

## BECCS: la combinación de bioenergía y captura de carbono que gana terreno

Daniel Plana, Belén Rodríguez-Reartes y Fèlix Llovell

*Cátedra para la Transición Energética sobre Captura y aprovechamiento de CO<sub>2</sub>*  
*Fundación Repsol - Universitat Rovira i Virgili*

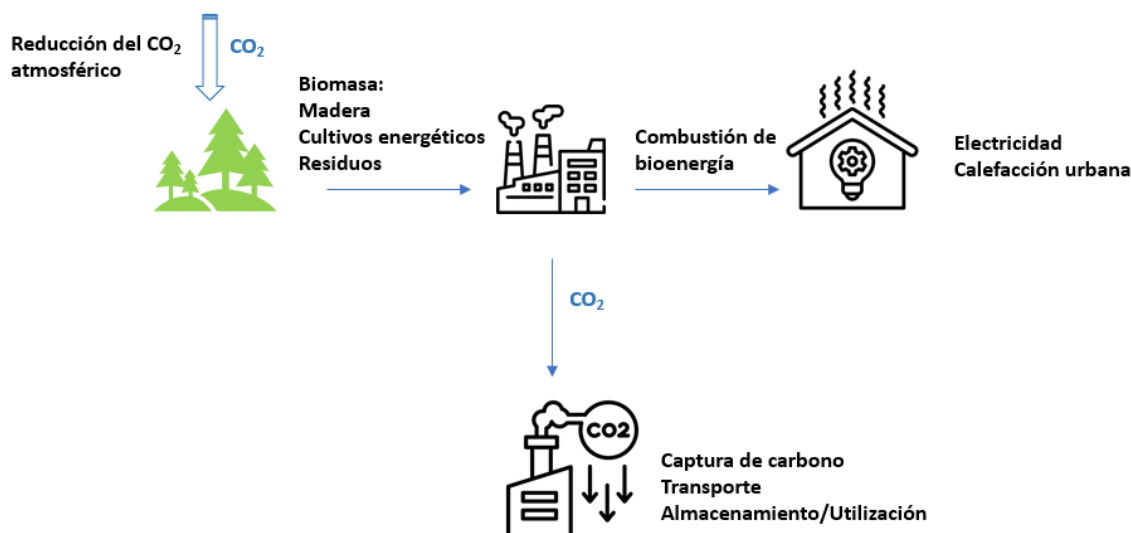
La bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS, por sus siglas en inglés) se perfila como una de las tecnologías más prometedoras para alcanzar emisiones netas negativas y cumplir los objetivos del Acuerdo de París. Esta nota analiza el papel de BECCS como herramienta de mitigación climática en el contexto español y europeo, detallando sus fundamentos tecnológicos, su potencial de implementación y los principales retos asociados. BECCS combina la generación de energía a partir de biomasa con la captura y almacenamiento geológico del CO<sub>2</sub> biogénico emitido, logrando una reducción neta de gases de efecto invernadero. Para ello, se dispone de varias rutas tecnológicas — combustión, gasificación, pirólisis y digestión anaerobia— junto con las estrategias de captura de postcombustión, precombustión y oxidación. Esta nota examina la disponibilidad y sostenibilidad de la biomasa en España, los costes estimados de implementación, con grandes oscilaciones en función de un número elevado de factores (35–300 €/tCO<sub>2</sub>) y los beneficios climáticos, energéticos y socioeconómicos asociados. Finalmente, se presentan los avances del proyecto “La Robla Green”, pionero en integrar bioenergía, hidrógeno verde y captura de CO<sub>2</sub> a escala industrial en España. BECCS podría convertirse en un pilar esencial de la transición energética, siempre que se garantice el uso sostenible de la biomasa y una adecuada infraestructura de transporte y almacenamiento de carbono.

## Introducción

El cambio climático se ha consolidado como uno de los mayores desafíos del siglo XXI, siendo el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) el principal responsable del aumento de las temperaturas globales. A pesar de las medidas adoptadas para mitigar sus emisiones, la concentración atmosférica de este gas sigue en aumento, superando ya los 420 ppm [1]. Esta tendencia pone en riesgo la estabilidad climática del planeta y exige soluciones que van más allá de la simple reducción de las emisiones de carbono.

En este contexto, las tecnologías de emisiones negativas (TEN) han ganado protagonismo como herramientas necesarias para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París. Se denominan así por su capacidad para reducir la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, logrando un balance neto negativo. Entre ellas, destaca la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (*bioenergy with carbon capture and storage*, BECCS, en inglés), que combina la generación de energía a partir de biomasa con la captura y almacenamiento geológico del CO<sub>2</sub> liberado durante el proceso. El funcionamiento de BECCS es, en esencia, sencillo: las plantas absorben CO<sub>2</sub> durante su crecimiento y, al utilizar esta biomasa para generar energía, las emisiones producidas se capturan y se almacenan de forma permanente en lugar de liberarse a la atmósfera. De este modo, el balance final de CO<sub>2</sub> es negativo, lo que convierte a BECCS en una de las tecnologías de emisiones negativas más relevantes, ya que no solo evita nuevas emisiones, sino que contribuye directamente a reducir la concentración atmosférica existente.

El ciclo (ver Figura 1) comienza con la producción o recolección de biomasa —residuos agrícolas y forestales, o cultivos energéticos— que ha fijado carbono biogénico mediante fotosíntesis. Esta biomasa se transforma en energía a través de combustión, gasificación, digestión anaerobia o pirólisis, procesos en los que se libera el CO<sub>2</sub> previamente absorbido. Dicho CO<sub>2</sub> se captura mediante tecnologías industriales y se almacena de forma segura en formaciones geológicas profundas, como acuíferos salinos o yacimientos agotados de gas. Así, al impedir que el CO<sub>2</sub> biogénico vuelva a la atmósfera, el sistema contribuye a una reducción neta de carbono, aunque es imprescindible evaluar con rigor todo el ciclo de vida para tener en cuenta las emisiones asociadas al cultivo, transporte y procesamiento de la biomasa.



**Figura 1:** Tecnología de bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS). Imagen adaptada de [2].

Numerosos informes del IPCC y de agencias europeas de energía señalan a BECCS como una pieza clave en los escenarios de mitigación más ambiciosos, especialmente aquellos que buscan limitar el aumento de la temperatura global por debajo de los 1,5 °C [3]. Según estas proyecciones, el despliegue de BECCS podría representar una sustracción anual de entre 1 y 5 Gt de CO<sub>2</sub> a mediados de siglo, dependiendo de la intensidad de su implementación. No obstante, cabe destacar que BECCS no es una única tecnología, sino un conjunto de procesos interrelacionados que abarcan desde la producción y el tipo de biomasa utilizada, hasta el método de conversión energética y las opciones de almacenamiento geológico. Por ello, su despliegue a gran escala requiere una evaluación crítica de sus ventajas, limitaciones, costes, impactos ecológicos y sociales, así como de su viabilidad tecnológica, ambiental y económica en diferentes contextos geográficos.

### Técnicas y procesos involucrados en las tecnologías BECCS

Para comprender el funcionamiento y la interrelación de los procesos involucrados en BECCS es necesario analizar cada eslabón de su cadena de valor: desde la conversión energética de la biomasa hasta la captura, el transporte y el almacenamiento final del CO<sub>2</sub>.

La **conversión de la biomasa en energía**, puede realizarse mediante diversas rutas tecnológicas, dependiendo de si su origen es vegetal o animal, puede transformarse en energía por diversas vías. Entre las más utilizadas en proyectos BECCS se encuentran:

- **Combustión directa:** involucra la quema controlada de biomasa para producir calor, que puede utilizarse para generación eléctrica mediante turbinas de vapor. Es la técnica más consolidada y de mayor despliegue a escala industrial.
- **Gasificación:** transforma la biomasa en un gas de síntesis (principalmente CO, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>) mediante procesos termoquímicos a alta temperatura en condiciones de bajo oxígeno. El gas producido puede utilizarse como combustible o materia prima para productos químicos.
- **Pirólisis:** es el proceso en el que la biomasa se descompone térmicamente en ausencia de oxígeno, generando una fracción sólida (*biochar*), una líquida (*bio-oil*) y una gaseosa (*syngas*). Algunas aplicaciones de BECCS incluyen la valorización del *biochar* como sumidero de carbono estable.
- **Digestión anaerobia:** descomposición biológica de materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás (principalmente CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>) que puede quemarse para generar energía o refinarse como biometano.

La elección de una u otra vía depende del tipo de biomasa disponible, la infraestructura existente y los objetivos energéticos y climáticos del proyecto.

La **captura del CO<sub>2</sub>** liberado durante el proceso de conversión energética puede realizarse mediante diferentes métodos que dependen del “punto” de captura:

- **Captura postcombustión:** separa el CO<sub>2</sub> de los gases de escape tras la combustión de biomasa. Es la opción más extendida por su posibilidad de adaptación a instalaciones existentes.
- **Captura precombustión:** consiste en convertir la biomasa en gas de síntesis, del cual se separa el CO<sub>2</sub> antes de su combustión. Es habitual en sistemas de gasificación.
- **Oxicombustión:** se quema la biomasa con oxígeno puro en lugar de aire, lo que produce una corriente rica en CO<sub>2</sub> y vapor de agua, más fácil de separar.

Adicionalmente, cada una de las estrategias anteriores puede asociarse a diversas tecnologías de captura que involucran: la absorción mediante solventes líquidos, la adsorción en superficies sólidas, el empleo de membranas, procesos criogénicos, etc.

El CO<sub>2</sub> capturado debe ser transportado y almacenado. Habitualmente se transporta por tuberías, hasta un punto de almacenamiento seguro: acuíferos salinos profundos, yacimientos agotados de petróleo y gas, y formaciones basálticas o rocosas estables.

En todos los casos, el almacenamiento debe garantizar que el CO<sub>2</sub> no escape durante cientos o miles de años, por lo que se aplican rigurosos sistemas de monitoreo y verificación. Algunos proyectos, como el de *Archer Daniels Midland* (ADM) en Illinois (Estados Unidos) [4], han demostrado la viabilidad técnica y económica de este proceso, con inyecciones estables en formaciones geológicas a más de 2.000 metros de profundidad.

La *eficiencia global* del sistema BECCS depende del proceso bioenergético empleado. En general, la conversión térmica directa (combustión) presenta una eficiencia aceptable para generación de calor y electricidad, mientras que la gasificación o digestión anaerobia pueden mejorar el aprovechamiento energético en función del tipo de biomasa y la cogeneración asociada. No obstante, la integración de sistemas de captura reduce ligeramente la eficiencia neta del sistema energético, al requerir energía para operar las unidades de separación de CO<sub>2</sub>. Este efecto puede compensarse parcialmente mediante la recuperación de calor residual o el aprovechamiento energético del CO<sub>2</sub> capturado si se destina a usos industriales o a la producción de combustibles sintéticos.

En la Tabla 1, se resumen las principales rutas existentes en las tecnologías BECCS, incluyendo las ventajas y desventajas en las etapas de conversión, captura y almacenamiento.

**Tabla 1. Comparación de principales rutas BECCS**

Etapa	Tecnología	Ventajas	Desventajas	Eficiencia	TRL
<b>Conversión</b>	Combustión	Tecnología madura, alto despliegue	CO <sub>2</sub> más diluido → captura más costosa	25–35% eléctrica	TRL 9
	Gasificación	Corriente rica en H <sub>2</sub> /CO → captura más sencilla	Mayor CAPEX, mayor complejidad	35–45% (co-generación)	TRL 6–7
	Pirólisis + biochar	Alta retención de carbono en biochar	Mercados limitados para biochar a gran escala	Retención 30–60% del C	TRL 5–7
	Digestión anaerobia	Biogás con 40–50% CO <sub>2</sub> → captura barata	Limitado a residuos húmedos	30–40% según cogeneración	TRL 8
<b>Captura</b>	Postcombustión	Retrofit posible	Alto coste energético	85–95% captura	TRL 9
	Precombustión	Alta concentración de CO <sub>2</sub>	Requiere gasificación	90–99%	TRL 7
	Oxicombustión	Corriente rica en CO <sub>2</sub>	Coste de separación de O <sub>2</sub>	95–99%	TRL 7–8
<b>Almacenamiento</b>	Acuíferos salinos	Mayor potencial	Requiere caracterización	>99% retención	TRL 8–9
	Pozos agotados	Infraestructura existente	Competencia con usos de gas	>99%	TRL 8–9
	Basaltos	Potencial muy alto	Pocas experiencias	Mineralización rápida	TRL 6

## Biomasa: origen, disponibilidad y sostenibilidad

La biomasa representa la base material del sistema BECCS, ya que es la fuente primaria de energía y el vehículo para la captura de carbono atmosférico mediante fotosíntesis. Su variedad, disponibilidad y sostenibilidad son factores clave para determinar la viabilidad técnica, económica y ambiental de esta tecnología.

El **origen de la biomasa** empleada en BECCS es diverso y abarca:

- *Residuos agrícolas*: restos de cosechas como paja, cáscaras, tallos y otros subproductos no alimentarios.
- *Residuos forestales*: restos de podas, corteza y madera no comercial.
- *Cultivos energéticos*: especies vegetales cultivadas específicamente para ser convertidas en bioenergía (como el *miscanthus* o el cardo).
- *Residuos orgánicos industriales y urbanos*: fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (RSU), lodos de depuradoras o residuos agroindustriales.

Cada tipo de biomasa presenta características diferentes en cuanto a contenido energético, humedad, composición química y logística de recolección y transporte, lo que condiciona su uso según el tipo de tecnología de conversión energética y la escala del proyecto.

En cuanto a **disponibilidad de biomasa**, a nivel europeo, se estima que la misma podría cubrir hasta un 20 % de la demanda energética si se aprovechan los recursos disponibles de forma sostenible. En España, el potencial de aprovechamiento es elevado gracias a su extensión forestal y agrícola. Sin embargo, aún se encuentra infrutilizado. Según AVEBIOM, en 2023 se contabilizaron más de 600 redes de calor con biomasa, y el número de instalaciones continúa en aumento [5].

Además, el país cuenta con un alto potencial de generación de biogás y biometano a partir de residuos ganaderos y agroindustriales, lo que diversifica aún más las fuentes de biomasa disponibles. Distintos estudios estiman que la disponibilidad de biomasa residual (principalmente residuos agrarios, ganaderos, forestales y urbanos) alcanza del orden de 159 Mt/año, lo que sitúa al país entre los más favorecidos de Europa en cuanto a recurso biodegradable. Además, se estima un potencial técnico de biometano en España en torno a 55 TWh/año, de los cuales aproximadamente un 80 % podría proceder de estiércoles, purines y residuos agrícolas (además de la fracción orgánica de residuos municipales y lodos de depuradora). Estos valores son coherentes con evaluaciones nacionales previas que identifican un potencial de al menos 10–20

TWh/año de biogás/biometano en 2030 solo a partir de residuos agroindustriales y fracción orgánica de residuos urbanos, información recogida en la Hoja de Ruta del Biogás del MITECO [5].

El uso masivo de biomasa plantea interrogantes sobre su **sostenibilidad**. Entre los principales desafíos se encuentran:

- *Cambio de uso del suelo*: la expansión de cultivos energéticos puede generar conflictos con la producción de alimentos o la conservación de ecosistemas.
- *Consumo de agua y nutrientes*: un aspecto especialmente relevante en zonas áridas o con suelos degradados.
- *Aceptación social y territorial*: factor crucial para el despliegue de estas tecnologías, relacionado con el impacto visual, la competencia por recursos y el modelo de desarrollo rural promovido.

Por estas razones, las políticas europeas fomentan el uso preferente de residuos y subproductos en lugar de cultivos dedicados, promoviendo una economía circular y minimizando impactos ambientales.

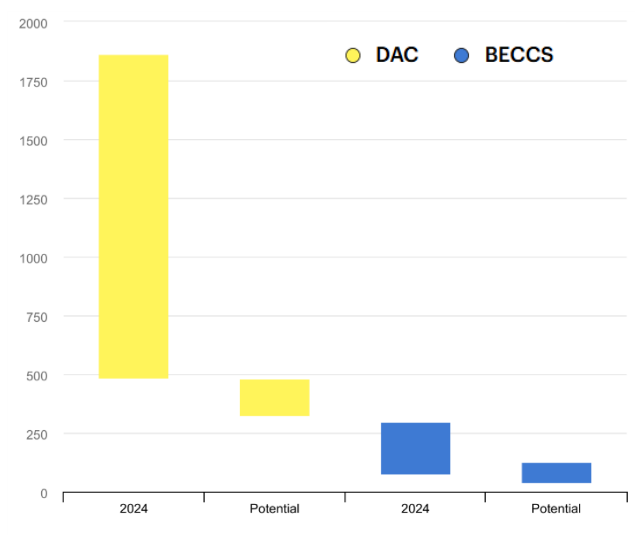
#### Costes, regulación y beneficios ambientales

La implementación de sistemas BECCS involucra una serie de costes asociados a cada una de sus etapas. Sin embargo, a pesar de su complejidad, BECCS presenta ventajas significativas tanto desde el punto de vista climático como económico, especialmente si se valora su capacidad de generar emisiones negativas.

El coste total de BECCS depende de múltiples factores: tipo de biomasa utilizada, tecnología de conversión, distancia hasta el punto de almacenamiento geológico, escala del proyecto, y marco normativo o fiscal aplicable. Según el reciente informe sobre el estado de la innovación energética (*"The State of Energy Innovation"*) publicado por la International Energy Agency (IEA) en 2025 [7], los costes de captura se estiman entre 35 y 45 €/tCO<sub>2</sub> en biorrefinerías con altas concentraciones de CO<sub>2</sub> (por ejemplo, etanol o biogás), y entre 90 y 110 €/tCO<sub>2</sub> para fuentes más diluidas, como centrales térmicas o fábricas de celulosa y papel. Sin embargo, lograr estos costos más bajos dependerá de la optimización del diseño de las plantas, el aprovechamiento de las economías de escala y la minimización de los costos de transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub> para las plantas existentes que no se encuentran cerca de los sitios de almacenamiento. Los proyectos BECCS pioneros actualmente oscilan entre 70 y 275 €/tCO<sub>2</sub>. El proyecto ADM en Illinois (Estados Unidos), basado en combinar la producción de bioetanol a partir de grandes superficies de maíz con la viabilidad técnica de inyectar un millón de toneladas

de CO<sub>2</sub> en tres años, ha reportado costes especialmente variables de captura [4]. Mejorar las fuentes de materia prima y las operaciones de refinamiento será clave para reducir los costos.

Pese a lo mencionado, el potencial de BECCS es enorme, ya que sus costes son significativamente más bajos que los relacionados a las tecnologías DAC, tal y como se muestra en la Figura 2, donde se comparan ambas tecnologías, incluyendo su coste potencial en los próximos años.



**Figura 2:** Costos actuales y potenciales de eliminación mediante DAC y BECCS. El eje y indica el coste en \$/tCO<sub>2</sub>.

A nivel regulatorio, instrumentos como el sistema de comercio de emisiones europeo (ETS) permiten asignar un valor económico a la reducción o eliminación de CO<sub>2</sub>, lo que puede mejorar significativamente la rentabilidad de BECCS. Por otro lado, en Estados Unidos, el marco político y financiero está avanzando: el crédito fiscal 45Q ofrece incentivos de hasta 50 dólares por tonelada almacenada en formaciones salinas, y el país dispone ya de 4 500 millas de gasoductos de CO<sub>2</sub>, lo que reduce significativamente las barreras de transporte.

Respecto a los beneficios ambientales, es imperativo evaluar el *Balance de carbono del ciclo completo*, ya que el desempeño climático de BECCS depende de que las emisiones y absorciones de carbono se evalúen a lo largo de toda la cadena de valor — cultivo y/o procesamiento de la biomasa, su conversión energética, captura, transporte y almacenamiento geológico del CO<sub>2</sub>— mediante un análisis de ciclo de vida (LCA) que cuantifique las emisiones directas e indirectas asociadas a cada etapa. Solo así puede garantizarse que el impacto neto asociadas no contrarreste los beneficios de remoción



de CO<sub>2</sub>. Diversos análisis de ciclo de vida (LCA) demuestran que, bajo condiciones adecuadas, la cantidad de CO<sub>2</sub> retirada del sistema atmosférico puede superar la liberada durante la operación, transporte y logística de la biomasa [8]. En particular, Fajardy y Mac Dowell [9] evaluaron sistemas BECCS con cultivos energéticos dedicados y residuos agrícolas considerando variaciones regionales, climáticas y efectos de cambio de uso del suelo (LUC, *land use change* e iLUC, *indirect land use change*). Su análisis mostró que el desempeño ambiental de BECCS es fuertemente dependiente del contexto: tres de los cuatro casos estudiados presentaron emisiones netas negativas —entre -288 y -1124 t CO<sub>2</sub>-eq ha<sup>-1</sup>— mientras que un caso (sauce europeo en praderas) resultó en emisiones positivas debido principalmente a los impactos asociados al LUC y al iLUC. Esto destaca la necesidad de evaluaciones locales detalladas para determinar la verdadera contribución climática del BECCS.

### Desafíos y limitaciones

A pesar del potencial de BECCS como tecnología de emisiones negativas, su despliegue a gran escala enfrenta importantes desafíos de diversa índole: técnicos, económicos, ambientales, sociales y regulatorios.

Uno de los principales obstáculos es la necesidad de una infraestructura integrada y a gran escala, que permita coordinar la conversión de biomasa, la captura de CO<sub>2</sub> y su transporte a formaciones geológicas adecuadas. Esta complejidad técnica limita el despliegue en regiones sin experiencia previa en tecnologías de captura y almacenamiento (CCS). Además, la eficiencia de los sistemas BECCS varía en función del tipo de biomasa, la tecnología de conversión empleada y la proximidad a los puntos de almacenamiento. Las pérdidas energéticas derivadas de la captura y compresión del CO<sub>2</sub> pueden reducir la viabilidad del sistema en ausencia de optimización.

Los costes variables de BECCS (alcanzando hasta 300 €/tCO<sub>2</sub>) y la falta de señales claras de precio del carbono dificultan la inversión privada. En muchos casos, el retorno económico depende de subsidios, incentivos fiscales o mercados de emisiones robustos, como el ETS europeo o el crédito 45Q en EE. UU, anteriormente mencionados.

Por otro lado, la cadena de suministro de biomasa no siempre está profesionalizada ni preparada para sostener la demanda adicional que requeriría una expansión de BECCS a gran escala. El uso intensivo de biomasa puede generar tensiones con otros usos del suelo, especialmente si se recurre a cultivos energéticos. Esto plantea riesgos

sobre la biodiversidad, la seguridad alimentaria y el acceso equitativo a los recursos naturales.

Además, la aceptación social del almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub> aún es limitada en muchas regiones debido a la percepción de riesgo o la falta de información pública.

La Tabla 2 ofrece un resumen en el que se comparan las ventajas e inconvenientes de las tecnologías BECCS frente a otras TEN.

**Tabla 2: Comparativa entre las diferentes Tecnologías de Emisiones Negativas (TEN)**

Criterio	BECCS	DAC (Captura Directa de Aire)	Reforestación / Biochar
<b>Madurez (TRL)</b>	7–9	5–7	7–9
<b>Coste por tCO<sub>2</sub></b>	35–300 €/t	300–600 €/t (o más)	20–50 €/t (pero limitada estabilidad)
<b>Estabilidad del CO<sub>2</sub> capturado</b>	Alta (almacenamiento geológico)	Alta	Media (riesgo incendios) / Alta (biochar)
<b>Escalabilidad</b>	Alta (limitada por biomasa y almacenamiento)	Muy alta (limitada por energía)	Alta pero limitada por tierra/agua
<b>Competencia por recursos</b>	Biomasa, uso del suelo	Energía renovable	Tierra, agua, biodiversidad
<b>Co-beneficios</b>	Producción de energía, gestión de residuos	Desarrollo tecnológico	Biodiversidad, suelo
<b>Impacto territorial</b>	Alto (logística biomasa + planta CCS)	Bajo (modular)	Alto (uso de suelo)
<b>Principales barreras</b>	Biomasa, logística, aceptación del almacenamiento	Coste y energía	Disponibilidad de suelo y permanencia

### Proyectos BECCS en marcha en España

La bioenergía con captura y almacenamiento de carbono es una realidad que cobra impulso en diversos puntos del planeta, en la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles. En particular, en España, el proyecto “La Robla Green” promueve la conversión de una antigua central de carbón en La Robla (Castilla y León) hacia bioenergía con captura de carbono [10]-[14]. Prevé una planta de cogeneración de 49,9 MW eléctricos alimentada con biomasa vegetal de origen agrícola (principalmente restos de cosechas como paja de maíz). El proyecto se encuentra en fase de desarrollo: en marzo de 2025 obtuvo la autorización administrativa previa y de construcción por parte de las autoridades regionales. Incluirá una planta de producción de hidrógeno (200 MW de electrólisis) y una planta de e-metanol verde asociadas. La planta de captura de CO<sub>2</sub> integrada estará diseñada para capturar hasta 400.000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año procedentes de los gases de combustión de la biomasa. La tecnología de

captura prevista es postcombustión por absorción química (con aminas). El consorcio desarrollador ha involucrado a Mitsubishi Heavy Industries como proveedor de tecnología de captura de CO<sub>2</sub>, mientras que el CO<sub>2</sub> capturado se combinará con hidrógeno renovable para sintetizar e-metanol. Aunque en este caso el CO<sub>2</sub> se aprovechará como insumo industrial (no necesariamente para almacenamiento geológico inmediato), el proyecto generará emisiones negativas al capturar carbono biogénico que de otro modo iría a la atmósfera.

Los promotores principales son la empresa española *Reolum* (especializada en transición energética) [11], con la ingeniería a cargo de un consorcio de Técnicas Reunidas y Siemens Energy [10], y con apoyo financiero de programas europeos (como fondos de los “valles del hidrógeno” por 180 M€). Actualmente, el proyecto ha superado la evaluación de impacto ambiental y se espera el inicio de obras en breve, posicionando a España entre los pioneros de BECCS a escala comercial en Europa.

## Conclusiones

La tecnología BECCS representa una solución clave para alcanzar los objetivos de neutralidad climática marcados por el Acuerdo de París, especialmente en los escenarios que requieren emisiones negativas para compensar sectores difíciles de descarbonizar. La combinación de beneficios climáticos, gestión de residuos y generación de empleo rural convierte a esta tecnología en una opción atractiva dentro de un enfoque de transición energética justa y circular.

En el futuro será imprescindible priorizar el uso de biomasa residual frente a los cultivos dedicados, fomentando al mismo tiempo el desarrollo de la infraestructura de transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub>. También será clave asegurar la aceptación social mediante la transparencia, la educación y la participación pública, e integrar BECCS en las estrategias climáticas nacionales y europeas, con objetivos cuantificables y mecanismos de financiación adecuados que garanticen su despliegue efectivo y su contribución a la neutralidad climática.

Con las condiciones necesarias, BECCS puede convertirse en un pilar fundamental de las políticas de mitigación del cambio climático y recuperación del equilibrio del sistema climático global.

## Bibliografía

- [1] National Oceanic and Atmospheric Administration, “Trends in CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SF<sub>6</sub>,” NOAA Global Monitoring Laboratory, 5 Sep. 2025. [Online]. Available: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

- [2] Tatarewicz, I., Lewarski, M., Skwierz, S., Krupin, V., Jeszke, R., Pyrka, M., Szczepański, K., & Sekuła, M. (2021). *The role of BECCS in achieving climate neutrality in the European Union*. *Energies*, 14(23), 7842. <https://doi.org/10.3390/en14237842>
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (H. Lee & J. Romero, Eds.). Geneva, Switzerland: IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- [4] Hossain, T., Burli, P., Pina, J., Jones, D., Hartley, D., & Hess, R. (2023). *Deployment of BECCUS value chains in the United States: A case study of sequestering CO<sub>2</sub> from ethanol production* (IEA Bioenergy Task 40 Report; ISBN 979-12-80907-24-0). IEA Bioenergy.
- [5] AVEBIOM. (2023). Informe Redes de Calor con Biomasa 2023 – Avance. Asociación Española de la Biomasa.
- [6] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (2022, marzo). *Hoja de Ruta del Biogás. Marco estratégico de energía y clima* (Versión V6). Madrid: MITECO. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/es-es/Novidades/Documents/00HR\\_Biogas\\_V6.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/es-es/Novidades/Documents/00HR_Biogas_V6.pdf)
- [7] International Energy Agency (IEA). Driving down the cost of carbon removal: Why innovation matters. Commentary, 27 October 2025. Paris: IEA. Licence: CC BY 4.0. Available at: <https://www.iea.org/commentaries/driving-down-the-cost-of-carbon-removal-why-innovation-matters>.
- [8] T. Terlouw, C. Bauer, L. Rosa, M. Mazzotti. *Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies: A critical review*. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14, 1701-1721.
- [9] Fajardy, M., & Mac Dowell, N. (2017). Can BECCS deliver sustainable and resource efficient negative emissions? *Energy & Environmental Science*, 10, 1389–1426.
- [10] Técnicas Reunidas (2024). Técnicas Reunidas y Siemens Energy desarrollarán la ingeniería de una de las mayores plantas de metanol verde de Europa en La Robla. <https://www.tecnicasreunidas.es/tecnicas-reunidas-will-carry-out-the-engineering-services-to-develop-one-of-europes-largest-green-methanol-plant>.
- [11] Reolum (2024). Proyectos – La Robla Green. <https://reolum.com>
- [12] El Periódico de la Energía (2024). Luz verde al impacto ambiental de la planta de biomasa con captura de CO<sub>2</sub> de La Robla. <https://elperiodicodelaenergia.com/luz-verde-al-impacto-ambiental-de-la-planta-de-biomasa-con-captura-de-co2-de-la-robla>.
- [13] El Español – Invertia (2025). Europa concede 445 millones al proyecto de Reolum en La Robla. [https://www.elespanol.com/invertia/empresas/energia/20250326/europa-concede-millones-proyecto-reolum-robla-leon-biomasa-captura-carbono-hidrogeno-e-metanol/933907180\\_0.html](https://www.elespanol.com/invertia/empresas/energia/20250326/europa-concede-millones-proyecto-reolum-robla-leon-biomasa-captura-carbono-hidrogeno-e-metanol/933907180_0.html)
- [14] Renewables Now (2024). Reolum selects Johnson Matthey tech for e-methanol project in Spain. <https://renewablesnow.com/news/reolum-picks-johnson-matthey-tech-for-e-methanol-project-in-spain-1269774>