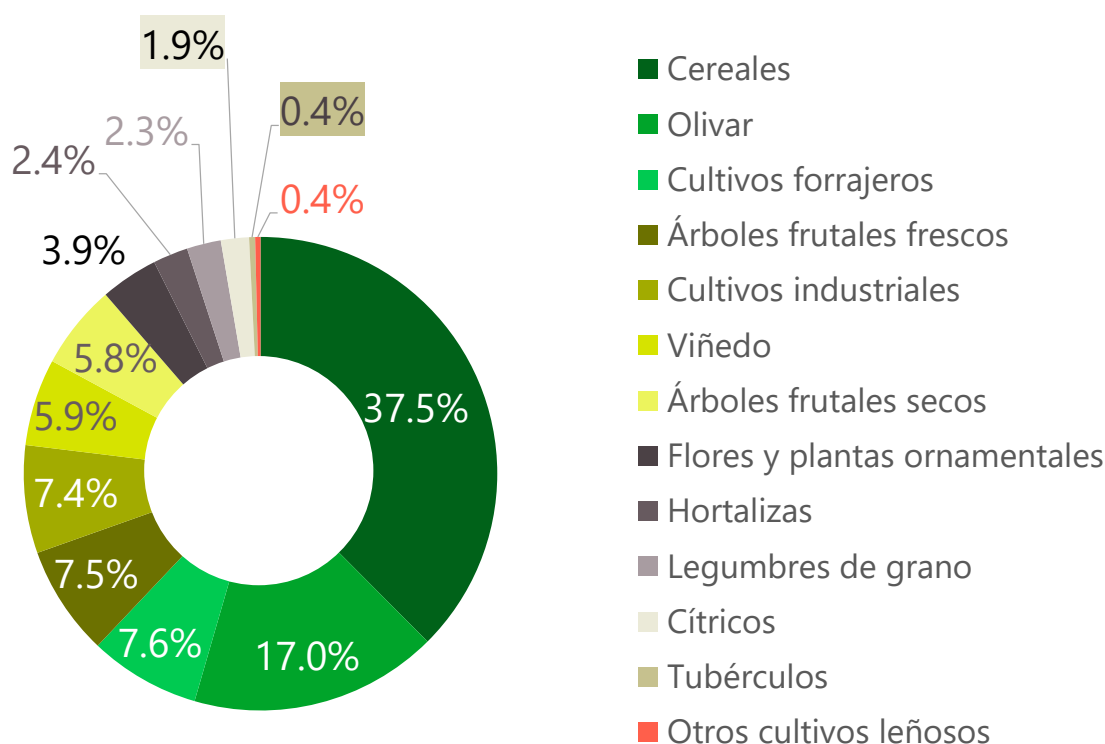


Figura 14. Superficie agrícola por tipo de cultivo en 2022, datos del Anuario Estadístico del MAPA²⁵.

Las tierras cultivadas, gracias a la gestión sostenible del suelo y a la inclusión de prácticas de agricultura de conservación, representan una fuente de secuestro de carbono. Además, los cultivos leñosos e incluso los cultivos anuales después de la cosecha dejan una gran cantidad de residuos que pueden utilizarse como materia prima de biomasa para otros métodos de CDR, es decir, biochar o BECCS. Estas tierras también están disponibles para actividades de ERW.

3.3.3 Escenarios de uso del suelo

A lo largo de los años, se han observado cambios en el uso del suelo en todo el territorio español que alteran la cantidad de carbono absorbido por los ecosistemas naturales. En la siguiente sección se examinan los cambios previstos para los usos del suelo no acuáticos, ya que los usos acuáticos se tratan más adelante.

La metodología utilizada para estimar la disponibilidad de tierra se basa en las siguientes referencias:

- La Estrategia Forestal Española, horizonte 2050²⁴.
- Áreas basadas en tendencias derivadas de los datos del MITECO para cada categoría de suelo.
- Las bases de datos «Corine Land Cover».
- El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), a través de las Encuestas de Superficie y Rendimiento de Cultivos (ESYRCE)²⁶.

En términos generales, el enfoque consiste en identificar los escenarios más favorables y desfavorables para los bosques (superficie forestal cubierta de árboles) y cuantificar sus cambios de superficie para 2030, 2040 y 2050. Debido a estos cambios en la superficie forestal, también se realizan estimaciones para las tierras agrícolas y los pastizales (incluidas las tierras forestales no arboladas) para los mismos años. Los datos se presentan como un rango que resume los resultados de tres escenarios de cambio de la superficie terrestre, con un primer valor correspondiente a un escenario en el que los objetivos establecidos en la estrategia forestal española se adoptan más lentamente de lo previsto, un segundo valor correspondiente a un escenario más optimista y, entre paréntesis, el escenario más realista.

Proyección para tierras de cultivo

Para 2050, se espera una reducción moderada de la superficie agrícola en España²⁷, más pronunciada en los cultivos anuales que en los permanentes, aunque no se prevé una pérdida drástica debido al crecimiento de la población y a la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria. Según las proyecciones, **las tierras de cultivo anuales disminuirían de 9,57 Mha a 9,46 Mha**, mientras que **las tierras de cultivo permanentes se mantendrían más estables, de 5,98 a 5,92 Mha**.

Tipo de tierra	Estimación actual	2030	2040	2050	Superficie disponible para CDR en 2050	% de superficie disponible para CDR de la superficie total en 2050
Cultivos anuales	9,57	9,49 – 9,56 (9,5) ▼	9,32 – 9,59 (9,47) ▼	9,26 – 9,60 (9,46) ▼	8,27	87%
Cultivos permanentes	5,98	5,91 – 5,99 (5,97) ▼	5,83 – 6,00 (5,94) ▼	5,76 – 6,01 (5,92) ▼	3,65	62%
Terrenos forestales	18,09	18,12 – 18,39 (18,2) ▲	18,23 – 18,75 (18,42) ▲	18,39 – 19,09 (18,69) ▲	14,92	80%
Pastizales y terrenos no arbolados	12,17	12,20 – 11,72 (11,92) ▼	12,28 – 11,41 (11,85) ▼	12,37 – 11,07 (11,77) ▼	11,77	100%

Tabla 5. Resumen de las estimaciones actuales y futuras del uso del suelo en España en Mha.

Factores como el abandono rural, la falta de renovación generacional, el estrés hídrico y las políticas de reforestación y renaturalización explican esta tendencia, que favorece la expansión forestal. En general, se prevé un paisaje agrícola más reducido, pero más sostenible, con una agricultura orientada a cultivos permanentes, ecológicos y resistentes al clima.

España es actualmente un país líder en agricultura ecológica, y las previsiones indican que esta superficie seguirá expandiéndose hasta 2050. Según las Estadísticas de Producción Ecológica del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA)²⁸, los cultivos ecológicos anuales podrían alcanzar 1,3 Mha (frente a los 0,6 Mha actuales), mientras que los cultivos ecológicos permanentes podrían pasar de los 0,85 Mha actuales a 2,3 Mha en 2050. Sin embargo, tal y como se señala en la Iniciativa 4 por 1000: El carbono orgánico del suelo como herramienta para la mitigación y adaptación al cambio climático en España, elaborada por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación²⁹, estas superficies no son compatibles con la agricultura de conservación (que es una práctica de CDR), por lo que las hectáreas disponibles para su aplicación se estimarán restando la superficie dedicada a la agricultura ecológica de la superficie agrícola total.

Proyección para las zonas forestales

En el escenario de mayores cambios, la superficie forestal (incluyendo solo las tierras forestales cubiertas de árboles) experimenta un crecimiento constante impulsado por las políticas de reforestación y la restauración ecológica. Este crecimiento superaría el objetivo fijado por la Estrategia Forestal Española horizonte 2050²⁴ de reforestar 0,6 Mha entre ahora y 2050. Pasaría de los **18,1 Mha** actuales a **19,1 Mha** en 2050, lo que refleja el crecimiento progresivo de los bosques gestionados y la conversión gradual de pastizales y tierras agrícolas marginales en zonas boscosas.

En el escenario conservador, la expansión forestal es limitada, alcanzando solo **18,4 Mha** en 2050, suponiendo una menor eficacia de la reforestación y un mayor impacto de los incendios forestales o las sequías.

En España existen dos mecanismos de certificación de la gestión forestal, el FSC y el PEFC. La superficie forestal disponible para la aplicación de la IFM sería la superficie forestal prevista menos la superficie forestal que se prevé que esté certificada por el FSC y el PEFC en 2050, según un escenario de tendencia. Además, España cuenta con 2,42 millones de hectáreas de terreno forestal destinado a dehesa; esta superficie se utiliza para la agrosilvicultura, por lo que la IFM no puede aplicarse en ella.

Proyección para los pastizales

Los pastizales y los terrenos forestales no arbolados muestran una ligera tendencia a la baja, pasando de los **12,2 Mha** actuales a **11,77 Mha** en 2050, según el escenario.

El escenario de grandes cambios prevé una contracción significativa (–9 %), asociada al abandono de la ganadería extensiva, la reforestación de las zonas forestales no arboladas y la renaturalización de estas tierras; el escenario conservador mantiene valores cercanos a los actuales debido al fracaso de los esfuerzos de reforestación, los incendios forestales y los efectos del cambio climático.

Las tierras forestales no arboladas se consideran potencialmente adecuadas para la aplicación de medidas de CDR mediante proyectos de reforestación y restauración ecológica. Según una proyección «sin cambios» o “business as usual” (BAU) elaborada a partir de datos históricos, se prevé que España cuente con alrededor de **8,4 Mha** de tierras forestales no arboladas en 2050. Estas tierras representan zonas no agrícolas sin un uso definido y son el único espacio donde se podrían establecer de forma realista nuevos pastos gestionados, ya que los pastizales existentes ya se consideran gestionados y necesarios para satisfacer la demanda alimentaria futura sin cambios importantes en la dieta. Solo una parte de los 8,4 Mha puede utilizarse para pastos, ya que la zona también debe dar cabida a la reforestación y la agrosilvicultura. El resto de los pastizales se destina a la gestión de pastos, lo que garantiza que toda la zona contribuya a la CDR mediante una combinación equilibrada de reforestación, agrosilvicultura y mejores prácticas de pastoreo.

Cuadro 1. El sistema de la dehesa

La agrosilvicultura en España se centra en la *dehesa*, un ecosistema mediterráneo seminatural con una capa arbórea abierta (principalmente encinas y alcornoques) combinada con pastos herbáceos para el pastoreo extensivo. Formada a través de la transformación histórica de los bosques mediterráneos, la *dehesa* integra la agricultura, la ganadería, los usos forestales (bellotas, leña, corcho) y diversas funciones ecológicas. Sus árboles dispersos y su baja cobertura de copas fomentan la biodiversidad, el uso multifuncional de la tierra y la resiliencia a las perturbaciones, lo que la convierte en uno de los paisajes culturales más valiosos de la Península Ibérica.

Las *dehesas* suelen presentar una fracción de cabida cubierta (FCC) del 5-65 %. Las zonas con una FCC del 5-20 % se clasifican como pastos, mientras que las que tienen una FCC del 20-60 % se clasifican como bosques. Un seminario organizado por la Sociedad Española de Ciencias Forestales, la UVA INIA, el CSIC y la Junta de Extremadura³⁰ informó de que el 31 % de la superficie de *dehesa* de España se encuentra dentro del rango de FCC del 5-20 %. Actualmente, alrededor de **1,09 Mha** de *dehesa* tienen una fracción de cabida cubierta inadecuada³⁰, debido a factores como el pastoreo excesivo, la falta de planificación en la gestión silvopastoral, la extracción excesiva de leña, la alta presión cinegética, los incendios forestales y, en los últimos años, la creciente incidencia de la pudrición de las raíces y otros procesos que provocan el declive, comúnmente agrupados bajo el término «*La Seca*», lo que las convierte en candidatas idóneas para los métodos de CDR.

3.3.4 Humedales y turberas

Los humedales, incluyendo pantanos, lagunas, cuencas salinas, turberas y marismas (IEZH, 2030), son ecosistemas acuáticos clave. Cuando se degradan, emiten gases de efecto invernadero, lo que agrava el cambio climático; por lo tanto, su restauración es una poderosa herramienta de mitigación. España alberga **647 kha de humedales**, de los cuales aproximadamente el 73 % (**488,51 kha**) se encuentran en un estado de conservación regular o malo (RAMSAR, MITECO). Las turberas son escasas y fragmentadas, y solo cubren **60 kha** (<0,04 % del territorio)¹⁶. Según el último informe sobre la Directiva de Hábitats de la UE (2013-2018), ninguna se encuentra en condiciones favorables: el 88 % se considera estar en estado inadecuado o malo, y el 12 % restante se desconoce (MITECO, 2018), lo que muestra un claro deterioro en comparación con 2007-2012, cuando ninguna turbera se consideraba mala o desconocida y una se consideraba favorable.

La restauración hidrológica, apoyada por la paludicultura y la supervisión, es clave para recuperar las turberas como sumideros de carbono. La experiencia nacional es limitada, pero los proyectos exitosos han aplicado técnicas del norte de Europa, principalmente el bloqueo de zanjas y la revegetación con *Sphagnum*. Aunque los resultados abarcan menos de cinco años, parecen muy eficaces. Entre las iniciativas de restauración, el proyecto LIFE Tremedal, en el norte de España, es el más grande (170 ha) y restaura turberas y humedales de montaña mediante el bloqueo del drenaje y la reforestación. Al elevar el nivel freático y restablecer la vegetación de los humedales, se consigue un enterramiento neto de carbono de aproximadamente 2,9 t CO₂/ha al año. Dos proyectos más pequeños, el piloto Turberas de Padul

(18 ha, Granada) y Tremedales de Orihuela (6 ha, Albarracín), también convirtieron fuentes de carbono en sumideros utilizando métodos similares.

En una trayectoria BAU, el único punto de referencia de España es su modesta tasa de restauración de humedales, sin pruebas de que los esfuerzos actuales puedan ampliarse para cerrar la brecha de sumideros de 2030. Para lograr un impacto a nivel de sistema se necesitaría un programa específico para las turberas con objetivos claros, financiación garantizada y un MRV estandarizado alineado con el PNIEC y las normas de la UE. Las acciones prioritarias incluyen la cartografía y clasificación de las turberas, la ampliación de las técnicas de restauración probadas y la garantía de un seguimiento a largo plazo.

Sin embargo, las turberas siguen teniendo una prioridad baja en la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo (ELP 2050). Es poco probable que se produzca una expansión, la degradación puede empeorar debido a las presiones del uso del suelo y el clima, y las iniciativas son limitadas, lo que hace improbable un impacto a gran escala. Incluso la restauración completa de las **60 000 hectáreas** de turberas degradadas solo produciría alrededor de **0,16 MtCO₂ al año**, lo que es un resultado poco realista incluso en un escenario muy ambicioso. Según los datos de LIFE Tremedal, Padul Wetland Pilot y Tremedales de Orihuela, un factor de enterramiento medio ponderado de 2,7 tCO₂/ha al año es una estimación razonable del potencial de CDR de las turberas españolas.

Sin avances hasta la fecha, el escenario de referencia presentado en la tabla 6 es el más realista. No obstante, a efectos comparativos, se han modelado trayectorias más optimistas para 2050: el caso ambicioso alcanza más del 500

Escenarios de turberas	Restauración anual en 2050 (kha)	Carbono capturado (ktCO ₂ /año)
P1: Referencia	0,18	0,51
P2: Conservador	0,73	1,97
P3: Referencia	0,90	2,46
P4: Ambicioso	0,97	2,61

Tabla 6. Posibles escenarios evaluados para la restauración de turberas para 2050. P4: Ambicioso es el que se supone en el escenario teórico descrito en el capítulo 4.

% por encima de la referencia, mientras que el escenario conservador ofrece aproximadamente cuatro veces la captura actual.

3.4 Zonas marinas costeras

España tiene 5.755 km de costa, 172.888 km² de aguas territoriales y una capacidad de procesamiento de agua salada de más de 1,97 bcm/año, de los cuales el 26 % (1.404.000 m³/d) corresponde a agua salobre. España tiene soberanía restringida sobre 104 Mha de espacio marino. El espacio marino es fundamental para determinar si el país puede implementar métodos de CDR marino, como la revegetación costera, la OAE y la captura directa del océano.

3.4.1 Infraestructura costera coherente para la CDR

España tiene una **importante capacidad de desalación**, que supera los 5 400 000 m³/día (**1,97 bcm/año**) para satisfacer su intensa demanda de agua, especialmente en las regiones costeras. Las plantas desalinizadoras pueden apoyar los métodos CDR utilizando sus residuos de salmuera para capturar y almacenar CO₂ mediante mineralización. Los métodos emergentes también utilizan procesos electroquímicos para convertir la salmuera en compuestos que absorben CO₂. La integración de la CDR en la desalinización aprovecha la infraestructura existente, lo que ofrece un doble beneficio para los objetivos hídricos y climáticos.

Las plantas desalinizadoras, en particular las situadas en regiones con escasez de agua en la cuenca mediterránea, ofrecen una oportunidad única para apoyar las CDR a través de mecanismos basados en el océano. Estas instalaciones producen grandes volúmenes de **residuos de salmuera ricos en minerales alcalinos** como el magnesio y el calcio, que son insumos clave para la OAE.

La planta desalinizadora de Carboneras, en el sureste de España, es una de las más grandes de la región y suministra agua dulce principalmente para uso agrícola. Según sus especificaciones técnicas, 1 m³ de agua desalinizada en esta planta genera aproximadamente 0,43 kg de emisiones de CO₂e, debido en gran parte al consumo de energía. Sin embargo, mediante la recuperación y la reutilización del subproducto salmuera, las plantas desalinizadoras como la

de Carboneras podrían adaptarse para servir no solo para la producción de agua dulce para satisfacer la demanda regional, sino también como fuente de materia prima mineral para la CDR.

La capacidad actual de desalinización en España se distribuye de la siguiente manera:

- Las grandes plantas, capaces de tratar más de 10 000 m³/día, representan **el 77 %** de la capacidad, con 1,52 bcm/año.
- Las plantas medianas, con capacidades de 500 a 10 000 m³/día, representan **el 22 %** de la capacidad, con 0,43 bcm/año.
- Las plantas más pequeñas solo representan **el 1 %** de la capacidad instalada, con 0,02 bcm/año.

Las precipitaciones en las zonas costeras de España son muy irregulares, con variaciones interanuales de hasta el 30 %. El consumo de agua de los hogares, los servicios, las industrias, el turismo y el consumo municipal solo representa entre el 15 % y el 20 % del volumen total, mientras que el uso agrícola del agua puede ser hasta seis veces superior.

El siguiente mapa (Figura 15) ofrece una evaluación de las regiones adecuadas para medidas de secuestro de carbono. El mapa destaca las grandes plantas desalinizadoras, cuyos vertidos de salmuera y las infraestructuras cercanas que bloquean las mareas (por ejemplo, los puertos) dificultan la supervivencia de la *Posidonia*, junto con las zonas costeras altamente pobladas que añaden nutrientes y posibles lixiviados al medio marino, así como las reservas marinas designadas que podrían ser adecuadas para la restauración de la *Posidonia*.

3.4.2 Zonas marinas para la restauración de pastos marinos

Debido a la sobreexplotación de los recursos marinos, España ha establecido 12 reservas marinas para apoyar la pesca sostenible y medidas de protección específicas para lograr la recuperación de especies de interés. Las 9 reservas marinas del Mediterráneo albergan densas praderas de *Cymodocea nodosa* y *Posidonia oceanica*. Dada la productividad de *Posidonia oceanica* en cuanto al enterramiento de carbono, la restauración de estas praderas ofrece importantes beneficios para la biodiversidad, el medio ambiente y la economía.

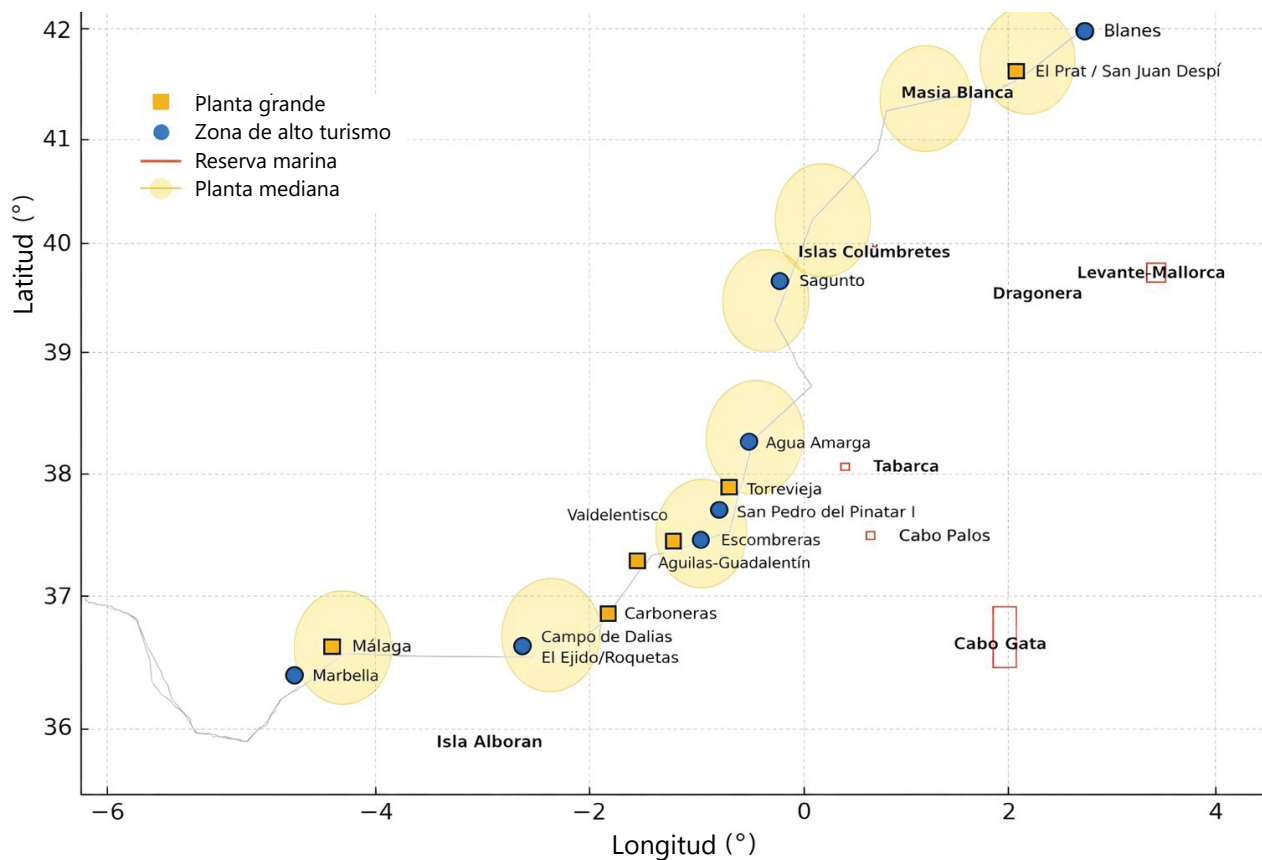


Figura 15. Mapa compuesto de zonas de alto turismo, plantas desalinizadoras y reservas marinas en el mar Mediterráneo español.

La Posidonia debe excluirse de los puntos críticos de fondeo, los vertidos de salmueras y las zonas altamente turísticas, donde sus condiciones de crecimiento son poco fiables. Las áreas protegidas bien gestionadas ofrecen la mejor viabilidad. La selección de los sitios debe eliminar las huellas de salmuera y la presión del fondeo, y luego priorizar las áreas según la luz, la turbidez, la exposición a las olas y el nivel de protección. Con los controles adecuados, la restauración de la Posidonia puede coexistir con las economías costeras.

Teniendo en cuenta estas limitaciones y considerando que la referencia es 0 kha, una superficie de restauración realista es de **9,91 kha**, con un máximo teórico de **13,19 kha** de las 49,6 kha que se han perdido en los últimos 50 años³¹.

Para evaluar el potencial de captura de carbono e identificar las zonas adecuadas para la restauración es necesario comprender la zonificación marina, ya que los usos permitidos determinan las técnicas que se pueden aplicar. El secuestro de CO₂ a largo plazo debe evaluarse mediante el enterramiento de carbono y no mediante la fijación neta, que solo refleja el crecimiento de la biomasa a corto plazo.

Bajo una estimación conservadora, una pradera de Posidonia sana contiene alrededor de 450 haces/m² (percentil 50-60), lo que equivale aproximadamente a 2,43 tCO₂/ha/año. Los proyectos de restauración en España muestran una tasa de supervivencia de la Posidonia superior al 91 % después de cuatro años, lo que demuestra que las praderas degradadas pueden restaurarse eficazmente.

Dada la importancia ecológica y la capacidad de secuestro de carbono de los ecosistemas de pastos marinos, la preservación de las praderas de Posidonia existentes y la recuperación parcial de las zonas degradadas deben tener prioridad sobre alternativas menos maduras o inciertas.

Estas estimaciones no tienen en cuenta los servicios ecosistémicos adicionales que proporcionan las praderas de Posidonia, como la mitigación de la acidificación oceánica. Un pH más bajo del agua marina aumenta la absorción de CO₂ atmosférico, ya que el gas es más soluble en agua que en aire; se estima que los océanos absorben entre el 30 % y el 40 % del CO₂ atmosférico, convirtiéndolo en ácido carbónico y reduciendo aún más el pH¹¹.

3.5 Condiciones naturales

La variada geografía y las zonas climáticas de España, desde el húmedo norte atlántico hasta el árido sureste mediterráneo, determinan la viabilidad y la durabilidad del CDR. Como se muestra en la figura E.1 del anexo E, predominan cuatro zonas climáticas principales:

- **Mediterráneo con veranos calurosos** (Csa): veranos calurosos y secos e inviernos de suaves a fríos y húmedos. Se extiende por toda la Península Ibérica, excepto el norte, las cordilleras, partes de Murcia, el sur de Valencia, y las Islas Canarias. Madrid es un ejemplo típico de esta zona climática.
- **Mediterráneo con veranos frescos** (Csb): similar al Csa, pero más fresco, sin meses con una temperatura media superior a 22 °C y con mayores precipitaciones. Se da en zonas elevadas y en partes de Galicia; Salamanca es un ejemplo representativo.
- **Estepa semiárida** (BSh/BSk): Concentrado en el sudeste de España, incluyendo Murcia, el sur de Valencia, Lanzarote y Fuerteventura. Se caracteriza por sequías y calor extremos en verano, inviernos suaves/cálidos y escasas precipitaciones, principalmente en primavera y otoño.
- **Océánico** (Cfb): Limitado al norte (nordeste de Galicia, País Vasco, Asturias, Cantabria y Navarra). Se caracteriza por lluvias frecuentes, nevadas ocasionales y temperaturas suaves/frescas sin calor ni frío extremos.

Las CDRs terrestre (bosques, suelos, humedales/turberas) son más fiables en las zonas Csb/Cfb, más frías y húmedas, donde el crecimiento de la biomasa y la humedad del suelo favorecen un mayor secuestro y un menor riesgo de reversión. En Csa y BSh/BSk, la sequía estival, las olas de calor y los incendios forestales elevan los riesgos de reversión y la demanda de agua; en estos casos, los proyectos deben favorecer los sistemas autóctonos adaptados a la sequía, las prácticas agrícolas eficientes en el uso del agua, la gestión de la carga de combustible y las hipótesis conservadoras de permanencia.

Las CDRs geoquímicas (ERW, mineralización del carbono) dependen tanto del calor como de la humedad. Las zonas Cfb con temperaturas templadas durante todo el año, y las primaveras y otoños de las zonas Csb, ofrecen las cinéticas más constantes. Las Csa puede proporcionar fuertes impulsos en invierno y primavera, pero se enfrenta a limitaciones de humedad en verano y a retos de control de la erosión y el polvo. La implementación de métodos de CDR en BSh/BSk requiere acceso a humedad adicional (por ejemplo, suelos irrigados o enriquecidos con materia orgánica) y una gestión cuidadosa del manejo de partículas y metales traza para evitar el polvo contaminante y la escorrentía, ya que, debido a las escasas precipitaciones, las partículas tienen un período de vida más largo y tienden a acumularse.

Las CDRs sintéticas (como DACCS/BECCS) se benefician de la abundante energía solar y de las crecientes plantas de energía

eólica, pero la ubicación del emplazamiento debe equilibrar la disponibilidad de agua y las cargas de refrigeración siendo esto más difícil en Csa/BSh que en Cfb/Csb que condiciones más suaves.

En todos los métodos, es esencial la ubicación conjunta con energía baja en carbono y (cuando sea pertinente) opciones de transporte y almacenamiento de CO₂. En general, España aboga por una estrategia de cartera: ampliar la energía terrestre y la ERW en Cfb/Csb; desplegar opciones de ingeniería donde se resuelvan las limitaciones de agua/energía en Csa/BSh; y combinar cada proyecto con MRV específico para el clima y planes de contingencia contra incendios/sequías.

3.6 Materias primas de biomasa

La producción total de biomasa en España asciende aproximadamente a 174 Mt, considerando el conjunto de materiales generados anualmente en los sectores forestal y agrícola, junto con corrientes de residuos biogénicos tales como estiércol y purines ganaderos, lodos de depuradora, residuos sólidos urbanos, residuos industriales, restos de poda y jardinería urbana, así como papel y cartón

De este total, España solo consume actualmente (2025) ~16 Mt de biomasa y residuos biogénicos con fines energéticos al año³². De esta cantidad, aproximadamente 9,1 Mt corresponden a biomasa forestal, 4,2 Mt a biomasa agrícola y agroindustrial y 2,9 Mt a residuos biogénicos, que incluyen estiércol y purines ganaderos, lodos de depuradora, residuos sólidos urbanos (RSU) y otros residuos biogénicos industriales (véase el anexo C.1). El aprovechamiento actual se basa principalmente en el uso de residuos forestales y agrícolas para combustión, cultivos energéticos tanto para fermentación como para combustión, y estiércoles y purines para la producción de biogás mediante digestión anaerobia

Dado que el consumo actual se sitúa muy por debajo del potencial disponible, y que se espera que la disponibilidad de biomasa varíe de forma mínima en el futuro, los valores de potencial de CDR se toman como referencia para la proyección a 2030 (Figura 16).

El siguiente mapa (Figura 17) muestra la distribución espacial de las instalaciones vinculadas a la bioenergía en España, incluyendo plantas de combustión de biomasa, instalaciones de biogás y sistemas de cogeneración que emplean combustibles renovables o derivados de residuos. La alta densidad de instalaciones, especialmente en regiones industriales como Cataluña, el País Vasco, Andalucía y Castilla y León, refleja la infraestructura existente que podría servir de base para un futuro despliegue de BECCS. Esta red pone de manifiesto oportunidades significativas para la integración de sistemas de captura de carbono tanto en la generación eléctrica como en la producción de calor a partir de fuentes biogénicas.

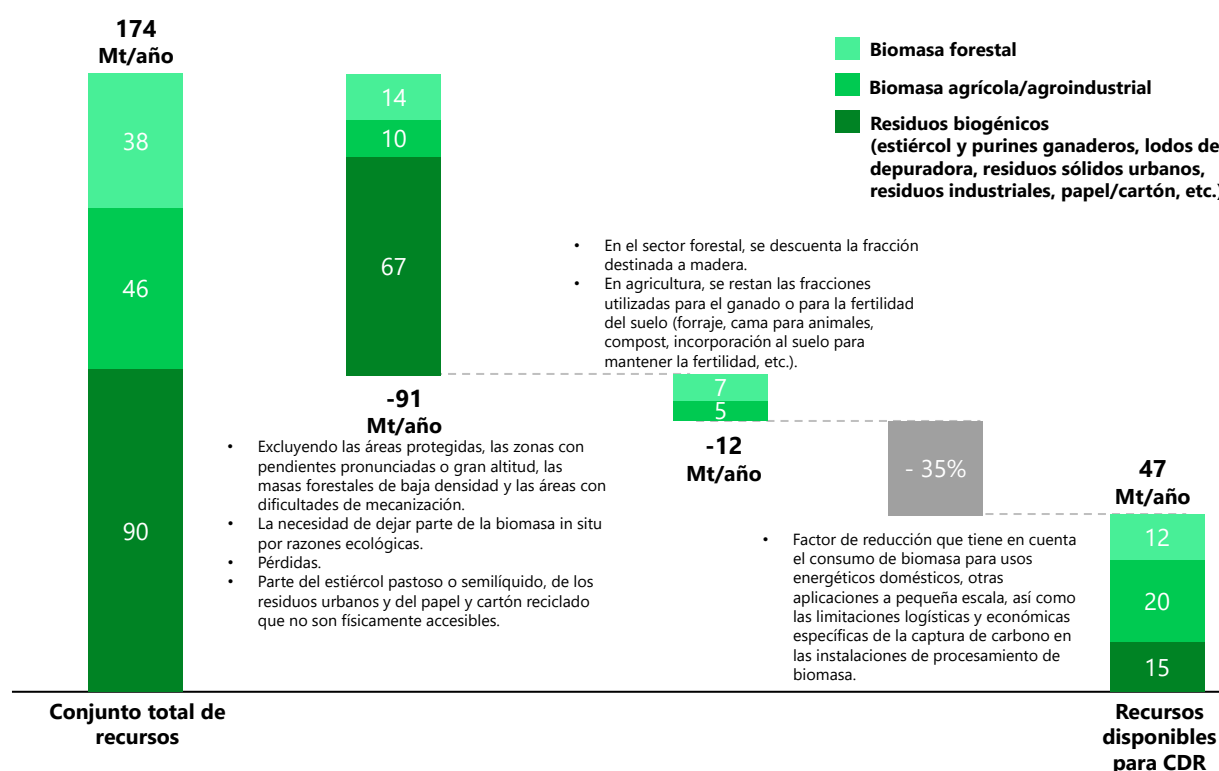


Figura 16. Biomasa disponible estimada para CDR, 2030, en Mt/año (DM o RM).

Las plantas de digestión anaerobia para la producción de biogás y biometano desempeñan un papel relevante en España, apoyadas en la abundante disponibilidad de estiércoles y purines ganaderos. Las instalaciones de combustión de biomasa las complementan al procesar corrientes de baja humedad o no adecuadas para digestión, como los residuos leñosos y lignocelulósicos. La cogeneración industrial realiza una contribución menor, pero pone de

relieve el aprovechamiento de subproductos agroindustriales, mientras que el sector del bioetanol aporta una mayor diversidad, basándose en cultivos ampliamente implantados como materia prima estable para biocarburantes de primera generación³⁸. Los procesos termoquímicos, como la pirólisis y la gasificación, aunque actualmente limitados a proyectos piloto, ofrecen vías complementarias para el tratamiento de residuos heterogéneos o de baja biodegradabilidad. Su

Recuadro 2. Metodología para estimar la biomasa disponible para CDR

Para estimar las materias primas de biomasa, el análisis comenzó considerando el conjunto total de materiales generados anualmente en los sectores forestal y agrícola, junto con corrientes de residuos biogénicos tales como estiércol y purines ganaderos, lodos de depuradora, residuos sólidos urbanos, residuos industriales, restos verdes urbanos, así como papel y cartón. A partir de este conjunto amplio, se definió el potencial accesible mediante la aplicación de restricciones técnicas y ecológicas: se excluyó la biomasa ubicada en espacios protegidos, pendientes pronunciadas, zonas de elevada altitud o masas de baja densidad. Asimismo, se tuvieron en cuenta las pérdidas inevitables y la necesidad de dejar parte del material en el terreno por motivos ecológicos. También se descontaron las fracciones de estiércoles, residuos urbanos y papel o cartón reciclados que no resultan físicamente recuperables.

El siguiente paso consistió en determinar el potencial disponible, restando la biomasa ya comprometida a otros usos. En el ámbito forestal, esto implicó descontar la fracción destinada a producción de madera, mientras que en agricultura se excluyeron las cantidades empleadas como forraje, cama para animales, compostaje o incorporación al suelo para el mantenimiento de la fertilidad. Finalmente, a partir de este potencial disponible, se aplicó una reducción adicional para estimar la fracción realísticamente accesible para CDR. Este ajuste tuvo en cuenta el consumo energético de los hogares, las aplicaciones a pequeña escala y las limitaciones logísticas y económicas específicas de la BECCS.

Fuentes principales: IDAE, «Evaluación del potencial de energía de la biomasa. Estudio Técnico PER 2011-2020»³³; informe del proyecto AGROALNEX «Evaluación de biomasa potencial en España a nivel provincial» (2023)³⁴; INE, Cuentas medioambientales: Cuenta de residuos (2023)³⁵; IDAE, «Uso energético de la biomasa, el biogás y los residuos. Situación en España, 2021 - Abril 2025»³²; RACVE (Real Academia de Ciencias Veterinarias), Ganadería y Medio Ambiente³⁶.

Instalaciones de cogeneración, residuos y biomasa/biogás

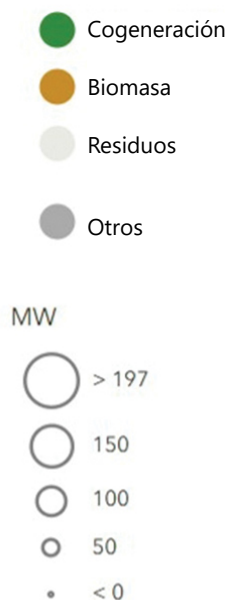
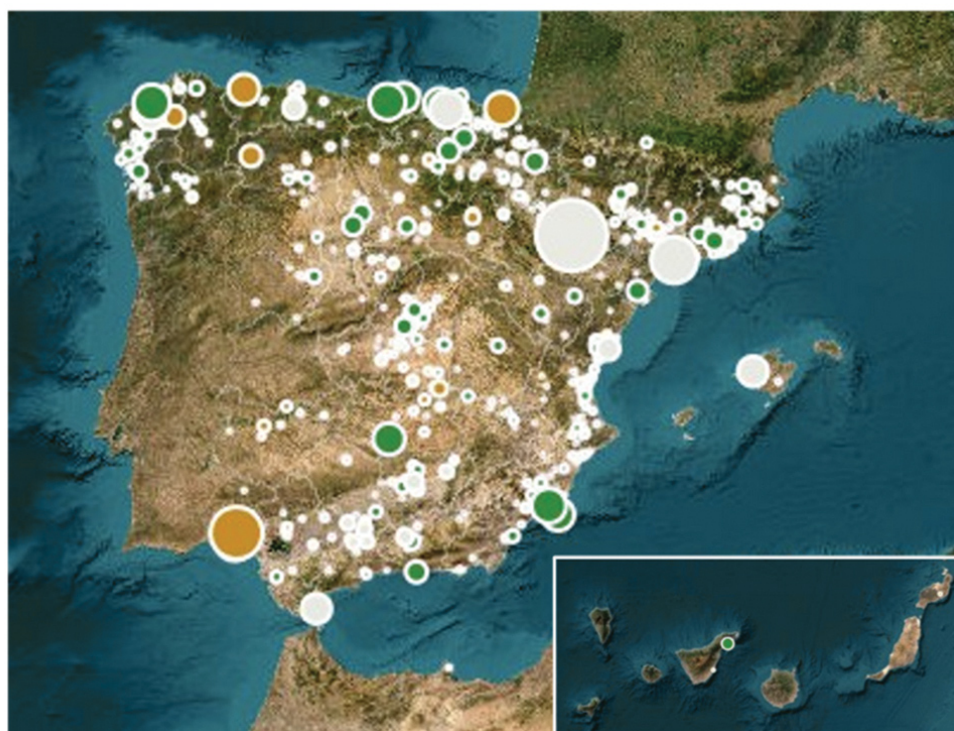


Figura 17. Instalaciones de cogeneración, residuos y biomasa/biogás en España. Fuente: Red Eléctrica Española (REE)³⁷.

desarrollo podría diversificar el portafolio de bioenergía y generar productos ricos en carbono, como el biochar, contribuyendo tanto a la eliminación de CO₂ como a la mejora de los suelos.

Actualmente, España **no** cuenta con **plantas comerciales de biomasa que operen con captura de CO₂**, ya que el país carece de almacenamiento comercial operativo de CO₂. No obstante, existen varios proyectos en fases tempranas que están explorando la captura de CO₂ de origen biogénico, principalmente con fines de utilización del CO₂ en lugar de su almacenamiento permanente. Entre ellos destacan el proyecto La Robla Green, en León, que prevé integrar captura de CO₂ en una nueva planta de cogeneración de biomasa de 50 MW³⁹, y la iniciativa de Magnon Green Energy en Huelva, cuyo objetivo es capturar CO₂ biogénico para la producción de combustibles renovables, como el e-metanol⁴⁰.

3.6.1 Escenarios de biomasa

La diversidad de recursos de biomasa en España ofrece un potencial significativo, con un potencial teórico estimado de alrededor de **~50 Mt** de materia seca (MtMS) **disponibles para CDR en 2050** (Figura 18). Las materias primas clave incluyen el estiércol y los purines ganaderos aptos para BECCS con digestión anaerobia, seguidos de los residuos agrícolas y forestales aptos para BECCS con combustión y captura de CO₂, y la producción de biochar mediante pirólisis.

Teniendo en cuenta la disponibilidad actual de biomasa y residuos en España, se espera que la evolución futura siga

las tendencias generales de la UE, lo que apunta a una combinación diversificada de materias primas, en la que el crecimiento de los residuos agrícolas y la mejora de los sistemas de recogida de residuos se vean compensados por límites de sostenibilidad más estrictos en la biomasa forestal⁴¹.

- Se prevé que **la biomasa forestal** se mantenga en niveles similares o disminuya ligeramente (-5 % a 0 %), lo que refleja las restricciones de sostenibilidad en la tala de troncos, la movilización de residuos forestales y la menor disponibilidad hídrica.
- Se espera que **la biomasa agrícola** experimente un ligero crecimiento (+4-8 %), gracias a la mejora de los sistemas de recogida y a la movilización controlada de los residuos de poda.
- Se prevé que **los residuos agroindustriales** se mantengan prácticamente estables, ya que están vinculados a los volúmenes de procesamiento de cultivos.
- Se espera que **los residuos biogénicos** contribuyan de manera más significativa para 2050 (+4-10 %), impulsados por las mejoras en la gestión de residuos y los sistemas de recogida selectiva.

De acuerdo con estas tendencias, los 47 MtMS de biomasa estimados para 2030 (Figura 18) podrían aumentar ligeramente hasta alcanzar unos **50 MtMS en 2050** (un incremento del 5-6 %), lo que constituye la cantidad estimada disponible para CDR en el potencial teórico. Se prevé que el potencial de biomasa de España se mantenga prácticamente estable, lo que proporcionará una materia prima constante, aunque limitada, para las futuras vías de bioenergía y de CDR.

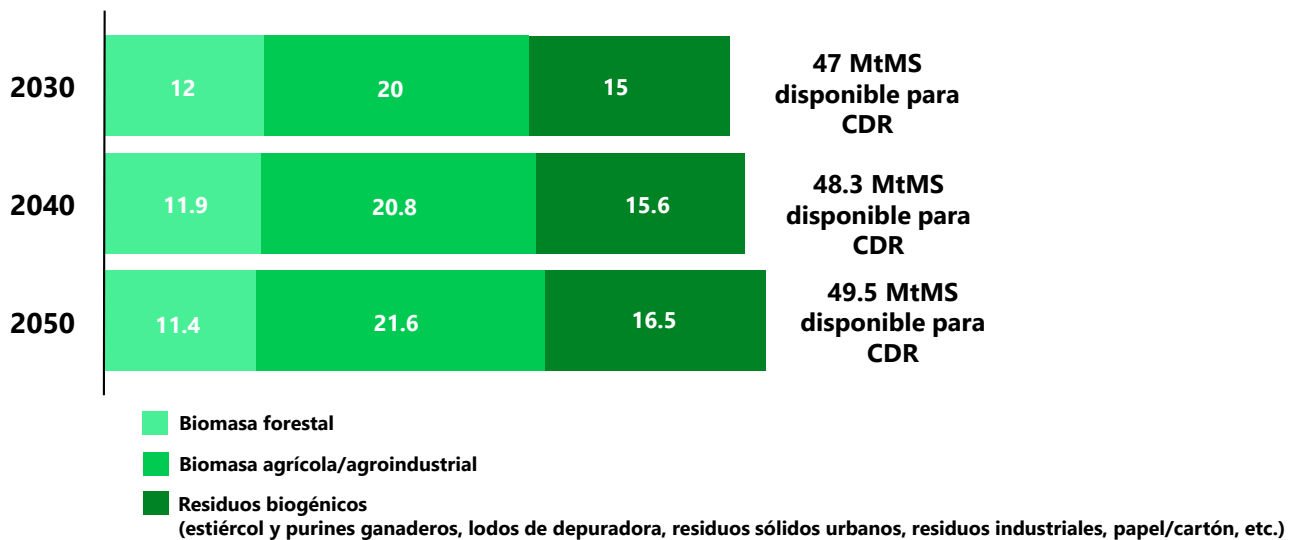


Figura 18. Biomasa teórica disponible para CDR en 2030, 2040 y 2050 desglosada por categoría³⁶. Las estimaciones para 2040 y 2050 aplican la tendencia de crecimiento proporcional de la UE por categoría.

Entre las diferentes categorías, se espera que los residuos forestales y agrícolas se utilicen de diversas maneras como materia prima para sistemas de combustión, gasificación o pirólisis integrados con la captura de CO₂.

Existen además planes estratégicos, como la «Hoja de ruta del biogás»⁴² y otros estudios que prevén un crecimiento de la producción de biogás/biometano. En consecuencia, se espera que el estiércol y los purines ganaderos sigan siendo una importante fuente de biomasa, representando una de las materias primas más relevantes para las aplicaciones de BECCS en España.

Otras fuentes de biomasa relevantes, como los residuos municipales, los lodos de tratamiento de aguas residuales urbanas y agroalimentarias, entre otras, proporcionan más material biogénico que podría valorizarse con fines energéticos y de captura de carbono.

En conjunto, todo ello pone de relieve la diversidad y el potencial de la biomasa en España, que ofrece oportunidades sustanciales para el despliegue de la bioenergía y las tecnologías BECCS. No obstante, la materialización de este potencial para la CDR dependerá de mejoras en los sistemas de recogida, la logística regional, la competencia con otros usos (por ejemplo, enmiendas al suelo o alimentación animal), así como del desarrollo de infraestructuras eficientes de conversión y captura de CO₂.

3.6.2 Almacenamiento de CO₂ en la madera de edificios duraderos

La madera estructural, como la madera contralaminada (cross-laminated timber, CLT), es un producto biológico duradero que almacena carbono durante toda la vida útil

de un edificio. En España, la CLT es el principal producto de madera técnica empleado en la construcción. Según el informe 2023-2024 de Mass Madera⁴³, la CLT representó entre el 0,5 % y el 1 % de las nuevas construcciones en 2022, con un potencial de alcanzar entre el 1,5 % y el 2 % a plena capacidad industrial y alrededor del 3 % en 2026, impulsado por la disponibilidad de recursos forestales, las inversiones en capacidad productiva, la innovación y un marco normativo favorable a la descarbonización.

En 2024, se aprobaron unos 35 millones de m² de superficie construida para obra nueva y rehabilitación, con 25,5 millones de m² para nuevas construcciones⁴⁴, el segmento en el que la madera estructural es más común. Suponiendo un uso de CLT del 1,5 %, un consumo de 0,25 m³ de madera por m² construido⁴⁵ y un almacenamiento de 0,9–1 tCO₂ por m³ de madera⁴⁶, **se estima que el volumen de CLT actual en los edificios es de ~95.500 m³, lo que supone un almacenamiento anual de 0,86-0,95 MtCO₂, en 2024.**

La superficie de nueva construcción se ha mantenido estable en los últimos años (23-26 millones de m² anuales)⁴⁷, lo que sugiere un nivel de actividad constante. Si se mantienen constantes **los 24.5 millones de m²** y el uso de CLT alcanza el 3 %, el carbono almacenado en los edificios de madera en **2030** podría ser de aproximadamente **183.750 tCO₂**.

Sin embargo, los **datos y las proyecciones** disponibles **son insuficientes para proporcionar estimaciones sólidas** del almacenamiento de carbono en los edificios de madera **para los años 2040 y 2050**. Debido al carácter a largo plazo de estas previsiones y a las incertidumbres que rodean las tendencias futuras en materia de construcción, capacidad industrial y evolución de las políticas, las estimaciones no serían fiables.

Por razones prácticas, y para garantizar la coherencia de los cálculos presentados en los capítulos siguientes de este informe, el valor estimado para 2030 también se ha utilizado como aproximación para los horizontes de 2040 y 2050 en la evaluación del potencial de CDR.

Si bien la contribución de la construcción en madera al almacenamiento de CO₂ está creciendo, su magnitud sigue siendo muy limitada en comparación con las opciones de almacenamiento geológico. Incluso en escenarios optimistas, el carbono almacenado en edificios de madera alcanzaría únicamente cientos de miles de toneladas anuales, mientras que el almacenamiento geológico en España presenta un potencial técnico del orden de cientos de millones de toneladas al año. Por ello, la construcción en madera debe considerarse una solución complementaria y de nicho, que contribuye a la descarbonización de materiales y a la circularidad, pero no como un sustituto de las estrategias de almacenamiento de carbono a gran escala, como el almacenamiento geológico.

3.7 Recursos minerales

Una variedad de materias primas minerales puede desempeñar un papel clave en la captura, almacenamiento o unión química al CO₂, permitiendo métodos de CDR como ERW u OAE y métodos de almacenamiento como la mineralización ex situ. Entre las más relevantes se encuentran las rocas/minerales ricos en calcio y magnesio de forma natural, como la caliza, la dolomita y el basalto, que pueden generar alcalinidad, potenciar los procesos de meteorización o favorecer la carbonatación mineral.

España también tiene un potencial adicional para métodos geoquímicos de CDR que aprovechan rocas madres máficas y ultramáficas como la dunita, la peridotita o la harzburgita disponibles en la superficie o cerca de la superficie⁴⁸. Las áreas expuestas representan solo varios miles de kilómetros cuadrados, y el potencial de CDR se ha estimado en ~133 MtCO₂ eliminadas durante un período de 70 años, equivalente a aproximadamente 1,9 MtCO₂/año en promedio. Sin embargo, acceder a estas rocas requeriría abrir nuevas minas, mientras que la mayoría de las áreas consideradas se encuentran actualmente bajo regímenes de protección medioambiental.

La disolución de estas rocas en contacto con CO₂ y agua almacena el carbono en iones estables, proporcionando una forma permanente de almacenamiento de carbono. Para una cinética eficaz, las rocas/minerales deben molerse hasta obtener polvos finos, aumentando la superficie reactiva. Aunque las rocas completas podrían molerse intencionadamente para la CDR, este proceso es intensivo en energía, lo que reduce la eficiencia global del proceso desde el punto de vista del análisis del ciclo de vida. Las operaciones mineras, así como la trituración de estas rocas hasta obtener un tamaño agregado, ya generan corrientes de partículas

finas que a menudo no se utilizan y representan frutos fáciles para aplicaciones de CDR a corto plazo.

Los subproductos industriales como la escoria de acero o el polvo de horno de cemento (ERC) también pueden servir como fuentes minerales suplementarias para aplicaciones de CDR, aunque con desafíos adicionales relacionados con una mayor toxicidad. Estas materias primas resultan de la producción de acero y cemento con tasas medias del 15-20 %, respectivamente. Por ello, analizamos las tendencias proyectadas para la producción de acero y cemento para estimar la posible disponibilidad de estos subproductos.

Las **fracciones de residuos de materias primas minerales adecuadas para la CDR** se estimaron en este estudio en **20-25 Mt** de residuos de piedra caliza, **2,3-2,9 Mt** de residuos de dolomita, 0,08-0,25 Mt de residuos de basalto y 2,58 Mt de residuos de cemento, lo que proporciona material de grano fino listo para su aplicación en el suelo o en la costa. Para 2050, la producción mineral podría mantenerse en **157 Mt** (BAU) o aumentar hasta **268 Mt** (escenario de crecimiento), impulsada principalmente por la demanda de la construcción. Residuos industriales como **1,9 – 2,5 Mt** de escorias de acero también representan una corriente prometedora de materia prima.

3.7.1 Disponibilidad actual de minerales

España produce volúmenes significativos de minerales adecuados para la CDR. En 2023, la producción incluyó **89,3 Mt de piedra caliza, 10,5 Mt de dolomita y 1,7 Mt de basalto**⁴⁹. El corte y/o la manipulación de estos materiales genera partículas finas que, en la actualidad, son en su mayoría un producto de desecho, pero que pueden utilizarse para la CDR.

La figura 19 muestra los volúmenes históricos de producción de piedra caliza, dolomita y basalto. En general, los datos reflejan una tendencia al alza en la disponibilidad de estos materiales a lo largo del tiempo, lo que respalda la posible ampliación de la ERW en las próximas décadas. En 2023, la piedra caliza representa la materia prima dominante, con aproximadamente el 82 % de la producción total, seguida de la dolomita, con un 10 %, y el basalto, con alrededor del 1 %.

España es un exportador neto de estos minerales: las importaciones de piedra caliza son insignificantes, mientras que en 2023 las exportaciones de basalto y dolomita superaron a las importaciones en un 21 % y un 783 %, respectivamente^{50,51,52}. Se espera que la extracción de estos minerales tenga un impacto medioambiental menor que la minería de metales y no requiera ningún procesamiento tóxico, lo que reduce las barreras para su expansión. Sin embargo, debe tenerse en cuenta el efecto del tratamiento y el transporte.

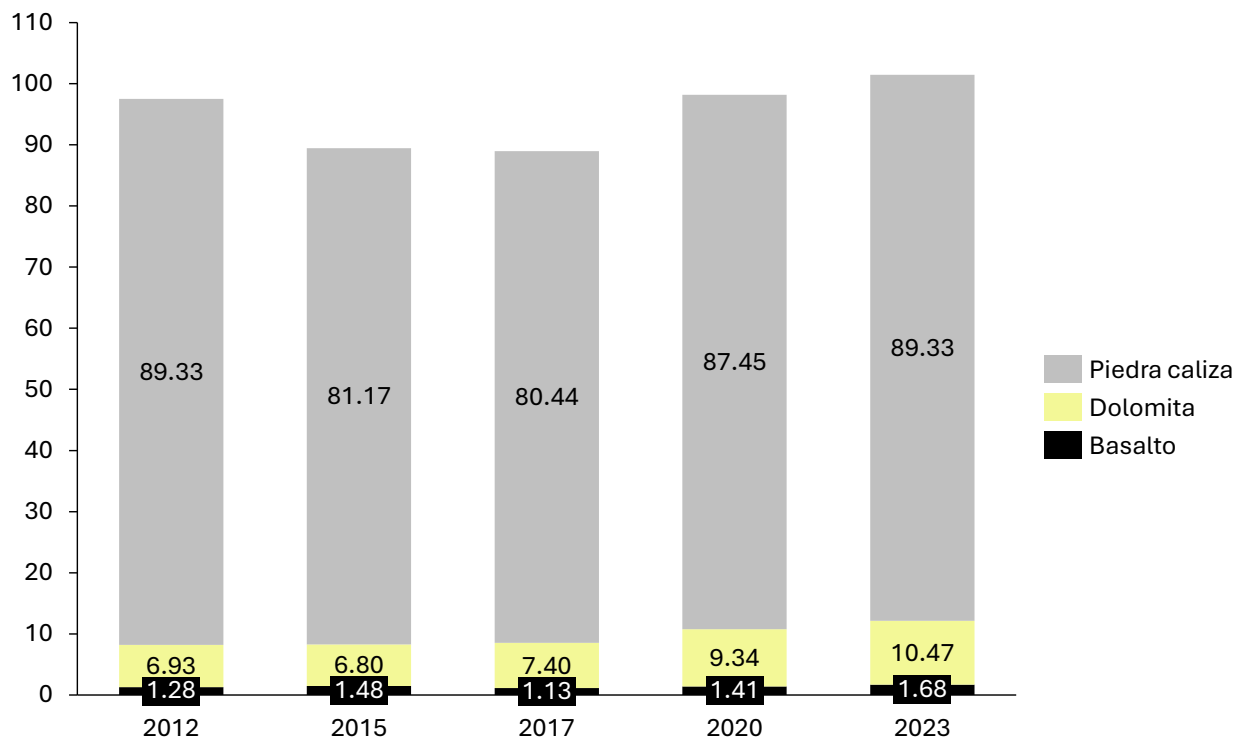


Figura 19. Volúmenes históricos de producción de piedra caliza, dolomita y basalto⁴⁹.

La distribución geográfica de estos minerales en España se muestra en Figura 20. Geográficamente, las zonas más prometedoras para la ERW debido a la disponibilidad de recursos son Galicia, las Islas Canarias (basalto) y Andalucía (caliza y dolomita).

La producción de acero en España fluctuó entre **11 y 14 Mt** al año entre 2019 y 2023⁵⁴. Como subproducto infrautilizado, la escoria de acero puede servir como materia prima prometedora para la CDR. Dado que la escoria suele representar entre el 15 % y el 20 % de la producción de acero, los niveles de producción actuales producen aproximadamente **entre 1,65 y 2,8 Mt** de escoria de acero al año⁵⁵. No se han encontrado datos sobre las previsiones.

La producción de cemento ha aumentado ligeramente hasta alcanzar **los 19 Mt** en 2023. Teniendo en cuenta una ratio conservadora de 150 kg de polvo de horno de cemento (CKD, por sus siglas en inglés) por tonelada de cemento producido, hemos estimado la disponibilidad total de CKD en **2,85 Mt**. No se ha encontrado información oficial sobre los usos actuales del polvo de horno de cemento (Cement Kiln Dust) en España. En la práctica, se espera que el CKD se reintegre en gran medida en el proceso de producción de cemento, siempre que sea técnicamente viable.

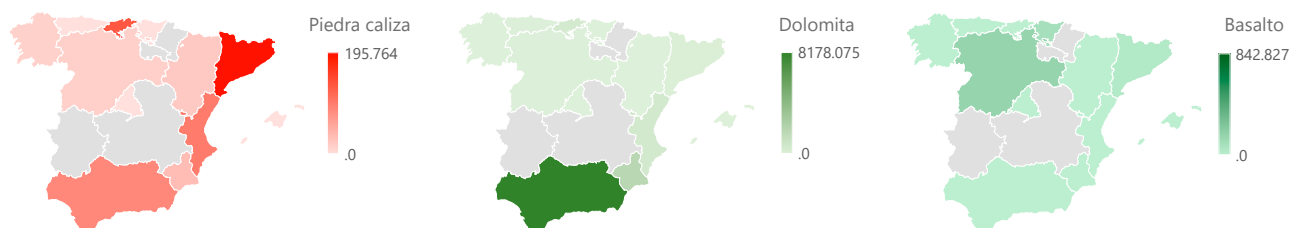


Figura 20. Distribución geográfica de los volúmenes de producción de dolomita caliza y basalto en España en 2022⁵³. Datos en kt.

3.7.2 Escenarios de disponibilidad de minerales

No se han encontrado escenarios/datos publicados recientemente que proyecten la producción de los minerales/rocas considerados hasta 2050. Por lo tanto, se consideran dos escenarios simples para la producción de minerales, **que dependen** en gran medida **del crecimiento del sector de la construcción**.

- El primer escenario es un escenario BAU, que considera un crecimiento lineal basado en datos históricos de 2012 a 2023, suponiendo que ningún factor político o económico provoque un cambio significativo en la producción o la demanda. Este escenario alcanza una producción mineral total de **157 Mt** en 2050, con la piedra caliza, la dolomita, el cemento, el basalto y las escorias de acero contribuyendo con 98 Mt, 23 Mt, 29 Mt, 2 Mt y 14 Mt, respectivamente (extremo inferior del rango de la tabla 7).
- El segundo escenario es un escenario de alta producción que supone un aumento anual del 3 % en el sector de la construcción a partir de 2023⁵⁶ (que tiene en cuenta el aumento de la inversión extranjera, la disminución de la inflación, el aumento de los permisos de construcción y el importante gasto público en proyectos ecológicos y de infraestructura), lo que da lugar a una producción

mineral total de **268 Mt** para 2050, con una contribución de la piedra caliza, la dolomita, el cemento, el basalto y las escorias de acero de 198 Mt, 27 Mt, 42 Mt, 4 Mt y 28 Mt, respectivamente (el extremo superior del rango de la tabla 7).

3.7.3 Potencial mineral para la captura y almacenamiento de carbono (CDR)

En este informe, **se parte del supuesto de que solo los residuos generados al cortar/triturar minerales** (es decir, residuos de piedra) **y escorias estarán disponibles para CDR**. Esto concuerda con otros estudios^{57,58} que consideran estos subproductos como opciones prometedoras a corto plazo para los REI en España debido a su tamaño de grano fino, su composición química y su proximidad a zonas industriales y agrícolas.

Si bien los minerales considerados se utilizan principalmente para la construcción, una parte significativa se convierte en residuos de grano fino durante el corte y el procesamiento. Las tasas de residuos varían según el tipo de mineral y se estima que oscilan entre el 22,5 % y el 28 % en el caso de la caliza o la dolomita^{57,58}. En el caso del basalto, se estima que la tasa de residuos es del 5-15 %⁵⁹.

Parámetro	Piedra caliza	Dolomita	Basalto	Cemento/CKD	Acero/escoria
Producción (Mt)					
Actual	89,3	10,5	1,7	19	12,4
2030	91,2 – 109,9	12,9 – 15,4	1,7 – 2,1	21,2 – 23,4	12,6 – 15,2
2040	94,7 – 147,6	17,3 – 21,3	2 – 2,8	25,2 – 31,4	13,1 – 20,5
2050	98,3 – 198,4	23,3 – 27	2,3 – 3,7	29,3 – 42,4	13,6 – 27,5
Generación de residuos (Mt)					
Tasa de residuos	22,5 – 28 %	22,5 – 28 %	5 – 15 %	15 %	15-20 %
Presente	20,1 – 25	2,4 – 2,9	0,08 – 0,25	2,9	1,9 – 2,5
2030	20,5 – 30,8	2,9 – 4,3	0,08 – 0,31	3,2 – 3,5	1,9 – 3,1
2040	21,3 – 41,3	3,9 – 5,9	0,10 – 0,42	3,8 – 4,7	2 – 4,1
2050	22,1 – 55,6	5,3 – 7,6	0,11 – 0,56	4,4 – 6,3	2 – 5,5
Recogida de residuos (Mt)					
Actual	2	0,2	0,008	incierto	incierto
2030	2,05	0,3	0,01	incierto	incierto
2040	2,13	0,3	0,01	incierto	incierto
2050	2,2 – 3,9	0,5 – 0,6	0,01 – 0,03	incierto	incierto
Otros problemas					
Idoneidad	Encalado oceánico, enmiendas del suelo	Encalado oceánico, agricultura	Esparcimiento en campos agrícolas	Encalado oceánico, agricultura	Mezcla agrícola
Posibles obstáculos	Necesidad de calcinación y/o pulverización	Priorización industrial	Producción limitada	Gestión de residuos	Regulación, ubicaciones distribuidas

Tabla 7. Estimación de la producción y los residuos de materias primas minerales clave adecuadas para CDR.

La tabla 7 muestra la generación estimada de residuos a partir de materias primas minerales adecuadas para CDR. Sobre la base de los rangos mostrados, la disponibilidad teórica máxima de minerales para CDR se estimó en **27-38 Mt para 2030, 30-51 Mt para 2040 y 32-69 Mt para 2050**, reflejando los valores más bajos la vía NCS y los valores más altos el escenario de alta producción. Sin embargo, para el escenario realista, se hizo una suposición conservadora de que **el 10 % de la fracción total de residuos generados para piedra caliza, dolomita y basalto** se recoge efectivamente como un flujo de materiales separado (lo que refleja las limitaciones operativas o la recirculación interna), alcanzando entonces **2,3-3,8 Mt para 2030, 2,5-5,1 Mt en 2040 y 2,7-6,8 Mt en 2050**. Las previsiones sobre la generación de escoria de acero partieron del supuesto de que la producción futura de acero aumentaría al mismo ritmo que la de cemento, ya que estas industrias están muy correlacionadas. Para CKD y escorias de acero, la fracción de recogida de residuos utilizada para la CDR puede ser incierta dadas las limitaciones técnicas en las instalaciones, así como los usos actuales y/o potenciales de estos flujos de residuos.

Los proyectos piloto a corto plazo podrían centrarse en los residuos del corte de piedra y la escoria de la fabricación de acero, que requieren una extracción mínima. El avance de este enfoque exige nuevos sistemas logísticos y de trazabilidad, consideraciones medioambientales y modelos de negocio que vinculen los residuos minerales con el uso agrícola. Dado el equilibrio entre volumen y reactividad, el despliegue de baja barrera debería dar prioridad a los materiales de desecho fácilmente disponibles y que se integren fácilmente en las prácticas agrícolas o costeras actuales.

3.8 Almacenamiento de CO₂

España cuenta con un potencial acumulado estimado de 11 GtCO₂ en formaciones geológicas (concretamente, trampas)⁶⁰, **aunque actualmente carece de sitios de almacenamiento comerciales operativos**. El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) ha identificado 85 zonas potencialmente adecuadas⁶⁰, la mayoría de las cuales se encuentran en un nivel bajo de madurez (SRL 2-4). No obstante, la capacidad teórica de almacenamiento podría aumentar en el futuro, ya que hay unidades de almacenamiento con un potencial no evaluado o no comunicado, debido principalmente a las restricciones de confidencialidad de los datos y a la limitada disponibilidad de información geológica detallada⁶¹.

La iniciativa más avanzada es el proyecto TarraCO₂⁶² en Tarragona, respaldado por la UE, con una capacidad prevista de **2 MtCO₂ al año a partir de 2030** y un potencial máximo de almacenamiento de 54 MtCO₂, sujeto a la viabilidad técnica y la autorización ministerial. Asimismo, en España existen potenciales teóricos de almacenamiento de CO₂ mediante mineralización in situ (capacidad acumulada de ~1,8 GtCO₂ en rocas máficas-ultramáficas) y vías ex situ (~7,7 MtCO₂/año a partir de residuos industriales alcalinos);

sin embargo, se espera que ambos potenciales se **reduzcan considerablemente** en la práctica, debido a factores como la accesibilidad, la cinética de reacción, la disponibilidad de agua, las infraestructuras y la aceptación social. En el caso de la mineralización ex situ, la estimación de 7,7 MtCO₂/año también incluye otras vías geoquímicas (como la alcalinización oceánica ex situ (OAE), el encalado oceánico, la meteorización acelerada de rocas (ERW), la carbonatación mineral de materiales ricos en alcalinos, y los procesos de separación electroquímica), lo que significa que la fracción estrictamente mineralizada sería aún menor.

Es importante aclarar que, aunque este informe se refiere a proyectos, capacidades de almacenamiento geológico e infraestructuras que actualmente se conciben y desarrollan principalmente para la captura y almacenamiento de carbono de fuentes industriales (CCS), en realidad, estas mismas infraestructuras podrían utilizarse en el futuro para gestionar el CO₂ capturado mediante métodos de eliminación de dióxido de carbono como BECCS o DACCS. Si bien CCS y CDR son conceptos distintos, el primero se refiere a la captura de CO₂ de fuentes puntuales industriales y el segundo a la eliminación del CO₂ atmosférico, ambos requieren infraestructuras similares para el transporte y almacenamiento seguro y permanente del CO₂. Por lo tanto, la existencia y el desarrollo de esta infraestructura es relevante para ambos enfoques. De hecho, en el futuro, todas las fuentes de CO₂ del país (ya sean de CCS o de CDR) competirán por el acceso a los mismos emplazamientos de almacenamiento e infraestructuras de transporte. Por esta razón, es esencial mencionar y analizar estas infraestructuras en el contexto de la CDR, aunque actualmente solo se estén considerando para CCS.

En la actualidad, no existen en España proyectos o infraestructuras dedicadas específicamente a la CDR, por lo que para analizar el potencial realista de despliegue de CDR es necesario trabajar con la información disponible, que por ahora es limitada y se centra en la CCS. Este enfoque permite identificar las oportunidades y limitaciones reales para el futuro despliegue de la CDR, partiendo de la premisa de que la infraestructura desarrollada para la CCS puede aprovecharse, adaptarse o ampliarse para la gestión del CO₂ capturado mediante métodos de CDR.

3.8.1 Almacenamiento geológico de CO₂

España ha dado algunos pasos en el desarrollo del almacenamiento geológico de carbono, en particular mediante la ratificación de la enmienda de 2006 al Protocolo de Londres⁶³, que permite el almacenamiento de CO₂ bajo el lecho marino.

La Comisión Europea ha promovido una serie de iniciativas estratégicas, en las que ha participado España, destinadas a avanzar en la identificación de zonas adecuadas para el almacenamiento subterráneo de CO₂, entre las que destacan

los proyectos CO₂Stop^c y Hystories⁶¹, cuyos datos se han integrado en el proyecto GSEU (Geological Storage for Europe). Esta última iniciativa ha dado lugar a la creación de una base de datos geológicos armonizada para todo el continente y ha dado como resultado el Atlas GCS paneuropeo⁶⁴, una valiosa herramienta cartográfica técnica y estratégica. El Atlas representa el potencial de almacenamiento a través de tres capas anidadas⁶¹:

- **Formaciones:** grandes zonas rocosas porosas y permeables que cumplen los criterios geológicos nacionales.
- **Unidades de almacenamiento:** secciones más profundas (>800 m) dentro de las formaciones, adecuadas para mantener el CO₂ en estado supercrítico y cubiertas por roca impermeable para garantizar la integridad del almacenamiento.
- **Trampas:** estructuras geológicas específicas, como domos o yacimientos de hidrocarburos agotados, que confinan de forma segura el CO₂ y sirven como objetivos clave para las evaluaciones de la capacidad y la madurez del almacenamiento. Por lo tanto, las trampas son el nivel de análisis más detallado.

Aunque **España no cuenta actualmente con ningún emplazamiento geológico comercial operativo para el almacenamiento de CO₂**, su capacidad teórica de almacenamiento se estima en alrededor de 11 GtCO₂ (IGME, 2024)⁶⁰ en 75 trampas en acuíferos salinos y 10 en yacimientos de hidrocarburos agotados. Estas trampas están distribuidas de forma desigual, siendo las regiones central y nororiental las más prometedoras (véase Figura 21). Otras unidades no caracterizadas podrían aumentar esta estimación, aunque la falta de datos y la confidencialidad limitan las evaluaciones actuales³⁶.

Otros estudios, como el de Clean Air Task Force (2023)⁶⁵, sugieren un rango más amplio de 12-44 GtCO₂, lo que refleja el alto grado de incertidumbre en los conocimientos geológicos actuales. En este estudio, la cuenca del Ebro destaca como una de las regiones más prometedoras para el futuro almacenamiento geológico de CO₂ a gran escala. Esta zona incluye importantes núcleos industriales, como Tarragona y el sur de Aragón, y contiene acuíferos salinos profundos, tanto en tierra como en mar, que han sido preseleccionados preliminarmente como formaciones de almacenamiento adecuadas. Según evaluaciones recientes, la cuenca podría ofrecer una capacidad de almacenamiento efectiva estimada de aproximadamente 0,85-1 Gt CO₂⁶⁶.

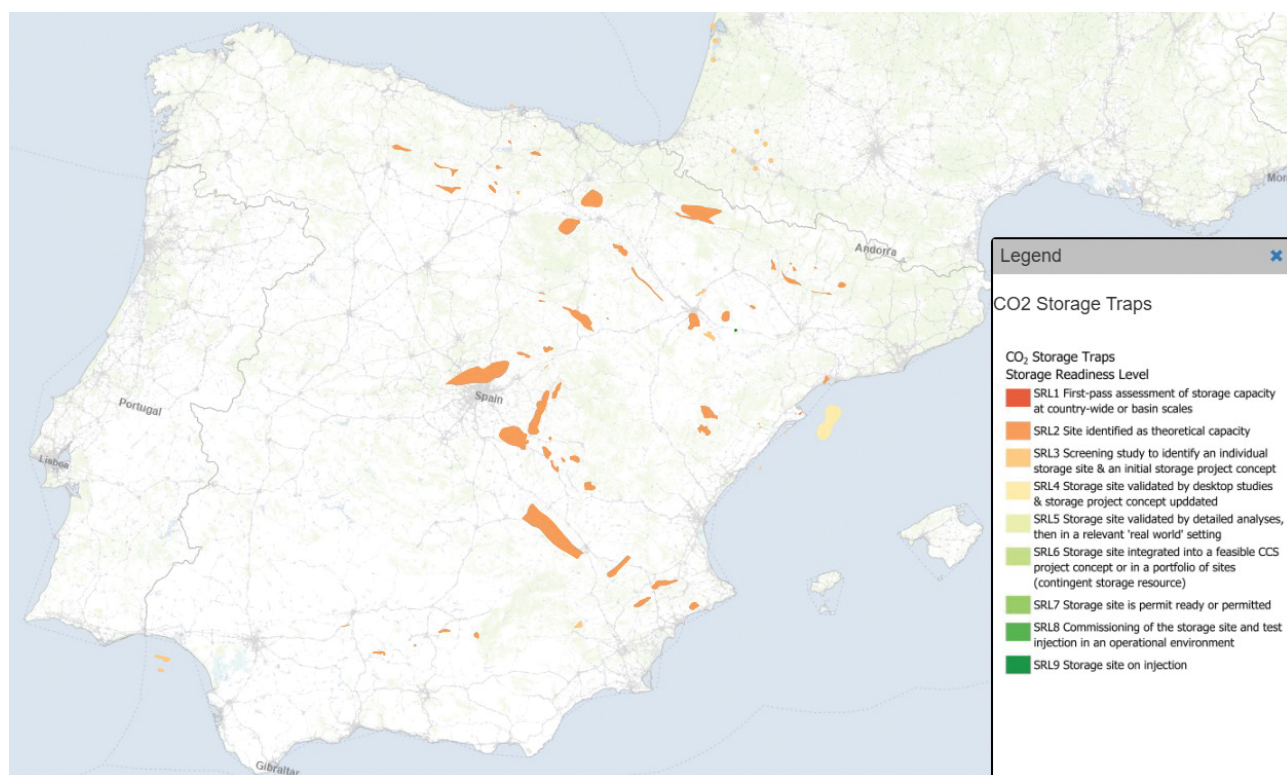


Figura 21. Reservas geológicas para el almacenamiento de carbono en España (las Islas Canarias se excluyen de la ilustración, ya que no tienen potencial de almacenamiento identificado)⁶⁴.

c. El proyecto CO₂Stop estableció una metodología que combina modelos volumétricos para calcular el volumen de poros disponible, junto con la aplicación de la eficiencia de barrido, los factores de saturación y la densidad del CO₂ en condiciones de yacimiento.

Aunque actualmente no hay instalaciones comerciales de almacenamiento de CO₂ en funcionamiento, existe un centro de investigación a escala piloto dedicado al desarrollo y la validación de métodos de almacenamiento geológico. En este contexto, la Planta de Desarrollo Tecnológico (PDT) de *Hontomín*, situada cerca de la ciudad de Burgos, en España, sirve como centro experimental de referencia y está reconocida por el Parlamento Europeo como una infraestructura clave para la realización de ensayos de almacenamiento geológico de CO₂. Gestionada por la Fundación Ciudad de la Energía (CIUDEN), constituye la única instalación activa de inyección de CO₂ en tierra firme de la Unión Europea, que opera exclusivamente con fines de investigación, ensayo y seguimiento⁶⁷.

La instalación está construida sobre un yacimiento geológico profundo al que se accede a través de dos pozos verticales de aproximadamente 1.570 metros de profundidad. Cuenta con sistemas de almacenamiento criogénico capaces de albergar hasta 150 toneladas de CO₂ y permite operaciones de inyección controlada a caudales de hasta 2 kg/s, con el apoyo de avanzadas redes de monitorización hidrogeológica y sísmica que permiten evaluar continuamente el comportamiento del subsuelo. La infraestructura también comprende un sistema de acondicionamiento de CO₂ y un edificio modular equipado para el control operativo y la supervisión técnica⁶⁸. Se han llevado a cabo múltiples campañas de investigación y ensayo, financiadas principalmente a través de programas europeos de I+D⁶⁹ como OXYCFB300, IMPACTS y ENOS, que subrayan la importancia estratégica de Hontomín como centro piloto para el avance del conocimiento científico y tecnológico en el almacenamiento y la monitorización geológica de CO₂.

Para orientar el desarrollo, la Comisión Europea utiliza el marco del Nivel de Preparación para el Almacenamiento (Storage Readiness Level, SRL)^{d,61}, que clasifica los emplazamientos según su madurez técnica, documentando los avances y los pasos que quedan por dar en los proyectos de CCS. Como se muestra en Figura 19, la mayoría de los yacimientos de España se encuentran en el SRL 2 (fase inicial), excepto el emplazamiento marítimo TarraCO₂, que ha alcanzado el SRL 4 (equivalente a cuando se solicita un permiso de investigación). En general, las capacidades aún no se han demostrado plenamente y se necesitan más estudios.

TarraCO₂, liderado por Repsol, tiene como objetivo almacenar CO₂ a 45 km de la costa de Tarragona. Con el respaldo de 205 millones de euros del Fondo de Innovación de la UE, el proyecto **tiene como objetivo alcanzar los 2 MtCO₂/año a finales de 2030**, con una capacidad total de 54 MtCO₂⁶². También está previsto que apoye un ecosistema de CCUS en el polo industrial de Tarragona, donde se generan más de 6 Mt de emisiones al año en un radio de 120 km por sectores como la producción de cemento y productos químicos. La

financiación de la UE está destinada a apoyar el despliegue de métodos innovadores de descarbonización, incluido el CCUS, pero aún no ha recibido la autorización definitiva del Ministerio para la Transición Ecológica, que permitirá evaluar su viabilidad técnica. Cabe señalar que la concesión de esta ayuda europea no obliga a la ejecución del proyecto, que solo se llevará a cabo si se confirma su viabilidad técnica y económica y cuenta con el apoyo institucional y social necesario⁶².

Otro proyecto digno de mención es el que está llevando a cabo la empresa energética estadounidense Nexwell⁷⁰, que ha solicitado un permiso de investigación para desarrollar un gran almacén subterráneo de CO₂ en la comarca del Maestrazgo. La solicitud de permiso abarca 13,5 km² repartidos entre varios municipios, con una capacidad acumulada de almacenamiento estimada en torno a 100 MtCO₂, lo que la convierte en una de las instalaciones con mayor potencial de España. Se prevé que los estudios duren cinco años, con una posible explotación en la próxima década. Nexwell también ha solicitado un permiso de investigación para caracterizar un posible emplazamiento de almacenamiento de CO₂ en la Región de Murcia (Moratalla y Cehegín)⁷¹, que según una evaluación preliminar podría almacenar 366 MtCO₂. El proyecto, desarrollado en colaboración con la Universidad Politécnica de Cartagena, se encuentra actualmente en fase de caracterización geológica y tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica del emplazamiento.

No obstante, la realidad actual muestra una importante oposición política y social en el territorio⁷², impulsada por los riesgos medioambientales percibidos y las preocupaciones sobre el modelo de desarrollo asociado a este tipo de proyectos. Además, a nivel nacional, el despliegue llevará tiempo y no hay un impulso fuerte a corto plazo. Esto subraya la importancia de una comunicación transparente, rigurosa y participativa para generar confianza social y enmarcar el debate con información clara y accesible.

Para liberar el potencial de almacenamiento de España, es esencial una inversión específica. La construcción de emplazamientos de almacenamiento requiere un elevado capital inicial y largos periodos de amortización, lo que hace necesario diseñar mecanismos de financiación público-privados que mitiguen el riesgo y fomenten la confianza de los inversores. Fomentar los proyectos de almacenamiento geológico y facilitar el acceso a las licencias y los datos sísmicos contribuirá a crear un entorno más favorable para su despliegue a gran escala.

d. SRL tiene en cuenta factores como los conocimientos geológicos, la validación técnica, el historial de exploración y la disponibilidad de datos.

Recuadro 3. Metodología para estimar el almacenamiento geológico de CO₂

Como se muestra en Figura 21 y en la base de datos correspondiente del IGME^{64,e}, no se dispone de información de alta calidad para todos los emplazamientos de almacenamiento que aparecen en el mapa. Por este motivo, el análisis de los escenarios teóricos y realistas de almacenamiento de CO₂ se basa en la siguiente metodología, que clasifica los emplazamientos en tres niveles de riesgo: bajo, medio y alto.

Riesgo bajo. Actualmente, el único emplazamiento de almacenamiento en desarrollo -aunque aún pendiente de permisos de exploración - es TarraCO₂, con una capacidad acumulada total estimada de 54 MtCO₂. Por lo tanto, este emplazamiento se considera la única opción de bajo riesgo.

Riesgo medio. Aunque no se han realizado estudios de viabilidad detallados, las zonas de Maestrazgo y Murcia presentan un alto potencial de almacenamiento, y recientemente se han solicitado permisos de investigación para comenzar a estudiarlas. Según la base de datos preliminar del IGME, sus capacidades acumuladas medias estimadas son de aproximadamente 132 MtCO₂ y 200 MtCO₂, respectivamente.

Riesgo alto. Las capacidades asignadas a los emplazamientos de almacenamiento de alto riesgo difieren en función de si se considera el escenario teórico o el realista:

- El **escenario teórico** incluye todos los emplazamientos de almacenamiento de la base de datos que cuentan con datos de calidad aceptable y datos de alta calidad, excluyendo TarraCO₂, Maestrazgo y Murcia, que ya se han tenido en cuenta en las categorías de riesgo bajo y medio, y el emplazamiento piloto de Hontomín, ya que no es una instalación comercial. Según estos criterios, la capacidad acumulada total asciende a aproximadamente 11,7 GtCO₂ (1,5 GtCO₂ para los emplazamientos con datos de alta calidad y 10,2 GtCO₂ para los emplazamientos con datos de calidad aceptable).
- Los **escenarios realistas** incluyen solo los emplazamientos de almacenamiento con datos de alta calidad, manteniendo las mismas exclusiones aplicadas en el escenario teórico (TarraCO₂, Maestrazgo, Murcia y Hontomín, que se contabilizan en las categorías de riesgo bajo y medio). Con ello, la capacidad total de almacenamiento es de 1,5 GtCO₂.

Basándose en la metodología, se ha aplicado un factor de ajuste del riesgo (RAF) a cada categoría para ajustar la capacidad estimada en función del nivel de riesgo y, por lo tanto, del grado de incertidumbre asociado a su viabilidad. El RAF se ha determinado a partir de la información disponible sobre los emplazamientos de almacenamiento, teniendo en cuenta factores como el nivel de los estudios, los proyectos previstos y la calidad de los datos. La tabla 8 muestra los valores del RAF considerados en cada caso.

Sobre esta base, se determinó la capacidad de almacenamiento acumulada que se espera que esté disponible en los horizontes temporales de 2030, 2040 y 2050. Para ello, se han realizado hipótesis realistas sobre el ritmo de desarrollo de los emplazamientos de almacenamiento en España, teniendo en cuenta la madurez actual de los proyectos, la disponibilidad de datos y el tiempo necesario para la exploración, la caracterización, la obtención de permisos y la puesta en marcha.

En **2030**, se supone que solo estará operativo el emplazamiento de almacenamiento TarraCO₂, ya que es el único que se encuentra actualmente en desarrollo. Esto da como resultado una capacidad de almacenamiento teórica acumulada de 48,6 y una realista de 43,2 MtCO₂ en 2030. Para **2040**, se espera que el panorama se amplíe con la puesta en funcionamiento, además de TarraCO₂, de los almacenamientos de Maestrazgo y Murcia, ambos clasificados como de riesgo medio y con capacidades preliminares significativas. Durante este mismo periodo, se supone que aproximadamente la mitad de la capacidad potencial de los emplazamientos de almacenamiento de alto riesgo podría estar disponible, ya que algunos podrían madurar técnicamente entre 2030 y 2040, mientras que otros podrían no hacerlo, debido a las incertidumbres en cuanto a la calidad de los datos y la viabilidad. Esto da como resultado una capacidad de almacenamiento teórica acumulada de 1.189,85 y una capacidad realista de 288,61 MtCO₂ en 2040. Para **2050**, se espera que toda la capacidad de almacenamiento esté disponible. Esta perspectiva se basa en el supuesto de que la investigación continua, los estudios detallados de los

e. Para todos los sitios de almacenamiento analizados, se ha utilizado la estimación «EST STORECAP MEAN (Mt)» en lugar de la capacidad máxima estimada en la base de datos, con el fin de adoptar un enfoque conservador. Esta variable corresponde a la «Capacidad media estimada de almacenamiento de CO₂ (Mt) – solo unidad hija del acuífero».

Sitios de almacenamiento	Riesgo bajo	Riesgo bajo	Riesgo alto		Capacidad acumulada total (MtCO ₂) 2050
	TarraCO ₂	Maestrazgo y Murcia	Datos de alta calidad Otros acuíferos salinos y trampas de hidrocarburos	Datos de calidad aceptable	
Capacidad de almacenamiento acumulada	54	332,66	1.527,9	10.195,55	
Factor de ajuste de riesgo (RAF) - Teórico	0,9	0,75	0,5	0,1	
Factor de ajuste de riesgo (RAF) - Realista	0,8	0,65	0,3	0	
Capacidad de almacenamiento teórica acumulada (MtCO ₂) con el RAF teórico aplicado	48,6	249,5	763,95	1.019,56	2081,6
Capacidad de almacenamiento teórica acumulada (MtCO ₂) con aplicación realista del RAF	43,2	216,23	458,37	0	717,8

Tabla 8. Clasificación de riesgo de los emplazamientos de almacenamiento en España y su capacidad de almacenamiento acumulada, teórica y realista, con aplicación del RAF.

emplazamientos y la acumulación de experiencia operativa permitirán, en conjunto, el despliegue seguro y fiable de todas las instalaciones a largo plazo. Esto da como resultado una capacidad de almacenamiento teórica acumulada de 2.081,6 y una capacidad realista de 717,8 MtCO₂ en 2050.

La estimación de la inyección teórica de CO₂ en 2050 se encuentra en el capítulo 4.2, y la inyección anual realista en el capítulo 7.

3.8.2 Almacenamiento de CO₂ mediante mineralización del carbono

España tiene un potencial significativo para el almacenamiento de CO₂ mediante mineralización, tanto in situ (inyección en formaciones máficas y ultramáficas) como ex situ (utilización de residuos industriales y subproductos alcalinos). La diversidad geológica del país, con rocas máficas y ultramáficas accesibles en regiones como Galicia, Andalucía, Murcia y las Islas Canarias, ofrece emplazamientos prometedores para el almacenamiento in situ de CO₂ mediante carbonatación mineral, con alrededor de 1,8 Gt de CO₂. Al mismo tiempo, la producción anual de residuos y subproductos alcalinos industriales proporciona una base de recursos sustancial para la mineralización ex situ, que asciende a unos 7,7 MtCO₂/año.

Si bien el potencial máximo teórico es considerable, la capacidad real dependerá de la superación de limitaciones prácticas como la accesibilidad de los materiales, la cinética de las reacciones, el desarrollo de infraestructuras y la aceptación social. La investigación continua, los proyectos piloto y los marcos políticos de apoyo serán esenciales para desbloquear y ampliar los métodos CDR basados en la

mineralización en España, lo que le permitirá contribuir de manera significativa a los objetivos climáticos nacionales y europeos.

Mineralización in situ

El potencial teórico acumulado de almacenamiento mediante mineralización in situ en rocas máficas-ultramáficas se estima en alrededor de **1,8 GtCO₂**⁷³, aunque las limitaciones prácticas (accesibilidad, cinética de reacción, disponibilidad de agua, infraestructura y aceptación social) reducen sustancialmente el recurso realmente aprovechable.

Basándose en la experiencia internacional (CarbFix, Wallula, Coda Terminal) y en el ritmo esperado de despliegue de proyectos, el potencial anual de mineralización de España se estima en **0,1-0,2 MtCO₂** para 2030, **0,4-0,8 MtCO₂** para 2040 y **0,8-1,5 MtCO₂** para 2050 (Figura 22). Estas estimaciones suponen una fase inicial en 2030 con un hub costero (por ejemplo, en las Islas Canarias) y un piloto en la península, con un total de 6-10 pozos, cada uno inyectando 15-20 kt CO₂/año. Para 2040, la ampliación hasta dos hubs operativos con 20-30 pozos a 20-25 kt/año aumentaría la capacidad a 0,4-0,8 Mt/año. En 2050, 2-3 hubs y 40-60 pozos con tasas de inyección similares permitirían mineralizar entre 0,8 y 1,5 Mt/año de CO₂. Las tasas de inyección se basan en proyectos piloto internacionales como CarbFix (Islandia)⁷⁴ y Wallula (EE. UU.)⁷⁵, donde los pozos suelen mineralizar entre 15 y 25 kt de CO₂ al año. El número de pozos refleja una ampliación gradual en consonancia con los plazos previstos para la concesión de permisos, el desarrollo de infraestructuras y la disponibilidad de fuentes geológicas y de CO₂ adecuadas en España.

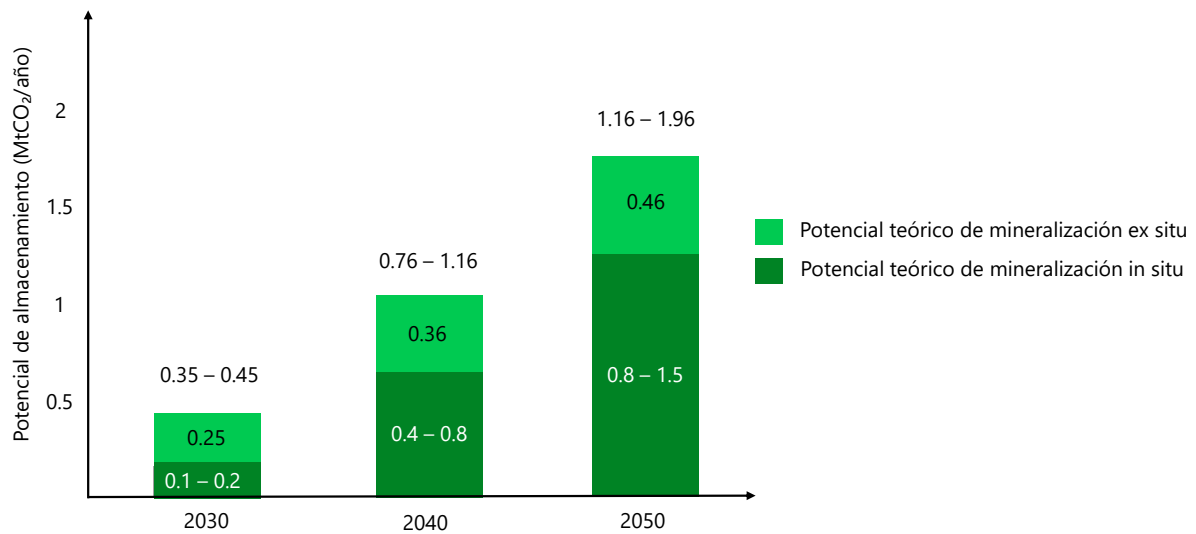


Figura 22. Potencial teórico in situ y ex situ.

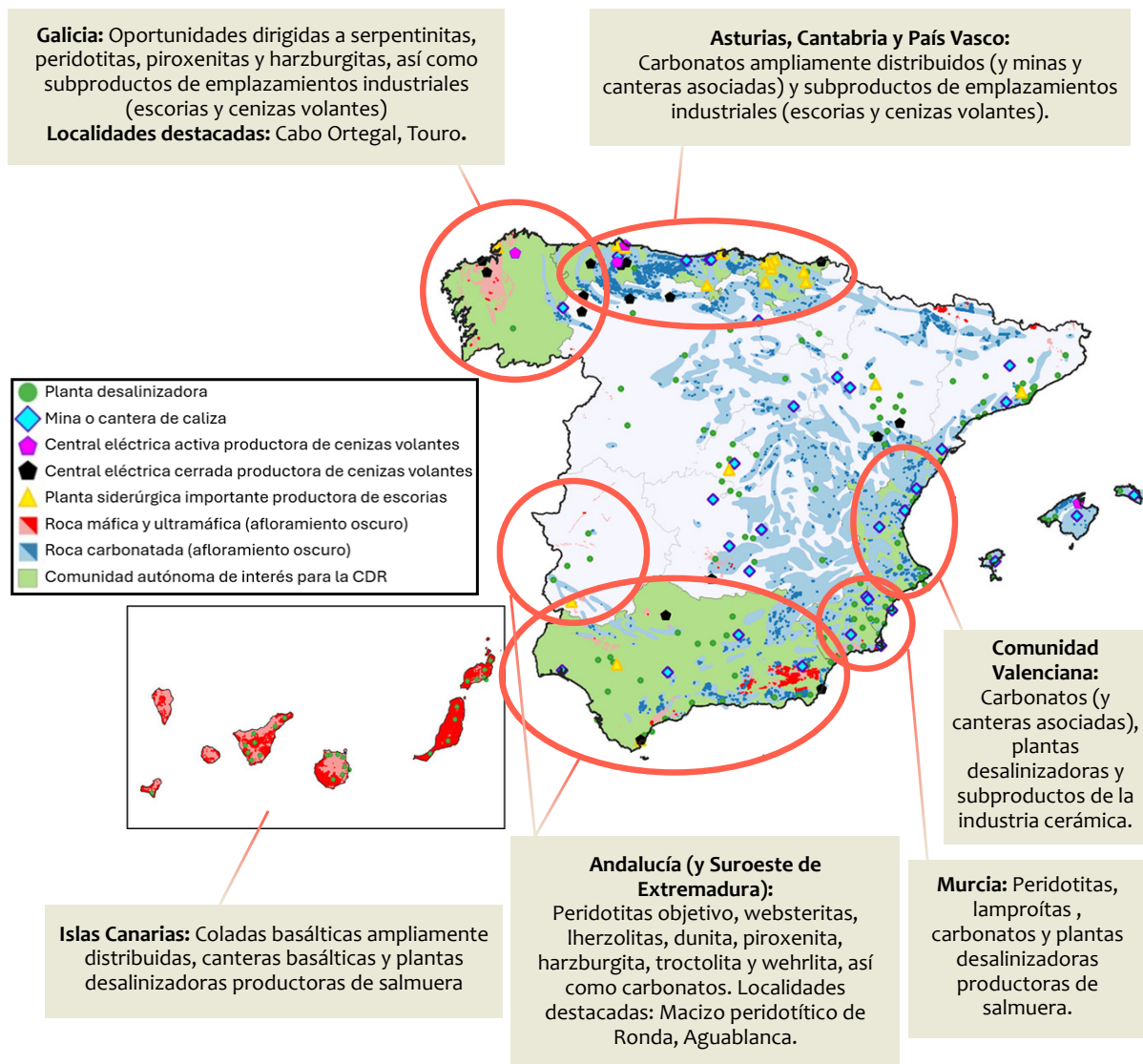


Figura 23. Mapa en el que se destacan las zonas susceptibles de ser objeto de proyectos y enfoques geoquímicos de CDR en España⁷⁶.

Estos valores suponen la puesta en marcha progresiva de varios hubs de mineralización en regiones como Galicia, Andalucía y las Islas Canarias, el uso de agua de mar para la inyección de CO₂ disuelto y la integración de fuentes industriales de CO₂ y métodos DAC. El rango superior solo sería alcanzable con una política industrial sólida, el desarrollo de infraestructuras y una aceptación social favorable.

Las ubicaciones más prometedoras para la mineralización en España son las formaciones rocosas máficas y ultramáficas accesibles que se encuentran en regiones como Galicia, Murcia y Andalucía, incluyendo peridotitas, serpentinitas, dunitas, harzburgitas y basaltos. Además, las Islas Canarias, con sus extensas unidades de lava basáltica y basanítica, presentan importantes oportunidades para el almacenamiento geológico (Figura 23).

Mineralización ex situ

El potencial de mineralización ex situ de España a partir de residuos alcalinos industriales y subproductos se estima en **hasta 7,7 MtCO₂/año**⁷⁶ para las vías geoquímicas combinadas, aunque la parte estrictamente mineralizada sería menor. En la actualidad, la actividad de carbonatación mineral sigue siendo limitada. Un ejemplo notable es AggregaCO₂, un proyecto piloto de Petronor, O.C.O y socios del grupo REPSOL, que ha logrado alrededor **de 2.200 tCO₂/año** de CO₂ mineralizado⁷⁷.

Para reflejar el potencial realista actual, esta evaluación solo tiene en cuenta los flujos de residuos más adecuados: cenizas volantes, polvo de hornos de cemento (CKD) y escoria de acero. Teniendo en cuenta que el estudio «Potencial geoquímico de eliminación de dióxido de carbono en España»⁷³ estima una disponibilidad de alrededor de 5 Mt de estos subproductos al año, y con una absorción de CO₂ de 50 kg de CO₂ por tonelada de subproducto industrial, se estima un potencial de **0,25 MtCO₂** para **2030**. A medida que se amplíen las tecnologías de recogida, procesamiento y mineralización de residuos industriales, este potencial podría crecer hasta alcanzar un potencial anual de **0,36 MtCO₂** en 2040 con una implantación más amplia y la optimización de los procesos, y **0,46 MtCO₂** en 2050, suponiendo una implementación madura y la mineralización de los residuos más adecuados.

3.8.3 Conclusión sobre el almacenamiento de CO₂

España posee un importante potencial geológico para el almacenamiento de CO₂; sin embargo, la ausencia de una estrategia nacional definida, junto con el limitado desarrollo a escala piloto, ha ralentizado su avance en este campo.

Para permitir un despliegue a gran escala, es esencial establecer marcos de financiación público-privados sólidos, acelerar y simplificar los procedimientos reglamentarios y de concesión de permisos, y reforzar los esfuerzos de

caracterización geológica para reducir las incertidumbres actuales y aumentar la confianza de los inversores. Paralelamente, se necesitarán mecanismos de cooperación internacional, incluidos acuerdos bilaterales para el transporte y almacenamiento transfronterizo de CO₂, en particular con países que ya cuentan con una infraestructura de almacenamiento madura.

La combinación de estas acciones sentaría las bases para un sistema de gestión del carbono viable, seguro y competitivo, posicionando a España como participante activo en la agenda europea de descarbonización y aprovechando al mismo tiempo sus propios recursos geológicos para la mitigación del cambio climático.

3.9 Infraestructura de CO₂

La infraestructura de CO₂ es fundamental para el despliegue a gran escala de los métodos de eliminación de dióxido de carbono, ya que garantiza el transporte y el almacenamiento seguro y rentable del dióxido de carbono capturado. Aunque los proyectos de infraestructura de CO₂ mencionados en esta sección están diseñados actualmente para aplicaciones de CCS, se espera que en el futuro puedan adaptarse para gestionar el CO₂ capturado mediante métodos de CDR, como BECCS y DACCS. Esta flexibilidad permitiría a estos sistemas apoyar estrategias más amplias de eliminación de carbono, aprovechando las inversiones existentes para acelerar los esfuerzos de mitigación del cambio climático.

El proyecto COMET (7.º Programa Marco de la UE, 2010-2012⁷⁸) fue el primer estudio integrado sobre la infraestructura necesaria para la captura, el transporte y el almacenamiento de CO₂ en el Mediterráneo occidental (España, Portugal y Marruecos). En él se identificaron las fuentes de emisión, los posibles lugares de almacenamiento y los medios de transporte más rentables: tuberías, barcos, trenes o camiones.

3.9.1 Gasoductos y terminales de exportación

Hasta la fecha, España no dispone de terminales de exportación ni de gasoductos de CO₂ operativos. No obstante, varios estudios están explorando el uso de las terminales de gas natural licuado (GNL) existentes para este fin, dada su gran sinergia técnica y de infraestructura con el manejo del CO₂. Estas instalaciones podrían adaptarse para convertirse en plataformas multimoleculares, utilizando el frío residual de la regasificación para la licuefacción del CO₂ y aprovechando la infraestructura portuaria, de almacenamiento y de seguridad existente. Además, la experiencia de los operadores de terminales de GNL en la gestión de gases criogénicos proporciona una base sólida para el desarrollo seguro y eficiente de las futuras capacidades de exportación de CO₂.

Muchas terminales de GNL se encuentran en zonas industriales con importantes emisiones de CO₂, lo que

permite su integración directa con los sistemas de captura y transporte. Al mismo tiempo, están integradas en redes de servicios y logística bien desarrolladas que podrían utilizarse o adaptarse para conectar los lugares de captura con los hubs de exportación. España cuenta con siete terminales de exportación de GNL y algunas de ellas ya se están considerando como ubicaciones estratégicas para el futuro desarrollo de terminales de CO₂, como las de El Musel (Gijón)⁷⁹, Bilbao⁸⁰ y Sagunto⁸¹.

Enagás, el principal operador del sistema de gas de España, ha identificado seis regiones prioritarias para proyectos de captura y transporte de CO₂ (figura E.2 del anexo E). La empresa está desarrollando hubs en estas zonas para permitir la captura, el transporte y el almacenamiento de CO₂ dentro de España y/o para su exportación y almacenamiento en el extranjero. Los proyectos basados en hubs permiten la agregación de emisiones y la optimización de costes.

A fecha de julio de 2025, algunos de los proyectos de desarrollo de infraestructuras de CO₂ que implican terminales de GNL y que son de dominio público son los siguientes:

- **CO₂NECTA (Valencia):** en las instalaciones de Holcim en el puerto de Sagunto, el CO₂ será capturado y transportado por tubería a lo largo de 7 km hasta la terminal de GNL de Sagunto para su licuefacción y almacenamiento (0,8 MtCO₂/año). Dirigido por Enagás, Holcim y Saggas. Se prevé que la construcción comience entre 2028 y 2029. Puesta en marcha: 2031-2032.

- **MOSUSOL-NETCO₂ (Cataluña):** este proyecto capturará el CO₂ de la cementera de Molins y lo transportará a través de una tubería de 100 km hasta un almacenamiento marino cerca del puerto de Tarragona (más de 1 MtCO₂/año). Desarrollado por Enagás y Molins, se ajusta a una concesión de almacenamiento subterráneo ya existente y prevé su entrada en operación entre 2031 y 2032.

- **CO₂net2 Norte:** (incluido en el Proyecto PCI de la lista provisional de la Comisión Europea): tiene como objetivo desarrollar una red de transporte de CO₂ en el norte de España, que conecte a los emisores del País Vasco y Asturias y las regiones adyacentes con terminales de GNL para la licuefacción y exportación utilizando el frío residual de los procesos de GNL (aproximadamente 5 MtCO₂/año). El proyecto prevé la construcción en 2029-2030 y su puesta en funcionamiento a partir de 2032. La figura 24 muestra la parte de infraestructura del proyecto prevista en España por fases.

3.9.2 Tren

La red ferroviaria es fundamental para los proyectos CCUS/BECCS, ya que actualmente es el único medio de transporte que no requiere modificaciones sustanciales para su uso inmediato. El transporte de CO₂ capturado por ferrocarril está regulado por el marco RID 2023 como mercancía peligrosa estándar, sin necesidad de autorización especial y con únicamente limitaciones de peso por vagón⁸².



Figura 24. Infraestructura por fases propuesta por Enagás para el proyecto CO₂net2 Norte.

Según el *Observatorio del Ferrocarril en España* de 2023⁸³, los trenes de mercancías circulan por 9.147,10 km de vías gestionadas por Adif (tanto de ancho ibérico como estándar). De este total, 8.686 km se comparten con los servicios de pasajeros y 460 km son de uso exclusivo para mercancías, además de 508 km en líneas de ancho métrico. Los vagones cisterna permiten un transporte eficiente de CO₂ a lo largo de estos corredores, con parámetros clave:

- Velocidad media del tren: 120 km/h, adecuada para la logística de larga distancia.
- Peso máximo por vagón de cuatro ejes: 90 toneladas, lo que permite transportar 61,7 toneladas de CO₂ por vagón¹⁶.
- Sin límite práctico de vagones por tren: con 20 vagones, un tren puede transportar unas 1.220 toneladas de CO₂.
- Velocidad de descarga: 20 toneladas/hora por unidad, dependiendo del equipamiento de la estación.

En este contexto, un reciente acuerdo entre Adif y Exolum (*empresa de servicios logísticos para el transporte y almacenamiento de combustibles, biocombustibles y combustibles líquidos*) tiene como objetivo desarrollar una red logística ferroviaria para productos como el CO₂ capturado, el amoníaco, el metanol, los biocombustibles y las materias primas renovables. Esta iniciativa busca una solución inmediata, flexible y de bajo impacto mediante la conexión de las instalaciones de Exolum con la infraestructura de Adif. El proyecto, coordinado por el Comisionado del Corredor Atlántico, estudiará la capacidad, la viabilidad técnica y los posibles nuevos apartaderos para conectar los hubs de producción con los puertos. Aprovechando la experiencia de Exolum en el transporte de energía y sus 17 terminales conectadas por ferrocarril en España, la asociación tiene como objetivo ofrecer una solución sostenible y rentable utilizando la infraestructura existente, minimizando el impacto medioambiental y evitando expropiaciones de terrenos.

3.9.3 Camión

El transporte por carretera en camión ofrece una entrega flexible de CO₂ para las necesidades locales o regionales, especialmente cuando no hay tuberías, y requiere una infraestructura mínima más allá de las estaciones de carga y descarga. Sin embargo, debido a su capacidad limitada (0-30 t por cisterna), solo es adecuado para pequeños volúmenes y distancias cortas (<300 km)⁸⁴. Además, es sensible a las condiciones meteorológicas y al tráfico, conlleva costes elevados y variables, y puede generar congestión en despliegues a gran escala. Para distancias más largas y volúmenes más elevados, las tuberías y el transporte marítimo siguen siendo alternativas más eficientes y escalables⁸⁵.

3.9.4 Transporte marítimo

El transporte marítimo de CO₂ se está convirtiendo en una opción estratégica para transportar grandes volúmenes entre regiones o zonas distantes sin conexión por tubería, y para

transportar el CO₂ desde los lugares de captura hasta los lugares de almacenamiento. La cadena logística consta de cuatro etapas: **captura y acondicionamiento, licuefacción y almacenamiento temporal, transporte marítimo en buques especializados e inyección en formaciones geológicas**.

Actualmente, el transporte de CO₂ por barco se limita a usos a pequeña escala, pero los futuros proyectos de captura y almacenamiento de carbono requerirán operaciones mucho mayores. Para reducir los costes, es probable que el transporte se realice en condiciones similares a las de los buques de GLP: presión de 7-9 bar y temperaturas de -50 °C, o presiones ligeramente superiores con temperaturas cercanas a los -30 °C⁸⁶. La seguridad se rige por el Código Internacional de Buques de Transporte de Gas (IGC), que proporciona un marco normativo sólido para el transporte marítimo de CO₂⁸⁷.

Cabe destacar que Enagás⁸⁸ anunció el lanzamiento de *Scale Green Energy*, una filial destinada a promover infraestructuras y servicios de descarbonización en ámbitos como el abastecimiento de GNL/BioGNL, el hidrógeno renovable y la gestión del CO₂. Esta última incluye el desarrollo de tuberías de CO₂, plantas de licuefacción y buques de transporte, con proyectos como *CO₂necta* junto con Holcim y Saggas, y *MOSUSOL NetCO₂* con Molins.

3.9.5 Conclusiones sobre la infraestructura de CO₂

España dispone de una base de infraestructuras que permite el transporte y la exportación de CO₂, lo que supone una oportunidad estratégica para escalar los métodos CDR. **La ubicación de instalaciones de CDR cerca de hubs industriales con infraestructuras de CO₂ planificadas** reduciría los costes, simplificaría la logística y aceleraría el desarrollo de una cadena de valor nacional de gestión del CO₂. A pesar de su potencial, **España se encuentra actualmente rezagada frente a otros países de la UE** en el despliegue de CCS/CDR. El Gobierno aún no ha puesto en marcha una estrategia específica ni ha presentado a la Comisión Europea las estimaciones requeridas sobre el potencial de captura, los planes de transporte o la capacidad de almacenamiento. España tampoco ha comunicado todavía a la Comisión Europea, aunque se le ha solicitado, sus estimaciones sobre el potencial anual de captura de CO₂ para 2030, ni ha facilitado información sobre la infraestructura de transporte de CO₂ o evaluaciones detalladas de su capacidad de almacenamiento geológico.

Los líderes industriales han instado al Ministerio para la Transición Ecológica a que proporcione una orientación clara, advirtiendo de que, **sin vías definidas para el transporte y el almacenamiento, la inversión se estancará**. Si bien la inclusión de la CCUS en el PNIEC actualizado supone un avance, las partes interesadas siguen pidiendo una hoja de ruta, similar a las del hidrógeno y el biogás, para evitar el declive industrial y la fuga de capitales a otros países.

3.10 Zonas restringidas

Una parte sustancial de los territorios terrestres y marinos de España se encuentra dentro de zonas legalmente restringidas – incluidos parques nacionales, espacios Natura 2000, reservas marinas y otras zonas protegidas – que abarcan aproximadamente el 27 % de los entornos terrestres y casi el 8 % de los marinos⁸⁹ (figura E.3 del anexo E). Estas zonas protegidas imponen límites estrictos al uso del suelo, prohibiendo actividades que podrían perturbar los objetivos de conservación, como la minería a gran escala, el desarrollo costero o la dispersión no regulada de materiales alcalinos para ERW. Desde el punto de vista de la implementación de CDR, esto significa que, aunque España cuenta con abundantes materias primas geológicas, el despliegue de CDR basada en minerales dentro o en las proximidades de estas zonas restringidas requeriría cuidadosas evaluaciones de impacto ambiental, permisos y una gestión adaptativa para evitar dañar los ecosistemas sensibles.

Dada la superposición entre las zonas geoquímicas con alto potencial de CDR y las áreas protegidas legalmente, las estrategias de CDR deben adoptar una planificación espacial deliberada para equilibrar los objetivos de eliminación de carbono con la conservación de la biodiversidad. Los enfoques ex situ, como el uso de residuos alcalinos en tierras de cultivo, invernaderos en Almería o a lo largo de terraplenes ferroviarios, ofrecen más flexibilidad y reducen el conflicto con las regulaciones de Natura 2000 o las áreas marinas protegidas. Para aplicaciones costeras, la OAE ofrece oportunidades fuera de los mares estrictamente protegidos, pero los sitios piloto deben excluir las reservas marinas y cumplir con la vigilancia medioambiental, en particular en los hábitats marinos de Natura 2000. En última instancia, el éxito en las zonas restringidas dependerá de la integración de los proyectos piloto de CDR con los marcos existentes de planificación del uso del suelo y regulación medioambiental, garantizando que las implementaciones de CDR mejoren, en lugar de socavar, los compromisos de conservación de España.



4. Potencial teórico de CDR (lo que se podría hacer)

Para estimar el potencial teórico de CDR de España, el análisis evalúa en primer lugar la disponibilidad máxima de los recursos pertinentes, como la biomasa, la tierra y la energía, preservando al mismo tiempo sus usos prioritarios esenciales. Este escenario hipotético supone la movilización total de todos los recursos adecuados para CDR, sin tener en cuenta las limitaciones del mundo real, las demandas competitivas de otros sectores o la preparación de la sociedad. Aunque no es viable en la práctica, esta estimación máxima sirve de referencia para comprender lo que se podría lograr en circunstancias extraordinarias, similares a un esfuerzo de movilización a nivel nacional para hacer frente al cambio climático. Este máximo teórico ayuda a enmarcar las estimaciones más realistas que se presentan en el capítulo 7.

4.1 Metodología para el potencial teórico de CDR

Para evaluar el potencial teórico, es necesario estimar la disponibilidad de cada recurso necesario para implementar los métodos de CDR. La mayoría de los métodos dependen de múltiples insumos, como la electricidad, el agua o el calor, y, por lo tanto, compiten por los mismos recursos. El cálculo del potencial teórico se basa en un enfoque ascendente fundamentado en los escenarios de disponibilidad de recursos desarrollados en el capítulo 3, que determina cómo se podrían asignar de manera más eficiente los recursos físicos de España para maximizar la eliminación global. Para cada método de CDR, se define en primer lugar cuál es el recurso o recursos primarios necesarios, y a continuación se asignan los recursos de manera óptima a los diferentes métodos en función de cuál de ellos requiere menos recursos por tonelada neta de CO₂ eliminada. La metodología y la base de datos utilizadas para esta optimización se describen en la sección 2.3. A partir de esta asignación, se calcula cuánto CO₂ podría eliminarse según las proyecciones de recursos más optimistas de España, utilizando la cartera de métodos de la forma más óptima para promover la máxima eliminación de carbono.

La eficiencia energética y la viabilidad económica se consideraron cualitativamente en el proceso de asignación de recursos, aunque no se incluyeron variables económicas en los cálculos. Por ejemplo, aunque el biochar es un método muy eficiente en cuanto a recursos, su uso está limitado porque desviar la mayor parte de la biomasa de madera al biochar excedería la demanda del mercado y socavaría la necesidad de una cartera equilibrada de CDR. En el caso de los métodos de CDR en los que las materias primas podían asignarse claramente sin competencia de otros métodos de CDR, el potencial de CDR se calculó aplicando factores de conversión para traducir las materias primas disponibles en toneladas equivalentes de CO₂.

4.2 Potencial teórico de CDR en España

El potencial teórico de CDR de España se revela mediante la asignación optimizada de recursos a los diferentes métodos de eliminación, estimada en casi **196 Mt de CO₂ al año para 2050**. El desglose de los métodos y los supuestos subyacentes se muestra en la tabla 9. La electricidad y el calor se asignaron para maximizar las vías electroquímicas, mientras que se supuso que la ERW requería una energía insignificante, utilizando solo fracciones de residuos de materias primas minerales. No se tuvieron en cuenta las limitaciones de agua y tierra para la ERW. En general, el potencial máximo está limitado en gran medida por la capacidad de almacenamiento de CO₂, especialmente para BECCS y DACCS.

En el potencial teórico, los métodos de CDR que tienen la mayor capacidad de eliminación para 2050 son los métodos de gestión de ecosistemas, en particular la forestación y la reforestación (50,24 MtCO₂) y la gestión de tierras de cultivo (47 MtCO₂), que juntos representan más del 66 % del total. Las opciones geoquímicas, incluida la meteorización mejorada de rocas mediante residuos industriales y subproductos mineros, contribuyen con alrededor de 30 MtCO₂, mientras que los métodos sintéticos, como el DACCS, representan una cifra más modesta de 9 MtCO₂, limitada principalmente por la capacidad de almacenamiento disponible. Esta estimación máxima refleja un nivel de movilización técnicamente posible pero prácticamente inalcanzable, que sirve de referencia para comprender la dotación de recursos de España.



Método CDR	Factor de conversión	Potencial teórico de CDR (2050)	Hipótesis
Gestión de ecosistemas		138,52	
Forestación/reforestación	6,49 tCO ₂ /ha/año	50,24	Utilizando los 7,74 Mha clasificados como «vegetación arbustiva GL» según la cartografía del Mapa Forestal Español y el factor de conversión obtenido del estudio «Biomasa y fijación de carbono por reforestación joven» realizado por INIA-CSIC, MITERD y COITF ⁹⁰ .
Gestión forestal mejorada (IFM)	2,52 tCO ₂ /ha/año	31,52	Teniendo en cuenta las hectáreas de la tabla 5, restando la dehesa en terrenos forestales y el factor de conversión obtenido de un artículo científico <i>Efecto a largo plazo de diferentes intensidades de claro forestal sobre las tasas de secuestro de carbono y los usos potenciales en las medidas de mitigación del cambio climático</i> ⁹¹ .
Agroforestería	2,74 tCO ₂ /ha/año	3	Teniendo en cuenta el total de hectáreas de dehesa (1,09 Mha) que se van a restaurar y multiplicándolas por el factor de conversión obtenido del seminario presentado por la Sociedad Española de Ciencias Forestales y el Instituto Universitario de Gestión Forestal Sostenible, UVA INIA, con la colaboración del CSIC y la Junta de Extremadura ⁹⁰ .
Gestión de tierras de cultivo (siembra directa y labranza cero o de conservación)	3,12 tCO ₂ /ha/año	25,79	Teniendo en cuenta las hectáreas de la tabla 5 y el factor de conversión obtenido de la Iniciativa 4 por mil del MAPA ²⁹ .
Gestión de tierras de cultivo (cubierta vegetal)	5,65 tCO ₂ /ha/año	20,62	Teniendo en cuenta las hectáreas de la tabla 5 y el factor de conversión obtenido de la Iniciativa 4 por mil del MAPA ²⁹ .
Gestión de pastizales	1,10 tCO ₂ /ha/año	5,81	Teniendo en cuenta las hectáreas registradas en los Ecorregímenes de la FEGA ⁹² y un factor de conversión obtenido del artículo científico Mitigación del balance de gases de efecto invernadero de los sistemas de producción de rumiantes mediante el secuestro de carbono en pastizales ⁹³ .
Restauración de humedales y turberas	2,7 t/ha/año	1,3	Si se restauraran las 488,51 kha de humedales y turberas degradados, se podría lograr un enterramiento de carbono de 1,32 Mt CO ₂ /año.
Carbono azul	2,44 t/ha/año	0,24	Estimaciones según el informe de Red Eléctrica. 9,98 kha de <i>Posidonia oceanica</i> restauradas.
Conversión de biomasa		18,18	
BECCS (combustión)	2,7 MWh/tCO ₂	8,6	Teniendo en cuenta que el 60 % del almacenamiento potencial de CO ₂ se asigna a BECCS y los valores para cada uso (Tabla 15)
BECCS (digestión anaerobia)	3,8 MWh/tCO ₂	4,9	Teniendo en cuenta que el 60 % del almacenamiento potencial de CO ₂ se asigna a BECCS y los valores para cada uso (Tabla 15)
Biochar	1,36 t/tCO ₂	4,5	Teniendo en cuenta que el 50 % de la biomasa procedente de procesos termoquímicos se destina a pirólisis, produciendo biochar.
Productos biológicos duraderos	0,9 tCO ₂ /m ³	0,18	Teniendo en cuenta la madera estructural (capítulo 3.7.3) El valor estimado para 2030 también se ha utilizado como aproximación para el año 2050
Geoquímico		30,3	
ERW (dolomita)	2,5 t/tCO ₂	3	Teniendo en cuenta que se utiliza todo el mineral generado como residuo. Se han hecho suposiciones conservadoras sobre el factor de conversión (por ejemplo, 2,5 t/tCO ₂ en lugar de 1,8 t/tCO ₂ mencionado en Bullock et al. 2023).
ERW (piedra caliza)	2,5 t/tCO ₂	18,7	
ERW (basalto)	4,3 t/tCO ₂	0,1	
ERW (rocas máficas)	-	0,4	Nueva extracción de rocas máficas.
OAE	1,74 t/tCO ₂	8,1	Teniendo en cuenta que se están utilizando todas las escorias de acero.

continuar>

Método CDR	Factor de conversión	Potencial teórico de CDR (2050)	Hipótesis
Sintéticas		9	
DACCS electroquímico	0,78 MWh/ tCO ₂	6,4	Teniendo en cuenta que SDAC y LDAC consumirán 6 TWh, lo que deja 25 TWh para E-DAC, y considerando que el 40 % del almacenamiento potencial de CO ₂ se asigna a DACCS (explicado al final de la sección 4.3 - Almacenamiento de CO ₂).
DACCS de baja temperatura	1,5 MWh/ tCO ₂	1,6	
DACCS de alta temperatura	1,75 MWh/ tCO ₂	1	
DOCCS		0	El DOCCS es teóricamente posible, pero se considera inviable para 2050, tal y como se explica en más abajo en el cuadro 4.
Total		196	

Tabla 9. Potencial máximo teórico estimado de CDR en España. Datos en Mt CO₂.

Cuadro 4. Nota sobre la captura directa de carbono oceánico (DOCCS)

La DOCCS mediante electrodiálisis colocada es un proceso que consume mucha electricidad y que se consideró técnicamente inviable en la actualidad al calcular el potencial teórico debido a las elevadas demandas energéticas, la baja eficiencia y el coste. El proceso requiere 1,3 MWh por tonelada de CO₂, lo que, teniendo en cuenta la evaluación técnico-económica (CAPEX+OPEX), supone un total de 500 €/t de CO₂ capturado (si se utiliza una planta co-ubicada; de lo contrario, los costes aumentan hasta 1300 €/t de CO₂), con una captura neta muy dependiente de la disponibilidad de energía renovable. El rendimiento se ve afectado por las pérdidas osmóticas, las restricciones de salinidad y los elevados costes operativos. Incluso con energías renovables, la eliminación neta es modesta (57-69 g CO₂/m³).

Como ejemplo ilustrativo de una configuración co-ubicada (la estación más eficiente), el procesamiento de 1 bcm de agua de mar del Mediterráneo podría capturar ~0,074 MtCO₂ por bcm (≈ 74 ktCO₂, suponiendo una recuperación del ~71 % del carbono inorgánico disuelto). Para ello se necesitarían ~96 GWh de electricidad para la fase de captura (tenga en cuenta que el GW equivalente depende de la velocidad a la que se procese el agua; por ejemplo, repartido a lo largo de un año, la media es de solo ~11 MW). Utilizando el TEA para el caso de la ubicación conjunta, esto corresponde a aproximadamente 32-34 millones de euros por bcm (427-461 euros por tCO₂ capturado). Estas cifras ilustran que, incluso en la configuración más favorable de ubicación conjunta, el DOCCS sigue siendo intensivo en energía y costes a gran escala y es sensible a una mayor optimización y a la electricidad con bajas emisiones de carbono.

4.2.1 Análisis de sensibilidad sobre el potencial teórico de CDR sin límite de almacenamiento

Dado que el almacenamiento representa una limitación significativa, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar el potencial de implementación de CDR en España suponiendo

que no existieran limitaciones de capacidad de almacenamiento. En este escenario, las contribuciones de BECCS y DACCS dependerían únicamente de otros recursos, como la biomasa y la energía. Su contribución en este caso hipotético aumentaría significativamente de 13,5 y 9 MtCO₂/año a **40 y 45 MtCO₂/año en 2050**, respectivamente (Tabla 10).

Método de CDR	MtCO ₂ /año	Hipótesis
BECCS (combustión)	25,5	Basado en la biomasa disponible para CDR ilustrada en la figura 18.
BECCS (digestión anaerobia)	14,5	
DACCS electroquímico	31,9	Suponiendo que S-DAC y L-DAC consumirán 6 TWh, lo que deja 25 TWh para E-DAC.
DACCS de baja temperatura	8	Teniendo en cuenta el calor residual de baja calidad disponible.
DACCS de alta temperatura	5,1	Teniendo en cuenta el calor residual de alta calidad disponible.
Total	85	

Tabla 10. Potenciales teóricos de CDR suponiendo que no hay límite de almacenamiento de CO₂.

Teniendo en cuenta estas cifras de BECCS y DACCS, **el potencial nacional para 2050 sería de 258,5 MtCO₂/año**, en lugar de los 196 MtCO₂/año limitados por el almacenamiento de CO₂. Esta cifra más elevada sigue siendo relevante porque los futuros avances en la infraestructura de transporte y almacenamiento de CO₂, incluidos los acuerdos internacionales para corredores compartidos de transporte y almacenamiento de CO₂, así como gasoductos y transporte marítimo transfronterizo, podrían desbloquear capacidad adicional. Estos avances permitirían a España aprovechar mejor su potencial de biomasa y energías renovables, acercándose a esta capacidad teórica.

4.3 Asignación de recursos en el potencial teórico de CDR

La tabla 11 resume la disponibilidad de recursos para estimar el potencial teórico de CDR en España para 2050, teniendo en cuenta los escenarios de recursos y materias primas descritos en el capítulo 3.

Recurso	2050	Hipótesis
Energía (TWh)		
Electricidad renovable	31	Suponiendo que solo la electricidad proyectada para la exportación en los escenarios eléctricos para 2050 de la figura 8 está disponible para la captura y almacenamiento de carbono.
Calor residual (bajo grado)	12	
Calor residual (alto grado)	9	
Suponiendo el rango máximo de los escenarios evaluados (Tabla3).		
Agua (bcm)		
Agua dulce	106,7	Debido al cambio climático, se prevé una disminución de los recursos de agua dulce.
Agua salada	1,5	Para combatir el estrés hídrico, se prevé un aumento cons-tante de la desalinización.
Tierra (Mha)		
Tierra cultivable anual	8,27	Teniendo en cuenta la superficie disponible para CDR (Tabla 5).
Tierra cultivable perma-nente	3,65	
Suelo forestal	14,92	
Pastizales	11,77	
Turberas (kha)	0,97	
Superficie submarina	16,36	Se supone que el 2 % de los ecosistemas de turberas de-gradados se restaurarán para 2050, según el escenario P4: Escenario ambicioso de la tabla 6.
Se supone que la pérdida de superficie de pastos marinos se recuperará parcialmente para 2050.		
Biomasa (MtMS)		
Biomasa forestal	11,4	Teniendo en cuenta la biomasa disponible para CDR (Figura 18).
Biomasa agrícola-la/agroindustrial	21,6	
Residuos biogénicos	16,5	
Materias primas minerales (Mt)		
Piedra caliza	55,6	Teniendo en cuenta los límites superiores de las estimaciones de las fracciones de residuos para 2050 (Tabla7).
Dolomita	7,6	
Basalto	0,6	
Cemento	6,3	
Escoria de acero	5,5	
Almacenamiento de CO2 (Mt/año)		
Depósitos geológicos	22,4	Basado en curvas exponenciales creadas para estimar las tasas de inyección según la capacidad teórica total estima-da (explicado al final de la sección 4.3 - Almacenamiento de CO2).
Mineralización	1,5	Teniendo en cuenta la mineralización in situ y ex situ.

Tabla 11. Resumen de la disponibilidad de recursos y materias primas para estimar el potencial teórico de CDR en España.

2050	MtMS disponible para CDR	TWh	Factor de conversión	Unidades	MtCO ₂ /año	MtCO ₂ /año (limitación de almacenamiento)	Método CDR
Combustión	18	59,77	2,7	MWh/tCO ₂	22,14	7,4	BECCS
Digestión anaerobia	19,3	55,1	3,8	MWh/tCO ₂	14,5	4,9	BECCS
Procesos termoquímicos (pirólisis/gasificación) ^f	12,2	50 % de gas de síntesis	1,8	t/tCO ₂	3,4	1,2	BECCS
		50 % biochar	1,36	t/tCO ₂	4,5	4,5	Biochar
TOTAL	49,5				44,5	18	

Tabla 12. Recursos teóricos máximos y potencial de eliminación de los métodos de CDR de biomasa.

Biomasa

Dadas las diversas vías de valorización de la biomasa, cada materia prima se asignó a usos específicos en función de sus propiedades fisicoquímicas y aplicaciones típicas en España, según Tabla C .2 en el anexo C. Estas asignaciones proporcionan estimaciones indicativas que pueden variar según la región, la tecnología y las condiciones del mercado.

Para aplicaciones energéticas como la combustión y la digestión anaerobia, cada categoría de biomasa se convirtió en su potencial energético correspondiente. Los factores de conversión utilizados para esta evaluación se presentan en Tabla C .4 del anexo C, que proporciona la cantidad teórica total de energía que podría obtenerse de las diferentes fuentes de biomasa. Esta cantidad de energía permite estimar el potencial teórico de CDR utilizando factores de conversión adicionales (véase Tabla 12), que permiten transformar los valores energéticos en la cantidad correspondiente de CO₂ que puede eliminarse de la atmósfera.

Para 2050, se prevé que la proporción de biomasa utilizada para la combustión disminuya, ya que la biomasa se reserva cada vez más para aplicaciones de mayor valor y la demanda de energía se desplaza hacia la electrificación. Se espera que la biomasa se destine cada vez más a vías de conversión avanzadas, como la digestión anaerobia para la producción de biometano.

Sin embargo, la cantidad de CO₂ que podría eliminarse por estas vías está limitada por la capacidad geológica disponible para el almacenamiento de CO₂. Teniendo en cuenta las limitaciones técnicas (baja concentración de CO₂

en la atmósfera) y energéticas de los DACCS, en particular las asociadas al L-DAC, y la eficiencia comparativamente mayor de los BECCS, se considera razonable una distribución del 60 % de BECCS y del 40 % de DACCS para garantizar un despliegue más viable y rentable de la eliminación de carbono.

Almacenamiento de CO₂

Para estimar la inyección en el escenario teórico de 2050, el análisis parte de la capacidad teórica total estimada para 2050 tras aplicar el RAF teórico (2081,6 Mt) (Tabla 8). Para ello, se generan curvas exponenciales comenzando con una inyección de 2 Mt en 2030 (una cifra conocida del proyecto TarraCO₂), asumiendo que la capacidad teórica total podría alcanzarse en 2060 y 2070. Esta hipótesis se adopta porque es razonable esperar que no toda la capacidad estimada se alcance en 2050, ya que no todos los emplazamientos de almacenamiento estarán operativos ni completamente llenos. Estas curvas exponenciales (que se muestran en el anexo D) arrojan valores estimados de inyección para 2050 de 59,81 Mt/año (curva de 2060) y 21,72 Mt/año (curva de 2070); por ello, se toma el valor medio, resultando en una capacidad total de inyección para 2050 de 40,77 Mt/año (tanto para CCS como para CDR).

Dado que España no cuenta con una estrategia nacional de captura de carbono, para este análisis se decidió seguir la asignación establecida por la Unión Europea en la *Comunicación de la UE sobre la gestión del carbono*. Siguiendo la división CCS/CDR establecida – 45 % CCS y 55 % CDR para 2050 –, se aplica la distribución, lo que indica que de los 40,77 Mt/año, aproximadamente 22 Mt/año se asignarían a CDR.

f. A partir de la biomasa disponible, además de la combustión y la digestión anaerobia, se asignó una parte para procesos termoquímicos, como la pirólisis y la gasificación, con el fin de tener en cuenta la gasificación, ya que puede ser una tecnología que se desarrolle en el futuro y de la que se pueda obtener CO₂ biogénico. Sin embargo, dado que la captura de CO₂ para gasificación aún no está tan desarrollada y su implementación es más incierta, a efectos prácticos, como se muestra en las tablas generales, el CO₂ potencial que podría generar se ha contabilizado junto con el BECCS procedente de la combustión, y solo se ha separado el biochar que se produciría mediante pirólisis.

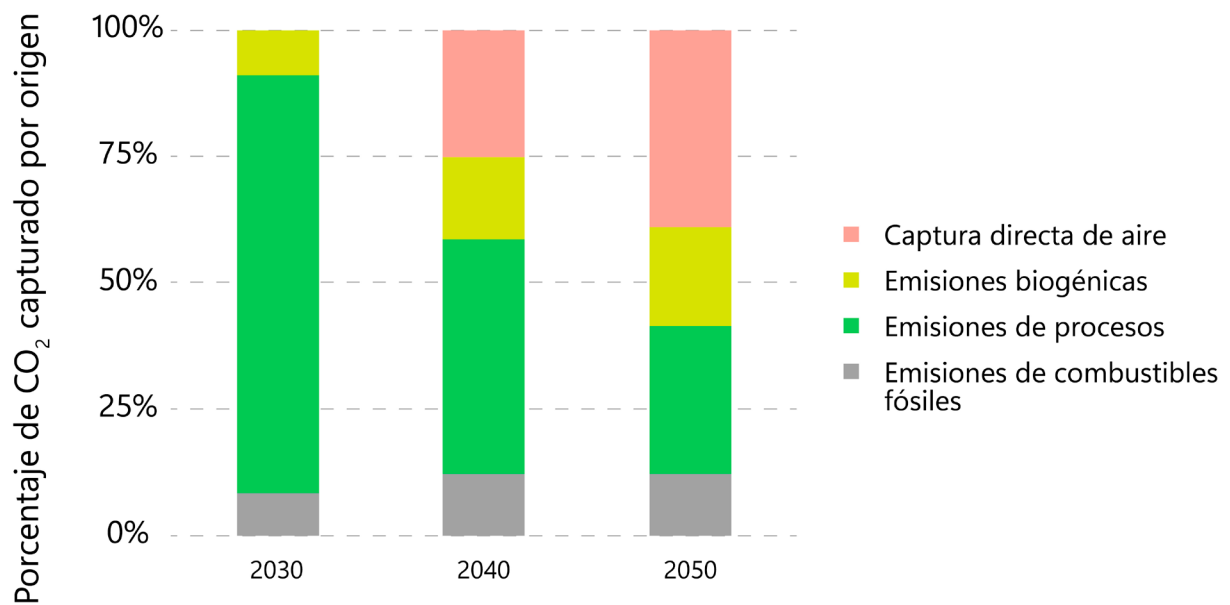


Figura 25. Distribución prevista del CO₂ capturado por origen según la Comunicación de la UE sobre la gestión del carbono (COM (2024)⁹⁴.

Teniendo en cuenta los recursos de biomasa disponibles a nivel nacional y el hecho de que la concentración de CO₂ en el aire ambiente es sustancialmente inferior que en las corrientes del proceso BECCS, se supone una distribución del 60 % para BECCS y del 40 % para DACCS para el escenario teórico de 2050. Esta asignación refleja tanto el progreso tecnológico previsto para DACCS a mediados de siglo como las reducciones de costes previstas en ambas vías de eliminación.

Cabe señalar que, aunque los estudios actuales se centran principalmente en soluciones de almacenamiento para el CO₂ capturado mediante métodos CCS, se prevé que en el futuro estas instalaciones también podrían utilizarse para el CO₂ capturado mediante técnicas CDR.



5. Política actual

La estrategia climática de España, tal y como se describe en su **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima** (PNIEC) actualizado, establece un rumbo para alcanzar emisiones netas de GEI cero para 2050. En 2021, las emisiones de CO₂ per cápita de España se situaban en aproximadamente 5 toneladas, lo que representa el 9 % de las emisiones totales de la UE. Las principales fuentes son los sectores del transporte, la industria, la agricultura y la energía, y los combustibles fósiles (en particular el petróleo y el gas natural) contribuyen con más del 70 % de la demanda energética del país. Si bien se observó una tendencia a la baja en las emisiones entre 2017 y 2020, en los últimos años se ha producido un repunte, especialmente en los sectores de la agricultura y el transporte, lo que indica las dificultades para ajustarse a las trayectorias previstas.

La tabla 13 resume algunas de las estrategias españolas incluidas en su PNIEC. El país pretende reducir la demanda energética aumentando la eficiencia en todos los sectores y cubrir las necesidades futuras de electricidad mediante el desarrollo de los sectores de la electricidad renovable en

detrimento de la nuclear y el carbón. Además, se espera que para 2050 el país alcance la autosuficiencia energética e incluso se convierta en un importante exportador de hidrógeno verde. La electrificación del sector del transporte por carretera es otro de los pilares y se espera que para 2040 se imponga la prohibición de la venta de vehículos con motor de combustión interna.

5.1 CDR dentro de la estrategia climática del país

Para 2030, España se propone reducir las emisiones totales de gases de efecto invernadero en un 32 % con respecto a los niveles de 1990, lo que supone un aumento con respecto al objetivo anterior del 23 %. Además, **el país se ha comprometido a alcanzar la neutralidad en carbono para 2050**, con una reducción del 90 % de las emisiones con respecto a los niveles de 1990, que se estiman en un **máximo de 29 MtCO₂** al año. Se espera que las emisiones restantes se compensen con sumideros naturales, cuya capacidad de captura se prevé que alcance los 37 MtCO₂ en 2050.

Área estratégica	Descripción	Asignación de recursos	Objetivo para 2030	Objetivo para 2050
Generación de electricidad renovable	Acelerar el despliegue de la energía solar, eólica e hidroeléctrica para descarbonizar el sector eléctrico.	Inversiones significativas en infraestructuras renovables, con el apoyo de fondos de la UE e incentivos nacionales.	81 % de la electricidad procedente de fuentes renovables	100 % de generación de electricidad renovable
Producción de hidrógeno verde	Posicionar a España como líder europeo en hidrógeno verde, aprovechando los abundantes recursos renovables.	Subvenciones gubernamentales e inversiones extranjeras, incluidas asociaciones con empresas internacionales.	12 GW de capacidad instalada	Importante productor y exportador de hidrógeno verde
Adopción de vehículos eléctricos	Promover la electrificación del sector del transporte para reducir las emisiones del tráfico rodado.	Incentivos para la compra de vehículos eléctricos, ampliación de la infraestructura de recarga y medidas reguladoras.	5,5 millones de vehículos eléctricos en funcionamiento	Prohibición de la venta de vehículos con motor de combustión interna para 2040
Mejoras en la eficiencia energética	Mejorar la eficiencia energética en todos los sectores para reducir la demanda energética global.	Aplicación de normas de eficiencia, programas de modernización y campañas de sensibilización.	Reducir el consumo de energía primaria en un 39,5 %.	Mejoras continuas que conduzcan a una economía altamente eficiente desde el punto de vista energético
Eliminación gradual del carbón y la energía nuclear	Transición de fuentes de energía con altas emisiones hacia alternativas más limpias.	Planes de eliminación gradual gestionados con apoyo a las comunidades y los trabajadores afectados.	Eliminar el carbón para 2025; dismantlar las centrales nucleares para 2035	Eliminación completa de los combustibles fósiles; dependencia de fuentes de energía renovables
Reducción de la dependencia de las importaciones de energía	Aumentar la autosuficiencia energética mediante la producción nacional de energía renovable.	Inversiones en proyectos energéticos locales y diversificación de las fuentes de energía.	Reducir la dependencia al 50 %.	Lograr la independencia energética mediante la producción de energía renovable.

Tabla 13. Descripción de las estrategias incluidas en el plan nacional español de energía y clima.

El enfoque de España respecto a la CDR es actualmente limitado y se centra en gran medida en soluciones basadas en los ecosistemas, como la forestación y la reforestación, la restauración de humedales y las prácticas agrícolas sostenibles. El marco climático nacional, definido principalmente a través del **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030**, reconoce la necesidad de eliminar el CO₂ para alcanzar las emisiones netas cero, pero pone el énfasis casi exclusivamente en la mejora de los sumideros biológicos, prestando poca atención a las opciones tecnológicas de CDR. Al mismo tiempo, los Proyectos Estratégicos de Recuperación y Transformación Económica (PERTE) para la descarbonización industrial, que forman parte del Plan de Recuperación y Resiliencia de España, mencionan la eliminación de carbono en el contexto de la aplicación de BECCS^{95,96,97,98,99}, afirmando que este proceso podría reducir significativamente las emisiones netas al contrarrestar las emisiones de CO₂ liberadas con las capturadas de la atmósfera durante la fase de crecimiento de la biomasa.

España no se posiciona actualmente como un actor significativo en el mercado internacional de créditos de eliminación de carbono, ya que su estrategia da prioridad a las medidas de mitigación nacionales frente al uso de créditos negociados. Si bien instrumentos como el Fondo de Carbono FES-CO₂ apoyan proyectos que pueden generar créditos, los mercados internacionales de carbono no desempeñan un papel central en la planificación climática nacional.

A nivel político, la inversión en tecnologías de captura y eliminación de carbono sigue siendo muy limitada. Los instrumentos clave de planificación no incluyen la CDR tecnológica, y las recientes novedades normativas siguen centrándose en enfoques basados en la biología. Esta postura se ha visto reforzada por los debates políticos y de expertos, que destacan la baja madurez tecnológica y los retos sin resolver de los métodos de captura directa⁸⁸.

5.2 Marcos jurídicos relevantes para la CDR

La tabla 14 muestra el marco jurídico clave que interviene en el desarrollo de posibles métodos de CDR en España. En el caso de la meteorización, la Estrategia de la UE sobre el suelo y **la Ley 7/2022 de España sobre residuos y suelos contaminados** se aplican principalmente a actividades piloto y de I+D. Las opciones más experimentales, como la OAE, se rigen por una legislación medioambiental más amplia, como **la Directiva Marco de la Estrategia Marina de la UE y la Ley de Costas española**, pero siguen estando en gran medida sin regular y se rigen por el principio de precaución debido a sus posibles riesgos ecológicos. Las soluciones de ingeniería, como el DACCS, cuentan con el apoyo de la UE a través de mecanismos como el **Fondo de Innovación** y **la Ley de Industria Cero Emisiones**, pero se enfrentan a importantes lagunas normativas en España.

En cuanto al almacenamiento, **la Ley 40/2010**, de 29 de diciembre, regula la autorización, la explotación, el cierre y las responsabilidades asociadas al almacenamiento de CO₂ en

Método CDR	Normativa clave (España/UE)	Descripción
Erosión	<ul style="list-style-type: none"> Estrategia de la UE sobre el suelo (2021) Ley 7/2022 (Residuos y suelos contaminados) 	Aún en fase piloto/I+D. Se están estudiando los impactos medioambientales y sobre el uso del suelo ^{100,101} .
Deforestación/ Reforestación ^{102,103}	<ul style="list-style-type: none"> Estrategia forestal de la UE (2030) Plan forestal español Real Decreto 214/2025 	La contabilidad de los sumideros forestales es obligatoria. España debe informar sobre las absorciones en virtud del Reglamento LULUCF de la UE. Existen incentivos para los proyectos de reforestación ^{104,105,106} .
Aumento de la alcalinidad oceánica	<ul style="list-style-type: none"> Directiva Marco de la UE sobre la estrategia marina Ley 22/1988 del Marítimo-Terrestre 	Se considera una forma de geoingeniería marina, sujeta a principios de precaución. Aún carece de un marco jurídico específico en España ^{107,108} .
Captura directa de aire (DACCS)	<ul style="list-style-type: none"> Fondo de Innovación de la UE Estrategia española de CCUS (borrador de 2023) 	No se incluye explícitamente en el NECP español ^{109,110} .
Captura y almacenamiento de carbono (CCS)	<ul style="list-style-type: none"> Ley de Industria Cero Emisiones Netas de la UE (2024) Borrador de la estrategia española de CCUS Ley 40/2010 	Aunque la UE proporciona un marco, España no ha definido objetivos específicos de captura de CO ₂ . No hay proyectos comerciales operativos de CCS ^{109,111,112} .
Biochar	<ul style="list-style-type: none"> Plan de Acción de la UE para la Economía Circular RD 999/2017 español (fertilizantes) 	Reconocido como enmienda del suelo. Se están desarrollando marcos de contabilidad del carbono. Los mercados voluntarios de carbono apoyan su acreditación ^{113,114} .
Carbono azul	<ul style="list-style-type: none"> Estrategia de Biodiversidad de la UE para 2030 Ley 22/1988 del Marítimo-Terrestre 	Ecosistemas protegidos. Las actividades de restauración pueden ser elegibles para créditos de carbono; sin embargo, España carece de un marco claro de contabilidad del carbono para los ecosistemas marinos ^{108,115} .

Tabla 14. Normativa clave implicada en el desarrollo de posibles métodos de CDR en España.

formaciones geológicas subterráneas, tanto en tierra firme como en el subsuelo marino, siempre que se garantice el confinamiento permanente y la seguridad medioambiental. El biochar puede utilizarse como enmienda del suelo en virtud **del RD 999/2017 español** y cuenta con el apoyo de los mercados voluntarios de carbono, aunque los sistemas normalizados de contabilidad del carbono aún están en evolución. Por último, las iniciativas de carbono azul, aunque cuentan con el apoyo de la legislación de la UE y española en materia de biodiversidad y costas, se ven limitadas por la ausencia de una metodología definida de contabilidad del carbono para los ecosistemas marinos.

5.3 Apoyo a la I+D y la innovación

El apoyo de España a la investigación y la innovación relacionadas con la CDR sigue siendo fragmentado, aunque hay indicios de un creciente interés. La mayor parte de la financiación de I+D respaldada por el Gobierno se canaliza a través de programas nacionales del Ministerio de Ciencia e Innovación y del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), que dan prioridad a la descarbonización, pero aún no se centran explícitamente en la CDR como área de investigación estratégica. No obstante, algunas vías tecnológicas de CDR, como el biochar, el BECCS y la captura directa de aire, han recibido apoyo indirecto a través de iniciativas más amplias de energía limpia o economía circular. Por ejemplo, el programa «Misiones CDTI» ha financiado varios proyectos de descarbonización industrial que podrían ampliarse a la CDR, mientras que la participación de España en iniciativas de investigación a escala de la UE en el marco de Horizonte Europa ha proporcionado recursos adicionales para actividades piloto y de demostración relacionadas con la CCUS¹¹⁶.

También se están realizando esfuerzos cada vez mayores para integrar la CDR en el ecosistema de innovación de España mediante la colaboración entre el mundo académico, las instituciones públicas y la industria. Varias universidades y centros de investigación españoles, entre ellos el CIEMAT y el Centro Vasco para el Cambio Climático (BC3), han comenzado a explorar la viabilidad de los sistemas de almacenamiento geológico, DAC y biochar en contextos nacionales y regionales. El borrador de 2023 de la estrategia nacional de CCUS, aunque aún no ha sido aprobado formalmente, menciona la promoción de bancos de pruebas y laboratorios vivos como forma de avanzar en el despliegue de la CDR, con el posible uso de la contratación pública para la innovación (PPI) y los contratos por diferencia (CfD) como facilitadores del mercado. Sin embargo, la ausencia de líneas de financiación específicas para la CDR, de licitaciones tecnológicamente neutras o de una hoja de ruta estructurada para la innovación significa que España sigue estando por detrás de países como el Reino Unido o Alemania en el fomento de un ecosistema de innovación específico para la CDR¹¹⁷.

Las oportunidades futuras podrían abrirse integrando la CDR en las estrategias industriales verdes existentes, como el «PERTE para Energías Renovables, Hidrógeno Renovable y Almacenamiento (ERHA)» de España, que cuenta con el respaldo de la financiación de Next Generation EU. Aunque no están diseñados explícitamente para la CDR, estos programas crean infraestructuras y entornos de I+D que los actores de la CDR podrían aprovechar, especialmente para el transporte de CO₂, la integración de las energías renovables y la valorización de la biomasa.

5.4 En el horizonte

El panorama político emergente en España sugiere que la CDR podría ganar más impulso en los próximos años, aunque siguen existiendo varias lagunas institucionales y técnicas. Un hito clave es la próxima aprobación de la Estrategia Nacional de CCUS, que se espera que describa medidas más concretas para el despliegue de infraestructuras de captura, transporte y almacenamiento de carbono, sentando las bases para la integración tanto de opciones de CCS de fuente puntual como de CDR, como BECCS y DACCS. Esta estrategia, combinada con la evolución de la normativa europea, como la Ley de Industria Cero Neto (NZIA) y el Marco de Certificación de Eliminación de Carbono (CRCF) propuesto por la UE, podría ayudar a armonizar los incentivos y estandarizar los marcos de seguimiento, notificación y verificación (MRV) en todos los métodos de CDR.

La participación de las partes interesadas también está aumentando. Iniciativas como los proyectos Enagás CO₂ Hubs y PCI (por ejemplo, CO₂net2 Norte, MOSUSOL-NETCO₂) ilustran el creciente interés de la industria en la construcción de infraestructuras escalables que puedan servir para aplicaciones de CDR. Del mismo modo, la creciente participación de España en las redes internacionales de CDR y en los diálogos europeos sobre el clima (por ejemplo, la Misión CDR de Mission Innovation) posiciona al país para beneficiarse del intercambio transfronterizo de conocimientos, las prácticas de certificación armonizadas y los mecanismos de cofinanciación¹¹⁸. Sin embargo, persisten los retos. La falta de un impulsor institucional coordinado para la CDR, la incertidumbre normativa en materia de almacenamiento de CO₂ y la escasa sensibilización pública pueden retrasar su implantación. Una hoja de ruta nacional que incluya vías de CDR tanto basadas en la naturaleza como tecnológicas, en consonancia con los objetivos de cero emisiones netas de España, podría ayudar a consolidar los esfuerzos fragmentados y proporcionar visibilidad a largo plazo tanto a los innovadores como a los inversores. Por lo tanto, los próximos años serán fundamentales para traducir la voluntad política y la viabilidad técnica en un marco político coherente para el despliegue de la CDR.

5.4.1 Actores del CDR

En España, a pesar del limitado apoyo gubernamental y la ausencia de una estrategia de CDR, está comenzando a tomar forma un ecosistema dinámico. Este reúne a instituciones de investigación y desarrollo, asociaciones, desarrolladores de proyectos, empresas de gestión de CO₂ y corredores de mercado. Los principales actores que impulsan actualmente este panorama emergente se presentan en la figura 26.

5.5 Conclusiones sobre la política actual

La política climática actual de España refleja una gran ambición en materia de descarbonización, especialmente a través de la promoción de las energías renovables, la eficiencia energética y el hidrógeno verde. Sin embargo, su tratamiento directo de la CDR sigue siendo limitado, ya que se hace más hincapié en la mejora de los sumideros naturales que en el desarrollo de soluciones tecnológicas de CDR. El PNIEC actualizado menciona el papel de los sumideros de carbono en el cumplimiento de los objetivos de neutralidad, pero no asigna funciones específicas a métodos de CDR como DACCS, BECCS u OAE. Como resultado, existe un vacío normativo que dificulta

la integración de estos métodos emergentes en la planificación nacional a largo plazo. Sin objetivos claros ni mecanismos de incentivo, el desarrollo de la CDR en España sigue siendo en gran medida exploratorio y carece de dirección estratégica.

Los marcos normativos presentan inconsistencias similares. Si bien España ha adoptado una legislación alineada con la de la UE que apoya el despliegue de las energías renovables y la silvicultura sostenible, siguen faltando elementos clave para la CDR, como la autorización legal del almacenamiento de CO₂ y los marcos formales de MRV. Los enfoques de CDR basados en los océanos y los minerales, por ejemplo, se rigen por leyes medioambientales más amplias sin directrices específicas, lo que limita la participación tanto del sector público como del privado. Además, aunque existe apoyo a la I+D a través de programas nacionales de innovación y financiación de la UE, no hay una línea de financiación específica ni un liderazgo institucional para la CDR. El panorama jurídico e institucional fragmentado sugiere que, para aprovechar todo el potencial de la CDR en España, es necesario establecer una agenda política más coherente y proactiva que reconozca la urgencia de integrar las eliminaciones en la estrategia nacional de descarbonización.



Figura 26. Actores del CDR en España (2026)

6. Geografía social de España

Esta sección tiene por objeto ofrecer una visión general de la geografía social del país, identificando los principales factores que favorecen y limitan el despliegue de la CDR. Se trata de una combinación de investigación documental y ejercicios de participación para captar las percepciones y aspiraciones de una diversidad de actores relevantes.

6.1 Visión general

6.1.1 Economía

En los últimos años, España ha pasado de ser una de las economías más afectadas por la COVID-19 a convertirse en uno de los principales motores de crecimiento de la zona euro. En 2024, el PIB nominal alcanzó los 1,73 billones de dólares y el crecimiento real se situó en el 3,2 %, con una previsión de crecimiento del 2,6 % para 2025. Este rendimiento se ve respaldado por el consumo interno, las exportaciones de servicios y un proceso de modernización basado en la digitalización, el despliegue de energías renovables y las reformas del mercado laboral¹¹⁹. Los principales indicadores macroeconómicos incluyen:

- **PIB y crecimiento:** La actividad económica se sitúa un 5,7 % por encima de los niveles previos a la pandemia (cuarto trimestre de 2019), con un rendimiento superior al de la zona euro.
- **Mercado laboral:** la tasa de desempleo se situó en el 10,6 % en el cuarto trimestre de 2024, su nivel más bajo desde 2008, aunque sigue siendo la más alta de la Unión Europea.
- **Productividad:** el PIB por hora trabajada es aproximadamente un 5 % superior a los niveles de 2019, aunque sigue estando por debajo de la media de la UE.
- **Bienestar:** Con un IDH de 0,918 (2023) y un PIB per cápita de 35 789 dólares estadounidenses (2024), España se encuentra en el grupo de desarrollo humano muy alto.

El valor añadido se concentra en los servicios (70 % del PIB), seguidos de la industria (18 %) y la agricultura (2,5 %). La intensidad de carbono se redujo a 0,10 kg de CO₂/USD en 2023, lo que supone una reducción del 46 % desde 2005, mientras que las emisiones totales de GEI se situaron en 287,7 MtCO₂e. Compensar estas emisiones mediante CDR costaría aproximadamente 14 400 millones de USD (0,8 % del PIB) a 50 USD/tCO₂, aumentando a 28 800 millones de USD (1,7 %) a 100 USD/tCO₂, 57 500 millones de dólares (3,3 %) a 200 dólares/tCO₂, y hasta 143 900 millones de dólares (8,3 %) a 500 dólares/tCO₂.

A 100 USD/tCO₂, lo que se prevé que sea viable para los métodos maduros en 2030, el impacto fiscal se mantendría por debajo del 2 % del PIB. La sólida base económica de España proporciona capacidad para financiar y ampliar la CDR, aunque será esencial mantener el crecimiento de

la productividad, diversificar la industria y garantizar una financiación estable.

6.1.2 Panorama político y público

El panorama político de España se caracteriza por un alto grado de fragmentación, con un gobierno de coalición progresista que depende del apoyo de los partidos regionales y una oposición fuertemente polarizada, especialmente en cuestiones relacionadas con el clima. Esta situación afecta tanto a la estabilidad de los futuros ciclos electorales como al debate público en torno a la neutralidad climática y, cada vez más, a la eliminación de dióxido de carbono (CDR). Se prevé que el actual Gobierno permanezca en el poder hasta 2027, con importantes hitos electorales por delante, como las elecciones europeas de 2026 y las elecciones autonómicas y generales de 2027.

Principales posiciones políticas sobre la política climática:

- **Bloque progresista (PSOE y Sumar):** Apoya el objetivo legalmente vinculante de la neutralidad climática para 2050 y promueve una combinación de proyectos de reducción de emisiones y CCS, incluyendo centros industriales como Bilbao.
- **Partido Popular:** Acepta el objetivo climático de la UE, pero aboga por la «neutralidad tecnológica», defendiendo un papel más importante de la energía nuclear, objetivos intermedios más flexibles y un mayor enfoque en las soluciones de captura industrial.
- **Vox:** Rechaza el consenso científico sobre el cambio climático, se opone a los impuestos ecológicos y pide la derogación de la legislación climática vigente y de las zonas de bajas emisiones.

A pesar de la polarización política, el apoyo público a la acción climática sigue siendo fuerte. Según los datos del Eurobarómetro, una gran mayoría de los ciudadanos apoya la neutralidad climática para 2050 y considera que el cambio climático es uno de los principales retos mundiales. Sin embargo, este consenso general no siempre se traduce en aceptación local cuando los proyectos requieren cambios visibles en las infraestructuras o en el uso del suelo. Los proyectos de energía renovable a gran escala, en particular los eólicos y solares, se han enfrentado a la oposición local y a retos legales, especialmente en Galicia. Si bien las recientes sentencias judiciales han permitido que varios proyectos sigan adelante, estos casos ponen de relieve las tensiones recurrentes entre los objetivos climáticos nacionales y las preocupaciones locales relacionadas con el paisaje, el uso del suelo y las repercusiones económicas.

Al mismo tiempo, el debate en torno a la CDR está cobrando impulso:

- El Real Decreto 214/2025 estableció un registro de la huella de carbono que permite inscribir proyectos de eliminación de carbono.

- La primera planta continental de producción de áridos carbonatados, promovida por Petronor y O.C.O., se está desarrollando en el puerto de Bilbao.
- Las universidades y las ONG siguen insistiendo en la primacía de la reducción de emisiones y en la necesidad de criterios de permanencia sólidos, lo que ha llevado al Gobierno a preparar normas de integridad alineadas con el Marco de Certificación de Eliminación de Carbono de la UE (CRCF).

La aceptación pública de la innovación tiende a aumentar cuando los beneficios son claros y existen mecanismos de participación. Entre los ejemplos de éxito se encuentran el rápido despliegue de infraestructuras digitales, como las redes 5G, y grandes proyectos de transición energética, como el corredor de hidrógeno H2Med, que incorporó amplias consultas públicas.

En general, España muestra un amplio apoyo político y social a la neutralidad climática para 2050, aunque persisten los desacuerdos sobre el ritmo y la combinación tecnológica necesarios. Traducir este apoyo estratégico en aceptación local—mediante la planificación participativa, la transparencia, los mecanismos de reparto de beneficios y el desarrollo de competencias—será esencial para el despliegue eficaz de las soluciones de CDR.

6.1.3 Relación con la ecología

La conciencia medioambiental en España se ha intensificado a medida que los efectos del cambio climático se han hecho más visibles, especialmente a través de las sequías, los incendios forestales y las olas de calor extremas. Según el Eurobarómetro de 2025, España se encuentra entre los países de la UE con mayor preocupación por el clima¹²⁰. Sin embargo, la concienciación sobre otros retos medioambientales, como la biodiversidad, sigue siendo limitada, a pesar del amplio rechazo social a las actividades económicas que dañan las áreas protegidas. En este contexto, la restauración de la naturaleza se percibe como una de las respuestas más eficaces a los retos medioambientales¹²¹.

La preocupación por el medio ambiente también se ha traducido en una creciente movilización social y jurídica, junto con la puesta en marcha de proyectos de restauración y biodiversidad respaldados por la UE. No obstante, siguen existiendo importantes retos para convertir esta preocupación en avances tangibles en materia de mitigación, restauración de ecosistemas y despliegue eficaz de soluciones de eliminación de carbono.

6.1.4 Recursos humanos

España cuenta con una sólida base educativa, pero la ampliación de la CDR se enfrenta a dos limitaciones estructurales: la disminución del número de titulados en ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas y el rápido

crecimiento de la demanda de empleos verdes. España ha experimentado una de las mayores caídas de titulados en ciencia y tecnología de la UE, lo que limita la disponibilidad de competencias especializadas en un momento en que las necesidades de descarbonización se aceleran.

Este desequilibrio ya es visible en el sector energético, donde el empleo ha crecido rápidamente, impulsado por las energías renovables y las tecnologías emergentes, como el hidrógeno verde¹²². Si bien la creación de empleo es fuerte, la mano de obra sigue concentrada geográficamente y muestra desequilibrios de género persistentes, con una representación insuficiente de las mujeres en puestos técnicos y científicos.

En áreas emergentes como el hidrógeno y la captura y almacenamiento de carbono (CCS), se están desarrollando iniciativas de formación específicas que combinan herramientas digitales y experiencia práctica. Sin embargo, la oferta de perfiles altamente especializados, especialmente en modelización de yacimientos, ingeniería de procesos e investigación aplicada, sigue siendo insuficiente. España opera en un mercado laboral internacional competitivo, en el que los salarios más altos en el extranjero atraen a profesionales con experiencia, aunque algunos regresan con mayor experiencia¹²³.

En general, la base industrial y las infraestructuras existentes en España proporcionan una base sólida para la integración de la CDR, pero el éxito de su implantación dependerá de la ampliación de la formación técnica, la retención del talento especializado y la armonización de la educación, la industria y las políticas para satisfacer la demanda futura de competencias.

6.1.5 Integración industrial

España cuenta con una base industrial suficientemente amplia y diversificada para integrar múltiples vías de CDR aprovechando las infraestructuras y cadenas de valor existentes, especialmente en la construcción, el ciclo del agua, la minería y la bioeconomía.

El punto de partida es la construcción: el mercado de la construcción y la obra civil generó casi 180.800 millones de dólares en 2024, algo más del 5 % del PIB nacional, y sigue creciendo, impulsado por la rehabilitación energética y las infraestructuras verdes, según estimaciones basadas en la información publicada por «Cifras INE-Construcción» y la serie de inversiones en construcción de Eurostat¹²⁴. Esta escala convierte al sector del cemento—cuyas plantas siguen fabricando y consumiendo alrededor de 30 Mt al año—en un actor decisivo: solo en 2024, exportó 4,82 Mt de clinker, mientras que su capacidad instalada permite absorber CO₂ en hornos o mineralizarlo en subproductos, según datos de Oficemen, la asociación industrial que informa mensualmente a Eurostat. El potencial de captura y uso ya se está materializando en el acuerdo Petronor-O.C.O Technology, que construirá la primera fábrica continental de

áridos carbono negativo en el Puerto de Bilbao; utilizará CO₂ de la refinería y polvo de demolición local, un flujo abundante si se tiene en cuenta que el país genera alrededor de 33 Mt de residuos de construcción y demolición al año, según la Comisión Europea.

España cuenta con más de 760 plantas desalinizadoras con una capacidad conjunta de alrededor de 5 millones de m³ al día, lo que la sitúa entre los cinco primeros productores mundiales de agua desalinizada, según datos del MITECO¹²⁵. Las salmueras hipersalinas vertidas por estas instalaciones son un sustrato ideal para los métodos emergentes de alcalinización y captura de minerales. La segunda pieza es el ciclo del agua. El PERTE para la Digitalización del Ciclo del Agua moviliza 3.060 millones de euros en inversión pública y privada y lanza convocatorias específicas para el ciclo urbano y el riego. En agosto de 2024, se adjudicaron 300 millones de euros en la segunda convocatoria de propuestas para el ciclo urbano; en 2023, se concedieron 200 millones de euros en ayudas y, en diciembre de 2024, se abrió la tercera convocatoria de propuestas. Este impulso proporciona una base ideal para proyectos piloto de carbonatación en salmueras, sin necesidad de partir de cero en términos de infraestructura¹²⁶.

Los metales estratégicos de España se concentran en el cinturón pirítico ibérico y en Extremadura. Aun así, el valor de la producción del sector se redujo a 3.571 millones de euros en 2023, debido principalmente a la volatilidad de los precios. Según el MITECO, los residuos mineros heredados —más de 200 Mt de relaves y roca estéril— constituyen una importante materia prima secundaria para la mineralización del carbono¹²⁷. Paralelamente, los proyectos de litio en Cáceres y los activos de estaño y tungsteno en Galicia están bien posicionados para encajar con los posibles corredores de transporte de CO₂ hacia la costa cantábrica.

El cuarto pilar es la bioeconomía. El valor añadido agrícola alcanzó los 37.625 millones de euros en 2024, lo que equivale al 2,5 % del PIB; esto implica una base estable de biomasa residual (podas, orujo de oliva, paja de cereales) que podría alimentar plantas de pirólisis o BECCS. La nueva planta de Euthenia Energy en Córdoba, capaz de procesar 35.000 t/año y producir 8.000 t de biochar certificado, demuestra que el secuestro en el suelo es técnicamente viable y está empezando a generar créditos de carbono para el mercado voluntario. Además, iniciativas como Carbonfields en Soria y los proyectos piloto de recarbonización de olivares están probando cadenas de valor integrales y totalmente nacionales.

La tabla 15 muestra datos sobre el tamaño, la cuota de producción nacional y las subcategorías útiles para la CDR, basados en datos publicados por el MITECO.

En conclusión, las instalaciones y cadenas logísticas existentes (hornos de cemento, redes de demolición, plantas desalinizadoras, balsas de residuos y una agroindustria intensiva en biomasa) proporcionan a España un terreno fértil para integrar métodos de CDR sin necesidad de construir toda la infraestructura desde cero. El principal reto será coordinar las normas de certificación, el acceso a la financiación y la formación técnica para que estos circuitos de producción capturen y retengan carbono al ritmo necesario para alcanzar la neutralidad climática en 2050.

6.1.6 Consideraciones culturales, estéticas, religiosas y éticas

España aborda cualquier despliegue de infraestructura climática dentro de un marco cultural muy sensible al paisaje y al patrimonio histórico: con 50 sitios declarados Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, cualquier

Sector	Tamaño económico (€)	Cuota de producción nacional	Subcategorías relevantes para la CDR
Construcción, cemento y residuos de construcción y demolición	95.100 millones de euros de VAB en 2023 (5,4 % del PIB)	El 94 % de la demanda es cubierta por 12 fábricas de cemento; 1,37 Mt importadas frente a 22,2 Mt producidas; 4,8 Mt de clinker exportadas (2024)	Polvo y finos de hormigón (~33 Mt/año), escorias, cenizas volantes
Agricultura y biomasa	37.800 millones de euros de ingresos agrícolas en 2024 (2,5 % del PIB)	≈ 90 % de los alimentos básicos producidos en el país; exportador neto de fruta, verdura y aceite de oliva	Poda de vid y olivo (~20 Mt/año), paja de cereales (~8 Mt/año), purines de cerdo (~55 Mm ³ /año)
Minería y áridos	3.570 millones de euros de valor de producción en 2023 (-9 % interanual)	> 65 % de autosuficiencia en áridos y piedra ornamental; > 50 % importado para Cu y Li	Residuos y roca estéril (~200 Mt acumulados); polvo de cantera
Ciclo del agua y desalinización	≈ 2.600 millones de euros al año en servicios de tratamiento; ≈ 950 plantas, ~5 Mm ³ /día de capacidad	100 % del agua desalinizada producida en el país; empresas españolas exportan servicios de operación y mantenimiento.	Salmuera hipersalina (> 60 g/L); lodos de ósmosis inversa y corrientes de rechazo.

Tabla 15. Sector Producción nacional.

proyecto debe cumplir los requisitos de la Ley 16/1985 de Patrimonio Histórico, que obliga a los promotores a demostrar la compatibilidad estética y patrimonial desde las primeras fases del proyecto. Este requisito se ve reforzado por las consultas públicas obligatorias en los procedimientos medioambientales, lo que fomenta una cultura participativa que puede retrasar – o legitimar – las inversiones en función de la calidad del diálogo inicial.

Desde una perspectiva ética y religiosa, la población, mayoritariamente católica – aunque no muy practicante (casi el 53 % de los españoles se identifica como católico, pero solo el 17 % es practicante) –, ha acogido la encíclica *Laudato Si* como referencia moral: las parroquias y las ONG vinculadas a la Iglesia apoyan iniciativas de restauración y sumideros naturales de carbono, convirtiendo la «ecología integral» en un argumento a favor de la eliminación de carbono.

En conclusión, la cultura española favorece la acción climática siempre que los proyectos respeten el patrimonio, involucren a las comunidades y se presenten como un deber ético intergeneracional. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, algunos proyectos de CDR o de energías renovables pueden seguir enfrentándose al rechazo público, lo que pone de relieve la necesidad de mejorar la educación medioambiental en toda la sociedad. Aunque el público es consciente en general de que estas acciones son necesarias, tiende a haber una percepción negativa cuando estos proyectos afectan a zonas cercanas, sustituyen actividades tradicionales o provocan cambios en el uso del suelo.

6.2 Entrevistas a las partes interesadas

En esta sección se resumen los resultados del análisis de 23 entrevistas realizadas a partes interesadas clave en el ámbito de la política climática y la CDR en España. Estas entrevistas se llevaron a cabo en julio y agosto de 2025, con una duración total de 23 horas. Los entrevistados representan una muestra diversa que incluye administraciones públicas, centros de investigación, empresas privadas, asociaciones industriales y organizaciones de la sociedad civil (Tabla 16). Todos ellos suelen participar en la formulación o aplicación de políticas relacionadas con la energía, el medio ambiente, CCS y otras áreas conexas.

El objetivo de este análisis es ofrecer una visión consolidada sobre tres aspectos fundamentales: el conocimiento y las opiniones de las partes interesadas sobre la política climática actual del país, su nivel de familiaridad con los diferentes métodos de CDR y sus percepciones sobre el despliegue de estas soluciones como herramienta para hacer frente al cambio climático. La información recopilada permite identificar puntos de consenso, divergencias y factores críticos que influyen en la adopción de métodos de CDR en el contexto español.

6.2.1 Conocimiento y opiniones sobre la política climática actual de España

Las partes interesadas coinciden en general en que España cuenta con un marco normativo ambicioso y alineado con los objetivos climáticos de la UE. Sin embargo, advierten que su aplicación, especialmente en lo que respecta a los métodos de CDR, sigue siendo lenta y desigual. Entidades públicas como la OECC, IHOBE y las administraciones regionales señalan las herramientas y los planes existentes, pero reconocen que su despliegue se limita en gran medida a enfoques basados en la naturaleza, como la forestación/reforestación (ARR) y la gestión forestal mejorada (IFM). A pesar de los indicios de voluntad política, entre los obstáculos recurrentes se encuentran la complejidad administrativa, la falta de coordinación entre los distintos niveles de gobierno y la falta de incentivos específicos.

Las academias y los centros de investigación comparten la opinión de que España es activa en la mitigación, pero que la CDR está poco desarrollada. Los investigadores señalan la falta de una hoja de ruta clara, la insuficiente inversión en I+D y los débiles vínculos entre la ciencia y la política, además de la excesiva dependencia de los sumideros naturales sin explorar otras opciones.

Las empresas privadas valoran los objetivos nacionales, pero los consideran poco realistas si no se apoyan en incentivos y medidas reguladoras. Aunque algunas, como Sylvestris o la Fundación Repsol, promueven proyectos de ARR, la mayoría de las empresas privadas – incluidas las mencionadas – perciben los riesgos económicos y las incertidumbres asociados a métodos más complejos.

Tipo de parte interesada	Partes interesadas entrevistadas
Entidades públicas y administraciones	OECC, IHOBE, Consorcio de Aguas, Govern Balear, Principado de Asturias
Academia y centros de investigación	Universidad de Oviedo, IGME, CSIC, TECNALIA
Empresas privadas	Minersa, Fundación Repsol, ENAGAS, Sylvestris, Balearia
Asociaciones empresariales / industriales	SIDEREX, Aclima, FEAf, CEBEK, ADEGI, Clúster Vasco de la Energía
ONG y sociedad civil	COPAde, Greenpeace, ECODES

Tabla 16. Las 23 partes interesadas entrevistadas.

Las asociaciones industriales subrayan que la normativa actual está desconectada de la realidad industrial, lo que genera inseguridad en las inversiones. Por último, las ONG hacen hincapié en la necesidad de una visión más coherente con los retos sociales y medioambientales, y reclaman políticas que integren la justicia climática y la participación ciudadana.

6.2.2 Concienciación y conocimiento de la CDR y sus métodos

El conocimiento de la CDR es desigual. **Las administraciones públicas y las ONG** están familiarizadas con las soluciones basadas en la naturaleza, pero carecen de un conocimiento profundo de las opciones industriales, que son recibidas con cierto escepticismo.

Por otro lado, **las academias y los centros de investigación** poseen una gran experiencia técnica y distinguen claramente el potencial y las limitaciones de cada método. Identifican como prometedoras las soluciones relacionadas con el suelo, la restauración de turberas y humedales costeros y el biochar, mientras que métodos como el DACCS o el OAE se consideran demasiado costosos e inciertos en cuanto a sus efectos.

Las empresas privadas muestran un conocimiento fragmentado: las que se dedican a proyectos forestales dominan el campo, mientras que el resto tiene un conocimiento limitado de los métodos emergentes, lo que reduce su disposición a invertir. El conocimiento de las asociaciones industriales se limita en su mayor parte a métodos sencillos y basados en la naturaleza, mientras que otros enfoques se perciben como experimentales.

En todos los grupos de partes interesadas existe una preocupación general por la falta de información clara y de sistemas de seguimiento sólidos, lo que dificulta el establecimiento de la confianza.

6.2.3 Opiniones sobre el despliegue de la CDR en España

En cuanto al despliegue de la CDR, todos los grupos coinciden en que España tiene potencial, pero la realidad actual es limitada. El principal obstáculo identificado es la ausencia de un marco regulatorio específico que vaya más allá de la ARR y la gestión forestal. Otros retos son los altos costes, la falta de modelos económicos sostenibles, la limitada concienciación social y, en muchos casos, la oposición local a los proyectos de almacenamiento geológico. También se mencionan cuestiones logísticas y territoriales, como la disponibilidad de biomasa, los riesgos de incendios forestales y las dificultades para encontrar emplazamientos adecuados.

A pesar de estos retos, hay varios factores que podrían facilitar un mayor despliegue. Las partes interesadas destacan la necesidad de un impulso político sostenido, respaldado por financiación europea y nacional, incentivos

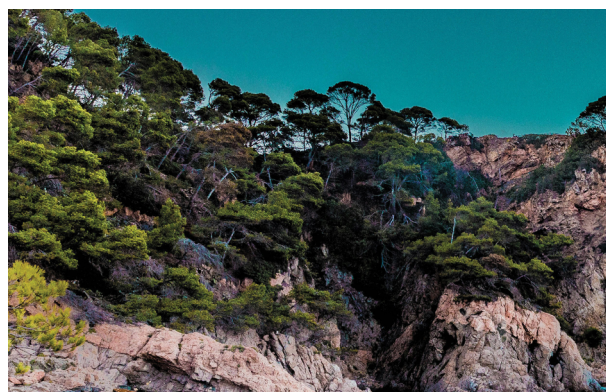
fiscales y una estrategia a largo plazo. La colaboración público-privada se valora como un factor clave, y se hace hincapié en la importancia de la educación y la comunicación medioambientales para generar aceptación social.

Existe consenso en que las soluciones basadas en la naturaleza —como la ARR, la IFM, la restauración de turberas y humedales costeros y el almacenamiento de carbono en el suelo— son las más viables a corto plazo, ya que ofrecen beneficios ambientales y sociales adicionales. Por su parte, una ONG no considera que la CDR sea una solución y apoya los enfoques basados en la naturaleza únicamente por los beneficios adicionales que proporcionan; además, es muy crítica con los métodos industriales de CDR y pide una mayor ambición climática y acción social para cumplir los objetivos de 2050. Por su parte, los demás grupos de interesados consideran que los métodos industriales, a pesar del escepticismo que suscitan, son necesarios a medio y largo plazo, siempre que se siga avanzando en la investigación, la regulación y la demostración de su viabilidad.

En la tabla 17 se ofrece un resumen de los resultados de las entrevistas con las partes interesadas.

6.2.4 Conclusiones sobre las entrevistas a las partes interesadas

El análisis muestra que España cuenta con un marco climático ambicioso, pero su aplicación es limitada y desigual. Existe consenso en que las soluciones basadas en la naturaleza son las más viables a corto plazo, aunque requieren una gestión y un seguimiento adecuados. Los métodos industriales, aunque prometedores, suscitan inquietudes por su coste y su falta de desarrollo, por lo que su adopción dependerá de los avances en I+D y en la normativa. Las principales barreras identificadas son la ausencia de incentivos claros, la falta de coordinación administrativa y la escasa sensibilización pública. Sin embargo, existen oportunidades si se refuerzan las políticas, se promueve la colaboración público-privada y se aprovechan los fondos europeos. Para avanzar, España necesita una estrategia nacional que combine soluciones naturales e industriales, respaldada por la ciencia, la inversión y la participación de todas las partes interesadas.



Tipo de parte interesada	Conocimiento de la política climática general del país	Nivel de compromiso con la descarbonización	Conocimiento de las políticas específicas de CDR	Conocimiento de la CDR	Perspectiva a corto plazo	Factores clave o partes interesadas que se consideran más adecuados para impulsar la CDR en España
Entidades y administraciones públicas	Alta	Medio-alto	Medio-alto	Medio-alto	Moderadamente optimista	<p>Factores clave: educación ambiental, administraciones públicas, mejora tecnológica e incentivos económicos.</p> <p>Partes interesadas: Gobierno central, gobiernos regionales (comunidades autónomas), consejos provinciales y municipios, industriales y productores agrícolas.</p>
Academia y centros de investigación	Alto	Medio-alto	Medio	Medio-alto	Moderadamente pesimista	<p>Factores clave: interés político, conocimiento e inversión financiera.</p> <p>Partes interesadas: Gobierno central y gobiernos regionales (comunidades autónomas).</p>
Asociaciones empresariales/industriales	Medio-alto	Medio	Medio-bajo	Medio-bajo	Moderado	<p>Factores clave: colaboración público-privada, políticas públicas a través de inversiones y economía.</p> <p>Partes interesadas: Gobierno central, administraciones públicas y sector privado, MITECO, gobiernos regionales (comunidades autónomas), Gobierno y partidos de la oposición.</p>
Empresas privadas	Medio-alto	Medio-alto	Medio	Medio-bajo	Moderadamente optimista	<p>Factores clave: creación de un mercado semiobligatorio.</p> <p>Partes interesadas: Gobierno central, centros de investigación, administraciones públicas, sector industrial, OECC, comunidades autónomas.</p>
ONG	Alto	Alto	Alto	Alto	Moderadamente optimista	<p>Factores clave: educación ambiental, esferas políticas de alto nivel.</p> <p>Partes interesadas: sociedad, municipios, Estado, industrias.</p>

Tabla 17. Resumen y evaluaciones obtenidas de las entrevistas con expertos.

Participantes del panel de ciudadanos

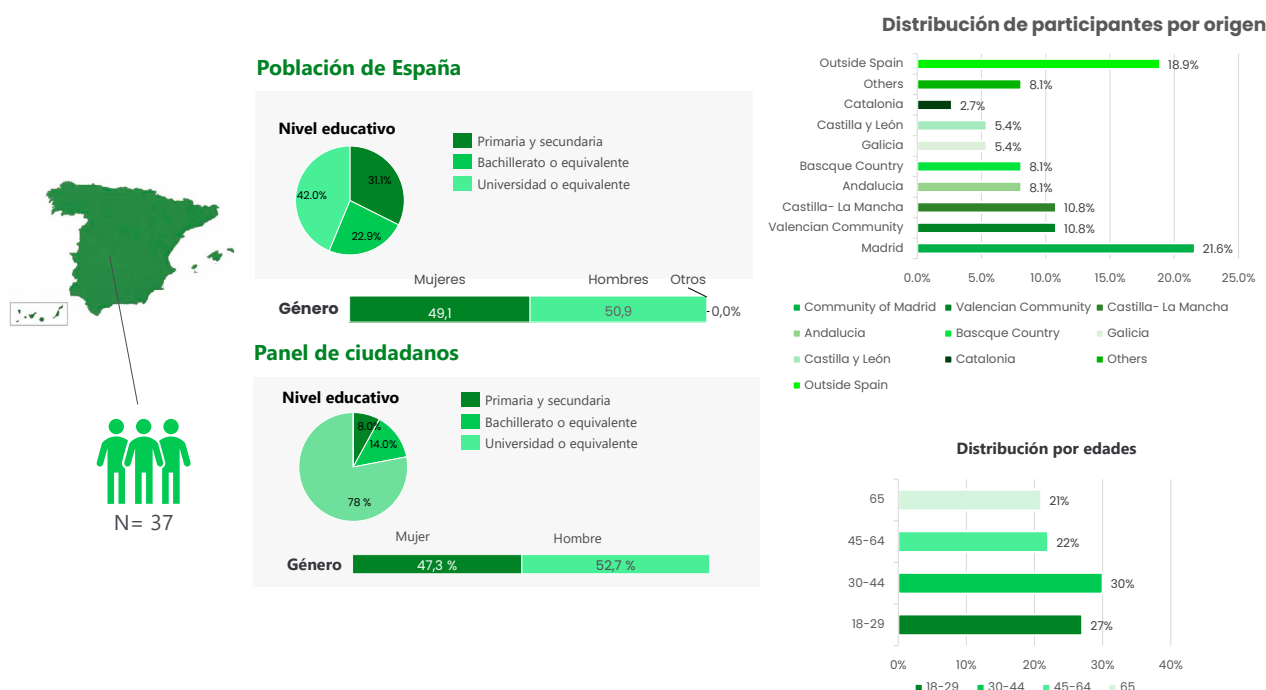


Figura 27. Composición del panel ciudadano por edad, nivel educativo y origen.

6.3 Panel ciudadano

Como parte de la evaluación de la geografía social, en septiembre de 2025 se celebró en Madrid un panel ciudadano para explorar la percepción del público en general sobre las soluciones tecnológicas y naturales que promueven la CDR. Al panel asistieron 37 personas, que representaban una gran diversidad en términos de edad, género, formación académica, experiencia profesional y origen geográfico. La distribución por género fue casi igualitaria, la distribución por edades fue bastante equilibrada y los niveles de educación fueron en general altos, como se puede ver en la figura 27. Además, los participantes procedían de toda España y del extranjero.

Antes del panel, los participantes recibieron resúmenes de una página de cada método de CDR, en los que se describían las ventajas, los inconvenientes y el contexto general. Este material se compartió por escrito y a través de un seminario web, disponible en directo y bajo demanda. Una encuesta previa al panel recopiló las opiniones iniciales, cuyos resultados se muestran en los gráficos siguientes.

La sesión, de tres horas de duración, combinó debates en pequeños grupos con una sesión plenaria. Se animó a los ciudadanos a compartir sus puntos de vista abiertamente y a solicitar más información. El diálogo siguió una estructura método por método, comenzando por los beneficios y las preocupaciones percibidos y concluyendo con una síntesis de los enfoques de CDR preferidos para España.

6.3.1 Concienciación y opiniones de las partes interesadas sobre la política climática actual del país

Los participantes en el panel ciudadano destacaron la importancia de desvincular la acción climática, que más del 60 % calificó de importante o muy importante, sin opiniones contrarias, de los ciclos políticos y las prioridades electorales cambiantes. Consideran que para hacer frente al cambio climático se requiere un esfuerzo global y unificado en el que todos los ciudadanos desempeñen un papel activo. Si bien los objetivos nacionales están bien fundados y se están realizando progresos, los participantes pidieron que se aumentara la inversión y la sensibilización pública para acelerar el impulso. Reconociendo la magnitud del reto, hicieron hincapié en la necesidad de políticas y herramientas integrales tanto a nivel nacional como internacional.

6.3.2 Concienciación/conocimiento de la CDR y los diferentes métodos

Los participantes en el panel ciudadano desconocían la existencia de estos métodos y el hecho de que se estuvieran promoviendo como mecanismos de CDR. Destacaron la dificultad de comprender cada uno de los métodos analizados, así como sus implicaciones y retos asociados, reconociendo que se requieren conocimientos técnicos muy específicos para comprenderlos plenamente. Ante esta falta de comprensión, expresaron su preocupación por la incertidumbre de los posibles impactos, la necesidad de claridad y sensibilización

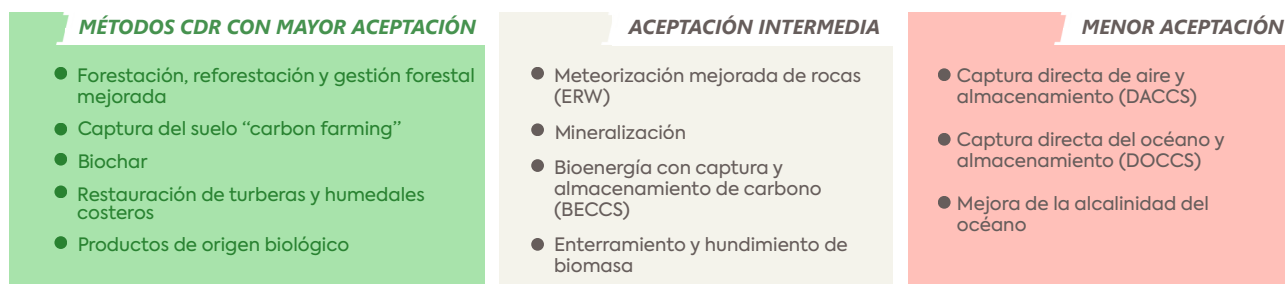


Figura 28. Clasificación de los métodos de CDR según la opinión de los participantes en el panel ciudadano.

pública, y la importancia de no perder de vista el objetivo real: cambiar los hábitos de consumo y los estilos de vida para prevenir y reducir las emisiones.

La información proporcionada cambió, al menos ligeramente, la percepción de la mayoría (66 %) de los participantes. Una minoría muy pequeña (9 %) mantuvo su posición y casi una cuarta parte (24 %) no respondió. Es importante señalar que todos ellos mostraron su preocupación por el cambio climático (considerándolo por unanimidad una amenaza global).

Los métodos de CDR basados en la naturaleza, como la forestación/reforestación, la restauración de turberas, el biochar y el cultivo de carbono, recibieron los niveles más altos de aceptación. Por el contrario, los DACCS y los OAE fueron rechazados enérgicamente, y los participantes citaron preocupaciones sobre la elevada demanda energética y los requisitos de almacenamiento de CO₂ de los primeros, y los posibles riesgos ecológicos de los segundos.

6.3.3 Opiniones sobre el despliegue de la CDR en el país y su uso para combatir el cambio climático

Los participantes en el panel ciudadano consideraron que los métodos de eliminación de carbono basados en la naturaleza eran los más aceptables y prometedores, en gran parte

debido a su realismo percibido y a los beneficios adicionales que aportan, como la conservación de la biodiversidad, la mejora del suelo y la gestión del agua. También se consideró que el ERW y el biochar tenían potencial, especialmente como soluciones complementarias dentro de una cartera más amplia. Por el contrario, otros enfoques de CDR se consideraron menos viables en esta etapa, principalmente debido a la inmadurez tecnológica, los altos costos y los posibles efectos secundarios negativos (Figura 28). No obstante, algunos participantes se mostraron optimistas en cuanto a que el DACCS y el BECCS podrían cobrar impulso si surgieran nuevas vías de CCU más allá del almacenamiento, avanzara la preparación tecnológica y disminuyeran los costos.

Los participantes hicieron hincapié en la importancia de reconocer quién ha sido el principal responsable del problema, junto con la necesidad de una distribución justa y equitativa de los costes entre los países. Una vez más, se hizo un fuerte llamamiento a la educación y a una mayor sensibilización del público. La responsabilidad, subrayaron, no debe recaer únicamente en las instituciones públicas, sino que también debe ser compartida por las escuelas, las empresas, las familias y otros actores sociales. En general, los ciudadanos expresaron una actitud positiva hacia la aplicación de métodos de CDR para mitigar el cambio climático, con 18 participantes muy a favor, 9 a favor y solo uno algo en contra.



7. Potencial realista de España para implementar la CDR (lo que se podría hacer)

Partiendo de la descripción general de los recursos del capítulo 3 y del potencial teórico de CDR esbozado en el capítulo 4, en este capítulo se revisan las hipótesis sobre la disponibilidad de recursos y los métodos de CDR seleccionados para incorporar las perspectivas de las partes interesadas, la opinión pública y las consideraciones jurídicas y socioeconómicas analizadas en los capítulos 5 y 6. Sobre la base de este análisis integrado, estimamos el potencial realista, definido como los volúmenes de CDR que pueden desplegarse con un alto grado de confianza en un futuro previsible. Dentro de este marco, siguen siendo posibles múltiples escenarios, determinados en gran medida por el nivel de ambición de España. En este capítulo se exploran esas vías en detalle.

7.1 Metodología para el potencial realista de CDR

El potencial realista de CDR en España se calculó utilizando la misma metodología que el potencial teórico del capítulo 4, pero con restricciones añadidas, como factores normativos, económicos y sociales. La evaluación de la aceptación social se basa en las opiniones recabadas a través de las entrevistas con las partes interesadas y el panel de ciudadanos descrito en el capítulo 6. A diferencia de la evaluación teórica del capítulo 4, que asume una asignación total de recursos a la CDR, la estimación realista es más conservadora, ya que tiene en cuenta las demandas y restricciones contrapuestas, lo que da lugar a unos volúmenes de CDR previstos más bajos. Estas estimaciones más cautelosas se basan en las siguientes consideraciones:

- **Viabilidad técnico-económica:** además de las limitaciones físicas, se evaluó el uso de los recursos en términos de lo que es razonablemente viable desde una perspectiva técnico-económica, en particular en el caso de los recursos que son objeto de disputa entre múltiples métodos de CDR. Sin embargo, no se incluyeron como inputs dinámicos variables macroeconómicas como el crecimiento del PIB, los niveles de costes, los tipos de interés y los mecanismos de apoyo financiero existentes.
- **Despliegue tecnológico:** el ritmo y el alcance de la implantación de la tecnología se ajustaron para reflejar expectativas realistas. Por ejemplo, las tasas de adopción de métodos como BECCS y DACCS se estimaron para 2030 y 2050 basándose en trayectorias de despliegue plausibles.
- **Restricciones legislativas:** se incorporaron las limitaciones legales cuando estas restringen de forma clara y significativa la disponibilidad de determinados recursos. El ejemplo más notable es la *Ley 40/2010 de almacenamiento geológico de CO₂*, que impone requisitos estrictos en materia de permisos,

responsabilidad y selección de emplazamientos para el almacenamiento geológico, y el alcance limitado del *Registro nacional de proyectos de absorción de CO₂ en virtud del Real Decreto 214/2025*, que actualmente solo reconoce un conjunto reducido de proyectos de absorción basados en la naturaleza.

- **La aceptación social** se evaluó a través del apoyo público, determinado a partir de las aportaciones de las entrevistas con las partes interesadas y el panel de ciudadanos. La aceptación social se consideró un factor limitante para determinados métodos, en particular el DOCCS y el OAE, y la distribución entre el BECCS y el DACCS. El OAE se excluyó por este motivo, mientras que el DOCCS se excluyó tanto por la falta de aceptación social como por los elevados costes que lo harían inviable en un escenario realista (véase el recuadro 4). En cuanto a la aceptación social de DACCS, la principal limitación era el escaso conocimiento de la tecnología por parte del público. En consecuencia, DACCS no ha sido penalizado en la evaluación por motivos de aceptación social. La asignación entre BECCS y DACCS se realizó teniendo en cuenta otras limitaciones clave, como las diferencias de coste entre ambos enfoques, la mayor dificultad técnica de capturar CO₂ directamente del aire ambiente, dada su muy baja concentración, y la disponibilidad de los recursos de biomasa necesarios para el despliegue de BECCS (véase la sección 7.4.6).

Al igual que con el potencial teórico, se aplicó un enfoque ascendente a la mayoría de los métodos de CDR.

7.2 Escenarios realistas del potencial de CDR

Para evaluar el potencial realista de eliminación de dióxido de carbono de España, este estudio esboza tres escenarios para 2050:

- Escenario **de referencia** alineado con los objetivos climáticos actualmente vigentes en la legislación;
- Escenario **conservador** que refleja el statu quo sin esfuerzos adicionales para implementar la CDR y que asume una implementación limitada de los métodos de CDR debido a barreras como la insuficiencia de inversiones, la falta de un marco regulatorio claro, los graves impactos climáticos, la baja aceptación pública, la limitada colaboración público-privada y el aumento de los incendios forestales, entre otros factores;
- Escenario **ambicioso** que supone medidas adicionales que permiten superar (o acelerar) los objetivos climáticos existentes, con un fuerte apoyo a los métodos de CDR y menos efectos climáticos adversos.

En comparación con las emisiones residuales previstas para España en 2050 (29 MtCO₂, LTS¹), el potencial de CDR es de ~17 MtCO₂/año para 2050 en el escenario **conservador**, ~52 MtCO₂/año en el **escenario de referencia** y ~69 MtCO₂/año en el escenario **ambicioso**, excluyendo los sumideros

naturales. Los escenarios de referencia adicionales para 2030 y 2040 ilustran un aumento plausible del despliegue de CDR a lo largo del tiempo y se muestran en la tabla A.1 del anexo A, que también resume las hipótesis clave.

En los tres escenarios, **los métodos de gestión de ecosistemas se perfilan como los principales métodos de CDR** (Figura 29). Esto se debe en gran medida a la disponibilidad de recursos, la amplia aceptación social y el fuerte reconocimiento público. Si bien métodos como DACCS y BECCS pueden ofrecer un mayor potencial, su despliegue se ve limitado por la capacidad limitada de almacenamiento de CO₂.

En todos los escenarios se tienen en cuenta la restauración de turberas, la revegetación costera, los productos biológicos duraderos y la meteorización mejorada de las rocas, pero su potencial es muy insignificante. La restauración de la *posidonia* emerge como el método marino de CDR más factible tras tener en cuenta los resultados sobre las preferencias de los ciudadanos y las partes interesadas, pero su potencial es mínimo. La mejora de la alcalinidad oceánica (OAE) se despliega en mínima medida solo en el escenario ambicioso debido al rechazo social. La restauración de turberas ofrece un alto potencial de enterramiento de carbono, pero los esfuerzos actuales siguen siendo mínimos en relación con la superficie disponible, a pesar de los objetivos del PNIEC. La captura directa de carbono oceánico sigue siendo

económicamente inviable (véase el recuadro 4), incluso si se considera su posible despliegue para 2050. La DACCS a alta temperatura no tiene ningún potencial, ya que se supone que el calor de alta calidad se destina íntegramente a usos industriales.

7.2.1. Escenario de referencia

En el escenario de referencia, el potencial anual de CDR para España es de **~52 MtCO₂ al año en 2050**. Si se añade la capacidad del sumidero natural previsto (14 MtCO₂), España podría eliminar **~66 MtCO₂ al año en 2050**. En el escenario de referencia, el objetivo de España de absorber 29 MtCO₂ para 2050, necesario para alcanzar la neutralidad climática una vez que las emisiones se hayan reducido en un 90 %, se logra con las eliminaciones procedentes de los métodos de gestión de los ecosistemas, que representan ~34 MtCO₂/año para 2050.

Los principales métodos de CDR en el escenario de referencia para 2050 son **la gestión de las tierras de cultivo**, que elimina **12 MtCO₂/año**, y **la mejora de la gestión forestal (10 MtCO₂/año)**. En este escenario, aunque actualmente no se registran proyectos de gestión forestal mejorada (IFM) en España y la norma del mercado voluntario de carbono de la Oficina Española de Cambio Climático aún no reconoce la IFM como un tipo de proyecto elegible, se asumió que la IFM experimentaría un crecimiento similar al de la certificación de gestión forestal sostenible (por ejemplo, PEFC y FSC).

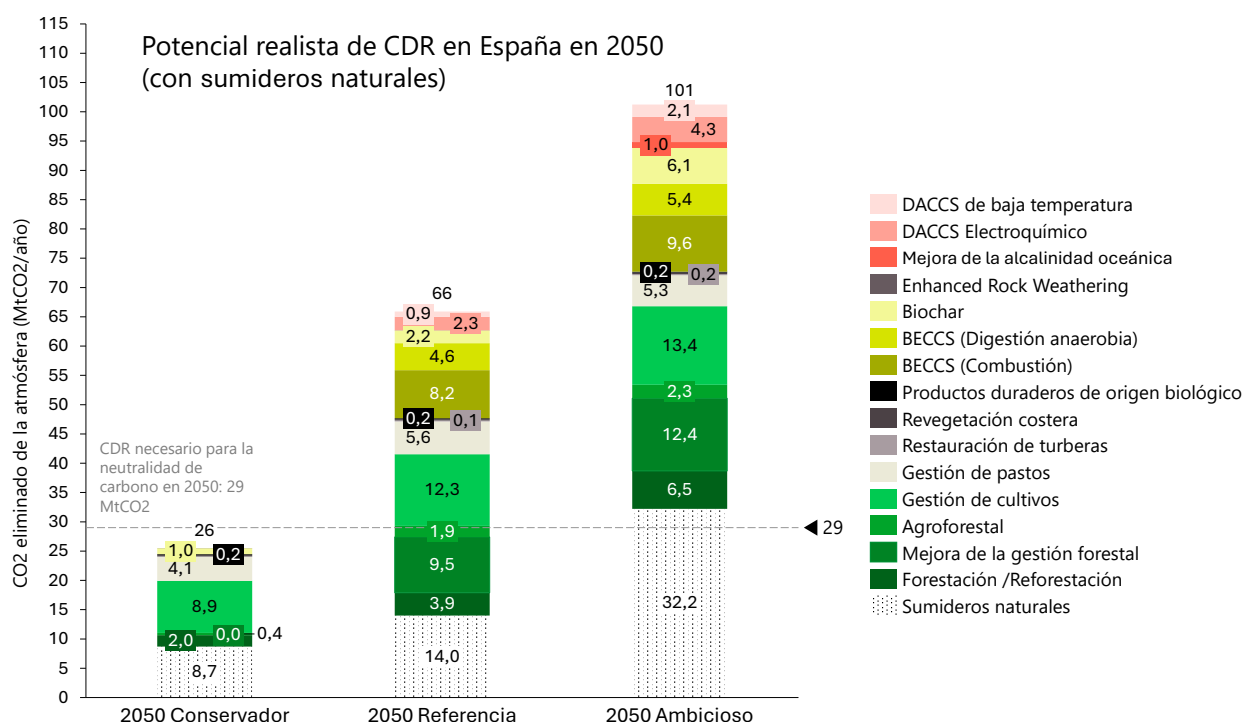


Figura 29. Potencial realista de CDR de España en 2050 en los escenarios conservador, de referencia y ambicioso, en comparación con las emisiones residuales previstas para 2050 (29 MtCO₂).

Cuadro 5. Sumidero forestal (excluyendo la CDR adicional)

Como referencia actual, las tierras forestales sin cambios han secuestrado una media de 29,15 MtCO₂e/año (incl. CDR) durante las dos últimas décadas (Inventario Nacional de GEI¹²⁸). En el escenario conservador, las prácticas de eliminación de carbono tienen por objeto evitar un mayor deterioro, pero no aumentarían la capacidad de los sumideros más allá de los niveles actuales. Además, las cifras actuales se refieren al sumidero forestal en su conjunto, que incluye tanto las medidas de CDR como la absorción del ecosistema natural. En este informe, excluimos el secuestro de los métodos de CDR del sumidero natural.

Para 2050, se prevé que la absorción total por sumideros naturales y CDR sea de 37 MtCO₂, mientras que el sumidero natural (excluyendo CDR) se prevé que sea de **14 MtCO₂e/año** en el escenario de referencia, basándose en un factor de conversión de 1,88 tCO₂/ha/año para masas forestales no gestionadas, según datos del Inventario Nacional de GEI. El escenario conservador estima **~8,7 MtCO₂e/año**, ambos por debajo de los niveles actuales debido al cambio climático. La Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo del MITECO¹ señala que «ya se observan señales de saturación, lo que conduce a una disminución de la absorción total».

Una mejor gestión podría ralentizar la degradación, pero es poco probable que impulse la captura de carbono más allá de los niveles actuales, dadas las presiones climáticas. En el escenario ambicioso, el sumidero (excluyendo la CDR) se mantiene al mismo nivel que el año pasado, **32,16 MtCO₂e/año**, lo que representa una situación en la que los impactos climáticos son menos graves y la superficie del sumidero forestal aumenta.

Otros métodos importantes a destacar son el BECCS con combustión (8 MtCO₂), la gestión de pastos (6 MtCO₂/año) y el BECCS con digestión anaerobia (5 MtCO₂). Se estima que la forestación/reforestación elimina ~4 MtCO₂ al año, basándose en la hipótesis de que se cumple plenamente el objetivo de forestación/reforestación de 0,6 Mha de la Estrategia Forestal Española²⁴ (0,6 Mha reforestados para 2050). La agrosilvicultura, el biochar y el DACCS electroquímico contribuyen con aproximadamente 2 MtCO₂/año cada uno, mientras que el DACCS a baja temperatura es el que menos contribuye, con menos de 1 MtCO₂/año.

7.2.2 Escenario conservador

Como se muestra en la figura 29, el potencial anual de CDR para España en el escenario conservador es de **~17 MtCO₂/año en 2050**. Si se añade la capacidad del sumidero natural previsto (8,7 MtCO₂), España podría eliminar **~26 MtCO₂ en 2050**. El escenario conservador no elimina las emisiones residuales previstas en 2050, incluso teniendo en cuenta los sumideros naturales.

Los principales métodos de CDR en este escenario son **la gestión de las tierras de cultivo**, que elimina **9 MtCO₂/año**, seguida de la gestión de los pastos (4 MtCO₂/año). Se estima que **la forestación/reforestación** elimina **2 MtCO₂** al año, suponiendo que solo se alcance la mitad del objetivo de la Estrategia Forestal Española para 2050²⁴ – que establece un objetivo de reforestar 0,6 Mha entre ahora y 2050 –, lo que refleja retos como los incendios forestales, los reveses políticos, la financiación limitada y los efectos del clima. **El biochar** también contribuye al potencial en el escenario conservador, con 1 MtCO₂/año. Se supone que el IFM es

cero en el escenario conservador debido a prácticas de gestión forestal infructuosas. Del mismo modo, se supone que la agrosilvicultura se encuentra en un nivel mínimo que no cumple el objetivo de restauración del PNIEC (véase la sección 7.3.3). El BECCS y el DACCS se excluyen de este escenario debido a la falta de almacenamiento de CO₂.

7.2.3 Escenario ambicioso

En el escenario **ambicioso**, el potencial anual de CDR para España es de **~69 MtCO₂ en 2050**. En combinación con la capacidad de sumidero natural prevista de 32 MtCO₂, las eliminaciones totales podrían acercarse a **~101 MtCO₂/año**, superando con creces las 29 MtCO₂ de emisiones residuales que deben compensarse para alcanzar el objetivo de cero emisiones netas.

En este escenario, los principales métodos de CDR son **la gestión de tierras de cultivo** (13 MtCO₂/año) y **la gestión forestal mejorada** (IFM) (12 MtCO₂/año), seguidos por **BECCS con combustión** (10 MtCO₂). Se supone que la IFM tendrá un gran éxito, con un crecimiento un 30 % superior al del escenario de referencia. Se estima que **la forestación/reforestación** eliminará **7 MtCO₂/año**, suponiendo que el objetivo de la estrategia forestal española se supere en 0,4 Mha gracias a la mejora de las prácticas y la reducción de las presiones climáticas, lo que supone un total de 1 Mha reforestado. **La gestión de pastos** contribuye con **5 MtCO₂/año**, menos que en el escenario de referencia, ya que se supone que, en el escenario ambicioso, la reforestación altamente exitosa reduce una parte significativa (9 %) de los pastizales, lo que reduce en consecuencia la superficie dedicada a la gestión de pastos. En el escenario ambicioso, **el biochar**

(6 MtCO₂/año) y el BECCS con digestión anaerobia (5 MtCO₂) aportan importantes contribuciones a la eliminación de carbono. El DACCS electroquímico añade otras 4 MtCO₂/año, mientras que el DACCS a baja temperatura elimina 2 MtCO₂ al año. La agrosilvicultura aporta 2 MtCO₂/año adicionales. En este escenario, la mejora de la alcalinidad oceánica se despliega utilizando materias primas carbonatadas y aporta 1 MtCO₂/año de eliminación.

7.3 Asignación de recursos

Como se describe en el capítulo 3, España dispone de recursos sustanciales para CDR. En esta sección se detalla cómo se asignan estos recursos entre los diferentes métodos de CDR. La tabla 18 presenta la proporción de recursos utilizados en cada escenario realista, mientras que en el anexo B se ofrece un resumen de la disponibilidad total de recursos.

7.3.1 Asignación de electricidad renovable

En términos de disponibilidad, se supone que la electricidad disponible para la CDR en los escenarios realistas corresponde a la electricidad destinada a la exportación descrita en los cuatro escenarios de la sección 3.1.1 (Figura 8). En el escenario conservador, corresponde a la fracción renovable de las exportaciones de electricidad previstas en el escenario E1: *Electricidad estable, mezcla estable* (22 TWh). El escenario ambicioso asume la misma cantidad que el escenario teórico (31 TWh) basándose en todas las exportaciones de electricidad estimadas del escenario E4: *electricidad alta, mezcla renovable*. En cambio, se supone que el escenario de referencia tiene 26,5 TWh disponibles para la CDR, el punto medio de las estimaciones ambiciosas y conservadoras.

En los escenarios de referencia y ambicioso, la electricidad renovable se asigna a DACCS electroquímicos y de baja temperatura. En el escenario de referencia se utiliza alrededor

del 8% de la electricidad renovable, mientras que en el escenario ambicioso se utiliza el 21%. En el escenario conservador no se utiliza nada, ya que no se implementa DACCS.

7.3.2 Asignación del calor residual

Se supone que solo se dispone de calor de baja calidad para la CDR, ya que el calor de alta calidad se destina íntegramente a la industria, sin dejar nada para aplicaciones de CDR. La disponibilidad de calor residual para la CDR en los escenarios realistas se estima en 6 TWh en el escenario Conservador, en consonancia con el escenario T2: *Demanda térmica estable*; 12 TWh en el escenario Ambicioso, según el escenario T1: *Demanda térmica estable* (Figura 10); y 9 TWh en el escenario de Referencia, que corresponde al valor medio.

En los escenarios de referencia y ambicioso, el calor residual se asigna a BECCS (combustión) y DACCS de baja temperatura, utilizando casi toda la disponibilidad. No se asigna nada en el escenario conservador, ya que no se implementan DACCS y BECCS.

7.3.3 Asignación de terrenos

En general, en relación con la tierra, los escenarios realistas se basan en la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo de España desarrollada por el MITECO⁴¹, que tiene como objetivo absorber 37 Mt CO₂e/año de los sumideros naturales para 2050 con el fin de alcanzar la neutralidad climática. En el escenario de referencia, este objetivo se alcanza, mientras que en el escenario conservador no se alcanza y los efectos del cambio climático son mayores. El escenario ambicioso, por su parte, representa una situación ideal en la que la política forestal es una prioridad política, respaldada por una inversión sustancial, una fuerte aprobación pública de la reforestación y la conservación de los bosques, una gestión forestal eficaz y unos efectos limitados del cambio climático.



Recursos	Referencia 2030	Referencia 2040	Conservador 2050	Referencia 2050	Ambicioso 2050
Energía (TWh)					
Energía térmica	0 % de 11,82	34 % de 10,42	0 % de 6,03	99 % de 9,04	100 % de 12,05
Agua (bcm)					
Agua dulce	0,018 % de 108,85 (0,02)	0,028 % de 108,5 (0,03)	0,019 % de 105,2 (0,02)	0,037 % de 107,6 (0,04)	0,045 % de 110 (0,05)
Agua salada	0	0,6	2,28	2,98	3,68
Tierra (Mha)					
Superficie cultivable anual	12,45 % de 8,19 (1,02)	13 % de 8,17 (1,06)	9,9 % de 7,98 (0,79)	13,24 % de 8,16 (1,08)	14,26 % de 8,28 (1,18)
Tierras cultivables permanentes	41,14 % de 3,62 (1,49)	42,74 % de 3,6 (1,54)	32,64 % de 3,5 (1,14)	43,74 % de 3,59 (1,57)	46,85 % de 3,65 (1,71)
Terrenos forestales	0	12,4 % de 18,2 (2,26)	14,33 % de 18,42 (2,64)	20,5 % de 18,39 (3,77)	26,2 % de 18,69 (4,90)
Pastizales	63,36 % de 8,55 (5,42)	69,26 % de 8,5 (5,89)	52 % de 7,94 (4,13)	75,77 % de 8,45 (6,40)	74,79 % de 8,88 (6,64)
Turberas (kha)	0	0,73 % de 60 (0,44)	1,21 % de 60 (0,73)	1,5 % de 60 (0,91)	1,6 % de 60 (0,97)
Superficies submarinas aptas para la restauración de pastos marinos (kha)	0	5 % de 49,6 (2,48)	20 % de 49,6 (9,92)	25 % de 49,6 (12,4)	26,6 % de 49,6 (13,19)
Biomasa (MtDM)					
Biomasa para BECCS - combustión	38,84 % de 33,7 (13,1)	55,29 % de 28,6 (15,8)	54,90 % de 24 (13,2)	63,21 % de 24 (15,2)	91,50 % de 24 (22)
Biomasa para BECCS: digestión anaerobia	37,07 % de 10,3 (3,8)	55,94 % de 14,3 (8)	54,22 % de 19,4 (10,5)	59,39 % de 19,4 (11,5)	90,37 % de 19,4 (17,5)
Biomasa para biochar	50 % de 3 (1,5)	50 % de 5,4 (2,7)	25 % de 6,1 (1,5)	50 % de 6,1 (3)	100 % de 6,1 (6,1)
Minerales					
Calizas	0% de 2,05	0% de 2,131	0% de 2,211	0% de 3,88	21% de 5,556
Dolomitas	0% de 0,29	0% de 0,389	0% de 0,523	0% de 0,639	0% de 0,760
Basalto	100% de 0,009	100% de 0,01	100% de 0,001	100% de 0,03	100% de 0,06
Polvo de horno de cemento (CKD)	28% de 0,318	24% de 0,378	21% de 0,439	22% de 0,536	24% de 0,63
Escoria de acero	0% de 0,189	0% de 0,196	0% de 0,204	0% de 0,377	100 % de 0,55
Almacenamiento de CO₂					
Depósitos geológicos	0	100 % de 5,6	0	100 % de 15,95	100 % de 21,45
Mineralización	100 % de 0,03	100 % de 0,03	100 % de 0,03	100 % de 0,04	100 % de 0,05

Tabla 18. Porcentaje de recursos disponibles utilizados para métodos de CDR en cada escenario. Los porcentajes se refieren al porcentaje de recursos utilizados para CDR en los escenarios realistas **del total de recursos disponibles para CDR** (como se muestra en el anexo B). No se indica ningún porcentaje para el agua salada, dada la enorme cantidad disponible. Para la combustión BECCS, la biomasa disponible para CDR incluye toda la biomasa disponible para combustión más la mitad de la biomasa asignada a procesos termoquímicos, según la tabla C.3.

Pastizales destinados a la reforestación

En el potencial teórico, toda la superficie de pastizales en la que no se llevaría a cabo la gestión de pastos y que no estaba clasificada como *dehesa* se utilizó para la reforestación. Sin embargo, en los escenarios realistas se tienen en cuenta restricciones adicionales, como la falta de inversión, la escasez de mano de obra y la ausencia de un marco político claro y colaborativo.

Dehesa (pastizales y bosques) destinada a la agrosilvicultura

Como se menciona en el Cuadro 1, la dehesa constituye la base de la agrosilvicultura española, con 1,09 Mha teóricamente disponibles para la restauración. Los potenciales realistas de la agrosilvicultura se basan en el potencial de restauración de la *dehesa* y se ajustan al objetivo del PNIEC de regenerar 28 kha/año¹²⁹. En el escenario conservador, solo se alcanza el 20 % de este objetivo (5,6 kha/año), mientras que en el escenario ambicioso se supera el objetivo del PNIEC en un 20 %, alcanzando los 33 kha/año. Además de la *dehesa*, en principio podrían considerarse otros sistemas agroforestales, como los cultivos anuales combinados con árboles. Sin embargo, en España estos sistemas agroforestales son prácticamente inexistentes y carecen tanto de una implementación significativa como de datos consistentes a escala nacional. Por esta razón, no se incluyeron en la evaluación, que se centra en la *dehesa* como el único sistema agroforestal ampliamente establecido y cartografiable en el país.

Pastizales destinados al pastoreo

La superficie de pastizales disponible para la gestión de pastos en los escenarios realistas es **de 5,28 Mha**. Este es el resultado de deducir los 1,09 Mha de dehesa de la superficie total de pastizales del país, que es de 6,37 Mha, según consta en las subvenciones de la PAC en el *Informe de 2025 sobre regímenes respetuosos con el clima y el medio ambiente («regímenes ecológicos»)*⁹². Esta definición es coherente, ya que, sin prácticas como la siega directa o el pastoreo extensivo, estas superficies de pastizales no se mantendrían. Por lo tanto, las eliminaciones de CO₂ derivadas de la gestión de los pastos serán proporcionales a la superficie de pastizales prevista para 2030, 2040 y los tres escenarios para 2050, pero también dependerán de factores sociales. Según las tendencias descritas en el capítulo 3, las eliminaciones derivadas de la gestión de los pastos variarían de la siguiente manera en 2050:

- Escenario conservador: al no cumplirse los objetivos de reforestación, la superficie de pastizales se expande un 1,64 %. Sin embargo, el abandono rural, el declive de la ganadería y la percepción desfavorable de los agricultores sobre los métodos de CDR hacen que esta nueva superficie, junto con el 30 % de los pastizales existentes, siga sin gestionarse. Como resultado, la superficie disponible para la gestión de pastizales se reduce en un 30 %, lo que refleja el declive del pastoreo extensivo.

- Escenario realista: si se cumplen los objetivos de reforestación para 2050, los pastizales disminuyen un 3,29 %, lo que reduce la gestión de los pastos en la misma proporción.
- Escenario ambicioso: la reforestación tiene un gran éxito y se pierde una parte significativa de los pastizales, lo que da lugar a una reducción del 9 %. La superficie destinada a la gestión de pastos disminuye en un 9 %.

Tierras cultivables destinadas a la gestión de cultivos

En cuanto a la gestión de las tierras de cultivo, el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), a través de las Encuestas de Superficie y Rendimiento de Cultivos (ESYRCE)²⁶, destaca dos prácticas clave en España: la siembra directa en cultivos anuales (13,7 % de la superficie agrícola, 0,9 Mha) y la cobertura vegetal en cultivos leñosos (25 %, 1,4 Mha). En la última década, estas técnicas han crecido un 65 % y un 15 %, respectivamente. Su promoción forma parte de la «Iniciativa 4 por 1000: el carbono orgánico del suelo como herramienta para la mitigación y adaptación al cambio climático en España»²⁹, que establece los factores de conversión (tCO₂/ha/año) utilizados para estimar la absorción de CO₂. Si bien en el capítulo 4 se presentaron valores sin restricciones, deben tenerse en cuenta las limitaciones del mundo real, como la incompatibilidad con la agricultura ecológica, la desconfianza de los propietarios de tierras, el abandono rural y la falta de incentivos económicos. En consecuencia, se proponen tres escenarios que reflejan diferentes niveles de aplicación.

El escenario de referencia para 2050 prevé un aumento de las absorciones derivadas de estas técnicas, en consonancia con el Plan Nacional de Energía y Clima (PNIEC), que no establece objetivos cuantitativos, pero fomenta su adopción generalizada en su «Medida 1.25 Sumideros agrícolas»¹²⁹. En este escenario, las prácticas de almacenamiento de carbono absorberían 12,25 MtCO₂e/año, un 10 % por encima de los niveles actuales, alcanzando los 2,65 Mha de tierras agrícolas en las que se aplican estos métodos de CDR, lo que refleja una adopción equilibrada de estas técnicas por parte de los agricultores. Esto refleja un aumento cauteloso e indicativo, en consonancia con las orientaciones cualitativas del PNIEC.

El escenario conservador para 2050 representa una situación desfavorable en la que los agricultores no apoyan la iniciativa y los efectos del cambio climático afectan gravemente a las tierras agrícolas, lo que conduce al abandono y, por lo tanto, a una disminución de la superficie en la que se practican estos métodos de CDR. Las prácticas de almacenamiento de carbono absorberían 8,91 MtCO₂e/año en el escenario conservador, un 20 % menos que la absorción actual, que se reduciría a 1,93 Mha donde se aplicarían.

El escenario ambicioso para 2050 representa una situación muy favorable en la que estos métodos son ampliamente adoptados por los agricultores, lo que conduce a un aumento del 20 % con respecto a los niveles de adopción actuales,

alcanzando los 2,90 Mha. Las prácticas de almacenamiento de carbono absorberían 13,36 MtCO₂e/año en el escenario ambicioso.

7.3.4 Asignación de biomasa

Biomasa asignada a BECCS

Tanto en el **escenario conservador para 2050** como en **el escenario para 2030**, la ausencia de almacenamiento geológico de CO₂ imposibilita cualquier despliegue de BECCS. Sin embargo, la biomasa seguiría estando disponible. Para 2030, incluso con una capacidad limitada de captura en plantas de biomasa y con restricciones en la infraestructura, se podría alcanzar aproximadamente el 40 % del potencial teórico de BECCS para 2030 si se dispusiera de almacenamiento, lo que equivaldría a unos 16,9 Mt de biomasa asignadas a BECCS para ese año. De cara a **2050**, bajo el escenario conservador, alrededor de **23,7 MtMS** de biomasa podrían estar disponibles para BECCS, lo que muestra la magnitud de la oportunidad que depende por completo de disponer de opciones de almacenamiento.

En el **escenario de referencia para 2040**, el aumento del uso de bioenergía y la expansión de la capacidad de BECCS permitirían activar alrededor del 60 % del potencial teórico de BECCS, respaldado por 23,8 MtMS de biomasa disponible (15,8 Mt para combustión y 8 Mt para digestión anaerobia). Sin embargo, al igual que en otros casos, este potencial se vería drásticamente reducido por las limitaciones de almacenamiento. Para 2040, se estima que el BECCS pueda ocupar el 90 % del almacenamiento disponible para CDR, lo

que daría lugar a un potencial de eliminación del BECCS en 2040 limitado a 5 MtCO₂/año.

En el **escenario de referencia para 2050**, se espera un desarrollo moderado del uso del biogás, que se pretende promover, junto con la implementación de métodos de captura de carbono en algunas plantas de biogás del país, así como en industrias de combustión de biomasa que cuenten con infraestructuras cercanas para el transporte y almacenamiento de CO₂. Se estima que 26,7 MtMS de biomasa estarían disponibles para BECCS (15,2 Mt para combustión y 11,5 Mt para digestión anaerobia).

Como se ha mostrado anteriormente en la Tabla 12, alrededor de 44,5 MtCO₂ podrían capturarse mediante BECCS en 2050. Sin embargo, parte del CO₂ capturado se destinará a su utilización, principalmente CO₂ biogénico para la producción de combustibles sintéticos. Una vía importante para utilizar el CO₂ capturado es la producción de estos combustibles, un ámbito regulado por estrictas normas de la UE. En el marco de la iniciativa ReFuelEU Aviation, las compañías aéreas están obligadas a aumentar gradualmente la proporción de combustibles de aviación sostenibles (SAF) en sus mezclas, pasando del 2 % en 2025 al 34 % en 2040 y alcanzando el 70 % en 2050. Dentro de este mandato, se aplica una cuota específica a los combustibles renovables de origen no biológico (RFNBO), que debe aumentar del 1,2 % en 2030 al 35 % en 2050. En la actualidad, los RFNBO pueden producirse utilizando CO₂ biogénico o fósil, pero el Reglamento (UE) 2023/1185 establece que, a partir de 2040, o de 2035 en el caso del sector eléctrico, solo el CO₂ de origen biogénico permitirá que estos combustibles se consideren bajos en

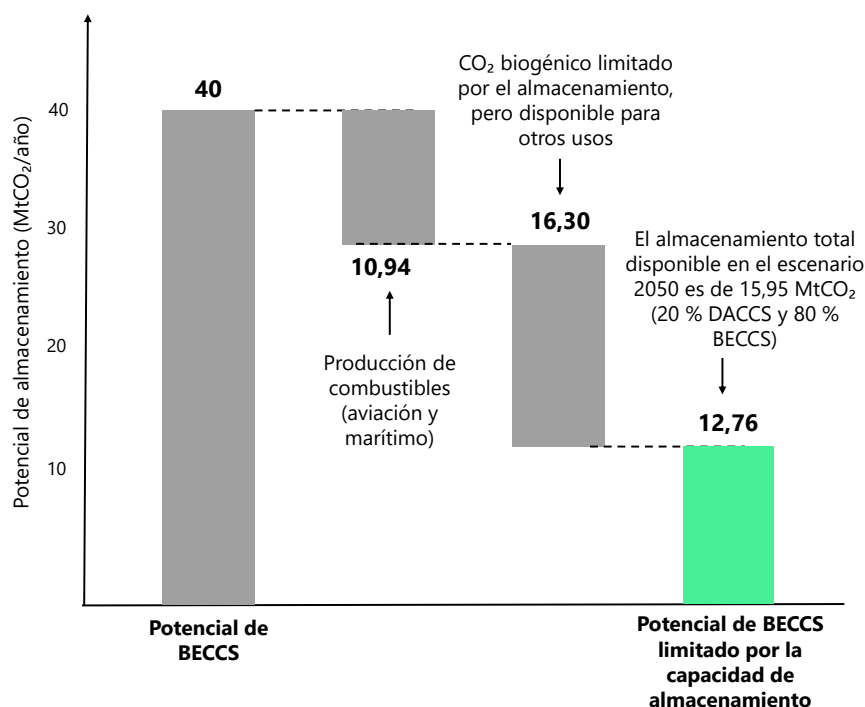


Figura 30. Potencial de BECCS limitado por la capacidad de almacenamiento en el escenario de referencia 2050.

carbono. Este cambio normativo garantiza de forma efectiva un nivel básico de demanda de CO₂ biogénico¹³⁰. Esto requiere aproximadamente 2,59 Mt de e-SAF al año y 9,84 Mt de CO₂ biogénico al año en España.

Se estima que el transporte marítimo necesitará 0,36 Mtep¹³¹, lo que equivale aproximadamente a 0,8 Mt de e-metanol. Según IRENA 2021¹³², para producir 1 tonelada de metanol se necesitan alrededor de 1,38 t de CO₂, por lo que se utilizarían alrededor de 1,1 Mt de CO₂. A esto hay que añadir la limitación del almacenamiento geológico para BECCS. En el escenario de Referencia, se estima que el 80 % del almacenamiento total disponible para CDR (15,95 Mt de CO₂) se asignaría a BECCS (véase la sección 7.3.6). Esto se traduce en una disponibilidad de **12,8 Mt de CO₂** para BECCS en 2050.

En el **escenario ambicioso para 2050**, se prevé un mayor desarrollo de las infraestructuras disponibles de almacenamiento geológico y transporte de CO₂. Además, dada la hoja de ruta de la UE, se espera un aumento del uso de la biomasa para la producción de energía, lo que contribuirá a impulsar el despliegue de la tecnología BECCS. También en el escenario ambicioso, aunque hay suficientes recursos de biomasa para un potencial significativo de BECCS, alrededor de 39,5 MtMS (22 Mt para combustión y 17,5 Mt para digestión anaerobia), la cantidad de CO₂ procedente de BECCS sigue siendo considerablemente limitada debido a la escasa disponibilidad de almacenamiento de CO₂ a nivel nacional. En los escenarios ambiciosos, el 70 % del almacenamiento total disponible para CDR (22,45 Mt de CO₂) se asignaría a la BECCS. Eso significaría alrededor de 15 Mt de CO₂ para la BECCS en 2050.

Biomasa asignada al biochar

Basándose en la disponibilidad teórica de biomasa evaluada en 2050 para el biochar, que es de 6,1 Mt/año (la mitad de la biomasa considerada para los procesos termoquímicos), los volúmenes de biomasa disponibles para CDR en los escenarios realistas tuvieron en cuenta los siguientes factores que pueden limitar el despliegue del biochar:

1. Limitaciones técnicas en torno a los costes logísticos de la recogida y el transporte de biomasa y a los controles de calidad (MRV) para garantizar la estabilidad a largo plazo.
2. Limitaciones económicas, como los elevados costes de producción (equipos, energía), la debilidad del mercado interno, con una demanda principalmente en la agricultura, y la competencia por la biomasa de otros sectores (biogás, pellets).

Otros costes asociados a la aplicación del biochar, como la purificación antes de su despliegue en el campo, no se han tenido plenamente en cuenta en las estimaciones de volumen. Según fuentes del sector, estos costes podrían ascender a unos 200 dólares por tonelada de CO₂ eliminada para alcanzar la viabilidad económica.

3. Restricciones normativas, como la falta de incentivos financieros o subvenciones, y la complejidad y los costes de la certificación (por ejemplo, el Certificado Europeo de Biochar).

4. Lagunas de conocimiento y concienciación entre los agricultores y las partes interesadas, y los pocos proyectos de demostración a gran escala que aún son insuficientes para generar confianza.

Teniendo en cuenta estas limitaciones, el **escenario de referencia** asume el 50 % del volumen máximo teórico (3 Mt/año), lo que podría permitir el secuestro de aproximadamente 2,2 MtCO₂/año para 2050. Se ha aplicado la misma lógica a 2030 y 2040, suponiendo el 50 % del valor teórico para cada año, lo que da como resultado 1,5 Mt/año y 2,7 Mt/año de biomasa disponible para biochar, respectivamente. Para el **escenario ambicioso**, se asume el 100 % del máximo teórico (6,1 Mt/año), mientras que el **escenario conservador** asume que el 25 % del máximo (1,5 Mt/año) está disponible de forma realista.

Biomasa asignada a productos biológicos duraderos

La madera estructural, concretamente la madera contralaminada (CLT), se ha considerado como el producto biológico duradero representativo. Para 2030, se estima que se utilizarán aproximadamente 183.750 m³ de CLT. Dado que la producción de 1 m³ de CLT requiere aproximadamente 2,5 m³ de madera en rollo¹³³, esto corresponde a una asignación de aproximadamente 459.375 m³ de biomasa de madera para productos biológicos duraderos. Para 2040 y 2050 se han aplicado los mismos valores, ya que los datos y las proyecciones disponibles son insuficientes para proporcionar estimaciones sólidas para esos años.

7.3.5 Asignación de minerales

En los escenarios realistas, suponemos que no habría otras materias primas minerales disponibles para CDR a través de la ERW, aparte de las fracciones de residuos de la producción de materias primas minerales estimadas en la Tabla 7. Esto es para reconocer la escasa concienciación y apoyo que existe actualmente en España, lo que muy probablemente impide que el país abra nuevas minas para aplicaciones de CDR. En consecuencia, se descarta aquí el potencial teórico de los lechos rocosos máficos identificados en el capítulo 3.

Además, para el escenario conservador, se asumió una baja tasa de generación de residuos, alcanzando una disponibilidad de materia prima de **0,11 Mt** de basalto, **22,11 Mt** de piedra caliza, **5,23 Mt** de dolomita, **4,39 Mt** de cemento y **2,04 Mt** de escorias de acero para 2050. Para el escenario ambicioso, se asumió una tasa alta de generación de residuos, lo que dio lugar a una disponibilidad de materia prima de **0,56 Mt** de basalto, **55,56 Mt** de piedra caliza, **7,75 Mt** de dolomita, **6,33 Mt** de cemento y **5,5 Mt** de

escorias de acero. Por último, en el escenario de referencia se asumió un punto medio entre los escenarios conservador y ambicioso, lo que dio lugar a una disponibilidad de materia prima de **0,34 Mt** de basalto, **38,83 Mt** de piedra caliza, **6,39 Mt** de dolomita, **5,36 Mt** de cemento y **3,77 Mt** de escorias de acero para 2050. En los tres escenarios se asumió que se puede recoger eficazmente hasta el 10 % de ese polvo residual, teniendo en cuenta que solo se puede recuperar una fracción limitada de las partículas finas de las operaciones de canteras a cielo abierto debido a la dispersión, la humedad y las limitaciones del equipo. Los residuos de cemento y escorias de acero se asignaron a la mineralización (almacenamiento de CO₂), mientras que la piedra caliza y la dolomita no se consideraron materias primas realistas para los residuos de ingeniería y construcción debido a la escasa y poco concluyente bibliografía sobre la eficacia de los minerales carbonatados en la eliminación de carbono. Como resultado, se supone que el potencial realista estimado de CDR de los residuos de ingeniería y construcción proviene del basalto y alcanza menos de **0,01 Mt de CO₂** para 2050. Se asume que el OAE se despliega solo en el escenario ambicioso utilizando rocas carbonatadas como la piedra caliza.

7.3.6 Asignación del almacenamiento de CO₂

Se ha realizado un análisis bottom-up para definir tasas de inyección más realistas en los escenarios realistas, teniendo en cuenta el estado actual de desarrollo de los proyectos de almacenamiento.

En los escenarios realistas para 2030, **se asume que no existe capacidad de almacenamiento geológico disponible para CDR**. Esto se debe a que el proyecto TarraCO₂-Storage aún se encuentra en fase de validación técnica⁶². Si para entonces se dispusiera de alguna capacidad de almacenamiento, es razonable suponer que se asignaría principalmente a la gestión del CO₂ procedente de fuentes industriales (es decir, CCS) en lugar de asignarse a CDR. Esta hipótesis es coherente con la Comunicación sobre la gestión del carbono⁹⁴, que establece que, para 2030, casi todo el CO₂ capturado procederá de emisiones de proceso y de origen fósil.

Para la estimación de la capacidad de inyección anual en los siguientes escenarios, se aplica la distribución entre tecnologías CCS y métodos CDR establecida por la UE, tal y como se muestra en Figura 31, garantizando la coherencia metodológica y la alineación con los objetivos climáticos europeos.

Bajo este criterio, en el **escenario de referencia para 2040**, se asume que el almacenamiento de TarraCO₂ inyectará CO₂ procedente tanto de fuentes fósiles como biogénicas, en línea con la evolución prevista de la combinación de fuentes de capturas. Para entonces, también se espera que los emplazamientos de almacenamiento de Maestrazgo y Murcia estén operativos, cada uno de ellos con capacidades de inyección anuales comparables a las de TarraCO₂.

Además, un conjunto de instalaciones de almacenamiento de alto riesgo, principalmente acuíferos salinos profundos y otras estructuras geológicas, complementarán los almacenamientos anteriores. Se prevé que entre dos y cuatro de estos almacenamientos adicionales estarán en funcionamiento en 2040, con niveles de inyección similares o superiores a los de TarraCO₂. Basándose en este conjunto de hipótesis, la **inyección total de CO₂ atribuida a los métodos de CDR en 2040 asciende a 5,6 MtCO₂/año**. Este resultado refleja el ritmo previsto de maduración del proyecto en España, condicionado por la infraestructura actualmente disponible, la prioridad dada al despliegue de instalaciones centradas en CCS y la incertidumbre inherente al desarrollo de nuevos emplazamientos de almacenamiento, incluidas las consideraciones sociales vinculadas a su implementación.

Para el escenario realista en 2050 se consideran tres casos: un escenario conservador, un escenario de referencia y un escenario ambicioso.

- **Escenario conservador 2050:** Se asume que **no habrá capacidad de almacenamiento geológico disponible para los métodos de CDR** y que la limitada capacidad en operación se asignará exclusivamente a la CCS. Esta hipótesis es coherente con la Estrategia Europea de Gestión del Carbono, que establece que el almacenamiento geológico debe dar prioridad a las emisiones de los sectores industriales difíciles de abatir, como el cemento, el acero o la industria química. Aunque el CDR se reconoce como una herramienta clave para alcanzar la neutralidad climática, los proyectos de almacenamiento europeos actuales, y por tanto los de España, siguen centrándose principalmente en la CCS debido al elevado volumen de emisiones industriales y a la urgencia de su reducción.
- **Escenario de referencia 2050:** En el horizonte 2050, se espera que el emplazamiento de almacenamiento TarraCO₂ incremente su capacidad de inyección anual, incorporando una proporción creciente de CO₂ procedente de métodos de CDR. En cuanto a los emplazamientos de almacenamiento de Maestrazgo y Murcia, y dado que la capacidad total estimada de Maestrazgo es aproximadamente el doble que la de TarraCO₂, mientras que la de Murcia es casi tres veces superior, a ambos emplazamientos se les asigna una tasa de inyección anual proporcional a la prevista para TarraCO₂, en consonancia con su mayor potencial geológico y su nivel de desarrollo previsto. Adicionalmente, se espera que entre cuatro y seis emplazamientos de almacenamiento más hayan entrado en operación en 2050, todos ellos con una capacidad de inyección anual superior a la atribuida inicialmente a TarraCO₂. El avance de estos emplazamientos se ve respaldado por la expansión de la infraestructura de transporte de CO₂, la mejora progresiva de la aceptación social y la creciente prioridad que la Unión Europea otorga a las tecnologías CDR dentro de sus objetivos climáticos a largo plazo. Bajo este conjunto de hipótesis,

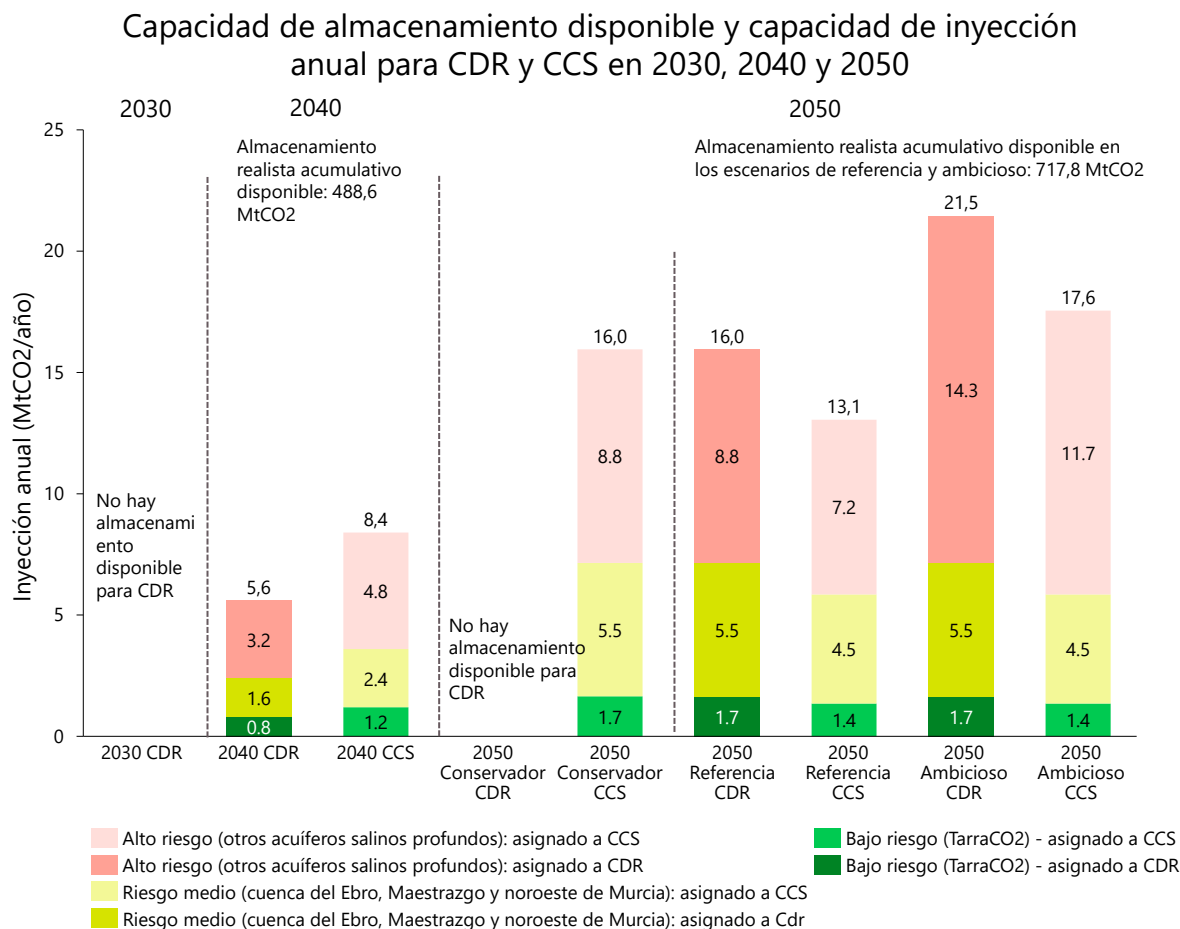


Figura 31. Capacidad de inyección anual estimada (MtCO₂/año) para CDR y CCS en los diferentes escenarios realistas para 2030, 2040 y 2050. La capacidad de almacenamiento realista acumulada se calcula aplicando la RAF (véase la sección 3.7).

la **capacidad total de inyección asignada a CDR en el escenario de referencia para 2050 asciende a 15,95 MtCO₂/año.**

- **Escenario ambicioso 2050:** En este escenario, las hipótesis relativas a TarraCO₂, Maestrazgo y Murcia se mantienen idénticas a las del escenario de referencia. Sin embargo, se supone que entre siete y diez emplazamientos de almacenamiento adicionales habrán entrado en funcionamiento para ese año, lo que refleja un despliegue significativamente más acelerado del sistema nacional de almacenamiento. Como resultado de estas hipótesis, la **inyección total asignada a CDR en el escenario ambicioso para 2050 asciende a 21,45 MtCO₂/año.** Este escenario implica un progreso sustancial en la infraestructura de transporte y almacenamiento, una mayor integración regional dentro del marco europeo de gestión del carbono y un aumento sostenido de la aceptación social y política de las tecnologías de CDR.

Tal y como se ha explicado anteriormente, se ha adoptado un enfoque bottom-up para definir los escenarios realistas debido a la ausencia de una estrategia nacional específica sobre el almacenamiento geológico de CO₂ y a la prioridad actual que se da a la CCS frente a CDR. Asimismo, dado que España aún no cuenta con ningún acuerdo bilateral operativo para el almacenamiento transfronterizo de CO₂, salvo su participación en el proyecto PYCASSO (Francia)¹³⁴, el **análisis se ha limitado a la capacidad de inyección nacional**.⁹ No obstante, se espera que en el futuro España establezca acuerdos con Portugal y Francia, así como interconexiones con las instalaciones de almacenamiento existentes y previstas en el Mar del Norte. A medida que las políticas europeas y nacionales continúen evolucionando, también se prevé un aumento progresivo del uso de CO₂ biogénico, impulsado por regulaciones que promueven las rutas del biochar. En consecuencia, en todos los escenarios proyectados, el volumen total de CO₂ asignado a la inyección geológica podría aumentar sustancialmente.

g. Por lo tanto, las exportaciones de CO₂ no se tienen en cuenta en ninguno de los escenarios de almacenamiento presentados en este informe.

Consideración de la capacidad limitada de almacenamiento geológico: BECCS y DACCS

El almacenamiento geológico de CO₂ constituye un factor crítico y potencialmente limitante para el despliegue de soluciones de eliminación de carbono basadas en BECCS y DACCS.

En el **escenario de referencia para 2030 y el escenario conservador para 2050, no se considera la participación de estos métodos**, ya que la capacidad de almacenamiento disponible se asignaría íntegramente a proyectos de captura y almacenamiento de carbono (CCS) asociados a fuentes industriales. Esta exclusión refleja la necesidad de dar prioridad a la descarbonización de los sectores industriales más intensivos en emisiones, en consonancia con la Estrategia Europea de Gestión del Carbono⁹⁴, que reconoce la CCS como una herramienta esencial para reducir las emisiones en sectores difíciles de abatir, como el cemento, el acero y la industria química.

En el **escenario de referencia para 2040**, se estima una capacidad de almacenamiento de 5,6 MtCO₂/año para los métodos de eliminación de dióxido de carbono (CDR), distribuida entre BECCS y DACCS.

Entre los dos principales enfoques tecnológicos para la captura directa de CO₂ del aire – S-DAC (adsorción con sorbentes sólidos) y L-DAC (absorción con solventes líquidos) –, se descarta la opción L-DAC debido a su elevada demanda

térmica (300-900 °C). Además, el DACCS se enfrenta al reto inherente de la baja concentración de CO₂ en la atmósfera (aproximadamente el 0,04 %), lo que aumenta significativamente los requisitos energéticos y operativos. Por el contrario, el BECCS se beneficia del procesamiento de corrientes de gas con concentraciones más altas de CO₂, lo que reduce tanto la intensidad energética como los costes de captura. Como se detalla en la sección 3.5, España presenta un potencial significativo para el despliegue de BECCS, especialmente en relación con las plantas de biogás y biometano, que podrían convertirse en un pilar estratégico de la implementación de CDR a escala nacional.

En consecuencia, se propone una asignación de la capacidad de almacenamiento **del 90 % para BECCS (5,04 MtCO₂/año) y del 10 % para DACCS (0,56 MtCO₂/año)**. Esta distribución refleja una estrategia prudente y realista, que da prioridad a la eficiencia técnica y económica en el proceso de despliegue.

En el **escenario de referencia para 2050**, la capacidad de almacenamiento nacional atribuible a BECCS y DACCS se estima en 15,95 MtCO₂/año.

En cuanto a los costes estimados, la captura de carbono mediante BECCS se considerará a un valor medio de 105 EUR/tCO₂, según *The Climate Drive* (2023), un informe elaborado por *Forest Solutions Group* en colaboración con *McKinsey Sustainability*, dentro del rango previsto para un despliegue a gran escala en 2050 de 50-160 EUR/tCO₂¹³⁵. Por el contrario, la captura directa de aire (DACCS) se considerará con una

CUADRO 6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD sobre el potencial realista de CDR para 2050

Dado que el almacenamiento representa una limitación significativa, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar el potencial despliegue de CDR en el escenario Ambicioso 2050, bajo el supuesto de que toda la capacidad de almacenamiento se asignaría exclusivamente a CDR, en lugar de a CDR y CCS.

Bajo este supuesto, la inyección anual prevista para CDR sería de aproximadamente 40 MtCO₂/año.

	MtCO ₂ /año	Notas
BECCS (combustión)	17,9	Teniendo en cuenta que el 70 % del almacenamiento está disponible para BECCS
BECCS (digestión anaerobia)	10,1	
DACCS electroquímico	8,1	Teniendo en cuenta que el 30 % del almacenamiento está disponible para DACCS
DACCS de baja temperatura	3,9	
DACCS de alta temperatura	0	Se supone que el calor de alta calidad se destina íntegramente a la industria, sin dejar nada para CDR.

Tabla 19. Potencial realista de CDR suponiendo que no hay límite de almacenamiento de CO₂

Esto daría lugar a un potencial total de CDR de **88,24 MtCO₂/año**, en lugar de los 69,64 MtCO₂/año estimados en el escenario de referencia para 2050.

estimación media de 127,5 EUR/tCO₂, en consonancia con el rango previsto para 2050 de 85-170 EUR/tCO₂, según el informe del *Foro Económico Mundial* (2023)¹³⁶.

Dado que la BECCS ofrece un menor coste por tonelada de CO₂ eliminada en comparación con la DACCS, y teniendo en cuenta las limitaciones técnicas de esta última, es razonable dar prioridad a la asignación de capacidad de almacenamiento a la BECCS, promoviendo así un despliegue más eficiente y económicamente viable de los métodos de CDR. Para apoyar una vía de despliegue realista y rentable, se propone una asignación de la capacidad de almacenamiento **del 80 % para BECCS (12,76 MtCO₂/año) y del 20 % para DACCS (3,19 MtCO₂/año)**. Esta distribución tiene en cuenta las ventajas técnicas y económicas de BECCS, al tiempo que preserva la contribución de DACCS, lo que garantiza una cartera diversificada de métodos de emisiones negativas.

En el **escenario ambicioso** para 2050, la capacidad de almacenamiento se ampliaría a 21,45 MtCO₂/año. En este contexto, se prevé una penetración algo mayor de DACCS, impulsada por su creciente madurez tecnológica, la reducción progresiva de los costes de captura y su capacidad para operar de forma independientemente de fuentes biogénicas o industriales. Este enfoque es especialmente relevante en regiones con disponibilidad limitada de biomasa sostenible.



Por lo tanto, se propone una distribución del **70 % de la capacidad total para BECCS (15,02 MtCO₂/año) y del 30 % para DACCS (6,43 MtCO₂/año)**. Este escenario representaría un sistema de eliminación de carbono equilibrado, menos dependiente de una sola tecnología y más resistente a las incertidumbres relacionadas con la disponibilidad de biomasa, los costes energéticos o las restricciones de ubicación.

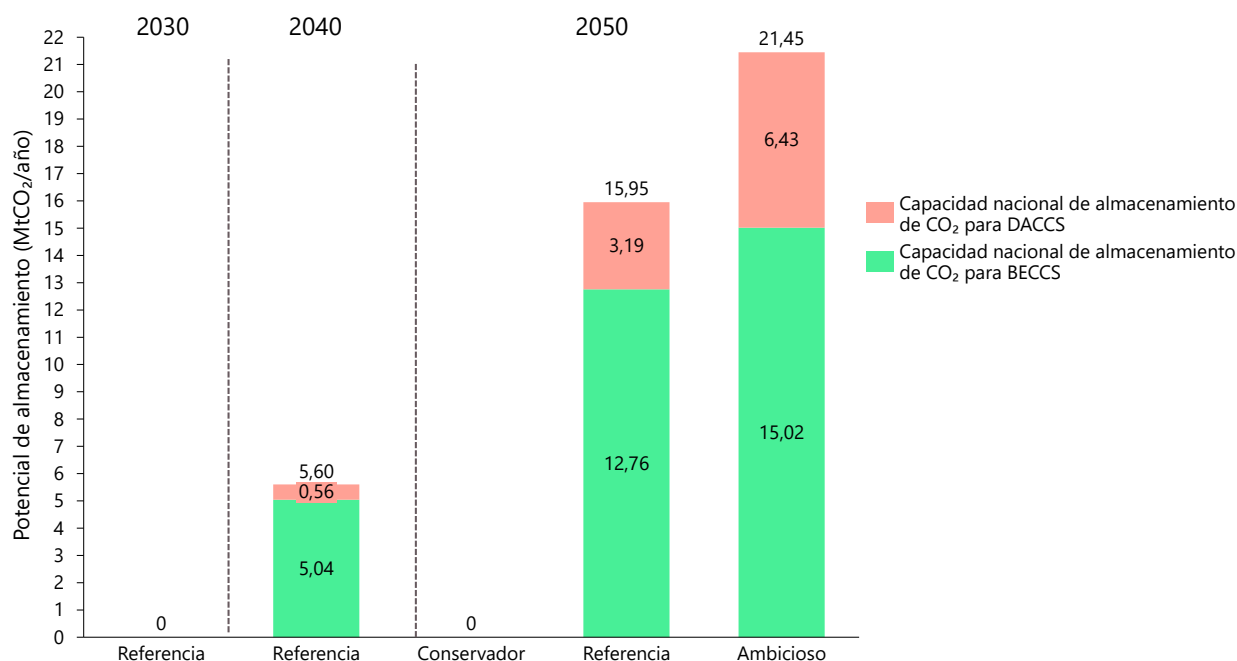


Figura 32. Distribución estimada de la capacidad nacional de almacenamiento de CO₂ para BECCS y DACCS en escenarios realistas

Mineralización in situ

Actualmente, no hay pruebas de mineralización in situ de CO₂ a escala operativa en España. Por esta razón y siguiendo el razonamiento descrito en la sección 3.7.3, se supone que no habrá mineralización en 2030 y en el escenario conservador de 2050. Se supone que habrá una pequeña cantidad de mineralización disponible en el escenario de referencia de 2040, centrada principalmente en proyectos piloto y pequeños hubs para adquirir experiencia (Figura 33). Para 2050, se espera que el potencial de almacenamiento oscile entre mínimo (escenario de referencia) y más de 1,5 MtCO₂ /año en el escenario ambicioso, con un despliegue que dependerá de la política, la inversión y la aceptación pública.

Mineralización ex situ

Aunque actualmente no hay nada significativo a nivel nacional en términos de mineralización de carbono, algunas empresas como Petronor y O.C.O, en colaboración con empresas del grupo REPSOL, han llevado a cabo proyectos piloto como AggregaCO₂, a través de los cuales han logrado capturar alrededor de 2200 toneladas al año⁷⁷.

De acuerdo con la sección 3.7.3 y el proyecto AggregaCO₂, el potencial realista de mineralización ex situ solo tiene en cuenta el CKD y la escoria de acero. Si se recogiera efectivamente el 10 % del total de residuos disponibles, esto supondría aproximadamente 0,5 Mt al año para 2030. Basándose en una absorción media de CO₂ de 50 kg de CO₂ por tonelada de mineral, según se indica en la fuente⁷³, esto correspondería a un potencial de aproximadamente **0,025 MtCO₂/año en 2030**. Se espera que el potencial de almacenamiento aumente entre **0,129 y 0,229 MtCO₂/año para 2040** y entre **0,446 y 0,846 MtCO₂/año para 2050** en el escenario de referencia (Figura 33). **El escenario conservador para 2050** asume que la mineralización ex situ no aumentaría, lo que daría lugar a la **misma cantidad que en 2030**. En el **escenario ambicioso** para 2050, se considera una expansión de los proyectos piloto y una escalada industrial inicial, lo que aumentaría el potencial de almacenamiento de la mineralización ex situ a **0,05 MtCO₂ /año**.

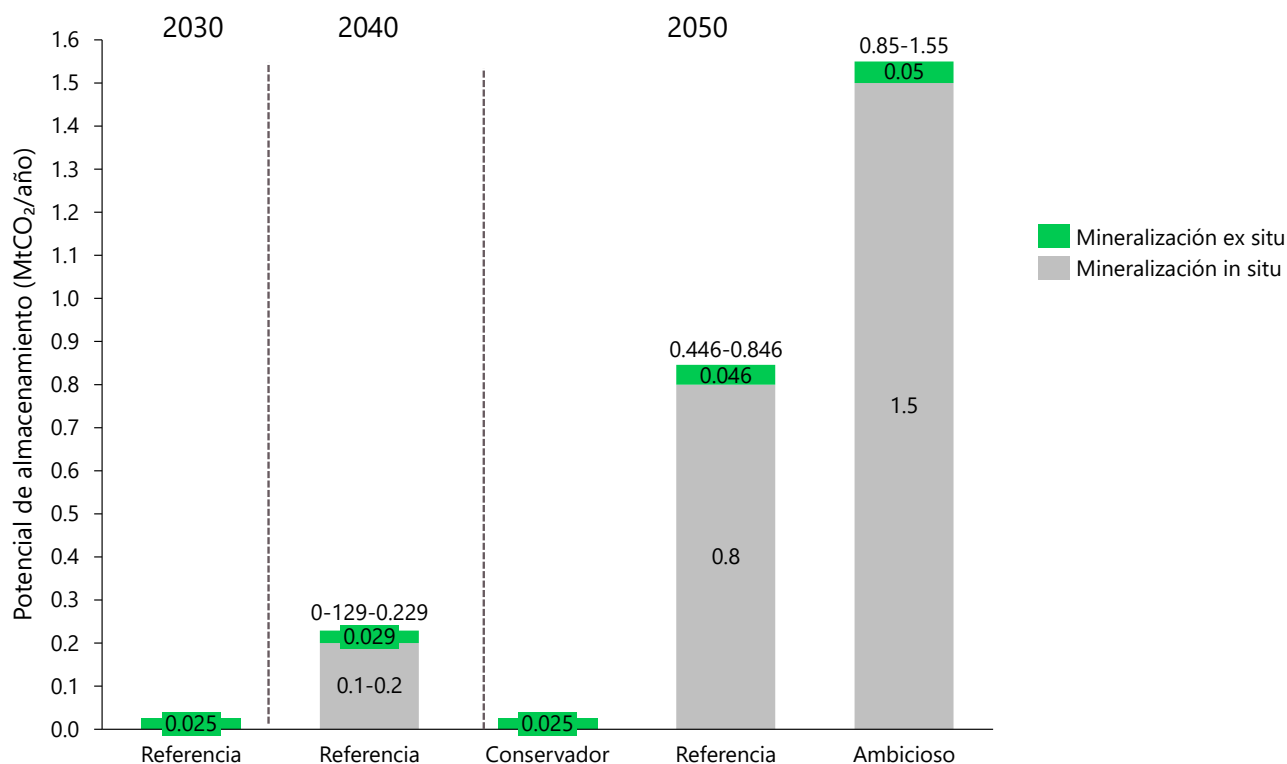


Figura 33. Potencial estimado de mineralización en escenarios realistas.

7.4 Una trayectoria de cero emisiones netas comparable para España

Los escenarios presentados no solo contemplan una serie de medidas para el despliegue de CDR, sino que también van acompañados de compromisos concretos de todos los sectores para reducir y mitigar las emisiones. El diseño económico, político, tecnológico y social para hacer realidad estos escenarios, debe cumplir con el principio de *equivalencia*¹³⁷, lo que implica que las emisiones y las absorciones deben tener un vínculo común derivado de la estructura del ciclo natural del carbono. Las emisiones **biogénicas** que se derivan de la biosfera (agricultura, cambios en el uso del suelo, residuos biológicos) y son de corta duración pueden eliminarse mediante eliminaciones temporales, como los métodos de CDR basados en la naturaleza y la agricultura. Por otro lado, las emisiones de larga duración causadas por la intervención humana (industria, energía, combustibles fósiles, residuos no biológicos), es decir, las emisiones fósiles, deben reducirse mediante métodos CDR duraderos (BECCS, biochar, DACCS). El cumplimiento del principio de equivalencia significa que tanto los métodos de CDR temporales como los duraderos deben ampliarse en paralelo para igualar las emisiones biogénicas y fósiles correspondientes.

Las emisiones residuales que deben eliminarse para 2050 según la estrategia a largo plazo son de **29 MtCO₂/año**, de las cuales **10 MtCO₂** pueden clasificarse como **fósiles** y **19 MtCO₂** como biogénicas¹³⁸.

En el escenario de referencia para 2050, los métodos de CDR basados en la naturaleza y de bajo rendimiento – incluidos los productos de origen biológico, las medidas agrícolas y la gestión de los bosques y los ecosistemas – permiten eliminar **34 MtCO₂/año** sin recurrir al sumidero forestal previsto de 14 MtCO₂. Esto satisface holgadamente el requisito de equivalencia para las emisiones biogénicas. El escenario ambicioso para 2050 ofrece aún mejores resultados: las eliminaciones basadas en la naturaleza, de **41 MtCO₂ al año**, superan las 19 MtCO₂ de emisiones residuales biogénicas, sin recurrir tampoco al sumidero natural de 32,2 MtCO₂ al año. Por el contrario, el escenario conservador para 2050 no logra igualar las emisiones residuales biogénicas ni fósiles.

Los métodos de CDR permanentes – principalmente BECCS, DACCS y biochar – proporcionan eliminaciones duraderas suficientes para neutralizar las emisiones fósiles tanto en el escenario de referencia como en el ambicioso para 2050, con **18 MtCO₂** y **28 MtCO₂**, respectivamente. Como se muestra en la figura 34, el diseño del escenario se ajusta al principio de equivalencia tanto en el escenario de referencia como en el ambicioso.

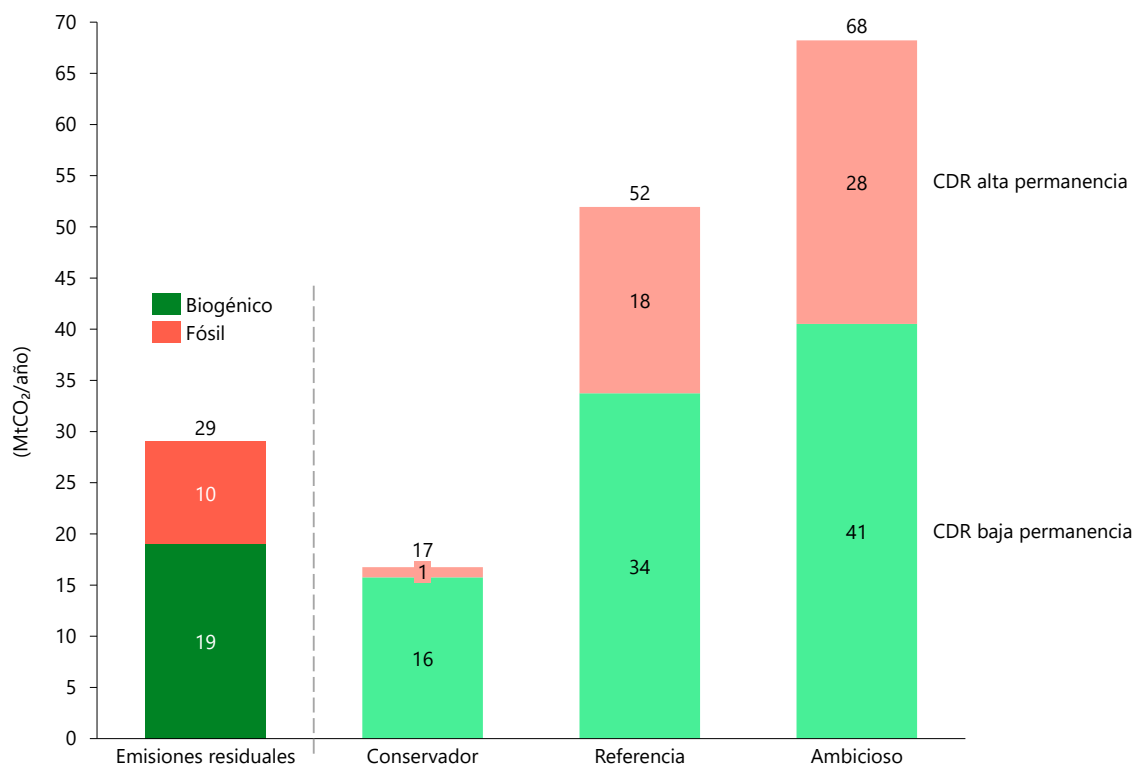


Figura 34. Principio de equivalencia en los escenarios conservador, de referencia y ambicioso en comparación con las emisiones residuales previstas en 2050.

Conclusiones

España cuenta con una cartera diversa de oportunidades de CDR, con un potencial teórico de eliminar **196 MtCO₂ al año para 2050**, suponiendo una movilización total de recursos sin restricciones sociales ni económicas. Este potencial está dominado por métodos basados en ecosistemas, seguidos de opciones geoquímicas, mientras que los métodos sintéticos, como el DACCS, son relevantes pero más modestos, limitados principalmente por la capacidad de almacenamiento de CO₂ disponible. Esta estimación máxima refleja un nivel de movilización técnicamente posible pero prácticamente inalcanzable, que sirve de referencia para comprender la dotación de recursos de España.

Un potencial significativo construido sobre una cartera de métodos de CDR

Cuando se introducen restricciones realistas, el potencial realista de CDR del país (excluyendo el sumidero natural) disminuye a **16,6 Mt CO₂** en el escenario conservador, a **51,8 Mt CO₂** en el escenario de referencia y alcanza **68,2 MtCO₂** de eliminaciones al año en 2050 en el escenario ambicioso para 2050. En todos los casos, la contribución de la gestión de los ecosistemas sigue siendo predominante, con valores en torno a los 15-40 MtCO₂, seguida de los métodos de conversión basados en la biomasa, como el BECCS y el biochar (1-21 MtCO₂), y el DACCS electroquímico (hasta 6,5 MtCO₂). La cuota combinada de estas tres categorías supera el 90 % de las eliminaciones totales. La meteorización mejorada contribuye de forma marginal, principalmente a través de la reutilización de fracciones de residuos minerales, mientras que las opciones marinas, como la restauración de la *posidonia* o la mejora de la alcalinidad del océano, solo ofrecen un potencial localizado. En comparación con el límite teórico, este rango realista sugiere que alrededor del 8-35 % del potencial teórico de España podría mobilizarse en condiciones favorables de política, inversión y sociedad.

Desde el punto de vista espacial, los puntos más prometedores para la CDR coinciden con las regiones de alta productividad de biomasa, concentración de recursos minerales y disponibilidad de tierras no cultivables. Andalucía, Galicia y las Islas Canarias destacan por sus opciones basadas en minerales, como la meteorización del basalto y la dolomita, mientras que Castilla y León, Extremadura y el valle del Ebro presentan una amplia disponibilidad de tierras para la restauración forestal y las prácticas de carbono en el suelo. Las zonas costeras y marinas de las Islas Baleares y el litoral mediterráneo pueden ofrecer oportunidades específicas para el cultivo de *posidonia*, siempre que se respeten las restricciones en materia de biodiversidad. La ubicación estratégica de las instalaciones de CDR junto a las infraestructuras previstas para el transporte y almacenamiento de CO₂, como en Tarragona y la cuenca cantábrica, mejoraría la rentabilidad y facilitaría la creación de una red integrada de gestión del carbono.

Baja preparación social, falta de políticas y desarrollo lento del transporte y el almacenamiento

A pesar de estas oportunidades, existen varias limitaciones que dificultan su implementación a gran escala. La principal limitación es la falta de una estrategia nacional específica y un marco regulatorio para la gestión del CO₂ (CDR+CCS), lo que socava la confianza de los inversores e impide el desarrollo de centros permanentes de almacenamiento de CO₂. La limitada capacidad de almacenamiento geológico actual restringe la expansión de BECCS y DACCS, que dependen de soluciones de almacenamiento seguras. Otras barreras estructurales son la competencia por los recursos terrestres y de biomasa, la fragmentación de la gobernanza entre los ministerios y la ausencia de mecanismos financieros que incentiven el despliegue temprano. La inmadurez tecnológica y los elevados costes operativos retrasan aún más la ampliación de los métodos sintéticos. Desde el punto de vista social, la escasa sensibilización del público sobre la CDR, junto con una fuerte preferencia por las soluciones basadas en la naturaleza, indica que las estrategias de comunicación y participación serán esenciales para garantizar la legitimidad y la aceptación.

El contexto social e institucional de España añade más matices a las perspectivas de despliegue. El panel ciudadano y las consultas a las partes interesadas revelaron un patrón constante: confianza generalizada en los enfoques basados en los ecosistemas, aceptación moderada de las vías minerales y biológicas, y escepticismo hacia los métodos industriales y basados en los océanos. Estas percepciones están influenciadas por la cultura medioambiental de España, donde la reforestación, la agricultura sostenible y el uso circular de los residuos industriales resuenan fuertemente en las narrativas políticas existentes. Esto implica que el diseño de la hoja de ruta nacional de CDR debe dar prioridad a las acciones que se ajusten a estas preferencias sociales, integrando la CDR en los programas de desarrollo rural, aprovechando las iniciativas de gestión forestal y del suelo, y combinando soluciones tecnológicas con beneficios colaterales visibles para la biodiversidad, el empleo y la equidad regional.

Potencial sin explotar

Los escenarios realistas presentados en este estudio se diseñaron para que fueran viables con un alto grado de confianza en un futuro próximo, adoptando hipótesis conservadoras. Como resultado, parte del potencial de CDR de España permanece sin explotar por ahora, como es el caso del lecho rocoso máfico para ERW, pero podría ser viable en el futuro, sujeto a la evolución del apoyo público traducido en nuevas regulaciones.

Es muy probable que dos vías principales para crear potencial adicional de CDR hayan sido subestimadas en este informe,

dada la falta de datos sobre eficiencia y/o aceptabilidad. La primera es el uso de rocas carbonatadas para ERW o vías alternativas como la gestión de la alcalinidad fluvial. Si estos métodos se demuestran más a fondo y se establecen las políticas necesarias, el potencial de CDR de España podría aumentar significativamente, dada la abundancia de estos materiales. La segunda está relacionada con OAE y DOCCS, en particular cuando se aprovecha la infraestructura existente de tratamiento de aguas costeras. Nuevamente, España cuenta con una infraestructura relativamente amplia que podría ofrecer oportunidades si evoluciona la percepción de estos métodos y permite aprobar las políticas necesarias.

Más allá de la fecha final de esta evaluación (2050), es muy probable que España continúe desarrollando su capacidad de almacenamiento geológico, desbloqueando un mayor potencial de CDR habilitado por CCS, como DACCS o DOCCS.

Una década clave

España tiene un potencial significativo para el CDR, pero no puede comprimir los tiempos necesarios para desplegar estas nuevas actividades a gran escala. Las decisiones que se tomen en los próximos cinco a diez años son las que realmente importan para desplegar el CDR a tiempo y mantener el calentamiento global bajo control.

Este informe va acompañado de una hoja de ruta de políticas codiseñada con actores nacionales y que enumera las acciones y cambios clave que deben producirse para que el potencial estimado de CDR pueda materializarse.

Contar con los medios para eliminar cantidades importantes de carbono de la atmósfera es tanto una ventaja comparativa como una responsabilidad.



Anexo A: Tabla de potenciales realistas de CDR

Método de CDR	Potencial realista de CDR (2030)	Potencial realista de CDR (2040)	Realistic CDR potential (2050)			Supuestos clave
			Conser- vador	Refer- encia	Ambi- cioso	
Gestión del ecosistema	19,9	26,8	15,6	33,6	40,3	
Forestación/ reforestación	0,3	2	1,95	3,9	6,5	El escenario de referencia para 2050 se basa en el objetivo de reforestar 0,6 Mha según la Estrategia Forestal Española ²⁴ . Factor de conversión utilizado: 6,5 tCO ₂ /ha (basado en el estudio del INIA-CSIC y el MITERD sobre la reforestación joven) ⁹⁰ .
Gestión forestal mejorada (IFM)	1,9	5,7	0	9,5	12,4	Se supone que la IFM podría aumentar de manera similar a la certificación forestal (PEFC y FSC). Se han establecido escenarios conservadores y ambiciosos para 2050 basados en el escenario de tendencia ¹³⁹ , con un aumento o una disminución del 30 %.
Agroforestería	0,4	1,2	0,38	1,9	2,3	Factor de conversión utilizado: 2,74 tCO ₂ /ha, basado en el seminario «La dehesa: definición, producción del arbolado y tendencias de la gestión silvopastoral», presentado por la Sociedad Española de Ciencias Forestales y el Instituto Universitario de Gestión Forestal Sostenible, UVA-INIA ³⁰ .
Gestión de tierras de cultivo (total)	11,6	12	8,9	12,25	13,4	El escenario de referencia se basa en el Plan Nacional de Energía y Clima (PNIEC), que promueve la difusión de estas dos prácticas en su «Medida 1.25 Sumideros agrícolas» ¹²⁹ . Factores de conversión de la siembra directa en cultivos anuales y la cubierta vegetal en cultivos leñosos de la «Iniciativa 4 por 1000: el carbono orgánico del suelo como herramienta para la mitigación y adaptación al cambio climático en España» ²⁹ .
Gestión de las tierras de cultivo (siembra directa y labranza cero/de conservación)	3,2	3,3	2,5	3,4	3,7	El Gobierno español considera que la siembra directa y la labranza cero o de conservación son una de las soluciones para aumentar la captura de CO ₂ en las tierras de cultivo anuales.
Gestión de las tierras de cultivo (cultivos de cobertura)	8,4	8,7	6,5	8,9	9,7	El Gobierno español considera que la cubierta vegetal es una de las soluciones para aumentar la captura de CO ₂ en las tierras cultivables arboladas.
Gestión de pastos	5,7	5,7	4,1	5,6	5,3	La FEGA está empezando a destacar el papel fundamental que desempeña la gestión de los pastos. Una gestión eficaz de los pastos existentes es esencial para mantener la salud y la resiliencia de este ecosistema. Las eliminaciones derivadas de la gestión de los pastos son proporcionales a la superficie de pastizales prevista, que se estima en 5,28 Mha (excluida la dehesa). Factor de conversión utilizado: 1,1 tCO ₂ /ha/año ⁹³ .
Restauración de humedales	0,05	0,06	0,07	0,14	0,2	Teniendo en cuenta los planes de restauración españoles para recuperar 20 000 km ² para 2030 y 50 000 km ² para 2050.

continuar>

Método de CDR	Potencial realista de CDR (2030)	Potencial realista de CDR (2040)	Realistic CDR potential (2050)			Supuestos clave
			Conser- vador	Refer- encia	Ambi- cioso	
Revegetación costera	0	0,12	0,20	0,22	0,24	Estimaciones según el informe de Red Eléctrica. En un escenario realista para 2050 en el que se detiene la degradación de la Posidonia y avanza su restauración, se podría recuperar hasta un 20 % de las praderas degradadas, principalmente dentro de las zonas marinas protegidas.
Conversión de biomasa	1	7	1	15	21,3	
BECCS (combustión)	0	3,7	0	8,2	9,6	El BECCS se excluye de los escenarios conservadores para 2030 y 2050 debido a la falta de almacenamiento de CO ₂ . En 2040, se supone que el 90 % del almacenamiento disponible se destina al BECCS; en 2050, el 80 % en el escenario de referencia y el 70 % en el escenario ambicioso.
BECCS (digestión anaerobia)	0	1,3	0	4,6	5,4	
Biochar	1	2	1	2,2	6,1	Teniendo en cuenta que el 50 % de la biomasa procedente de procesos termoquímicos se destina a la pirólisis y que el 50 % de esta se recupera para CDR. De ese porcentaje, para 2050, el 20 % en el escenario conservador, el 50 % en el escenario de referencia y el 100 % en el escenario ambicioso.
Productos biológicos duraderos	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	Dado que los datos y las proyecciones para 2040 y 2050 son insuficientes para proporcionar estimaciones sólidas, el valor estimado para 2030 también se ha utilizado como aproximación para los años 2040 y 2050 a fin de mantener la coherencia.
Geoquímico	0,002	0,002	0,003	0,008	1,013	
ERW (total)	0,002	0,002	0,003	0,008	0,013	
con piedra caliza	0	0	0	0	0	Los escenarios realistas excluyen la dolomita y la piedra caliza debido a la insuficiencia de pruebas bibliográficas sobre su eficacia y, por lo tanto, solo tienen en cuenta el basalto para los REG
con dolomita	0	0	0	0	0	
con basalto	0,002	0,002	0,003	0,008	0,013	Suponiendo que 4,3 t de mineral capturan 1 t de CO ₂ y que se recoge eficazmente hasta el 10 % del polvo residual.
con rocas máficas	0	0	0	0	0	Entre ahora y 2050, es imposible abrir nuevas minas en áreas actualmente protegidas, dados los niveles actuales de concienciación y aceptación de CDR
OAE	0	0	0	0	1	Debido al rechazo social, se supone que la OAE solo se implementará en el escenario más ambicioso y con un potencial mínimo.
Sintético	0	0,6	0	3,2	6,4	
DACCS electroquímico	0	0,5	0	2,3	4,3	DACCS no se tiene en cuenta para los escenarios conservadores de 2030 y 2050, ya que no habrá almacenamiento disponible para CDR. Suponiendo un 10 % de almacenamiento disponible para 2040; un 20 % para el escenario de referencia de 2050 y un 30 % para el escenario ambicioso de 2050.
DACCS a baja temperatura	0	0	0	0,9	2,1	
DACCS de alta temperatura	0	0	0	0	0	Se supone que el calor de alta calidad se asigna exclusivamente a la industria, sin dejar residuos para la captura y almacenamiento de carbono (CDR).
Total	20,9	34,40	16,60	51,81	69,01	

Tabla A.1. Potencial realista estimado de CDR en España en 2030, 2040 y los tres escenarios de 2050 con hipótesis clave. Datos en MtCO₂.

Anexo B: Disponibilidad de recursos en los escenarios realistas de CDR

Recursos	2030	2040	Conser- vador	2050 Refer- encia	Ambi- cioso	Supuestos clave
Energía (TWh)						
Electricidad ren- ovable	15,5	19	22	26,5	31	Se supone que solo la electricidad destinada a la exportación está disponible para la captura y almacenamiento de carbono.
Calor residual (bajo grado)	11,82	10,42	6,03	9,04	12,05	Solo se utiliza calor de baja calidad para CDR. Se supone que el calor de alta calidad se destina íntegramente a la industria, sin dejar nada para CDR.
Agua (bcm)						
Agua dulce	0,02	0,03	0,02	0,04	0,05	Se supone que el DACCS a baja temperatura consume 1000 litros por tonelada de CO ₂ , con agua suministrada desde regiones septentrionales donde la disponibilidad es alta.
Agua salada	0,00	0,6	2,28	2,98	3,68	Se asumió un requerimiento de agua de 2000 m ³ /t de CO ₂ para todos los métodos de CDR que utilizan agua salada. El agua de mar solo se utiliza como refrigerante y, por lo tanto, después de que se produce el intercambio térmico, se devuelve al mar.
Tierra (Mha)						
Tierra cultivable anual	1,02	1,06	0,79	1,08	1,18	Se prevé que la superficie cultivable disminuya debido a la baja rentabilidad, el abandono rural y la sustitución por terrenos forestales.
Tierras cultivables permanentes	1,49	1,54	1,14	1,57	1,71	
Terrenos forestales	0	2,26	2,64	3,77	4,90	La estrategia forestal de España tiene como objetivo la reforestación de 0,6 millones de hectáreas para 2050, aumentando la superficie forestal.
Pastizales	5,42	5,89	4,13	6,40	6,64	Se prevé que las praderas disminuyan debido al declive de la ganadería extensiva y la reforestación natural de las tierras abandonadas. Se prevé la regeneración de las dehesas para reforzar la agrosilvicultura.
Turberas (kha)	0	0,44	0,73	0,91	0,97	Se prevé que los proyectos de conservación de turberas sigan siendo escasos, con pocas o ninguna iniciativa nueva a corto plazo.
Superficies submarinas para la restauración de pastos marinos (kha)	0	2,48	9,92	12,4	13,19	La estrategia de España en materia de restauración de pastos marinos se centra en prevenir una mayor degradación.
Biomasa (MtMS)						
Biomasa para BECCS - combustión	13,1	15,8	13,2	15,2	22	Teniendo en cuenta un 40 % de BECCS para 2030 y un 60 % para 2040. Para 2050: 60 % para el escenario conservador. Para el escenario de referencia, el CO ₂ biogénico que puede utilizarse para combustibles electrónicos se deduce del potencial de BECCS. Y para el escenario ambicioso, la misma cantidad que la teórica.
Biomasa para BECCS - digestión anaerobia	3,8	8	10,5	11,5	17,5	
Biomasa para biochar	1,5	2,71	1,5	3	6,1	Suponiendo que el 50 % de la biomasa procedente de procesos termoquímicos se destina a la pirólisis y el 50 % se recupera para CDR. Para 2050, esto depende del escenario: 25 % (conservador), 50 % (referencia), 100 % (ambicioso).

continuar>

Recursos	2030	2040	2050			Supuestos clave
			Conser- vador	Refer- encia	Ambi- cioso	
Minerales						
Piedra caliza	2,052	2,131	2,211	3,883	5,556	Suponiendo que solo se utilizan las fracciones de residuos (Tabla7) con una tasa de recogida del 10 %. Las mismas tasas de reacción que las de Tabla A.1.
Dolomita	0,29	0,389	0,523	0,639	0,760	
Basalto	0,009	0,01	0,011	0,034	0,056	
Cemento	0,318	0,378	0,439	0,536	0,633	
Escoria de acero	0,190	0,197	0,204	0,377	0,550	
Almacenamiento de CO ₂ (Mt)						
Depósitos geológicos	0	5,6	0	15,95	21,45	Basado en un enfoque ascendente, dada la falta de una estrategia española.
Mineralización	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	Suponiendo que solo se utilizarían residuos de cemento y escoria de acero.

Tabla B.1. Resumen de la disponibilidad de recursos y materias primas para CDR en España en 2030, 2040 y 2050.

Anexo C: Biomasa

C1. Consumo actual de biomasa

Categorías de biomasa	Mt	Categorías de biomasa	Mt
Biomasa forestal total	9,08	Madera reciclada	0,036
Corteza	0,258	Madera en rollo para uso como combustible (incluida la leña)	1,666
Licor negro y aceite de resina crudo	2,084	Troncos de árboles (incluidos los astillados)	0,070
Ramas y copas de árboles (incluido el formato de astillas)	2,176	Astillas de madera, serrín y otras partículas de madera	1,064
Carbón vegetal	0,024	Pellets y briquetas de madera	0,960
Otros residuos forestales	0,741		
Total biomasa agrícola/agroindustrial	4,18	Madera de olivo (incluidos residuos de poda y eliminación de plantaciones)	0,402
Paja de cereales	0,038	Otros materiales vegetales y residuos de cultivos agrícolas	1,239
Posos de café	0,008	Piñas	0,062
Orujo de uva	0,061	Cáscaras de piñones	0,001
Cáscaras de nueces	0,127	Cáscara de arroz	0,003
Hueso de aceituna	0,392	Sarmientos (incluidos los residuos de poda y la eliminación de plantaciones)	0,036
Orujo de oliva	1,469	Cultivos energéticos leñosos	0,340
Residuos biogénicos (ganadería, lodos de depuradora, RSU, residuos industriales, etc.) total	3,77	Otros residuos industriales no renovables	0,138
Ganadería	0,087	Otros residuos industriales sólidos renovables	0,259
Lodos residuales	0,067	Residuos industriales, fracción no renovable	0,201
Otros biolíquidos (por ejemplo, aceite vegetal, residuos líquidos industriales renovables)	0,049	Residuos industriales, fracción renovable	0,099
Otros combustibles de biomasa	1,137	Fracción no renovable de RSU	0,538
Otros residuos ganaderos	0,016	Residuos sólidos urbanos renovables	1,182

Tabla C.1. Desglose actual del consumo de biomasa³².

C2. Distribución de la biomasa entre las diferentes vías de valorización y conversión energética

Las diferentes materias primas de biomasa se han distribuido entre las principales vías de valorización: combustión, digestión anaerobia y procesos termoquímicos (como la pirólisis). Los porcentajes asignados a cada vía de valorización reflejan las características fisicoquímicas de cada tipo de

biomasa y los usos típicos en España, lo que ofrece una aproximación indicativa que puede variar según la región, la tecnología y las condiciones del mercado. Se han aplicado los mismos supuestos para asignar la biomasa en los cálculos teóricos y realistas del potencial de CDR.

Categoría de biomasa	Vías de valorización 2030	Previsión para 2030 (MtMS)	Vías de valorización 2040	Proyección para 2040 (MtMS)	Vías de valorización 2050	Proyección para 2050 (MtMS)
Biomasa forestal	Combustión: 85 %	12	Combustión: 70 %	11.9	Combustión: 60 %	11.4
	Digestión anaerobia: 0 %		Digestión anaerobia: 0 %		Digestión anaerobia: 0 %	
	Procesos termoquímicos: 15 %		Procesos termoquímicos: 30 %		Procesos termoquímicos: 40 %	
Biomasa agrícola/agroindustrial	Combustión: 65 %	20	Combustión: 40 %	20.8	Combustión: 40 %	22
	Digestión anaerobia: 25 %		Digestión anaerobia: 35 %		Digestión anaerobia: 40 %	
	Procesos termoquímicos: 10 %		Procesos termoquímicos: 20 %		Procesos termoquímicos: 20 %	
Residuos biogénicos (estiércol y purines ganaderos, lodos de depuradora, RSU, residuos industriales, etc.)	Combustión: 50 %	15	Combustión: 35 %	15.6	Combustión: 15 %	16.5
	Digestión anaerobia: 35 %		Digestión anaerobia: 45 %		Digestión anaerobia: 65 %	
	Procesos termoquímicos: 15 %		Procesos termoquímicos: 20 %		Procesos termoquímicos: 20 %	
Total		47		48,3		49,5

Tabla C.2. Clasificación de la biomasa por vías de valorización en 2030, 2040 y 2050 en España.

	Proyección España 2030 (MtMS)	Proyección España 2040 (MtMS)	Proyección España 2050 (MtMS)
Combustión	30,7	23,2	18
Digestión anaerobia	10,3	14,3	19,4
Procesos termoquímicos (pirólisis/gasificación)	6,1	10,9	12,2
Total	47	48,3	49,5

Tabla C.3. Cantidad de biomasa disponible para CDR asignada a cada vía de valorización.

Categoría de biomasa	Mtep/Mt	Mtep a TWh
Biomasa forestal	0,30	1 Mtep = 11,63 TWh
Biomasa agrícola/agroindustrial	0,30	
Residuos biogénicos (estiércol y purines ganaderos, lodos de depuradora, RSU, residuos industriales, etc.)	0,20	
Total	47	48,3

Tabla C. 4. Factores utilizados para convertir la biomasa en unidades energéticas.

Anexo D: Curvas exponenciales para estimar las tasas de inyección de CO₂

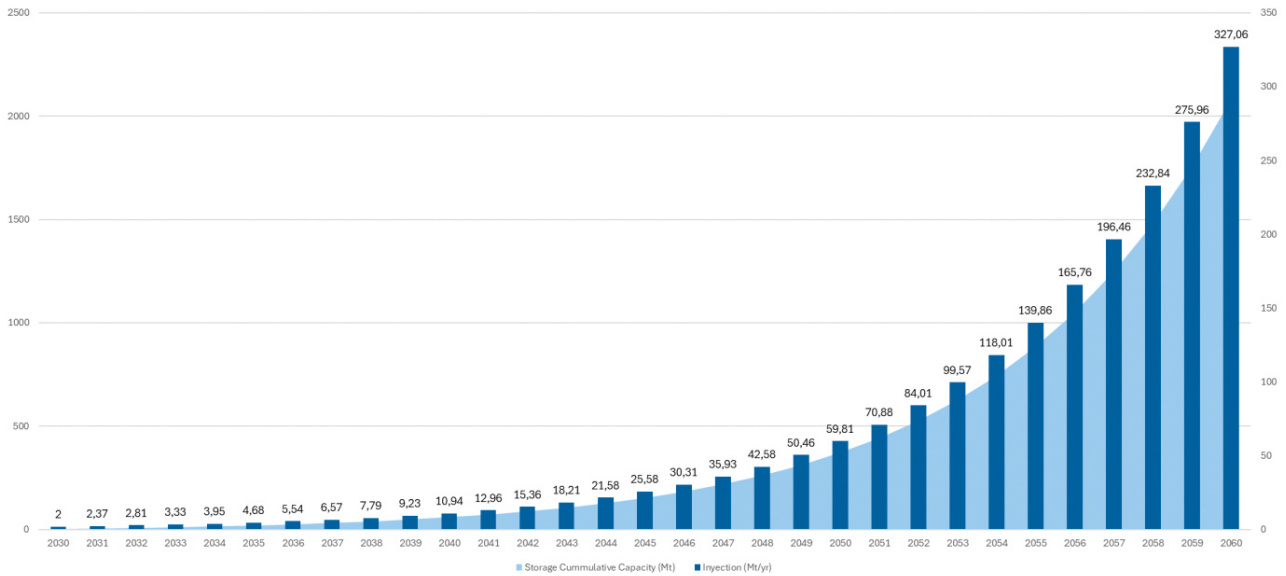


Figura D.1. Curva exponencial 2060 desarrollada como parte de este estudio.

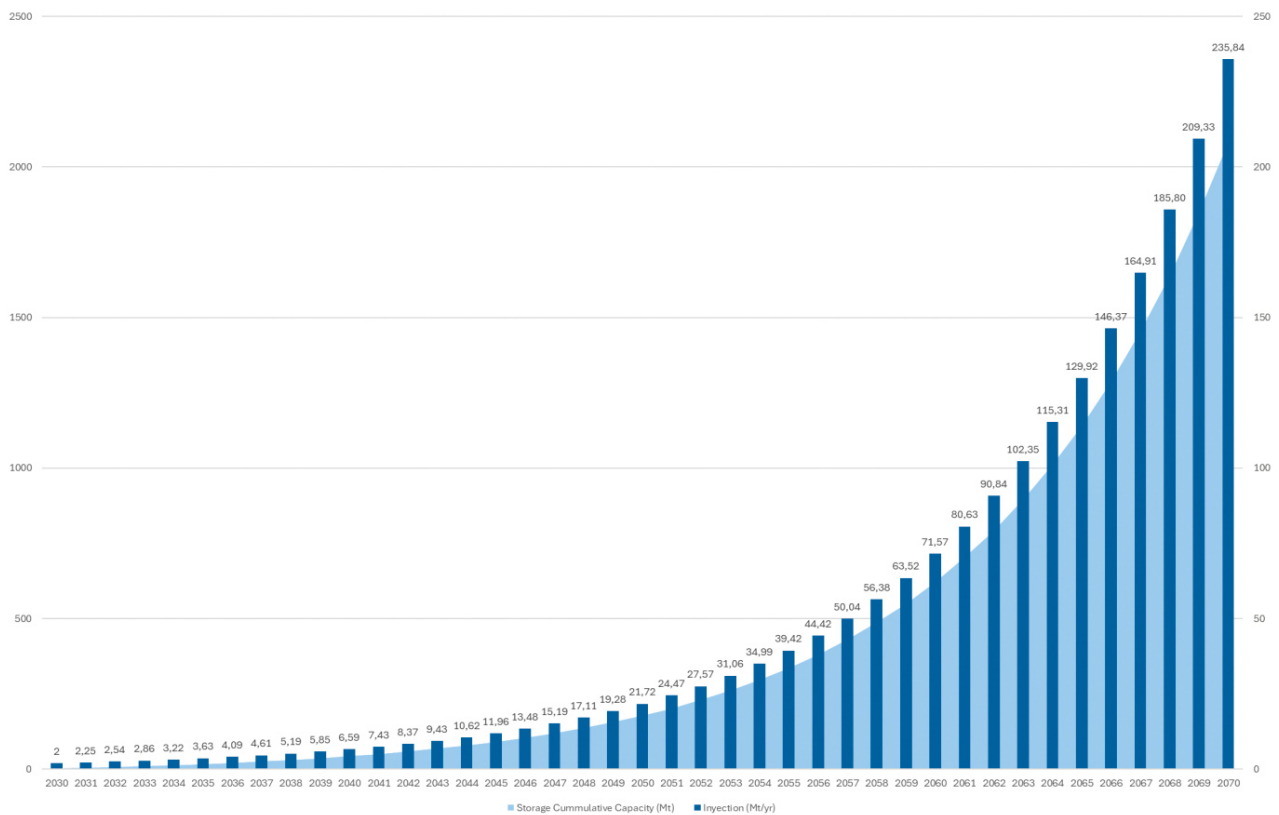


Figura D.2. Curva exponencial 2070 desarrollada como parte de este estudio.

Anexo E: Mapas adicionales del capítulo 3



Figura E.1 Mapa climático de España según Köppen.

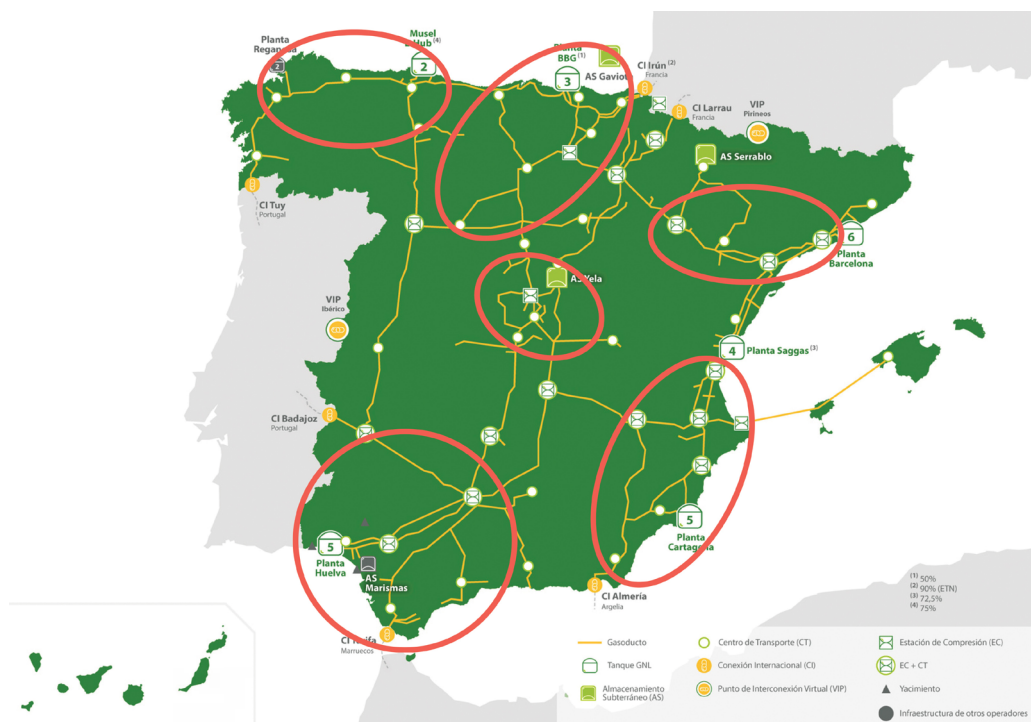


Figura E.2. Infraestructura de GNL y hubs de CO₂ identificados por Enagás.

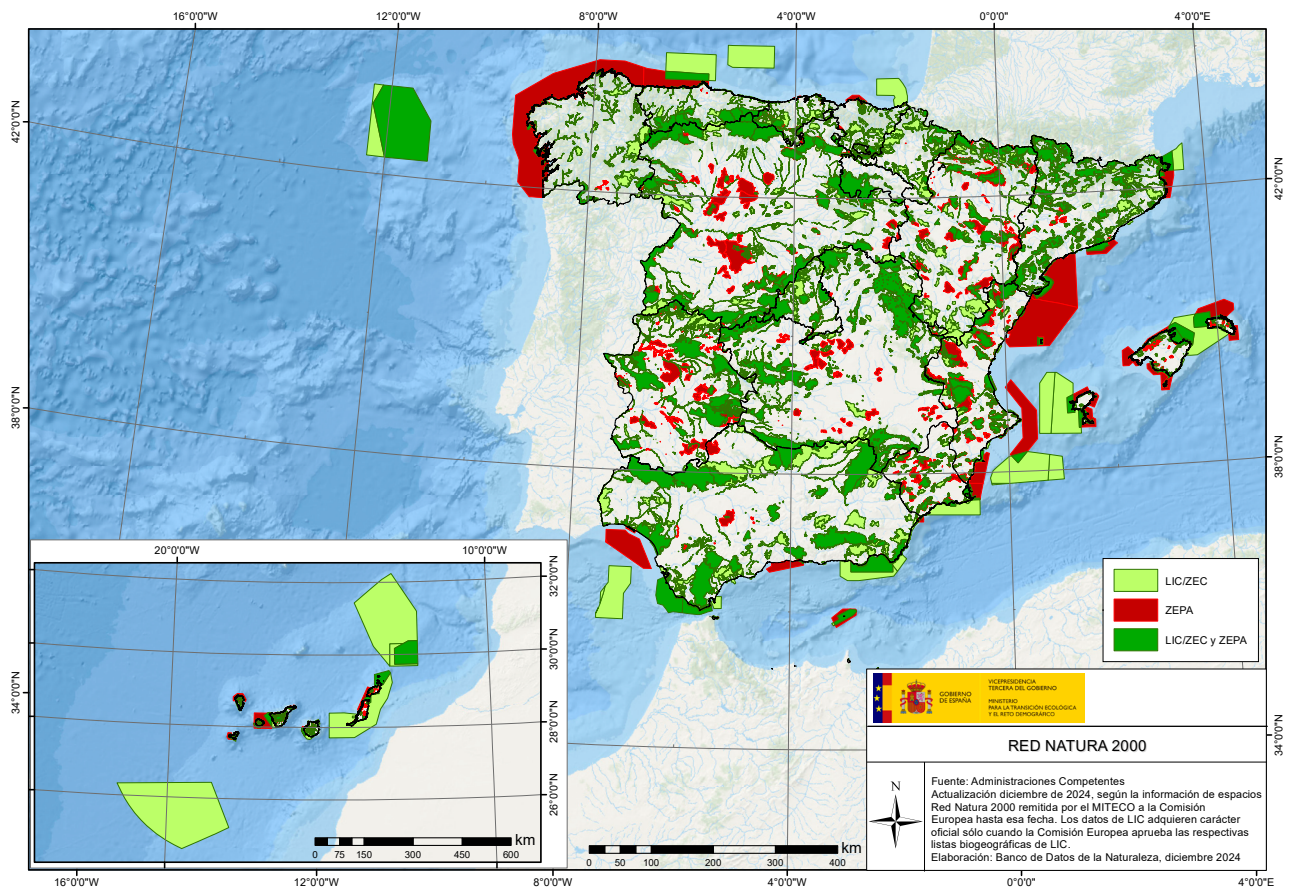


Figura E.3. Áreas protegidas en España¹⁴⁰.

Referencias

1. MITECO. Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo. 2020
2. United Nations. Paris agreement. Paris Agreement 2015:1–27. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (accessed January 12, 2026).
3. Shukla PR, Skea J, Reisinger A, Slade R, Fradera R, Pathak M, et al. Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Summary for Policymakers Edited by 2022.
4. The European Green Deal - European Commission n.d. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (accessed January 13, 2026).
5. Pozo C, Galán-Martín Á, Reiner DM, Mac Dowell N, Guillén-Gosálbez G. Equity in allocating carbon dioxide removal quotas. Nature Climate Change 2020 10:7 2020;10:640–6. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0802-4>.
6. NEGEM. Member State specific pathway for NETP deployment. Horizon 2020, Grant Agreement No 869192 2023:1–54. https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/10/NEGEM_D4.5_Member-State-specific-pathway-for-NETP-deployment.pdf (accessed January 15, 2026).
7. Geden O, Gidden MJ, Lamb WF, Minx JC, Smith SM. The State of Carbon Dioxide Removal 2 Lead institutions: Funders PROJECT TEAM Executive Team 2024. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/F85QJ>.
8. Corbent – A Master Plan for Next Generation Direct Air Capture — LessWrong n.d. <https://www.lesswrong.com/posts/RCifM58vph2iFYEy/corbent-a-master-plan-for-next-generation-direct-air-capture-1> (accessed December 16, 2025).
9. An introduction to bio-oil geological storage projects n.d. <https://www.calyxglobal.com/research-hub/research/an-introduction-to-bio-oil-geological-storage-projects/> (accessed November 25, 2025).
10. eurostat. Energy balance flow diagram. Spain - Year 2023 2025. <https://webgate.ec.europa.eu/eurostat/cache/sankey/energy/sankey.html?geos=ES&year=2023&unit=GWh&fuels=TOTAL&highlight=&nodeDisagg=0101000000000&flowDisagg=true&language=EN#> (accessed May 13, 2025).
11. Liu S, Huang Y, Luo H, Ren Y, Jiang Z, Wu Y, et al. How Does Seagrass Cope with Eutrophication? From Stress Responses to Molecular Adaptive Mechanisms. Current Pollution Reports 2025 11:1 2025;11:42–. <https://doi.org/10.1007/S40726-025-00374-6>.
12. Chopin T, Costa-Pierce BA, Troell M, Hurd CL, Costello MJ, Backman S, et al. Deep-ocean seaweed dumping for carbon sequestration: Questionable, risky, and not the best use of valuable biomass. One Earth 2024;7:359–64. <https://doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2024.01.013>.
13. Raven MR, Crotteau MA, Evans N, Girard ZC, Martinez AM, Young I, et al. Biomass Storage in Anoxic Marine Basins: Initial Estimates of Geochemical Impacts and CO₂ Sequestration Capacity. AGU Advances 2024;5. <https://doi.org/10.1029/2023AV000950>.
14. eurostat. Energy balances. Energy Balances 2025. https://ec.europa.eu/eurostat/cache/visualisations/energy-balances/enbal.html?geo=EU27_2020&unit=KTOE&language=EN&year=&fuel=fuelMainFuel&siac=TOTAL&details=1&chartOptions=0&stacking=normal&chartBal=&chart=&full=0&chartBalText=&order=DESC&siacs=&dataset=nrg_bal_c&decimals=0&aggregates=0&share=false&fuelList=fuelElectricity%2CfuelCombustible%2CfuelNonCombustible%2CfuelOtherPetroleum%2CfuelMainPetroleum%2CfuelOil%2CfuelOtherFossil%2CfuelFossil%2CfuelCoal%2CfuelMainFuel (accessed May 13, 2025).
15. MITECO. Balances energéticos 2025. <https://www.miteco.gob.es/es/energia/estrategia-normativa/balances/balances.html> (accessed July 3, 2025).
16. DNV. Energy transition outlook - España 2024. 2025.
17. Papapetrou M, Kosmadakis G, Cipollina A, La Commare U, Micale G. Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country. Appl Therm Eng 2018;138:207–16. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.04.043>.
18. Manz P, Kermeli K, Persson U, Neuwirth M, Fleiter T, Crijns-graus W. Decarbonizing District Heating in EU-27 + UK: How Much Excess Heat Is Available from Industrial Sites? Sustainability 2021, Vol 13, Page 1439 2021;13:1439. <https://doi.org/10.3390/SU13031439>.
19. Jouhara H, Khordehghah N, Almahmoud S, Delpech B, Chauhan A, Tassou SA. Waste heat recovery technologies and applications. Thermal Science and Engineering Progress 2018;6:268–89. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2018.04.017>.
20. TSIROPOULOS I, NIJS W, TARVYDAS D, RUIZ CP. Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050 2020. <https://doi.org/10.2760/081488>.
21. España en el contexto geográfico mundial - Atlas Nacional de España n.d. https://atlasnacional.ign.es/wane/Espa%C3%B1a_en_el_contexto_geogr%C3%A1fico_mundial (accessed October 16, 2025).
22. Tablas Comunes de Reportes (CRT). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) n.d. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/inventario-gases-efecto-invernadero.html> (accessed November 12, 2025).
23. Anuarios de Estadística Forestal n.d. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/forestal_anuarios_todos.html (accessed October 16, 2025).
24. MITECO. ESTRATEGIA FORESTAL ESPAÑOLA HORIZONTE 2050 2022. <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/politica-forestal/ESTRATEGIA%20FORESTAL%20ESPA%C3%91OLA%20HORIZONTE%202050%20-%20PLAN%20FORESTAL%20ESPA%C3%91OL%202022-2032%20RESUMEN%20EJECUTIVO.pdf> (accessed August 26, 2025).
25. Anuario de Estadística n.d. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica> (accessed October 6, 2025).
26. Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos (ESYRCE): resultados de años anteriores n.d. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/resultados-de-anos-anteriores> (accessed October 15, 2025).
27. IMPACTOS Y RIESGOS DERIVADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ESPAÑA. n.d.
28. La Producción Ecológica n.d. <https://www.mapa.gob.es/es/alimentacion/temas/produccion-eco> (accessed October 16, 2025).
29. Iniciativa 4 Por Mil, El Carbono Orgánico Del Suelo Como Herramienta De Mitigación Y Adaptación Al Cambio Climático En España - Catálogo De Publicaciones De La Administración General Del Estado (CPAGE) n.d. <https://cpage.mpr.gob.es/producto/iniciativa-4-por-mil-el-carbono-organico-del-suelo-como-herramienta-de-mitigacion-y-adaptacion-al-cambio-climatico-en-espana/> (accessed October 15, 2025).

30. Montero G. LA DEHESA: DEFINICIÓN, PRODUCCIONES DEL ARBOLADO Y TENDENCIAS DE LA GESTIÓN SILVOPASTORAL n.d.
31. Telesca L, Belluscio A, Criscoli A, Ardizzone G, Apostolaki ET, Frascchetti S, et al. Seagrass meadows (*Posidonia oceanica*) distribution and trajectories of change. Scientific Reports 2015 5:1 2015;5:12505-. <https://doi.org/10.1038/srep12505>.
32. Informe Web - Uso energético de la biomasa, el biogás y los residuos. Situación en España, 2021 - Abril 2025 n.d. <https://informesweb.idae.es/biomasa/informe.php> (accessed October 16, 2025).
33. Evaluación del potencial de energía de la biomasa. Herramienta informática para la valoración de recursos | Idae n.d. <https://www.idae.es/publicaciones/evaluacion-del-potencial-de-energia-de-la-biomasa-herramienta-informatica-para-la> (accessed November 23, 2025).
34. Evaluación de biomasa potencial en España a nivel provincial – Agroalnext n.d. <https://www.agroalnext.es/recursos/descargas/evaluacion-de-biomasa-potencial-en-espana-a-nivel-provincial/> (accessed October 16, 2025).
35. Nota de Prensa: Cuentas medioambientales: Cuenta de los residuos. Año 2023. n.d. <https://www.ine.es/dyngs/Prensa/CR2023.htm> (accessed November 23, 2025).
36. RACVE | Ganadería y Medio ambiente. Aspectos legislativos y tecnológicos n.d. <https://www.racve.es/publicaciones/ganaderia-y-medio-ambiente-aspectos-legislativos-y-tecnologicos/> (accessed November 23, 2025).
37. Mapa Instalaciones de cogeneración, residuos y biomasa/biogás | ESIOS electricidad · datos · transparencia n.d. <https://www.esios.ree.es/es/mapas-de-interes/mapa-instalaciones-cogeneracion-residuos-biomasa-biogas> (accessed October 19, 2025).
38. Christianides D, Bagaki DA, Timmers RA, Zrimec MB, Theodoropoulou A, Angelidaki I, et al. Biogenic CO₂ Emissions in the EU Biofuel and Bioenergy Sector: Mapping Sources, Regional Trends, and Pathways for Capture and Utilisation. Energies 2025, Vol 18, Page 1345 2025;18:1345. <https://doi.org/10.3390/EN18061345>.
39. La Robla (León) albergará una planta de biomasa vegetal y captura de CO₂ n.d. https://www.ecoticias.com/energias-renovables/biomasa-vegetal#google_vignette (accessed October 17, 2025).
40. Magnon project in Huelva to capture biogenic CO₂ to produce renewable fuels n.d. <https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2025/02/magnon-project-in-huelva-to-capture-biogenic-co2-to-produce-renewable-fuels/> (accessed October 17, 2025).
41. Sustainable biomass availability in the EU, to 2050 - Concawe n.d. <https://www.concawe.eu/publication/sustainable-biomass-availability-in-the-eu-to-2050/> (accessed October 16, 2025).
42. Mincotur. HOJA DE RUTA DEL BIOGÁS MARCO ESTRATÉGICO DE ENERGÍA Y CLIMA NextGenerationEU GOBIERNO DE ESPAÑA VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO n.d.
43. Juan Bugarin Eduard Correal Carla Ferrer Vicente Guallart Daniel Ibañez Irene Jimeno Felipe Riola Michael Salka Aída Santana A. RED ESPAÑOLA PARA EL IMPULSO DEL USO DE LA MADERA MACIZA INDUSTRIALIZADA PARA LA EDIFICACIÓN 2024.
44. El año 2024 arroja los mejores datos del sector de la edificación en España desde 2019 n.d. <https://www.cscae.com/index.php/cscae/sala-de-comunicacion/8868-el-ano-2024-arroja-los-mejores-datos-del-sector-de-la-edificacion-en-espana-desde-2019> (accessed October 16, 2025).
45. Structural design process for estimating cross-laminated timber use factors for buildings :: BioResources n.d. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/structural-design-process-for-estimating-cross-laminated-timber-use-factors-for-buildings/> (accessed October 16, 2025).
46. Madera U. Frente al Cambio Climático n.d.
47. La superficie visada para construcción en España se mantiene estable en 2023, pese a la coyuntura económica | coacm.es n.d. <https://www.coacm.es/es/1-Noticias/3-CSCAE/425-La-superficie-visada-para-construccion-en-Espana-se-mantiene-estable-en-2023-pese-a-la-coyuntura-economica.htm> (accessed October 16, 2025).
48. Bullock LA, Fernandez-Turiel JL, Benavente D. Experimental investigation of multiple industrial wastes for carbon dioxide removal strategies. International Journal of Greenhouse Gas Control 2023;129:103990. <https://doi.org/10.1016/j.IJGGC.2023.103990>.
49. USGS. Spain. Spain 2025. <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fd9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com%2Fassets%2Fpalladium%2Fproduction%2Fs3fs-public%2Fmedia%2Ffiles%2Fmyb3-2022-Spain-ert.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK> (accessed May 13, 2025).
50. Dolomite in Spain Trade | The Observatory of Economic Complexity n.d. <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/dolomite/reporter/esp> (accessed July 10, 2025).
51. Spain | Imports and Exports | World | Granite, porphyry, basalt, sandstone and other monumental or building stone | Value (US\$) and Value Growth, YoY (%) | 2012 - 2023 n.d. <https://tradeconomy.com/data/h2/Spain/2516> (accessed July 10, 2025).
52. Materiales de piedra caliza para la fabricación de cal o cemento: Exportaciones, importaciones, patrones de comercio y complejidad económica | La Complejidad Económica en España - COTEC n.d. <https://complejidadeconomica.cotec.es/informe/producto/materiales-de-piedra-caliza-para-la-fabricacion-de-cal-o-cemento> (accessed July 10, 2025).
53. MITECO. Estadística minera de España 2022 . 2024.
54. UNESID. La industria siderúrgica española. 2023.
55. Bullock LA, Alcalde J, Tornos F, Fernandez-Turiel JL. Geochemical carbon dioxide removal potential of Spain. Science of The Total Environment 2023;867:161287. <https://doi.org/10.1016/j.SCIOTENV.2022.161287>.
56. Research and Markets. Spain construction industry report 2025. Spain Construction Industry Report 2025 2025:1-3. https://www.globenewswire.com/news-release/2025/07/04/3110330/28124/en/Spain-Construction-Industry-Report-2025-Output-to-Grow-by-3-2-This-Year-Supported-by-a-Rise-in-FDI-an-Easing-of-Inflation-Rates-and-Rising-Building-Permits-Issued-Forecast-to-2029.html?utm_source=chatgpt.com (accessed July 24, 2025).
57. Yurdakul M. Natural stone waste generation from the perspective of natural stone processing plants: An industrial-scale case study in the province of Bilecik, Turkey. J Clean Prod 2020;276:123339. <https://doi.org/10.1016/j.JCLEPRO.2020.123339>.

58. Sciotti A, Bernardo G, Mecca I, Fatiguso F. Characterization of Stone Waste Sludge and Preliminary Investigation on Green Materials Based on Traditional Lime Putty for Sustainable Construction. Sustainability 2024, Vol 16, Page 9173 2024;16:9173. <https://doi.org/10.3390/SU16219173>.
59. Carbo Gap, E-Cube, Aarmi. Deployment potential of carbon dioxide removal methods in France. Deployment Potential of Carbon Dioxide Removal Methods in France 2024:1–124. https://carbongap.org/wp-content/uploads/2024/11/CRRA_France_Final-eng.pdf (accessed December 1, 2025).
60. España tiene 85 posibles almacenes de CO₂ pero prácticamente sin explorar por falta de inversión n.d. <https://www.eleconomista.es/energia/noticias/13421325/06/25/espana-tiene-85-posibles-almacenes-de-co2-pero-practicamente-sin-explorar-por-falta-de-inversion.html> (accessed October 16, 2025).
61. GSEU. pan-european_atlas_sgc_description 2025.
62. La Comisión Europea concede 205 millones a Repsol para el almacén de CO₂ frente a la costa de Tarragona n.d. <https://www.diaridetarragona.com/economia/227088/la-comision-europea-concede-205-millones-a-repsol-para-el-almacen-de-co2-frente-a-la-costa-de-tarragona-me23270905.html> (accessed October 16, 2025).
63. Enmienda de 2006 al Protocolo de 1996 relativo al Convenio sobre n.d. https://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/823268-enmienda-de-2006-adoptada-en-londres-el-2-nov-2006-al-protocolo-de-1996-al.html (accessed October 16, 2025).
64. EGD I n.d. https://maps.europe-geology.eu/#baslay=baseMapGEUS&extent=26115.11870000139,1178514.7781177738,8424035.105392206,5280845.985006121&layers=gseu_co2_atlas_tr_v2 (accessed October 16, 2025).
65. Clean Air Task Force. Spain's Potential for Carbon Capture and Storage Carbon Capture & Storage in Spain. 2023.
66. Explore the Regions | PilotSTRATEGY n.d. <https://pilotstrategy.eu/about-the-project/explore-the-regions> (accessed November 27, 2025).
67. Hontomin | ENOS n.d. <http://www.enos-project.eu/sites/operational-storage-field-site/hontomin/> (accessed November 27, 2025).
68. INSTALACIONES-ALMACÉN GEOLÓGICO - Fundación Ciudad de la Energía n.d. <https://ciuden.es/instalaciones-almacen-geologico/> (accessed November 27, 2025).
69. Almacenamiento geológico de CO₂ - Fundación Ciudad de la Energía n.d. <https://ciuden.es/producto/almacenamiento-geologico-de-co2/#OXYCFB300> (accessed November 27, 2025).
70. Una empresa estadounidense proyecta un gran almacén de CO₂ en el subsuelo del Maestrazgo n.d. <https://www.heraldo.es/noticias/aragon/2025/08/08/empresa-estadounidense-proyecta-gran-almacen-co2-subsuelo-maestrazgo-1845301.html> (accessed October 16, 2025).
71. Una empresa de EE UU proyecta un gran almacén de CO₂ bajo el suelo de la Región de Murcia | La Verdad n.d. <https://www.laverdad.es/murcia/empresa-proyecta-gran-almacen-co2-bajo-suelo-20250928072702-nt.html> (accessed October 16, 2025).
72. El debate sobre el almacenamiento de CO₂ en el Maestrazgo n.d. https://www.renovablesverdes.com/el-debate-sobre-el-almacenamiento-de-co2-en-el-maestrazgo/#google_vignette (accessed October 16, 2025).
73. Bullock LA, Alcalde J, Tornos F, Fernandez-Turiel JL. Geochemical carbon dioxide removal potential of Spain. Science of The Total Environment 2023;867:161287. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161287>.
74. Clark DE, Oelkers EH, Gunnarsson I, Sigfússon B, Snæbjörnsdóttir S, Aradóttir ES, et al. CarbFix2: CO₂ and H₂S mineralization during 3.5 years of continuous injection into basaltic rocks at more than 250 °C. Geochim Cosmochim Acta 2020;279:45–66. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.03.039>.
75. Wallula Basalt Project | PNNL n.d. <https://www.pnnl.gov/projects/carbon-storage/wallula-basalt-project> (accessed October 16, 2025).
76. Bullock LA, Alcalde J, Tornos F, Fernandez-Turiel JL. Geochemical carbon dioxide removal potential of Spain. Science of the Total Environment 2023;867. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161287>.
77. Ecoáridos, un nuevo producto para capturar CO₂ n.d. <https://www.aggregaco2.com/es/> (accessed October 16, 2025).
78. Integrated infrastructure for CO₂ transport and storage in the west Mediterranean | FP7 | CORDIS | European Commission n.d. <https://cordis.europa.eu/project/id/241400/reporting> (accessed October 16, 2025).
79. La Universidad de Oviedo y Enagás ponen en marcha una nueva cátedra sobre gases renovables que impulsará la adaptación de Musel E-Hub como planta multimolécula n.d. <https://www.enagas.es/es/sala-comunicacion/actualidad/notas-prensa/catedra-universidad-oviedo/> (accessed October 16, 2025).
80. Bahía de Bizkaia Gas prepara su infraestructura para operar con CO₂ e hidrógeno n.d. <https://www.eleconomista.es/energia/noticias/13179253/01/25/bahia-de-bizkaia-gas-prepara-su-infraestructura-para-operar-con-co2-e-hidrogeno.html> (accessed October 16, 2025).
81. Enagás, Holcim y Saggas se unen para desarrollar el proyecto pionero "CO₂necta", que impulsará a la industria n.d. <https://elperiodicodelaenergia.com/enagas-holcim-y-saggas-se-unen-para-desarrollar-el-proyecto-pionero-co2necta-que-impulsara-a-la-industria/> (accessed October 16, 2025).
82. Generales ID. Disposición 13090 del BOE núm. 131 de 2023 2023.
83. Observatorio del ferrocarril en España | Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible n.d. <https://www.transportes.gob.es/ferrocarriles/observatorios/observatorio-del-ferrocarril-en-espana> (accessed October 16, 2025).
84. Alcalde J. Transportation of CO₂. 2025.
85. Olson D, Yaw S. Planning Amidst Uncertainty: Identifying Core CCS Infrastructure Robust to Storage Uncertainty. Energies (Basel) 2025;18. <https://doi.org/10.3390/EN18040926>.
86. Así funciona el sistema de captura de carbono a bordo de buques (OCC) n.d. <https://piernext.portdebarcelona.cat/tecnologia/capturar-carbono-a-bordo/> (accessed October 16, 2025).
87. Transporte de CO₂: estado del arte, alternativas y retos – PTECO₂ n.d. <https://pteco2.es/documentos/transporte-de-co2-estado-del-arte-alternativas-y-retos/> (accessed October 16, 2025).
88. Enagás invertirá 4.035 millones de euros hasta 2030 con el hidrógeno verde como pilar de su crecimiento n.d. <https://www.enagas.es/es/sala-comunicacion/actualidad/notas-prensa/resultados-2024-actualizacion-estrategica/> (accessed October 16, 2025).

89. Múgica de la Guerra M, Puertas Blázquez J, Martínez Alandi C, García Ventura D, Gómez-Limón García J. Anuario 2023 del estado de las áreas protegidas en España. Madrid: 2024.
90. Fijación de biomasa y carbono por las repoblaciones forestales jóvenes. n.d.
91. Ganatsas P, Tsakalidimi M, Karydopoulos T, Papaemannuil A, Papadopoulos S. Long-term effect of different forest thinning intensity on carbon sequestration rates and potential uses in climate change mitigation actions. Mitig Adapt Strateg Glob Chang 2024;29. <https://doi.org/10.1007/S11027-023-10102-4>.
92. INFORME SOBRE LOS REGÍMENES EN FAVOR DEL CLIMA Y EL MEDIO AMBIENTE «ECORREGÍMENES» CAMPAÑA 2023 n.d.
93. Soussana JF, Tallec T, Blanford V. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. Animal 2010;4:334–50. <https://doi.org/10.1017/S1751731109990784>.
94. COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Towards an ambitious Industrial Carbon Management for the EU n.d.
95. MTDFP. PERTE: Strategic Projects for Economic Recovery and Transformation 2025. <https://espanadigital.gob.es/en/measure/perte-strategic-projects-economic-recovery-and-transformation> (accessed January 15, 2026).
96. PERTE for industrial decarbonization (RRP Phase 1: 2021-2023) – Policies - IEA n.d. <https://www.iea.org/policies/27714-per-te-for-industrial-decarbonization-rrp-phase-1-2021-2023> (accessed January 15, 2026).
97. NEXTGENEU. Segunda fase del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia de España. Impulso a La Industrialización Estratégica 2023. https://planderecuperacion.gob.es/sites/default/files/2023-06/06062023_adenda_plan_de_recuperacion.pdf (accessed January 15, 2026).
98. European Commission. Spain's recovery and resilience plan. Spain's Recovery and Resilience Plan 2025. https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility/country-pages/spains-recovery-and-resilience-plan_en (accessed January 15, 2026).
99. BECCS - Carbon Gap - Policy Tracker n.d. <https://tracker.carbongap.org/glossary/beccs/> (accessed January 15, 2026).
100. European Commission. Communication from the commission to the european parliament, the council committee and the committee of the regions 2021:1–26. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0699> (accessed October 15, 2025).
101. BOE-A-2022-5809 Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. n.d. <https://www.boe.es/eli/es/l/2022/04/08/7> (accessed October 15, 2025).
102. MITECO. Plan Nacional Integrado de Energía y Clima. 2024.
103. Directive - EU - 2023/2413 - EN - Renewable Energy Directive - EUR-Lex n.d. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413> (accessed October 15, 2025).
104. BOE. Real Decreto 214/2025. Real Decreto 214/2025 2025. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2025-7439> (accessed October 15, 2025).
105. MITECO. Plan Forestal Español 2022-2032. Política Forestal 2025. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/politica-forestal/planificacion-forestal/politica-forestal-en-espana/pfe_plan_forestal_esp.html (accessed October 15, 2025).
106. European Commission. EU Forest Strategy for 2030. Forest Strategy 2025. https://environment.ec.europa.eu/strategy/forest-strategy_en (accessed October 15, 2025).
107. European Directive. Establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive) 2008:1–22. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0056> (accessed October 15, 2025).
108. BOE. Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas. Ley 22/1988, de 28 de Julio, de Costas 1988. <https://www.boe.es/eli/es/l/1988/07/28/22> (accessed October 15, 2025).
109. MITECO. El Gobierno aprueba la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo, que marca la senda para alcanzar la neutralidad climática a 2050 2020. https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2020/11/el_gobierno_apruebalaestrategiadedecarbonizacionalargoplazoquem.html (accessed October 15, 2025).
110. European Commission. Innovation Fund. Climate Action 2025. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund_en (accessed October 15, 2025).
111. European Commission. On establishing a framework of measures for strengthening Europe's net-zero technology products manufacturing ecosystem (Net Zero Industry Act) 2023:1–87. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:6448c360-c4dd-11ed-a05c-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF (accessed October 15, 2025).
112. BOE-A-2010-20049 Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de almacenamiento geológico de dióxido de carbono. n.d. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2010-20049> (accessed December 16, 2025).
113. BOE. Real Decreto 999/2017. Real Decreto 999/2017 2017. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2017/11/24/999> (accessed October 15, 2025).
114. European Commission. A new Circular Economy Action Plan 2020:1–20. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-consumption-production/> (accessed October 15, 2025).
115. European Commission. EU Biodiversity Strategy for 2030 2020. <https://ec.europa.eu/research/environment/index.cfm?pg=nbs> (accessed October 15, 2025).
116. European Commission. Horizon Europe-Work Programme 2023-2025 Climate, Energy and Mobility 2024:1–551. https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2023-2024/wp-8-climate-energy-and-mobility_horizon-2023-2024_en.pdf (accessed June 19, 2025).
117. Carbon Gap. Unlocking the potential of carbon removal 2025. <https://carbongap.org/> (accessed June 19, 2025).
118. Home - Mission Innovation n.d. <https://www.mission-innovation.net/> (accessed June 19, 2025).
119. European Commission. Economic forecast for Spain 2025. https://economy-finance.ec.europa.eu/economic-surveillance-eu-economies/spain/economic-forecast-spain_en? (accessed August 11, 2025).

120. MITECO. Solo un 41 % de los europeos sabe qué es la biodiversidad 2019. <https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/carpeta-informativa-del-ceneam/novedades/europeos-saben-biodiversidad.html> (accessed August 13, 2025).
121. Eurobarometer. Attitudes of Europeans towards the environment 2024. <https://europa.eu/eurobarometer/surveys/detail/3173?utm=> (accessed August 7, 2025).
122. IndustriaAmbiente. El número de trabajadores del sector de la energía se dispara en España con un aumento del 15,6% en 2024. - IndustriaAmbiente 2025. <https://www.industriambiente.com/noticias/20250523/-numero-trabajadores-sector-energia-se-dispara-en-espana-con-un-aumento-156-en-2024> (accessed August 7, 2025).
123. Polytechnic University of Cartagena. Carbon capture, transport, utilization, and storage are a “sustainable job niche” for engineers. 2024. <https://www.upct.es/noticias/2024-11-15-la-captura-y-el-transporte-uso-y-almacenamiento-del-carbono-son-un-nicho-de-empleo-sostenible-para-ingenieros> (accessed August 11, 2025).
124. NextMSC. Spain Construction Market Value Analysis | 2025-2030 2025. <https://www.nextmsc.com/report/spain-construction-market> (accessed August 12, 2025).
125. MITECO. Teresa Ribera anuncia 467 millones para desalación y un plan de abastecimiento en barco ante la grave sequía en Catalunya 2024. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2024/febrero/teresa-ribera-anuncia-467-millones-para-desalacion-y-un-plan-de-.html> <https://www.moeveglobal.com/en/planet-energy/sustainable-innovation/desalination-plants-innovation-water-management-spain> (accessed August 7, 2025).
126. MITECO. PERTE de digitalización del ciclo del agua 2022. <https://www.prtr.miteco.gob.es/es/perte/perte-digitalizacion-ciclo-agua.html> (accessed August 4, 2025).
127. ISMC (Iberian Sustainable Mining Cluster). Mining in Spain in 2023: challenges and opportunities in a transforming sector 2023. <https://ismc-iberiamine.com/en/2025/02/25/mining-in-spain-in-2023-challenges-and-opportunities-in-a-transforming-sector/> (accessed August 4, 2025).
128. MITECO. INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO. <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/resumen-Inventario-GEI-2025.pdf> (accessed August 27, 2025).
129. Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 n.d. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.html> (accessed October 15, 2025).
130. Fundación Ecología y Desarrollo (ECODES). Análisis del SAF en España. 2025.
131. E-Fuels observatory for shipping | T&E n.d. <https://www.transportenvironment.org/articles/e-fuels-observatory-for-shipping> (accessed October 21, 2025).
132. IRENA. INNOVATION OUTLOOK RENEWABLE METHANOL in partnership with 2021:1–122.
133. Hacia unos Productos de Ingeniería de Madera más sostenibles | Madera Estructural / Structural Timber n.d. <https://maderaestructural.wordpress.com/2023/11/09/5739/> (accessed January 15, 2026).
134. Potentiel de la France à déployer l'élimination du dioxyde de carbone - Carbon Gap n.d. <https://carbongap.org/potentiel-de-la-france-a-deployer-lelimination-du-dioxyde-de-carbone/> (accessed October 16, 2025).
135. Adopt BECCS technologies - Action Library n.d. <https://www.theclimatedrive.org/es/action-library/adopt-beccs-technologies> (accessed October 16, 2025).
136. How to get direct air capture costs to under \$150 per ton | World Economic Forum n.d. <https://www.weforum.org/stories/2023/08/how-to-get-direct-air-capture-under-150-per-ton-to-meet-net-zero-goals/> (accessed October 16, 2025).
137. Delerce S. Understanding and implementing the like-for-like principle. 2025.
138. Smith H. Residual emissions in long-term national climate strategies show limited climate ambition - Supplementary Data. Zenodo 2024. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.10972619>.
139. Gestión Forestal Sostenible n.d. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/forestal_gestion_sostenible.html (accessed December 2, 2025).
140. MPTERD. Catálogo de metadatos 2025. <https://www.mapama.gob.es/ide/metadatos/srv/spa/catalog.search#/map> (accessed May 21, 2025).



ACERCA DE

Carbon Gap

Carbon Gap se creó para ser la primera organización de defensa del medio ambiente financiada con fondos filantrópicos de Europa, centrada exclusivamente en CDR. Su misión es garantizar que Europa se convierta en líder en el desarrollo y la implementación de soluciones de CDR a gran escala de forma segura y equitativa para preservar un clima estable. Carbon Gap coordina la ejecución del proyecto que ha dado lugar a este informe.

www.carbongap.org

Global Factor

Global Factor es una empresa internacional especializada en soluciones innovadoras y sostenibles en materia de cambio climático, energía, crecimiento verde, financiación climática y mercados de carbono. Con más de 20 años de experiencia, más de 1400 proyectos en 44 países y un equipo multidisciplinar de más de 70 expertos, la empresa combina conocimientos técnicos, políticos y financieros. Apoya a los gobiernos y al sector privado en el diseño y la implementación de estrategias de descarbonización, NDC y marcos de financiación climática. Con la confianza de instituciones internacionales líderes como el Banco Mundial, el ADB, el BID y la UE, Global Factor ofrece soluciones impactantes y específicas para cada contexto en todo el mundo.

www.globalfactor.com

CRÉDITOS

Autores: Ainhoa Rodríguez Zimmermann, Freddy Segundo Navarro, Javier Martínez, Mario Arranz, (Global Factor), Alvaro Ponce Tobon, Carlota Pueyo Mosquera (Sener)

Editora: Martina Massei (Carbon Gap)

Revisor principal: Sylvain Delerce (Carbon Gap)

Revisores: Allix Baxter, Alexis Dunand (Carbon Gap)

Diseño: www.lunatrix.co.uk

Créditos de las fotografías: Liisbet Luups, Juanjo Moreno, Boris Ulzibat, Ludvig Hedenborg, Jo Kassis, Catalina Herrera (Pexels x 6), Alex Junypr, Anne Middelkamp, Drew Dizzy Graham (Unsplash x 3), Climeworks