

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de la Energía  
*Mención en Energías Renovables*

# EL FUTURO DE LAS TECNOLOGÍAS DE BIOMASA CON CAPTURA DE CO<sub>2</sub> EN LA UNIÓN EUROPEA

Autora: Marina Candel Rubio  
Tutores: David Velázquez Alonso  
Ana Díaz Vázquez

Departamento de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla



Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de la Energía

# **EL FUTURO DE LAS TECNOLOGÍAS DE BIOMASA CON CAPTURA DE CO<sub>2</sub> EN LA UNIÓN EUROPEA**

Autora:  
Marina Candel Rubio

Tutor:  
David Velázquez Alonso  
Dr. profesor titular

Ana Díaz Vázquez  
Dr. Ing. Externo

Departamento de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado: EL FUTURO DE LAS TECNOLOGÍAS DE BIOMASA CON  
CAPTURA DE CO2 EN LA UNIÓN EUROPEA

Autora: Marina Candel Rubio

Tutor: David Velázquez Alonso  
Ana Díaz Vázquez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019  
El Secretario del Tribunal



*A mis abuelos, Pepe y Emy.*





# Agradecimientos

---

Gracias...

A mis tutores, que me han allanado el camino.

A los profesores que se aprendieron mi nombre.

A mi hogar. Mamá, Papá e Ignacio, gracias por tener paciencia y no desesperar en la espera de ver el fin de este trabajo. A ellos más que a nadie por hacer numerosos esfuerzos, anteponer mis estudios a todo y por aprenderse el nombre de mis asignaturas.

A *Está Pasando*. Gracias Marina, Rocío, María e Irene. Gracias por crecer conmigo, por hacerme mejor mujer, por quererme.

A David. Gracias por ser mi compañero, mi apoyo, mi salvavidas. Gracias por confiar en mí cuando ni yo lo hacía.

Y agradeceros a vosotros el haber llegado hasta aquí. Sin vuestra compañía, hubiera sido imposible. Vosotros, vosotros que sois mis años universitarios, sois mi familia, mis viajes, mi conciencia, mis esperanzas y anhelos, sois mi *Energía*. A vosotros más que a nadie, a esos apuntes compartidos, a esos madrugones, a esos llantos, a esas cervezas y a los descansos interminables. A las conversaciones que querían cambiar el mundo, a los cafés al sol mientras cantábamos canciones infantiles. A vosotros:

Dos cafés manchados,  
Un café con leche fría,  
Un café solo con hielo,  
Un café con leche fría sin lactosa,  
Dos cafés con leche y sacarina,  
Un café solo,  
Unas natillas,  
Un plátano.



# Resumen

---

En la actualidad, las políticas energéticas de la mayoría de los países, así como ciertas normativas que afectan a la vida cotidiana de los ciudadanos están centradas en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, así como en la sustitución de los combustibles fósiles por fuentes de energía limpia. Todo esto para mitigar el cambio climático.

La solución se centra en el uso de las energías limpias o en tecnologías con emisiones de gases contaminantes bajas. Para cumplir los objetivos del acuerdo de París (no superar los 2° C la temperatura del planeta respecto a los niveles preindustriales), la Unión Europea está fomentando el uso de las energías renovables y, además, la tecnología de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (uno de los gases más perjudicial para el calentamiento global).

La Unión Europea espera un desarrollo del uso de la biomasa con captura de CO<sub>2</sub>, ya que lo considera una fuente de emisiones negativas (consume/absorbe más de lo que emite). Esta tecnología se basa en el uso de biomasa como combustible para la producción energética, a la cual se le añade en la cadena de producción una unidad de captura de CO<sub>2</sub>, lo que evita que este contaminante sea emitido a la atmósfera.

En el estudio realizado a continuación, se analiza si las esperanzas puestas en esta tecnología por parte de la UE son realistas y si se puede llegar a desarrollar, o si, por el contrario, es preciso focalizar las inversiones y los objetivos en otras opciones de mitigación del cambio climático, como por ejemplo el uso de las energías renovables convencionales.



# Abstract

---

Currently, the energy policies of most countries, as well as certain standards that adapt to the daily life of citizens are focused on the reduction of greenhouse gas emissions, as well as on the substitution of fossil fuels by sources of clean energy. All this to mitigate climate change.

The solution focuses on the use of clean energies. To meet the objectives of the Paris agreement, the European Union is promoting the use of renewable energy and, in addition, the technology of capture and storage of CO<sub>2</sub> (one of the most harmful gases for global warming).

The European Union expects a development of the use of biomass with capture and storage of CO<sub>2</sub>, which is considered a source of negative emissions (consuming / absorbing more than it emits). This technology is based on the use of biomass as fuel for energy production, which has in the production chain a unit of capture of CO<sub>2</sub>, which prevents this pollutant from being emitted into the atmosphere.

In the study carried out below, the hopes published in this technology by the EU are realistic and if it can be developed, or if, on the contrary, it is necessary to focus investments and objectives on other options of mitigation of climate change, such as the use of renewable energies.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xviii</b>
<b>Notación</b>	<b>xxi</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Biomasa y sus usos energéticos</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Biomasa</b>	<b>3</b>
2.1.1. <i>Tipos de biomasa</i>	3
2.1.2. <i>Procesos de transformación de la biomasa</i>	6
2.1.3. <i>Biocombustibles</i>	7
<b>2.2. Producción energética a partir de biomasa</b>	<b>9</b>
2.2.1. <i>Biomasa para generación eléctrica</i>	9
2.2.2. <i>Biomasa para generación térmica</i>	12
<b>2.3. Emisiones de la biomasa</b>	<b>13</b>
2.3.1. <i>Biocombustibles líquidos comerciales o de primera generación</i>	14
2.3.2. <i>Biocombustibles avanzados o de segunda generación</i>	15
2.3.3. <i>Biogás</i>	16
2.3.4. <i>Biomasa sólida</i>	16
<b>2.4. Cambio indirecto del uso del suelo</b>	<b>18</b>
<b>2.5. Deforestación y alimentación</b>	<b>23</b>
<b>3. Tecnología de captura de dióxido de carbono</b>	<b>25</b>
<b>3.1. Captura de CO<sub>2</sub></b>	<b>25</b>
<b>3.2. Tecnologías de captura</b>	<b>25</b>
3.2.1. <i>Precombustión</i>	26
3.2.2. <i>Postcombustión</i>	26
3.2.3. <i>Oxicombustión</i>	28
<b>3.3. Purificación</b>	<b>28</b>

<b>3.4. Transporte</b>	<b>28</b>
<b>3.5. Almacenamiento</b>	<b>29</b>
3.5.1. <i>Almacenamiento geológico</i>	29
3.5.2. <i>Mineralización</i>	31
3.5.3. <i>Almacenamientos oceánicos</i>	32
3.5.4. <i>Usos industriales</i>	33
3.5.5. <i>Conversión en biocombustibles y biomasa</i>	34
<b>3.6. Situación actual de la tecnología</b>	<b>34</b>
<b>3.7. Barreras para la implementación</b>	<b>36</b>
<b>4. Biomasa con captura de CO<sub>2</sub></b>	<b>39</b>
<b>4.1. Biomasa con captura de CO<sub>2</sub> (BECCS)</b>	<b>39</b>
<b>4.2. Estado técnico</b>	<b>41</b>
4.2.1. <i>Proyectos en la Unión Europea</i>	41
<b>4.3. La demanda de recursos</b>	<b>44</b>
<b>4.4. Ejemplo de una planta</b>	<b>45</b>
4.4.1. <i>Comparación de beneficios entre una planta BECCS y una de Biomasa</i>	49
<b>5. BECCS en el futuro de la Unión Europea</b>	<b>52</b>
<b>5.1. Marco político y los objetivos a alcanzar</b>	<b>52</b>
5.1.1. <i>Protocolo de Kioto</i>	52
5.1.2. <i>Acuerdo de París</i>	53
5.1.3. <i>Horizontes de la Unión Europea</i>	54
<b>5.2. BECCS en la Unión Europea</b>	<b>57</b>
<b>5.3. Rutas alternativas</b>	<b>60</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>65</b>
<b>7. Propuestas de mejora</b>	<b>69</b>
<b>8. Bibliografía</b>	<b>71</b>
<b>9. Anexos</b>	<b>75</b>
<b>9.1. ANEXO 1. PLANTA DE BIOMASA CON CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO<sub>2</sub></b>	<b>75</b>
<b>9.2. ANEXO 2. CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA.</b>	<b>75</b>





# Índice de Tablas

---

Tabla 3-1	Proyectos en funcionamiento en UE. Fuente: creación propia. Datos: Global CCS Institute	35
Tabla 3-2	plantas de CAC en funcionamiento en UE. Fuente: creación propia. Datos: Global CCS Institute	35
Tabla 4-1,	valores de cada planta. Fuente: Creación propia	49
Tabla 4-2,	valores de R y diferencia beneficios. Fuente: creación propia.	50
Tabla 6-1,	potencia necesaria instalada en el futuro. Fuente: creación propia. Datos: Fuente: Berg, T. (2016). On the deployment of Bio-CCS in the EU: Barriers and policy requirements for a 2. C pathway	66
Tabla 6-2,	plantas en evaluación. Fuente: Berg, T. (2016). On the deployment of Bio-CCS in the EU: Barriers and policy requirements for a 2. C pathway	67
Tabla 9-1,	Consumo de agua de la planta	79
Tabla 9-2,	Consumo de electricidad de la planta	79
Tabla 9-3,	Características básicas de la planta	80
Tabla 9-4,	Eficiencia de la captura de la planta	80
Tabla 9-5,	Emisiones gaseosas de la planta	81
Tabla 9-6,	Balance de la caldera y tratamiento de gases	81
Tabla 9-7,	Balance de la unidad de producción de potencia	81
Tabla 9-8,	Balance de la unidad de compresión y secado del CO <sub>2</sub>	82
Tabla 9-9,	Balance de la unidad de captura del CO <sub>2</sub>	83



# Índice de Figuras

---

Ilustración 2-1 Tipos de biomasa. Fuente: Realización propia.	5
Ilustración 2-2, Diagrama de bloques producción de energía. Fuente: TFG Padilla Romero, Carlos. Estudio básico del grupo de turbina alternador de una planta de generación eléctrica con biomasa de 50 MW.	12
Ilustración 2-3, Desglose de las emisiones de gases de efecto invernadero por etapa del ciclo de vida de cuatro biocombustibles comerciales (g de CO <sub>2</sub> eq / MJ). Fuente: Carvalho, I. De, & Nassar, A. M. Greenhouse Gas Emissions from Bioenergy	14
Ilustración 2-4, Las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida de los biocombustibles comerciales	15
Ilustración 2-5, las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida de los biocombustibles de segunda generación	16
Ilustración 2-6, emisiones de gases de efecto invernadero (LCA excluyendo LUC): tecnología comercial de generación de bioenergía	17
Ilustración 2-7. Fuente: Staff, C., Document, W., & Assessment, I. (2012). IMPACT ASSESSMENT.	18
Ilustración 2-8. Fuente: Staff, C., Document, W., & Assessment, I. (2012). IMPACT ASSESSMENT.	19
Ilustración 2-9. Fuente: Staff, C., Document, W., & Assessment, I. (2012). IMPACT ASSESSMENT.	19
Ilustración 2-10, Emisiones ILUC. Fuente: Amigos de la Tierra, Ecologistas en Acción (2013): “Impacto de las políticas europeas sobre agrocombustibles”	21
Ilustración 2-11, Emisiones de CO <sub>2</sub> antropogénicas acumuladas en la atmósfera desde 1850. Fuente: IEA Bioenergy Berndes et.al. 2010	22
Ilustración 2-12 áreas deforestadas en los 27 ue de 1990 a 2030. Fuente: Matthews, R., Mortimer, N., Lesschen, J. P., Tomi, J., Sokka, L., Morris, A., Sayce, M. (2015). Carbon impacts of biomass consumed in the EU: quantitative assessment	23
Ilustración 3-1, tecnologías de captura. Fuente: <a href="https://www.pteco2.es/es/tecnologias/captura">https://www.pteco2.es/es/tecnologias/captura</a>	25
Ilustración 3-2, Esquema de proceso de absorción de CO <sub>2</sub> . fuente: Muñoz, C. B., Peris, P. M., & Rodríguez, J. D. R. 2011)	26
Ilustración 3-3, Captura de CO <sub>2</sub> por membranas. Fuente: Morales, H. Torres, C. (2008). Tecnologías de captura y secuestro de CO <sub>2</sub>	27
Ilustración 3-4, Almacenamiento geológico. Fuente: <a href="http://biologia-iespablodiez.blogspot.com/2013/06/el-almacenamiento-geologico-de-co2.html">http://biologia-iespablodiez.blogspot.com/2013/06/el-almacenamiento-geologico-de-co2.html</a>	30
Ilustración 3-5, Almacenamientos oceánicos. Fuente: IPCC (2005).	33
Ilustración 3-6, vías requeridas para limitar las emisiones para el escenario 2 °	36
Ilustración 4-1, Explicación BECCS. Fuente: Global CCS Institute	39

Ilustración 4-2, Emisiones negativas. Fuente: <a href="https://airfreshener.club/quotes/carbon-storage-and-ccs-capture.html">https://airfreshener.club/quotes/carbon-storage-and-ccs-capture.html</a> .	40
Ilustración 4-3, Cifras clave para la aplicación de BECCS en el sector de calor y electricidad cuando la entrega de 3,3 GtCeq / año de emisiones negativas en 2100	44
Ilustración 5-1, Países protocolo de Kioto. Fuente: <a href="https://canalhistoria.es/hoy-en-la-historia/se-firma-el-protocolo-de-kioto/">https://canalhistoria.es/hoy-en-la-historia/se-firma-el-protocolo-de-kioto/</a>	53
Ilustración 5-2, Países acuerdo de París. Fuente: <a href="https://es.weforum.org/agenda/2017/06/que-paises-forman-parte-del-acuerdo-de-paris">https://es.weforum.org/agenda/2017/06/que-paises-forman-parte-del-acuerdo-de-paris</a>	54
Ilustración 5-3, desarrollo de las emisiones de CO <sub>2</sub> . Fuente: <a href="https://airfreshener.club/quotes/chart-world-2100-emissions-carbon.html">https://airfreshener.club/quotes/chart-world-2100-emissions-carbon.html</a> .	57
Ilustración 5-4, GW de las tres actuaciones. Fuente: Berg, T. (2016). On the deployment of Bio-CCS in the EU: Barriers and policy requirements for a 2. C pathway	59
Ilustración 5-5, Emisiones negativas. Fuente: European Academies' Science Advisory Council. (2018). Easac Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets?	60
Ilustración 5-6, coste BECCS. Fuente: Fern. (2018). Six problems with BECCS.	61
Ilustración 5-7, terreno necesario para BECCS. Fuente: Fern. (2018). Six problems with BECCS.	62
Ilustración 5-8, daños a la biodiversidad. Fuente: Fern. (2018). Six problems with BECCS.	62
Ilustración 5-9, consumo de agua. Fuente: Fern. (2018). Six problems with BECCS.	63



# Notación

---

BECCS: *Bio-energy with carbon capture and storage*. “Bioenergía con captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>”

CAC: Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>

CH<sub>4</sub>: Metano

CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono

DLUC: Cambio directo del uso de la tierra

GEI: Gases de efecto invernadero

ILUC: Cambio indirecto del uso de la tierra

LUC: Cambio del uso de la tierra

UE: Unión Europea

MEA: Etanolamina

LP: Baja Presión

HP: Alta presión

€/tCO<sub>2</sub>: Euro la tonelada de CO<sub>2</sub>

H<sub>2</sub>O: Agua





# 1. Introducción

---

*“¿La ciencia ha prometido la felicidad? No lo creo. Ha prometido la verdad y la cuestión es saber si con la verdad se conseguirá algún día la felicidad.”.*  
- Emilé Zola-

La sociedad actual necesita del consumo a gran escala de energía para satisfacer sus necesidades. El ser humano se ha acostumbrado a tener un estilo de vida sin miramientos respecto al uso de energía. Durante años, se han utilizado los combustibles fósiles, los cuales se agotarán y, además, producen una gran cantidad de emisiones que son contaminantes. El uso de estos ha producido lo que ya es una realidad, el calentamiento global.

El calentamiento global es uno de los mayores problemas a los que se está enfrentando la Unión Europea en la actualidad. La principal causa es la emisión a la atmósfera de gases de efecto invernadero, entre los cuales se encuentra en gran medida el dióxido de carbono.

Es por esto por lo que en los últimos años se han desarrollado a gran escala las energías renovables, como es la eólica, la solar o la biomasa.

En diciembre de 2015 se celebró la Conferencia de París sobre el Clima, en la cual participaron 195 países que firmaron el primer acuerdo mundial sobre el clima. El acuerdo establece un plan de acción para evitar el calentamiento global y así limitar el aumento de temperatura en 2 °C respecto a los niveles preindustriales.

Para cumplir los objetivos de este acuerdo, la Unión Europea ha creado ciertos horizontes que comprenden la reducción de los gases de efecto invernadero por parte de los países miembros, así como el aumento de la eficiencia energética entre otros.

La UE confía alcanzar sus objetivos con la ayuda de la biomasa con tecnología de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Esta idea se basa en la consideración de que esta tecnología no solo no produce emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, sino que además captura cierta cantidad del contaminante, lo que conlleva a unas supuestas emisiones negativas.

En este documento se va a realizar un estudio de todos los parámetros que afectan a esta tecnología, para comprobar si la esperanza que ha depositado la UE en ella tiene fundamento o si por el contrario ha depositado dicha esperanza en una tecnología idílica y que no es tan beneficiosa como se ha supuesto desde un principio.

Para obtener las conclusiones del estudio a realizar, se va a analizar:

- Las emisiones relacionadas con el uso de la biomasa
- El estado de la tecnología de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>
- Barreras para la implementación de la tecnología
- La demanda de recursos de la tecnología BECCS
- El uso del terreno necesario, el consumo de agua, la deforestación...
- El coste de dicha tecnología
- Ayudas e incentivos

# 2. Biomasa y sus usos energéticos

---

*“Poco conocimiento hace que las personas se sientan orgullosas.  
Mucho conocimiento, que se sientas humildes”.*  
- Leonardo Da Vinci-

## 2.1. Biomasa

La biomasa es la utilización de material orgánico (desechos urbanos y agrícolas, plantas o árboles) como fuente energética. Puede ser utilizada para la producción de energía eléctrica, calefacción y como combustible para el transporte (biocombustibles) [1] [2] [3].

### 2.1.1. Tipos de biomasa

#### 2.1.1.1. Biomasa natural

Se produce en la naturaleza sin intervención humana. Se trata principalmente de residuos forestales:

- Coníferas
- Leñas y ramas
- Derivados de limpieza de bosques
- Frondosas

Es una de las principales fuentes energéticas de los países subdesarrollados, pero no es compatible con la protección al medio ambiente.

#### 2.1.1.2. Biomasa residual

Es el residuo o subproducto que se genera en actividades agrícolas o industriales. Estos residuos suponen un problema en su eliminación, por lo que esta biomasa tiene asociada ciertas ventajas en su utilización:

- Evita ciertas emisiones de CO<sub>2</sub>
- Los costes de producción son relativamente bajos, así como los de transporte.
- Disminuye la contaminación y riesgos de incendios
- Reduce el espacio en los vertederos
- Genera puestos de trabajo

La biomasa residual se divide a su vez en:

#### 1) Residuos agrícolas

Son los restos producidos por los cultivos herbáceos y leñosos. Debido a las diferentes fechas de producción de los cultivos tiene una marcada estacionalidad. Se destaca su fácil obtención, así como su obligada gestión como residuo. Por el

contrario, tiene diversas desventajas, como su estacionalidad y su producción dispersa.

2) Residuos forestales

Son generados de las explotaciones forestales, como las podas y los clareos (talas). La calidad como combustible y el volumen es variable. Su uso es beneficioso, ya que es necesario retirar estos residuos de los bosques debido al potencial riesgo de incendios que suponen.

3) Residuos de industrias forestales

A diferencia del anterior, estos residuos son generados en las actividades del sector de la madera.

4) Residuos urbanos

Esta biomasa depende de la fracción orgánicas de residuos sólidos urbanos, los lodos de la depuradora y aguas residuales.

5) Residuos de industrias agrícolas y agroalimentarias

Son residuos muy heterogéneos y con un alto grado de contaminación, por lo que su eliminación es complicada. Es importante valorar que su producción es previsible. Las industrias que generan mayor cantidad de residuos son las industrias de almazaras, arroz y frutos secos.

6) Residuos ganaderos

Son los residuos producidos por las explotaciones ganaderas, como los estiércoles, purines de cerdo y gallinácea. Debido a la gran explotación ganadera, se produce una gran cantidad de residuos que no puede ser utilizada como abono, lo que desemboca en la contaminación de aguas subterráneas y daños en los terrenos.

Por este motivo, es beneficioso utilizar estos residuos como biomasa, produciendo combustibles sólidos y biogás.

### 2.1.1.3.Excedentes agrícolas.

Los excedentes agrícolas que no sean utilizados para la alimentación humana pueden ser utilizados como biomasa.

### 2.1.1.4.Cultivos energéticos

Son cultivos que están destinados específicamente a la producción de energía. En éstos encontramos los cultivos tradicionales (cereales, caña de azúcar...) y otros no convencionales (sargo dulce). Su principal finalidad es la producción de biocombustibles a partir de biomasa.

En Europa, los biocarburantes de mayor desarrollo son constituidos por el etanol, obtenido de la remolacha y cereales, y los ésteres derivados de los aceites de colza.

Los cultivos energéticos deben cumplir unas características:

- Es necesario un alto rendimiento, es decir, un valor alto de producción de biomasa con unos costes bajos de producción.
- Debe desarrollarse en tierras marginales para así no afectar a los productos tradicionalmente cultivados.
- Las tierras utilizadas deben ser fácilmente recuperables para poder realizar otros cultivos.
- El balance energético global debe ser positivo.
- La cantidad de agua requerida en el cultivo debe ser mínima y sostenible.

- La biomasa obtenida debe ser adecuada para la fabricación de biocombustibles.
- Debe tener un impacto nulo o positivo sobre el medio ambiente.
- La maquinaria necesaria para su explotación debe poder ser utilizada para otros cultivos.

Estos cultivos se pueden clasificar en:

- Cultivos oleaginosos: son utilizados para la producción de aceite transformable en biodiesel, principalmente para la sustitución del gasóleo en el transporte. Los principales son el girasol, la palma, la soja y la colza.
- Cultivos alcoholícenos: producción de etanol para la sustitución de las gasolinas de automoción. Son destacables la remolacha y la caña de azúcar.
- Cultivos lignocelulósicos: principalmente basados en la producción de biocombustibles sólidos para su uso como generadores de electricidad.

Los cultivos energéticos representan una serie de ventajas que son necesarias mencionar:

- Disminución de la dependencia energética
- Creación de nuevos puestos de trabajo
- Disminución del dinero público destinado a ayudas para la agricultura (estos cultivos pueden ser rentables por si mismos).
- Creación de nuevas empresas y explotaciones agrarias.
- Aprovechamiento industrial de zonas áridas
- Ayuda al cumplimiento de los objetivos del protocolo de Kioto.

Por otro lado, es necesario destacar sus principales desventajas. Entre ellas encontramos el cambio del uso del suelo, que puede producir la disminución de producción alimenticia. Además, se debe tener en cuenta la inversión que se debe realizar para adecuar las maquinarias y la industria a los biocombustibles.

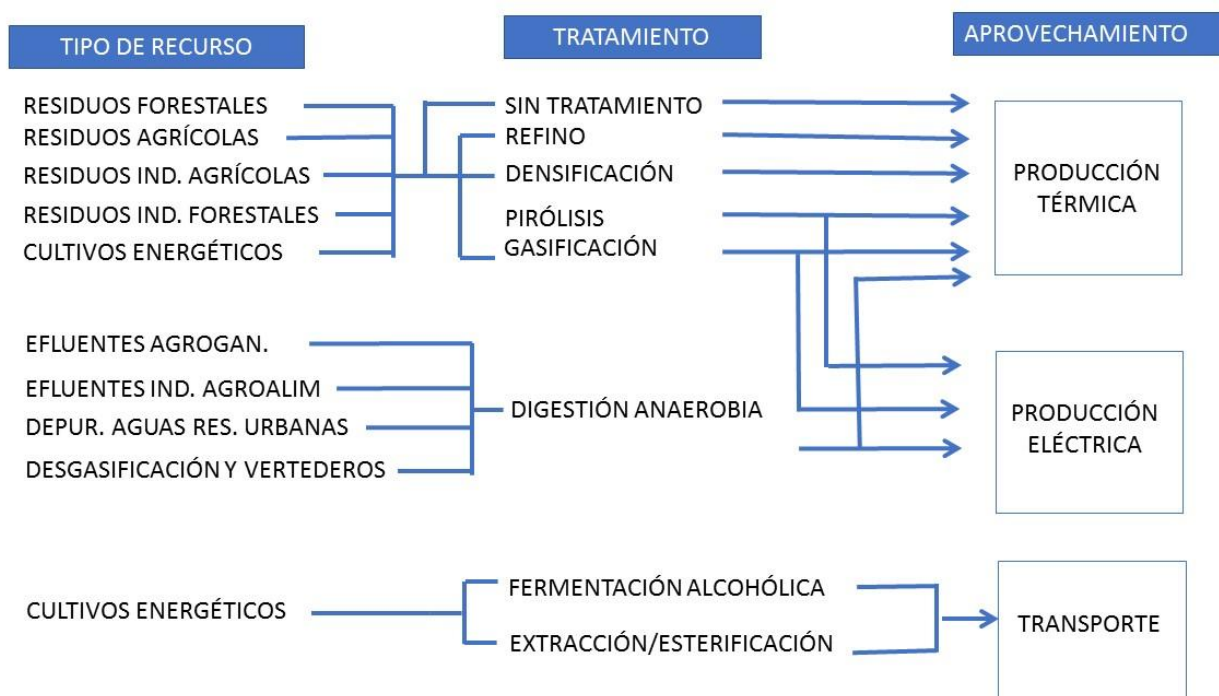


Ilustración 2-1 Tipos de biomasa. Fuente: Realización propia.

## 2.1.2. Procesos de transformación de la biomasa

Aplicando los diferentes procesos de transformación que se describen a continuación, la biomasa puede producir diferentes tipos de energía:

- Biocombustibles. Su objetivo es la sustitución del uso de combustibles fósiles en el transporte.
- Calor y vapor. A partir de la combustión de la biomasa, es posible generar calor y vapor, utilizados para calefacción o como subproducto para la generación eléctrica.
- Combustible gaseoso. A partir de procesos de gasificación o de digestión anaeróbica, se obtiene el biogás, pudiendo ser utilizado para la producción de electricidad, calefacción, etc.
- Electricidad. Como se ha explicado anteriormente, se puede producir a partir de diferentes procesos.
- Cogeneración. Producción simultánea de calor y de electricidad.

### 2.1.2.1. Procesos físicos

Consisten en la alteración de las características físicas del material, como su densidad y granulometría. Normalmente son utilizados para la preparación de la biomasa para los siguientes procesos. Los más utilizados son los siguientes:

- Astillado. Rompen la biomasa en trozos más pequeños.
- Molienda. Se convierten las astillas anteriores en polvo o serrín.
- Densificación. Mediante compactación se aumenta la densidad de la biomasa. Los productos resultantes (pellets y briquetas) pueden ser utilizados en aplicaciones industriales y domésticas.

### 2.1.2.2. Procesos termoquímicos

Se utiliza el calor como fuente de transformación de la biomasa.

- **Combustión**  
Es el proceso más rentable, y por tanto el más utilizado, para la transformación de la biomasa con fines energéticos. Su funcionamiento consiste en la oxidación de los hidrocarburos que contiene la biomasa con el oxígeno del aire.  
El calor obtenido a partir de esta reacción puede ser utilizado para la generación eléctrica, así como directamente en calor doméstico.
- **Gasificación**  
Es un proceso de combustión incompleta desarrollada a altas temperaturas. En este proceso, la biomasa es transformada en un gas combustible. En el proceso se recupera el calor de los gases de salida para producir calor y mover una turbina.  
La gasificación es un proceso que tiene mayores rendimientos que la combustión en calderas.

- Pirólisis  
Es la combustión incompleta de la biomasa a una temperatura de unos 500° en ausencia de oxígeno. Se obtiene un gas con bajo poder calorífico que puede ser utilizado para producir electricidad o accionar motores diésel. Además, produce carbón vegetal.
- Pirólisis Flash  
Es una variante de la anterior, que se realiza a mayores temperaturas. Su principal ventaja es que asegura una gasificación casi total de la biomasa, de tal forma el gas pobre es optimizado.

### 2.1.2.3. Procesos biológicos

Son procesos fundamentados en el crecimiento de microorganismos que degradan la materia orgánica, produciendo compuestos simples de alta densidad energética.

- La fermentación alcohólica  
El objetivo es la transformación de la glucosa obtenida anteriormente en etanol, a partir de microorganismos. Esta transformación se da a partir de una compleja secuencia de reacciones. Algunas de estas reacciones tienen un alto coste energético, por lo que el balance energético global es dudoso.
- Digestión anaerobia o fermentación metánica  
Se produce una digestión de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, originando una mezcla de gases, principalmente metano.  
El proceso consiste en dejar fermentar la biomasa en un contenedor cerrado, lo que produce un gas, pudiéndose utilizar los restos como fertilizante orgánico.  
Es idónea para la transformación de biomasa húmeda. Es realizada en fermentadores o digestores.
- Gas de rellenos sanitarios  
Si se fermentan los desechos sólidos urbanos se puede producir un gas combustible, mezcla de metano de dióxido de carbono. Este gas se suele producir sin ser utilizado.

### 2.1.2.4. Procesos químicos: transesterificación.

A partir de este proceso, los aceites de determinados tipos de biomasa se combinan con alcohol y se alteran de forma química para obtener ésteres grasos. Éstos pueden ser utilizados como combustibles o ser mezclados con diésel. Su mayor ventaja es la reducción de emisiones, humo negro y olor. Es el llamado biodiesel.

### 2.1.3. Biocombustibles

Los biocombustibles son combustibles líquidos o gaseosos para el transporte hechos a partir de biomasa [4] [5].

- Primera generación

Son aquellos biocombustibles que provienen de cultivos agrícolas destinados a la alimentación humana o del ganado. Las principales fuentes son el azúcar, los aceites vegetales, las grasas animales y el almidón, y los principales cultivos el maíz, la caña de azúcar, la soja, etc.

Sus principales ventajas son: la tecnología para su transformación está completamente desarrollada y es más sencilla. Se utilizan cultivos ya existentes y disponibles en prácticamente todo el mundo.

Sus principales desventajas son: alta necesidad de agua y fertilizante (agotando incluso el recurso básico para la vida), disminución de la biodiversidad (incluyendo desforestación), agotaría las cosechas destinadas a la alimentación ya que necesitaría toda la superficie cultivable para cubrir la demanda y el uso intensivo del suelo.

- Segunda generación o biocombustibles avanzados

Se obtienen a partir de biomasa lignocelulósica. Ésta se obtiene de los residuos de la industria alimentaria y forestal, así como de cultivos destinados a su producción. Se suelen cultivar en áreas improductivas en cultivos para alimentación y que no requieren, o requieren a menor escala, agua y fertilizantes.

Ventajas: tienen una alta densidad energética almacenada en la celulosa, que libera gran cantidad de energía al romper sus enlaces químicos. Se aprovechan especies no destinadas a la producción de alimentos, así como la utilización solamente de los residuos a partir de una cosecha alimenticia. Los cultivos son abundantes y de ciclo corto, por lo que las tierras son rápidamente recuperables. Son más eficientes y más respetuosos con el medio ambiente que los de primera generación.

Inconvenientes: necesitan una tecnología más compleja para su obtención, lo que aumenta el coste notablemente (hasta ser más caros que los combustibles fósiles).

- Tercera generación

Son los biocombustibles procedentes de algas o microalgas. Inicialmente fueron considerados de segunda generación, pero al ver su gran rendimiento a partir de menor cantidad, se decidió crear un nuevo grupo.

Además, las algas producen un aceite que se refina fácilmente en Diesel, y pueden modificarse genéticamente para producir otros compuestos, como etanol o gasolina.

Ventajas: pueden generar gran cantidad de combustibles (metano, biodiesel, gasolina, etc.). Tienen un gran rendimiento por unidad de superficie y son neutrales en las emisiones de carbono durante su combustión. Además, no tienen por qué ser producidas en terrenos destinados a la agricultura, pudiéndose producir en instalaciones de círculo cerrado, en las cuales el CO<sub>2</sub> y el agua residual vuelven a ser utilizados como nutrientes.

Desventajas: se necesitan condiciones muy controladas de temperatura para la producción de las algas, lo que aumenta notablemente el coste de producción. Necesitan la aplicación de fósforo, recurso que está empezando a escasear.

A grandes rasgos, las principales ventajas y desventajas de los biocombustibles son:

Ventajas:



- A medida que la tecnología se va desarrollando, el coste de producción de los biocombustibles va disminuyendo, llegando a ser una tecnología más económica que la de los combustibles fósiles. Además, los biocombustibles de segunda generación disminuyen más aún su coste, debido a que se trata de residuos.
- A grandes rasgos, los procesos de producción y consumo son más eficientes y tienen un menor coste medioambiental.
- Es una fuente mucho menos limitada que la de los residuos fósiles.
- La cantidad de desechos generada disminuye, al ser utilizada como combustible.
- Por último, hay que añadir que su transporte y almacenamiento tiene un nivel de seguridad mayor.

Desventajas:

- Los biocombustibles de origen vegetal pueden producir un aumento de las emisiones de óxido de nitrógeno (fertilizante nitrogenado). También puede contaminar aguas subterráneas con nitritos y nitratos.
- Los biocombustibles tienen un poder calorífico inferior que los combustibles fósiles, por lo que es necesario mucha más materia prima para producir la misma cantidad de energía.
- Una de las principales desventajas es el cambio del uso del terreno, que crea controversias éticas.
- Al necesitar mayores áreas de campos de cultivo se produce una gran pérdida en áreas forestales. Estas áreas son grandes consumidoras de CO<sub>2</sub>.
- Al tratarse de cultivos, provoca una gran demanda de agua.
- Durante la producción de biocombustibles se consumen combustibles fósiles.

## 2.2. Producción energética a partir de biomasa

### 2.2.1. Biomasa para generación eléctrica

Como se ha explicado anteriormente, existen muchas formas de producir electricidad a partir de la biomasa [6] [10].

Las tecnologías más destacables son:

- Equipos de combustión externa, como motores Stirling y turbinas de vapor. Los productos que son obtenidos a partir de la combustión ceden calor a otros fluidos que se encargan de producir el movimiento de las turbinas o de los motores.
- Motores de combustión interna y turbinas de gas. Los productos obtenidos a partir de la combustión se encargan de generar el trabajo mecánico.

En general, la biomasa tiene un poder calorífico inferior al de los combustibles fósiles, una alta humedad y un gran contenido en volátiles. Es por este motivo por el que se necesitan centrales térmicas con calderas de mayor tamaño que las habituales, lo que provoca un incremento notable del coste de inversión, disminuyendo su rendimiento. Es por este motivo por el que la producción de energía eléctrica a partir de la biomasa no está plenamente impuesta en la actualidad. El mayor porcentaje de las industrias que consumen este tipo de energía son debidas a que producen, como se ha explicado anteriormente, sus propios residuos.

Uno de los motivos por lo que no se ha desarrollado plenamente esta tecnología es debido a la ausencia de cultivos energéticos.

Dada su capacidad para asegurar el suministro eléctrico contribuye en gran medida a la estabilidad de la red.

#### 2.2.1.1. Descripción de una planta

Una central termoeléctrica de biomasa, aunque depende del tipo de biomasa y de la potencia instalada, tiene una constitución con sistemas similares [7]:

- **Recepción**

El sistema de recepción de la biomasa depende principalmente de las propiedades físicas de ésta. Su principal objetivo es minimizar los costes y emisiones desde el lugar de origen hasta la planta.

Para realizar esta maximización de la eficiencia es necesario conocer el tipo de transporte utilizado, así como tener una balanza para el cargamento y realizar un análisis químico de la biomasa para certificar el PCI y humedad acordados con el vendedor.

- **Almacenamiento primario**

Tras la recepción, se realiza el almacenamiento primario. Su principal objetivo es asegurar la cantidad de suministro necesaria para el mantenimiento de la planta.

El almacenamiento se realiza en lugares que no produzcan un aumento de humedad, como lugares techados.

Para el cálculo de la superficie requerida en el almacenamiento se utilizan diferentes parámetros:

- Altura máxima
- Ángulo de reposo
- Días de autonomía de la planta
- Densidad de la biomasa

- **Tratamiento**

Para mejorar la combustión, es necesario realizar una serie de pretratamientos a la biomasa. Los principales son:

- Reducción de la humedad: la biomasa sufre el proceso de combustión con una humedad de entre el 10% y el 20% (valores más óptimos). Por lo general, la biomasa suele tener valores mayores, como es el caso del trigo en primavera (70%). Es por este motivo que es necesario un proceso de secado de la biomasa.
  - Secado natural: supone un ahorro de combustible, pero no es posible alcanzar una humedad menor a la del ambiente.
  - Secado forzado: se realiza a partir de un agente secante. El tiempo de secado se reduce notablemente, y puede alcanzar valores inferiores a los de equilibrio con el ambiente. Los costes son elevados, por lo que su viabilidad depende de la

eficiencia de pretratamientos posteriores y de la conversión energética.

- Torrefacción: Además del secado tiene como objetivo la mejora del combustible. Debido a su elevado coste no existe a nivel industrial.
- Reducción granulométrica: consiste en la disminución del tamaño de las partículas para así aumentar su superficie específica. Se busca el punto óptimo entre el coste de la reducción granulométrica y el aumento de la eficiencia que esto produce. Es un proceso que se realiza en cadena, en etapas, que va reduciendo el tamaño de las partículas.
- Almacenamiento secundario  
Ya en las condiciones óptimas para el proceso, la biomasa es almacenada. El volumen de este almacenamiento depende principalmente de las horas de autonomía que requiera la planta, aunque también es destacable el uso de este almacenaje para afrontar de forma satisfactoria situaciones no deseadas. Para dimensionar el sistema de almacenamiento, se debe analizar el flujo de material que va a haber en su descarga, las dimensiones de la boca de descarga y el sistema de extracción. Para realizar este dimensionamiento se consideran los siguientes parámetros:
  - Densidad aparente del material
  - Ángulo de fricción de la pared
  - Cohesividad
- Ciclo de producción de energía  
Existen muchas formas de producir electricidad a partir de la biomasa. La más usada, y explicada de forma sencilla:  
Se produce un trabajo al ceder calor de un foco caliente a un foco frío.  
En las calderas se combustiona la biomasa, produciendo vapor (foco caliente), dicho vapor pasa por una turbina cediendo a ésta su energía. Tras la turbina, pasa por un condensador donde disminuye su temperatura (pasa a estado líquido). Seguidamente, se aumenta la presión del líquido resultante con una bomba para volver a llevarlo a la caldera.
- Tratamiento de aguas  
La acción del agua puede tener efectos perjudiciales respecto a la integridad de los equipos de la planta. Los principales motivos son los siguientes:
  - Corrosión. En las partes frías de la instalación el agua puede producir una cierta corrosión en los equipos y en los conductos. La corrosión es una reacción química entre el metal y el medio, que produce degradación que se expande hasta el interior del material. Esto puede generar desprendimiento de material y disminución del espesor. Para disminuir los riesgos de la corrosión se deben vigilar las sales disueltas en el agua, el PH y el oxígeno disuelto en esta.
  - Formación de depósitos. Estos depósitos son debidos principalmente al arrastre de los productos de la corrosión. Al producirse estos depósitos disminuye la sección de paso del fluido, así como disminuye

la transferencia de calor entre los tubos. También pueden afectar a las válvulas y a las turbinas.

- **Tratamiento de gases inquemados**  
El tratamiento de los contaminantes depende principalmente de si se trata de un gas o de partículas. Para los contaminantes gaseosos se usan dispositivos para destruir o recuperar el contaminante. Las principales técnicas utilizadas son la absorción, combustión, adsorción y condensación. Para el control de las partículas se utilizan otros equipos y procesos, tales como los filtros, los lavadores de venturi, las cámaras de sedimentación, ciclones, etc.
- **Producción de electricidad**  
La electricidad es producida por un generador, que transforma la energía mecánica producida por la turbina en energía eléctrica. Esta electricidad se conduce hasta una subestación de transformación. Aquí, la tensión es transformada hasta una adecuada según la finalidad. Normalmente, la tensión se aumenta hasta los valores requeridos para la distribución de esta en la red eléctrica.

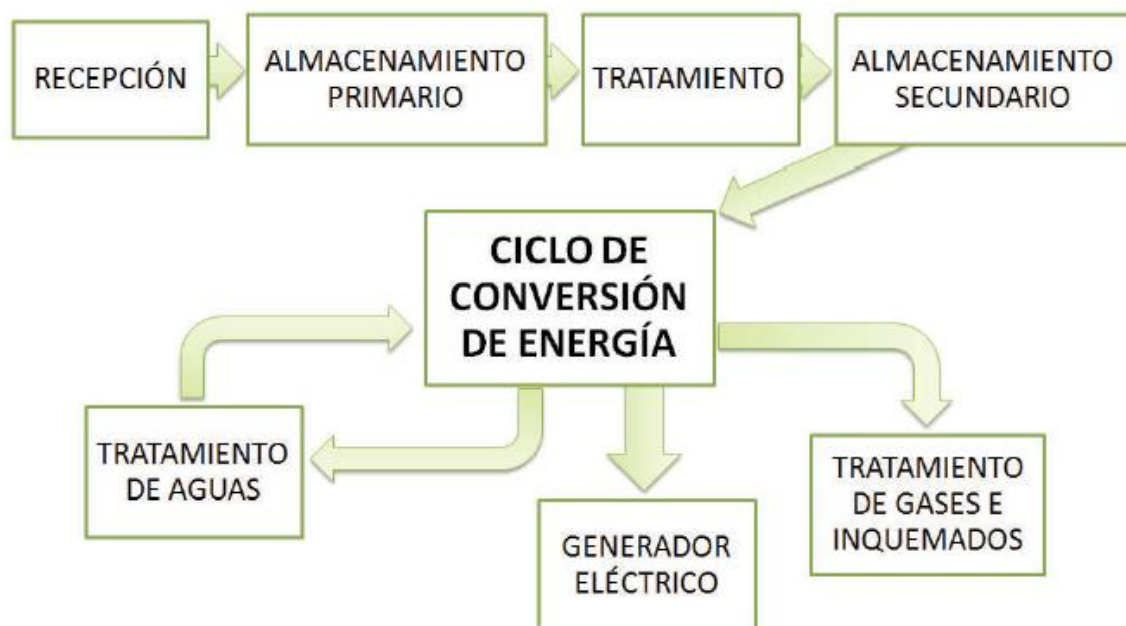


Ilustración 2-2, Diagrama de bloques producción de energía. Fuente: TFG Padilla Romero, Carlos. Estudio básico del grupo de turbina alternador de una planta de generación eléctrica con biomasa de 50 MW.

### 2.2.2. Biomasa para generación térmica

Dentro del sector de la biomasa, la generación térmica y de agua caliente sanitaria son las aplicaciones más comunes. Estas aplicaciones se pueden ver a diferentes escalas, desde estufas individuales en los hogares hasta producción térmica a gran tamaño.

En el caso de la utilización de la biomasa como fuente térmica en bloques de vivienda, la complejidad aumenta, ya que precisa de un lugar de almacenaje amplio y seco, por lo que hace más complicado la implementación en bloques con calderas convencionales y pequeñas.

Por otra parte, cabe destacar que son una solución en su mayor parte óptima debido a su equilibrio económico y medioambiental para nuevas construcciones. Esta implantación facilita el cumplimiento de los nuevos reglamentos (ya que el Reglamento Térmico de Edificios permite la sustitución de energía solar por la de biomasa) [8] [9].

Las instalaciones térmicas centralizadas con biomasa están muy extendidas en el norte de Europa, expandida no solo en viviendas, sino en edificios públicos y privados de alta ocupación.

Respecto a las industrias, se están empezando a desarrollar también en el ámbito de la energía térmica por biomasa. Normalmente, se trata de la reutilización de residuos propios de la industria como combustible.

Otra de las opciones más utilizadas es la utilización de un sistema combinado de energía solar térmica y biomasa para calefacción y ACS. Esta opción es muy recomendable para edificios de gran consumo, ya que la biomasa satisface las necesidades de consumo en todo momento.

### **2.3. Emisiones de la biomasa**

La utilización de la biomasa y de los biocombustibles de forma eficiente se considera esencial para reducir y adecuar los niveles de gases contaminantes, principalmente los que producen el efecto invernadero. Pero es necesario ser conscientes de que la biomasa no puede ser considerada una energía limpia, ya que cuenta con emisiones de GEI a la atmósfera [11].

En la última década se han desarrollado numerosos estudios para intentar obtener datos fiables respecto a lo que a las emisiones de contaminantes se refiere. La mayoría de los estudios se basan en la comparación de las emisiones de la bioenergía respecto al uso de combustibles fósiles.

El rendimiento de gas de efecto invernadero de la bioenergía desde una perspectiva del ciclo de vida depende de las emisiones de la cadena de suministro (que incluyen las emisiones de los cambios en el uso directo de la tierra, el cultivo, transporte, procesamiento), así como las emisiones de la combustión de la fuente de biomasa y el CO<sub>2</sub> absorbido debido al nuevo crecimiento de las plantas.

Se utiliza muy a menudo el ACV, un método desarrollado y estandarizado internacionalmente para evaluar los impactos ambientales. Cuantifica las emisiones, los recursos que han sido consumidos y los efectos de salud y ambientales relacionados. Hace principalmente un análisis del ciclo de vida de la biomasa y de los biocombustibles [12] [13].

	Corn Ethanol <sup>a</sup>	Sugarcane Ethanol <sup>a</sup>	Soybean Biodiesel <sup>b</sup>	Rapeseed Biodiesel <sup>c</sup>
Feedstock Farming	30.8	22.5	34.2	57.5
Fertilizer production	10.1	3.8 <sup>d</sup>	Not separated	Not separated
N <sub>2</sub> O emissions in field	16.7	6.7 <sup>e</sup>	20.1 <sup>e</sup>	Not separated
Farming	4.0	12.0 <sup>f</sup>	14.1	Not separated
Fuel Production	31.0	2.6	9.6	15.2
Transport and distribution	4.5	1.8	1.9	1.9
Co-product credit	-13.7	-6.4	Not separated	-20.8 <sup>g</sup>
Total without credit	66.3	27.7 <sup>h</sup>	45.7	74.6
Total with credit	52.6	21.3	16.8 <sup>i</sup>	53.8

Ilustración 2-3, Desglose de las emisiones de gases de efecto invernadero por etapa del ciclo de vida de cuatro biocombustibles comerciales (g de CO<sub>2</sub> eq / MJ). Fuente: Carvalho, I. De, & Nassar, A. M. Greenhouse Gas Emissions from Bioenergy

### 2.3.1. Biocombustibles líquidos comerciales o de primera generación

El etanol es el biocombustible mayor producido a nivel mundial, principalmente el etanol de maíz y el de caña de azúcar en América y el producido a partir de trigo y de remolacha azucarera en Europa.

Las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la producción de biodiesel varían dependiendo de los tipos de materia prima y de las decisiones metodológicas (por ejemplo, muchas no incluyen las emisiones ILUC) [14].

Estos métodos se basan principalmente en el análisis de toda la producción hasta la obtención final del biocombustible, incluyendo los recursos utilizados como el vapor, la electricidad, los productos químicos utilizados, etc. En el caso del biodiésel, la mayor parte contaminante es la trituración de la soja y la transesterificación.

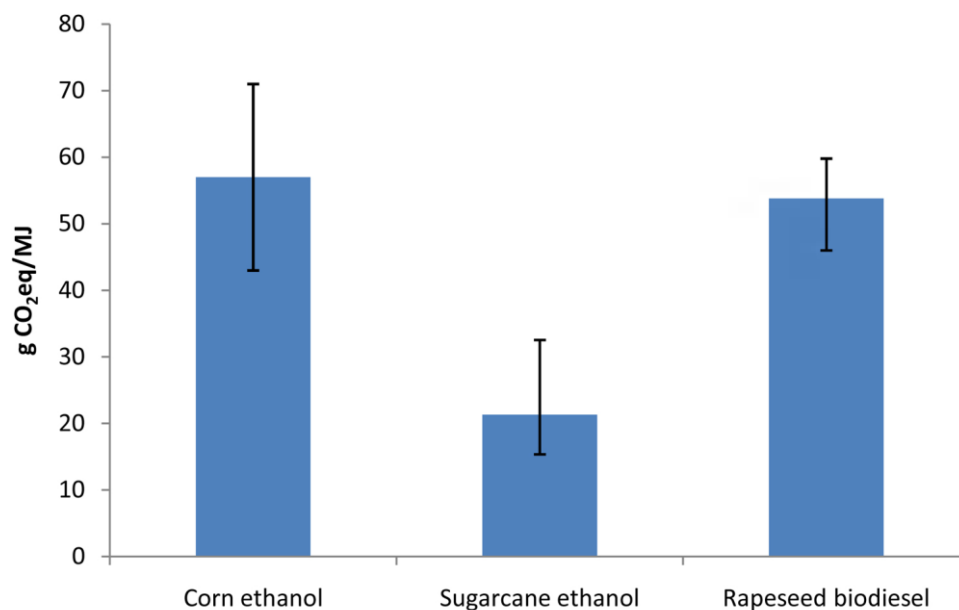


Ilustración 2-4, Las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida de los biocombustibles comerciales

Fuente: Carvalho, I. De, & Nassar, A. M. Greenhouse Gas Emissions from Bioenergy

Excluyendo las emisiones ILUC, Edwards et al. (2013) estima las emisiones medias de GEI de biodiesel en 37-59, 46, 55-60, y 31-63 g de CO<sub>2</sub>eq/MJ para semilla de colza, girasol, soja y aceite de palma, respectivamente, que conduce a la reducción de emisiones de GEI de aproximadamente 33-58%, 48%, 32-38%, 29-65%, respecto al diésel de petróleo (tasa de emisión de gases de efecto invernadero de 88,6 g de CO<sub>2</sub>eq/MJ) [15].

### 2.3.2. Biocombustibles avanzados o de segunda generación

Refiriéndose a combustibles avanzados a aquellos que se encuentran en desarrollo o en las primeras etapas de comercialización, los llamados de segunda generación.

Los GEI dependen mucho de la generación del biocombustible del que se trate, ya que los de segunda generación según muchos estudios tienen unas emisiones netas menores que los de primera generación. Según los resultados del estudio de Wang et al. (2012), el etanol celulósico (biocombustible de segunda generación) se sugiere que tiene la mayor diferencia emisiones de GEI con los combustibles fósiles que los biocombustibles de primera generación. Es importante señalar que los estudios proceden de datos obtenidos en plantas piloto o incluso en laboratorio, ya que son tecnologías no desarrolladas totalmente [16].

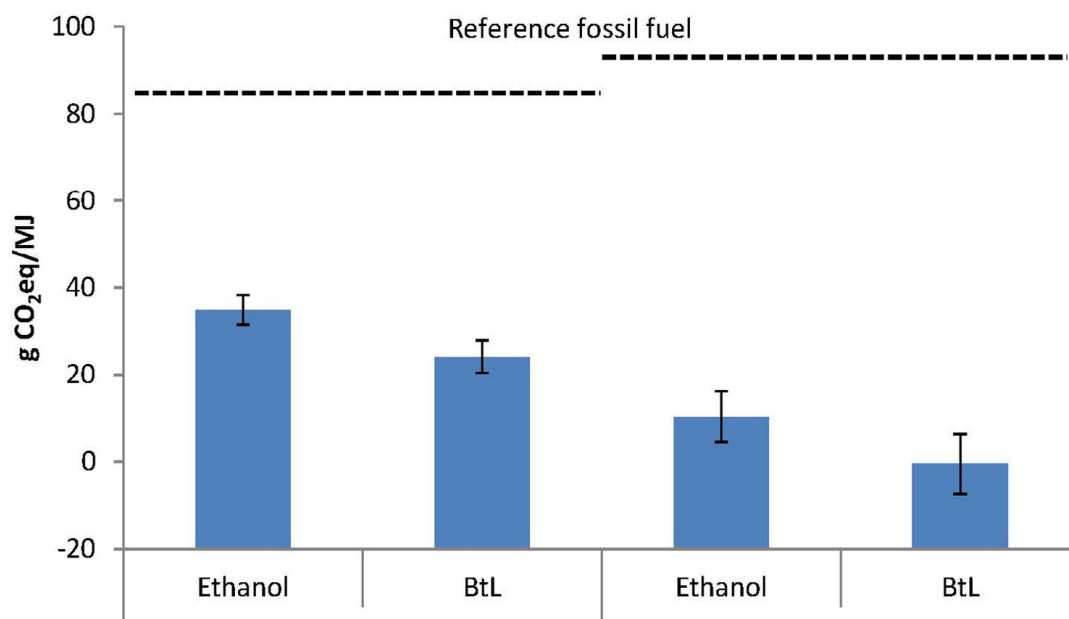


Ilustración 2-5, las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida de los biocombustibles de segunda generación

Fuente: Carvalho, I. De, & Nassar, A. M. (n.d.). Greenhouse Gas Emissions from Bioenergy

### 2.3.3. Biogás

Para el biogás, las emisiones varían significativamente dependiendo de la materia prima (por ejemplo, las emisiones de biogás a partir de cultivos energéticos son similares o incluso ligeramente superiores a los combustibles fósiles) y, sobre todo, la tecnología de conversión (jugando un papel importante las fugas de metano, tanto estructurales como accidentales).

La producción de biogás a partir del estiércol de los animales puede reducir las emisiones de metano que de otro modo serían emitidos a la atmósfera, siempre que se utilicen soluciones tecnológicas adecuadas (por ejemplo, uso de un tanque hermético al gas para el almacenamiento del digestato residual).

### 2.3.4. Biomasa sólida

En la última década, ha crecido notablemente la utilización de biomasa como combustible para calefacción en viviendas. Las emisiones de GEI de estos combustibles varía notablemente según la materia prima y la tecnología utilizada.

Para la biomasa sólida los principales factores que influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero son: la eficiencia de la conversión, el procesamiento (tecnología y eficiencia), el uso de fertilizantes, y la distancia y el modo de transporte.



Feedstock	Development stage	Lifecycle GHG Emissions, gCO <sub>2</sub> eq/kWh <sup>c</sup>			
		>10 MWe avg	>10 MWe range	0.01-10 MWe avg	0.01-10 MWe range
		Electrical efficiency <sup>b</sup>		Electrical efficiency <sup>b</sup>	
		31.5%	27-36%	20%	10-30%
Wood waste and forest residues	Commercial	26	23-30	40	27-80
Agriculture residues	Commercial and developing with respect to logistics collection and preprocessing	48	42-56	75	50-151
Short rotation woody crops	Commercial and developing with respect to crops and logistics	35	31-40	55	37-109
Herbaceous crops	Developing	56	49-64	40	59-173

Ilustración 2-6, emisiones de gases de efecto invernadero (LCA excluyendo LUC): tecnología comercial de generación de bioenergía

Fuente: Carvalho, I. De, & Nassar, A. M. Greenhouse Gas Emissions from Bioenergy

Es importante añadir, que, muchos de estos estudios dan como resultados unos valores de GEI menores a los reales, ya que consideran la introducción que se está realizando de las energías renovables en las fases del ciclo de vida secundarias de las emisiones, como es el transporte, la plantación la recolecta etc [17].

#### ➤ La biomasa forestal

Se considera biomasa forestal a la fracción biodegradable de los productos, subproductos y residuos procedentes de la silvicultura aplicada a la vegetación que cubre los terrenos forestales.

La biomasa forestal es parte de un ciclo de carbono que tiene un ciclo de vida muy largo. Una masa forestal normalmente tarda entre décadas y un siglo en alcanzar la madurez. Estudios recientes han encontrado que cuando las emisiones de GEI de la combustión, la decadencia y el crecimiento de la planta también se tienen en cuenta, el uso de ciertas materias primas de biomasa forestal con fines energéticos puede conducir a la reducción sustancialmente o incluso ahorros de gases de efecto invernadero negativos en comparación con el uso de combustibles fósiles en un período de tiempo dado (por ejemplo, de 20 a 50 años o incluso hasta siglos).

Actualmente, la biomasa utilizada se basa en residuos industriales y de cosechas, que sí que tienen mayores beneficios a lo que a emisiones se refiere. La cuestión es el incremento de consumo de biomasa que se espera en los próximos años, debido al cumplimiento de las políticas de la UE, ya que los residuos industriales en Europa son reducidos; lo que producirá un aumento del consumo de biomasa forestal.

La contribución de emisiones de gases de efecto invernadero de bioenergía forestal es sensible a la escala de consumo: un aumento significativo en el uso de la biomasa forestal es más probable que genere altas emisiones. Por lo tanto, las emisiones biogénicas podrían ser mayores en 2030 y 2050, si se utiliza una cantidad significativa de biomasa forestal.

## 2.4. Cambio indirecto del uso del suelo

Aunque el uso de los biocombustibles sea tomado como un proceso crucial para llegar a los objetivos de la UE respecto a las emisiones de GEI, la producción de estos normalmente se genera en tierras de cultivo que previamente eran utilizadas para otros fines, como el cultivo de alimentos. Al ser esta producción necesaria, se suele desplazar a otras tierras que anteriormente no solían ser cultivadas. Es lo que se conoce como el cambio indirecto del uso de la tierra (ILUC).

El ILUC puede llegar a anular los ahorros de emisiones de CO<sub>2</sub> proveniente del uso de los combustibles ya que los pastizales o bosques que se quitan para trasladar los cultivos eran grandes fuentes consumidoras del contaminante.

A continuación, se muestra de forma simplificada la definición de ILUC [18].

Como podemos observar, en la primera imagen se muestra un sistema agrícola con tierras forestales. Inicialmente no hay ninguna plantación de biomasa.

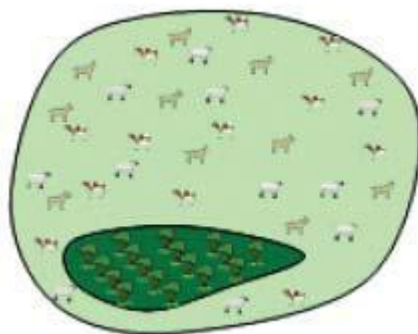


Ilustración 2-7. Fuente: Staff, C., Document, W., & Assessment, I. (2012). IMPACT ASSESSMENT.

Al introducir la plantación de biocombustibles en un terreno de pastoreo, se produce un cambio directo del uso del terreno, lo que puede causar una variación del carbono orgánico del suelo. Si el cultivo energético se introduce en el terreno forestal, las emisiones directas del cambio directo del uso del suelo pueden ser grandes, ya que hay una pérdida considerable de biomasa forestal que captura en grandes cantidades el CO<sub>2</sub>. Ambas emisiones son introducidas en el cálculo de las emisiones de GEI debido a la producción de biocombustibles.

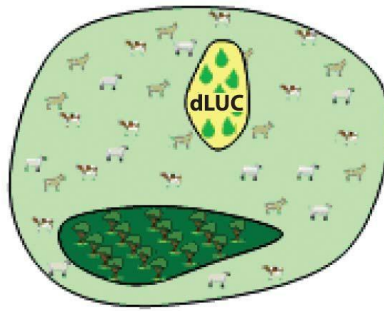


Ilustración 2-8. Fuente: Staff, C., Document, W., & Assessment, I. (2012). IMPACT ASSESSMENT.

Al producirse menos ganadería, se produce un aumento en el valor de los animales ganaderos y de su carne (alimentación). Para disminuir este efecto, se usarán otros terrenos como nuevos terrenos de pastoreo. Esto es un cambio indirecto del uso del terreno, lo que produce una disminución de las reservas de carbono, ya que utiliza tierras fértiles.

No hay una relación de uno – uno respecto al cambio de uso del terreno. Esta relación depende de la productividad, del mercado de los productos, y en qué medida aumenta el consumo de todos los productos y subproductos.

Es por esto por lo que es tan difícil contabilizar las emisiones reales del cambio indirecto del uso del suelo.

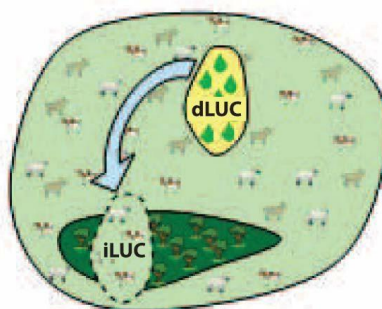


Ilustración 2-9. Fuente: Staff, C., Document, W., & Assessment, I. (2012). IMPACT ASSESSMENT.

Es importante diferenciar entre ILUC y DLUC (cambio directo del uso de la tierra).

Por una parte, DLUC estudia los cambios en la utilización de la tierra asociados a la producción de materia prima para biocombustibles, tales como el desplazamiento de los cultivos agroalimentarios, pastos, bosques o la conversión de los ecosistemas naturales.

La metodología definida en las directivas para determinar el ahorro de gases de efecto invernadero tiene en cuenta las emisiones asociadas con el cambio directo del uso del suelo, así como las emisiones procedentes de la producción de biocombustibles. Sin embargo, las emisiones asociadas a los cambios indirectos en el uso del suelo actualmente no están incluidos.

Esto es debido a la dificultad de obtener valores reales respecto a las emisiones de GEI que produce el cambio indirecto del uso del suelo. Es un tema muy polémico en la actualidad, ya que puede variar notablemente las emisiones netas de GEI de la biomasa. Las características de ILUC son muy cuantitativas, complejas y cambian con el tiempo, lo que complica su estudio.

ILUC también estudia otros aspectos secundarios, como son la reducción de plantaciones alimentarias para ser sustituidas para la producción de combustibles.

Suelen ser estudiados en modelos globales, lo que producen resultados muy inciertos, ya que incluyen modelos comerciales, políticas implantadas, contextos económicos, etc.

La Comisión Europea mandó realizar diversos estudios sobre la influencia de ILUC, siendo el modelo MIRAGE-BIOF el más utilizado para sus informes, ya que es el que ha demostrado ser más adecuado para estimar las emisiones de cambio indirecto del uso de la tierra en el contexto de la UE. Es un modelo de equilibrio general, que abarca todos los sectores y mercados económicos y sus interrelaciones acciones a escala global. El modelo se ejecuta en un "escenario de referencia", y un "escenario de la política", donde la única diferencia es la política de biocombustibles de la UE.

IFPRI- MIRAGE-BIOF estima las emisiones de cambio indirecto del uso de la tierra a partir de 2008 a 2020, para ascender a alrededor de 500 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> eq, lo que representa alrededor del 15% del total (7,500 Mt CO<sub>2</sub>) [19].

Es probable que el aumento de la demanda de bioenergía provoque un cambio de uso de la tierra tanto directo como indirecto. Convertir el uso del suelo con biomasa generalmente resulta en una pérdida inmediata de almacenamiento de carbono en el terreno y una disminución más gradual del carbono en la materia orgánica del suelo.

El carbono liberado a partir de biomasa se emite a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub>, mientras que otros gases también contaminantes serán emitidos en circunstancias particulares.

El primer aspecto del impacto de GEI, para la correcta estimación del tamaño y la ubicación de las emisiones, es la característica de la tierra que se puede convertir para evaluar la cantidad de carbono se libera como resultado. Por lo tanto, se necesitan mapas globales de los niveles de carbono orgánico del suelo bajo diferentes usos de la tierra con el fin de estimar los efectos de los cambios.

Hay reglas precisas para calcular las reservas de carbono en suelo debidos a la conversión de tierras para la producción de biocombustibles, éstas se establecen en la legislación de la UE, (IPCC 2006). Se basa en la definición de los valores por defecto de las reservas de carbono para un conjunto de condiciones del suelo, la cobertura del suelo y el clima. Las reservas de carbono

por defecto se modifican de acuerdo con los cambios en el uso del suelo, prácticas de gestión y las entradas, que forman un sistema de gestión. Sin embargo, la cuantificación de los efectos indirectos de las políticas de bioenergía es un ejercicio complejo que requiere una combinación de energía, uso de la tierra mundial agroeconómica y métodos de modelización de emisiones.

Una cuestión crucial es identificar aquellas áreas dentro de una determinada región económica donde es más probable que ocurra la expansión de la producción de biocombustibles. Dado que las emisiones de GEI derivadas del cambio de uso del suelo varían dependiendo de suelo, clima, factores de manejo, el estado de la tierra convertida etc., es importante capturar el patrón de expansión de la agricultura y las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas dentro de una región económica. Un ejemplo pertinente de modelos geográficamente explícitas “biofísicos” es el modelo ZAE-EF, que fue desarrollado para ser aplicado al modelo económico GTAP (Plevin et al. 2011).

Sin embargo, la aplicación de factores de emisión regionales genéricos no pueden captar las diferencias en términos de gases de efecto invernadero emitidos entre dos cultivos con diferentes necesidades climáticas suelo o en expansión en dos áreas distintas de un mismo país.

Los estudios realizados por la UE y tomados por tanto para las normativas aplicables se han quedado obsoletas, ya que a medida que los modelos se han ido desarrollando y mejorando, se han ido obteniendo resultados distintos. Como se puede observar en la siguiente imagen, estudios recientes han decretado que las emisiones producidas por ILUC son mucho mayores que los supuestos por los modelos anteriores.

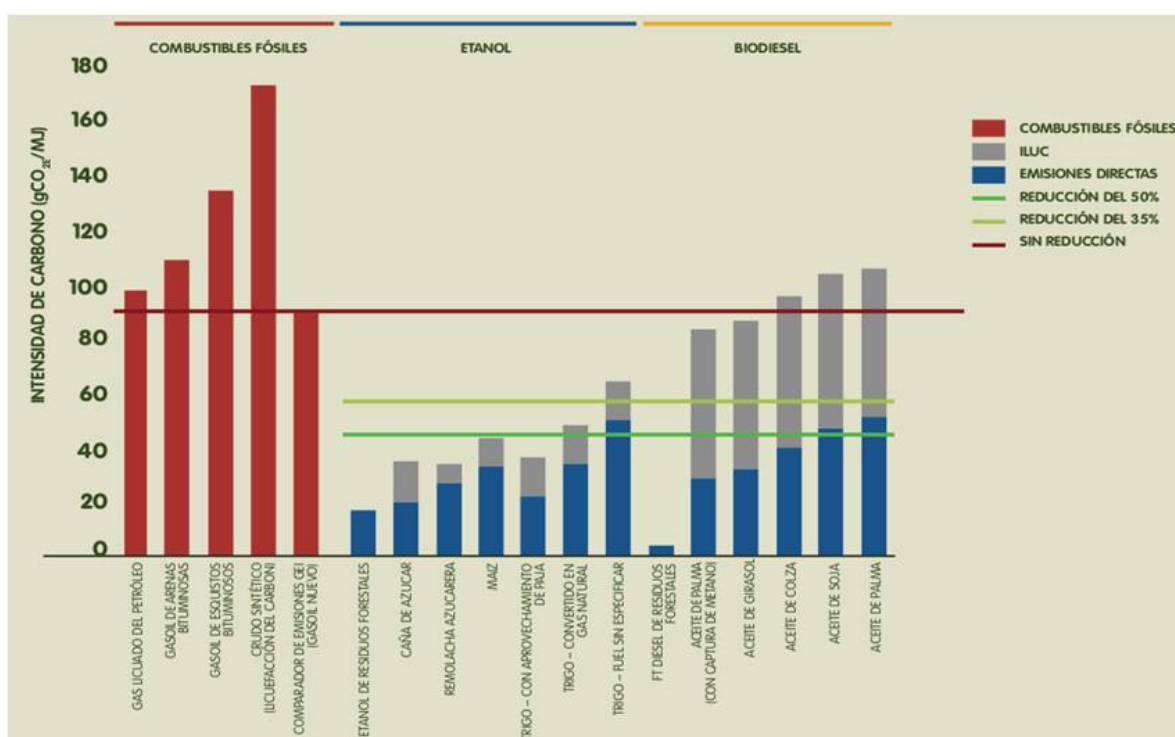


Ilustración 2-10, Emisiones ILUC. Fuente: Amigos de la Tierra, Ecologistas en Acción (2013): “Impacto de las políticas europeas sobre agrocombustibles”

La siguiente figura muestra las emisiones antropogénicas acumuladas de carbono a la atmósfera desde 1850 debidas al cambio del uso de la tierra (asociadas principalmente con la conversión de bosques en tierras agrícolas). Aproximadamente han contribuido en un tercio de estas durante este período de tiempo.

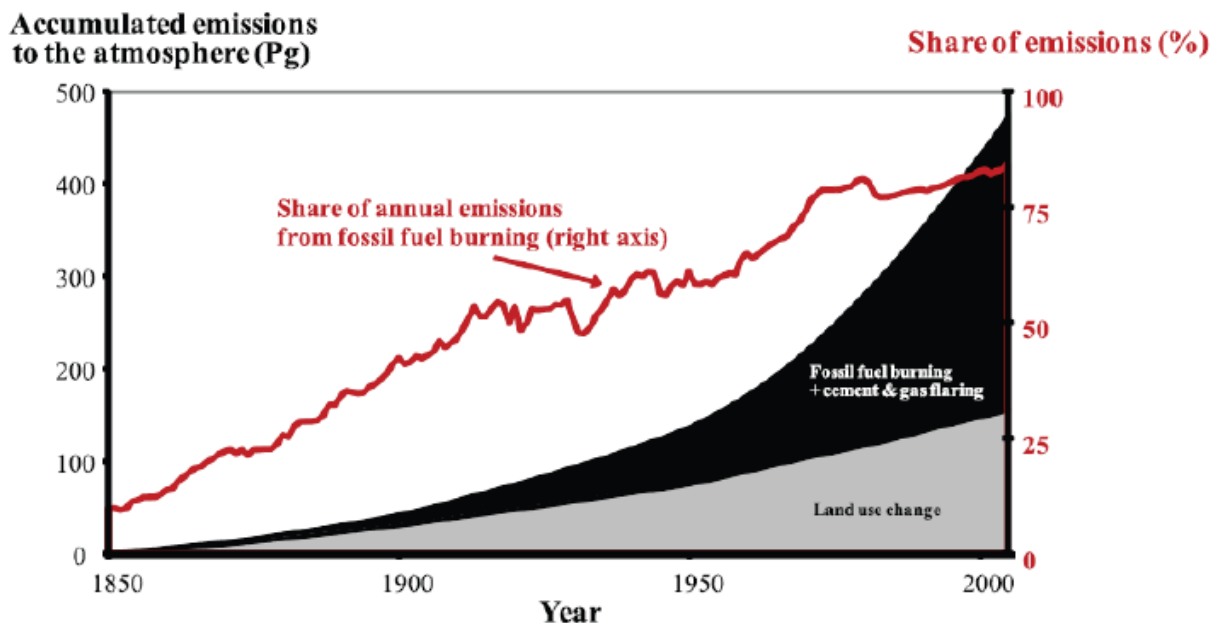


Ilustración 2-11, Emisiones de CO<sub>2</sub> antropogénicas acumuladas en la atmósfera desde 1850.  
Fuente: IEA Bioenergy Berndes et.al. 2010

Como resumen, se indican las principales desventajas que trae consigo el cambio indirecto del uso de la tierra:

- Por una parte, para la plantación de cultivos energéticos se deben quitar pastizales y bosques, los cuales capturan CO<sub>2</sub>. Esto produce que el beneficio de uso de biocombustibles sea menor.
- El propio procedimiento del cambio indirecto del uso de la tierra produce nuevas emisiones contaminantes, como es el transporte que se debe realizar, la maquinaria usada, etc.

Y finalmente, se indican algunas formas de mitigar las emisiones provenientes de ILUC:

- Reducción de la deforestación a través de políticas nacionales, zonificación ambiental y gestión del paisaje. Las políticas nacionales para el control de la deforestación, sin embargo, están fuera del alcance de cualquier política de energía renovable, que desafía a los responsables políticos, especialmente los de las regiones proveedoras.
- El aumento de la cantidad de bioenergía producida por unidad de superficie es la segunda opción de mitigación. En algunos cultivos el uso de la biomasa combinado con el etanol producido a partir de

azúcar o almidón puede aumentar fuertemente la productividad dando lugar a posibles efectos positivos en la reducción de ILUC.

- Hacer más productiva la tierra
- El desarrollo de cultivos adecuados para tierras de precipitación marginales o degradadas.
- Grandes cantidades de tierras marginales están ocupadas con los pastos degradados con bajo potencial para aumentar la productividad del ganado. La producción de cultivos bioenergéticos en tierras marginales puede ser una opción viable para mitigar ILUC.

## 2.5. Deforestación y alimentación

Como se ha explicado anteriormente, mucha parte de la biomasa sólida debe obtenerse a partir de la biomasa forestal ya que los residuos no son suficientes. Es decir, es necesario retirar bosques para realizar plantaciones. Esto, junto a la demanda de madera y de construcción, está reduciendo a gran escala las áreas forestales del mundo.

La falta de protección efectiva de los bosques y las zonas ricas en carbono puede dañar la biodiversidad, así como aumentar las emisiones de GEI. Si la conversión de áreas ricas en carbono, como los bosques y los humedales se limitara, el riesgo de daño sería menor [49].

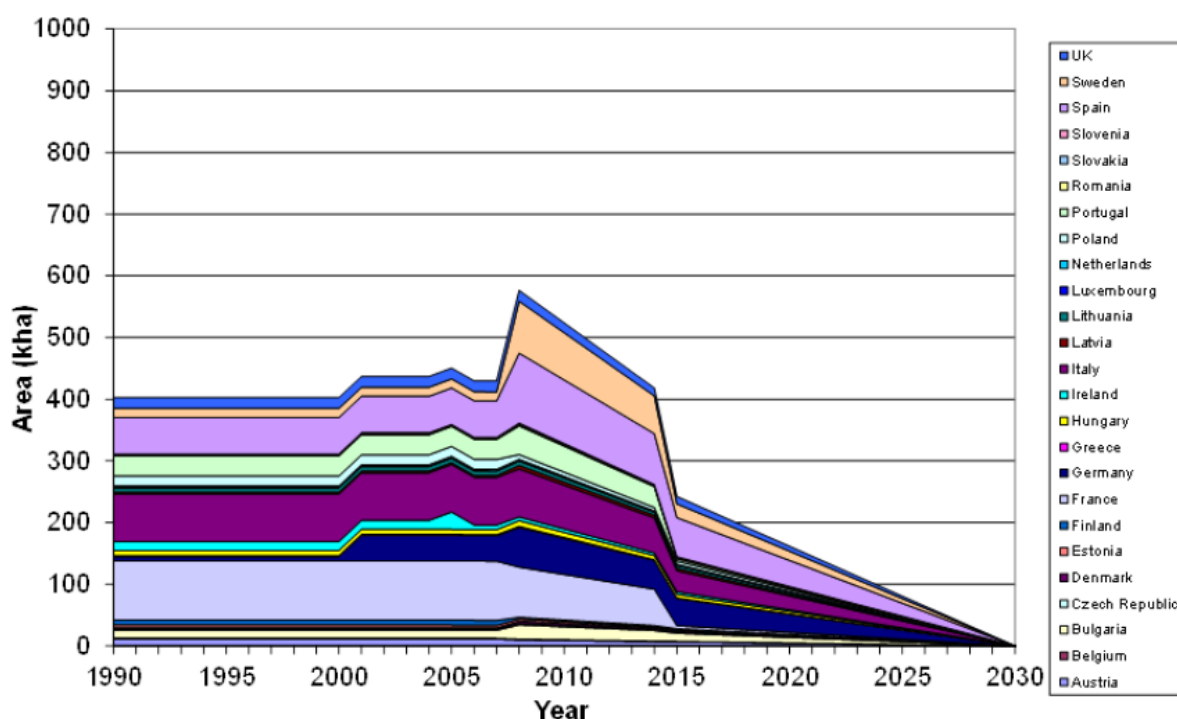


Ilustración 2-12 áreas deforestadas en los 27 ue de 1990 a 2030. Fuente: Matthews, R., Mortimer, N., Lesschen, J. P., Tomi, J., Sokka, L., Morris, A., Sayce, M. (2015). Carbon impacts of biomass consumed in the EU: quantitative assessment

Otro punto importante es como afecta la plantación de biomasa a los alimentos. Por una parte, debido al cambio del uso del suelo, se disminuye la cantidad de hectáreas dedicadas a la producción de alimentos, así como el uso de los propios alimentos como biomasa (por ejemplo, el trigo).

En las próximas décadas se prevé que una mayor población y el nivel de vida del mundo conducirán a la creciente demanda de alimentos, piensos, energía y fibra. La producción agrícola mundial debe aumentar en un 70 por ciento - casi el 100 por ciento en los países en desarrollo – en 2050 para alimentar a la previsión 9.1 mil millones de personas de todo el mundo.

También se debe señalar que mientras estas áreas representan una fuente importante para aumentar la producción agrícola total, la reducción de este tipo de conversiones es probable que aumenten los precios mundiales de las materias primas agrícolas.

Por ejemplo, para producir cinco litros de bioetanol, se precisan 230 kg de maíz, que corresponde a la alimentación de un niño durante un año. Además, el precio de la materia prima se multiplica cuando su fin es en la producción de bioenergía. También, con el consumo de un automóvil de biodiesel extraído de semillas oleaginosas o palmas, se podría enriquecer la dieta de 50 personas durante el mismo período de tiempo.

Esto podría suponer un problema para los países más pobres y con menos recursos del planeta, a medida que aumenta el consumo de biomasa en los países del “primer mundo”. La organización Oxfam afirma que más de 60 millones de personas podrían ser expulsadas de sus tierras para crear grandes latifundios de cultivos energéticos, si se quisiera sustituir sólo el 5% del consumo mundial de petróleo y gas, habría que sacrificar el 20% de la superficie agrícola total de cultivos y pastos.

Actualmente se estudia la utilización de zonas áridas y tierras marginales para la producción de biomasa, pero según Ökoinstitut en el informe "La producción de biomasa sostenible de las tierras degradadas" (Hennenberg et.al (2010)), es muy difícil cuantificar estas áreas de terreno, así como asegurar el crecimiento esperado de los cultivos de biomasa en el tiempo requerido y esperado.



# 3. Tecnología de captura de dióxido de carbono

*“Lo importante en la ciencia no es tanto obtener nuevos datos, sino descubrir nuevas formas de pensar sobre ellos.”*  
-William Lawrence Bragg-

## 3.1. Captura de CO<sub>2</sub>

El CO<sub>2</sub> es un gas que se encuentra de forma natural en la atmósfera, pero debido a las emisiones producidas por el ser humano su cantidad ha crecido notablemente. Las principales fuentes de CO<sub>2</sub> es la industria, el transporte, y la edificación.

Debido al calentamiento global, y para intentar parar el aumento de temperatura de la Tierra se están desarrollando la tecnología de captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CAC). Su principal objetivo es disminuir las emisiones de este contaminante a la atmósfera.

El proceso consiste en tres etapas principales:

- 1) Captura del CO<sub>2</sub>. Separar el contaminante en su fuente del resto de los gases.
- 2) Transporte. Transportar el CO<sub>2</sub> a un lugar de almacenamiento adecuado.
- 3) Almacenamiento.

## 3.2. Tecnologías de captura

Existen diferentes tecnologías para la captura del dióxido de carbono, dependiendo principalmente si éste se captura antes o después de la combustión [20] [21] [22].

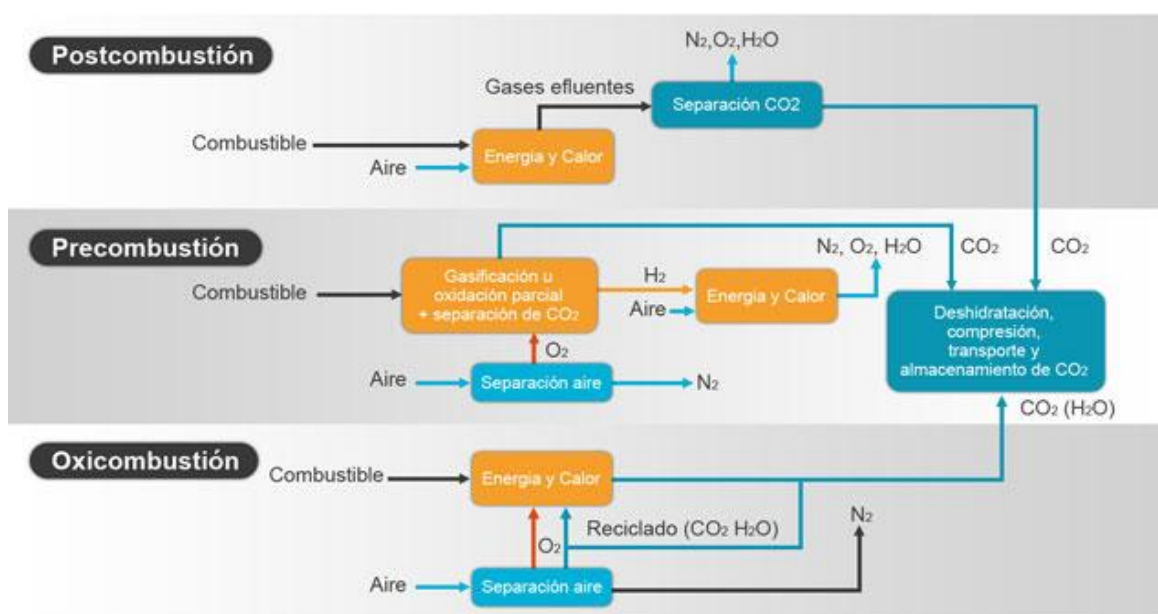


Ilustración 3-1, tecnologías de captura. Fuente: <https://www.pteco2.es/es/tecnologias/captura>

### 3.2.1. Precombustión

Esta tecnología captura el  $\text{CO}_2$  antes de sufrir el proceso de combustión. Normalmente se transforma el combustible en gas, para así separar fácilmente el contaminante. Al gasificar el combustible se produce (además de  $\text{CO}_2$ )  $\text{H}_2$ , el cual puede ser utilizado para la producción de energía.

Actualmente, el método más utilizado es el reformado de metano con vapor.

### 3.2.2. Postcombustión

La tecnología de captura de postcombustión trata directamente con los gases de combustión. Normalmente se utiliza para trabajar con grandes focos emisores de  $\text{CO}_2$ . Se trata de una tecnología madura, utilizada a menudo en ciertos procesos industriales.

El principal inconveniente de esta tecnología es el consumo de energía que necesita para su desarrollo, por lo que disminuye notablemente la eficiencia de la planta en la que esté instalado.

#### 3.2.2.1. Absorción química

Este es el proceso más desarrollado actualmente, siendo la más madura en captura de dióxido de carbono en industrias químicas, con una ratio de captación del 98%.

Se trata de una reacción de base alcalina (principalmente aminas), junto a un gas ácido en un medio acuoso.

El proceso es el siguiente:

El  $\text{CO}_2$  reacciona con el sistema agua-amina para dar carbonato. El principio de extracción es la reacción de un ácido débil con una base débil, formando una base soluble en agua.

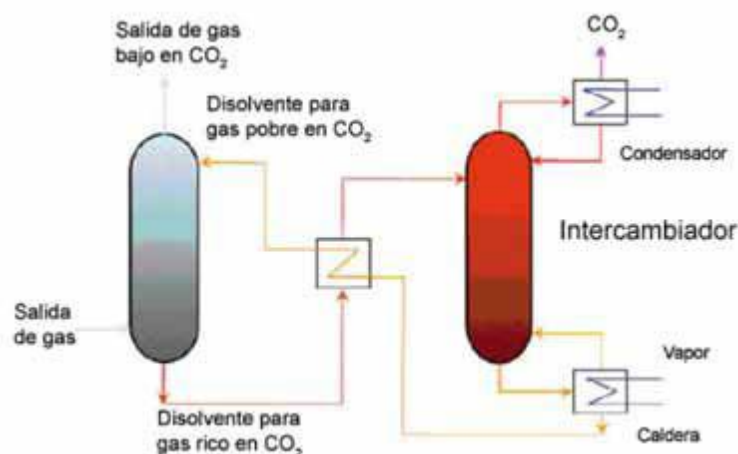


Ilustración 3-2, Esquema de proceso de absorción de  $\text{CO}_2$ .  
fuente: Muñoz, C. B., Peris, P. M., & Rodríguez, J. D. R.  
(2011)

### 3.2.2.2. Adsorción por cambio de presión

Es un proceso por el cual se adsorbe el  $\text{CO}_2$  a partir de tamices moleculares variando las temperaturas y presiones. El aire se bombea a través de un filtro, el cual absorbe el nitrógeno permitiendo así separar el  $\text{CO}_2$ .

Es utilizado principalmente para la eliminación del gas síntesis, aunque no se ha alcanzado aún una etapa comercial como la absorción.

### 3.2.2.3. Captura mediante algas

Consiste en capturar el  $\text{CO}_2$  de los gases de la combustión a partir de algas (ya que es el proceso que éstas realizan en la fotosíntesis). La tecnología se basa en un fotobiorreactor que sea capaz de producir algas.

Las principales desventajas de este proceso son la necesidad de un alto suministro de agua, la lentitud de la generación de algas y la necesidad de una gran superficie con luz para el crecimiento de éstas.

Es importante indicar la gran ventaja que tiene este proceso: no necesita de transporte ni almacenamiento del  $\text{CO}_2$ , debido a que las algas harían todo el trabajo.

### 3.2.2.4. Membranas

Se hace pasar un flujo con un alto contenido de  $\text{CO}_2$  y elevada presión por una membrana que absorbe el contaminante. Es una tecnología poco desarrollada, ya que inicialmente se utilizaron membranas de polímeros, las cuales tienen un alto consumo energético. Se están estudiando en la actualidad otros materiales, como líquidos iónicos.

Por otra parte, también hay una disminución del coste de la operación debido a que los gases no requieren un cambio de fase. Otra ventaja es que el tamaño requerido para esta separación es menor comparado con otras, por lo que el impacto ambiental es menor.

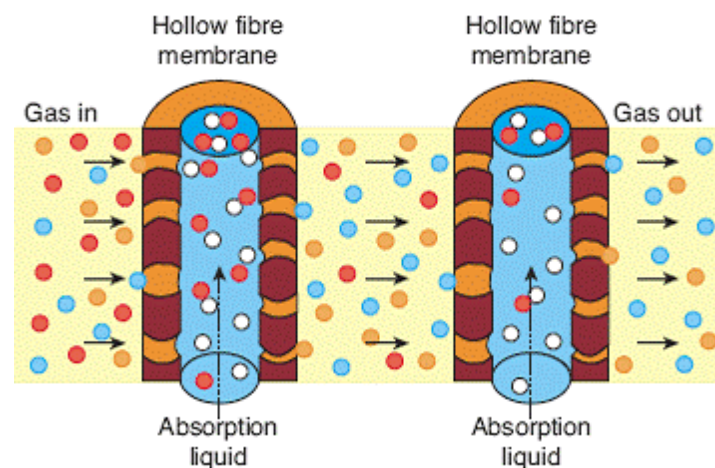


Ilustración 3-3, Captura de  $\text{CO}_2$  por membranas.

Fuente: Morales, H. Torres, C. (2008). Tecnologías de captura y secuestro de  $\text{CO}_2$

### 3.2.2.5. Captura mediante ciclos de carbonatación

Se trata de una reacción de CaO con CO<sub>2</sub>, para formar caliza (CaO<sub>3</sub>), y posteriormente descomponer este producto a alta temperatura para la liberación del CO<sub>2</sub> y poder almacenarlo. Es una tecnología que aún se encuentra en fases de desarrollo, pero se está estudiando su implementación en ciertas industrias.

### 3.2.2.6. Captura basada en la hidratación

Para capturar el CO<sub>2</sub>, se emplea un gas compuesto por agua y tetrahidrofurano que forma pequeños cristales que atrapan el contaminante. Se está estudiando actualmente, ya que es de gran interés debido a su gran capacidad de captura a bajas presiones y temperaturas.

### 3.2.3. Oxidación

Esta tecnología consiste en realizar la combustión con oxígeno en vez de con aire. El fin de este tipo de combustión es obtener una corriente de gases de combustión con un alto porcentaje en CO<sub>2</sub>, para que resulte más fácil su captura.

Hay dos desventajas principales en esta tecnología, por un lado, lo difícil de obtener el oxígeno a partir del aire, y por otra parte las altas temperaturas desarrolladas durante el proceso de combustión (alrededor de 3000 K) haciendo imposible su funcionamiento debido a la inexistencia de materiales que soporten esta temperatura. Para mejorar este último problema se recirculan los gases o se inyecta agua.

Es una tecnología que aún necesita bastante desarrollo.

## 3.3. Purificación

Para facilitar el posterior transporte y almacenamiento del CO<sub>2</sub>, se debe reducir el contenido de incondensables hasta un máximo de 5% en volumen.

Además, es necesario eliminar el H<sub>2</sub>O para evitar la corrosión de las tuberías por donde circula el CO<sub>2</sub>. También se evita así que se formen tapones en los conductos debido a los hidratos o la formación de gotas que podrían dañar los compresores.

Para el transporte, es necesario disminuir el contenido de H<sub>2</sub>S, ya que una fuga podría ser perjudicial en zonas habitadas. Igualmente ocurre cuando la captura se ha producido con sustancias orgánicas que podrían degradarse y generar tóxicos que podrían liberarse a la atmósfera.

Para lograr un almacenamiento seguro es necesario asegurar un bajo contenido en O<sub>2</sub> si éste se va a realizar en yacimientos de gas o petróleo, ya que podría producir una oxidación del combustible. Igual ocurre con el N<sub>2</sub>, haciendo que las características del producto fueran diferentes a las deseadas.

## 3.4. Transporte

Una vez realizados los procesos anteriormente explicados, el CO<sub>2</sub> debe ser transportado hasta los lugares de almacenamiento. Para esto, es necesario que el contaminante se encuentre en estado supercrítico (21,1°C y densidad de 760 kg/m<sup>3</sup>), ya que tiene la densidad de un líquido y la

viscosidad de un gas, dando como resultado un volumen perfecto para su transporte. Además, hay que comprimirlo a una presión superior a 80 bar [23].

Es necesario que el transporte sea económico, viable y principalmente seguro. Esto depende principalmente de la fuente del CO<sub>2</sub> y del lugar donde se vaya a almacenar. Los principales sistemas de transporte son los siguientes:

- Transporte por vehículos. Éste puede darse tanto de forma terrestre como marítima, utilizando para el primero camiones cisterna y para el marítimo o el transporte ferroviario contenedores. Esta opción suele utilizarse cuando el transporte por tuberías no es viable tecnológicamente o económicamente. Es aconsejable que las distancias no sean muy grandes, siempre que las condiciones geopolíticas lo permitan.
- Transporte por tuberías. Es la opción más factible para el transporte de CO<sub>2</sub> a grandes distancias y cuenta con una tecnología madura. Además, pueden ser construidas tanto en fondos marinos como en localizaciones rocosas. Aunque ya existen tuberías de una gran extensión, aún no llegan al nivel de los gaseoductos. Para aumentar la vida útil de las tuberías es imprescindible evitar la contaminación del CO<sub>2</sub> con sulfuro de hidrógeno, para que no se produzca corrosión ni fugas, aumentando así la seguridad del transporte. Por último, es necesario añadir que cada 100 km es preciso que haya estaciones de compresión intermedia, haciendo que el coste aumente notablemente.

### **3.5. Almacenamiento**

Una vez capturado el CO<sub>2</sub>, es preciso almacenarlo. El almacenamiento es complicado, ya no solo tecnológicamente, sino que hay que añadir dificultades económicas, políticas y sociales. Se han analizado diversas opciones para su almacenamiento, pero hoy en día muy pocas son realmente factibles [24] [25].

#### **3.5.1. Almacenamiento geológico**

Es la opción más factible y desarrollada hoy en día, esto es debido a que tiene una tecnología más accesible y a una mayor capacidad de almacenamiento. Existen tres mecanismos de almacenamiento geológico:

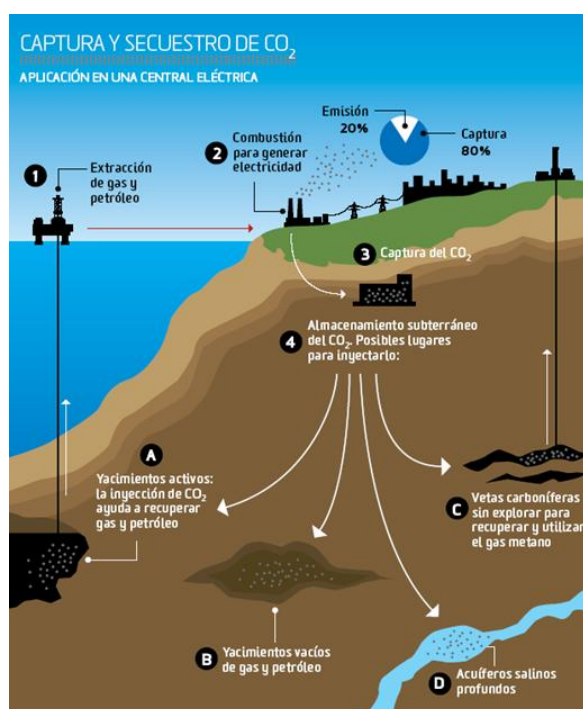


Ilustración 3-4, Almacenamiento geológico.

Fuente: <http://biologia-iespablodiez.blogspot.com/2013/06/el-almacenamiento-geologico-de-co2.html>

#### 3.5.1.1. Minas o yacimientos de carbón inexplorables

Este tipo de almacenamiento está en la actualidad en fase de estudio. Consiste en inyectar CO<sub>2</sub> en estos yacimientos para recuperar el CH<sub>4</sub> que ha quedado absorbido en el carbón durante su formación.

Las principales ventajas que tiene este tipo de almacenamiento son las siguientes:

- Disminución de costes al ser posible emplear algunas de las instalaciones de las minas de carbón ya existentes.
- Al estar las cuencas de carbón ya identificadas tiene menores costes de exploración.
- Mejor relación del coste/beneficio ya que se obtiene CH<sub>4</sub>.

Las principales desventajas:

- Menor capacidad de almacenamiento respecto a otras opciones.
- Problemas de inyección de CO<sub>2</sub> y disminución de la permeabilidad del carbón.

#### 3.5.1.2. Yacimientos ya explotados de hidrocarburos

Es la opción más utilizada actualmente. Por una parte, es un almacenamiento seguro, ya que es un “almacén” natural, lo que reduce los costes notablemente. Otro punto importante es que este tipo de almacenamiento alarga la vida útil de los yacimientos, ya que al inyectar el CO<sub>2</sub> aumenta

el factor de reutilización del crudo. Por tanto, con este procedimiento se mejora la relación coste/beneficio.

Principales ventajas de este tipo de almacenamiento:

- Existencia ya previa de un “almacén” que tiene una eficacia asegurada.
- Mayor conocimiento físico y geológico sobre los yacimientos.
- Mejora de la relación coste/beneficio debido al aumento de producción de crudo por la inyección del CO<sub>2</sub>.
- Disminución de los costes en inversión, ya que las instalaciones pueden ser reutilizadas.

Por otra parte, las desventajas:

- No todos los yacimientos son adecuados para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>.
- En algunos casos, la variación de presión en el yacimiento entre la etapa de producción y la inyección de CO<sub>2</sub> puede romper el sello del yacimiento.
- En algunos yacimientos, puede haber fugas a través de las instalaciones abandonadas de producción.

### 3.5.1.3. Acuíferos salinos

Los acuíferos salinos son depósitos de agua salada que se encuentran a grandes profundidades, tanto en el subsuelo marino como en la superficie terrestre. Están formadas por rocas porosas y permeables. Por estos motivos, su aprovechamiento como recurso hídrico no es factible.

Las características necesarias de los acuíferos para poder almacenar CO<sub>2</sub> son:

- Estar a bajas profundidades (mínimo 800 metros).
- Ubicadas en áreas geológicamente estables.
- Tener unas dimensiones aceptables.
- Contar con unas características concretas de salinidad, porosidad y permeabilidad.
- Tener una capa impermeable.

Sus principales ventajas:

- Se tiene un conocimiento previo de estas formaciones, ya que han sido estudiadas previamente debido a la presencia en algunos casos de hidrocarburos.
- Gran capacidad de almacenamiento.

Desventajas que presentan:

- Las instalaciones deben realizarse por primera vez.
- Conocimiento más leve en comparación con el de los yacimientos de hidrocarburos.
- La identificación de estos acuíferos es costosa.

### 3.5.2. Mineralización

Se trata de la carbonatación mineral, que es la fijación del CO<sub>2</sub> mediante reacciones químicas con óxidos alcalinos y alcalinotérreos, como el óxido de calcio (CaO) y el óxido de magnesio (MgO).

Estas reacciones producen compuestos como el carbonato cálcico y el carbonato de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ).

Estos compuestos resultantes se mantienen estables durante un largo periodo de tiempo, por lo que pueden ser utilizados en la construcción, aunque la reutilización sería mínima en comparación con las cantidades producidas.

Una ventaja que indicar es la escasa necesidad de vigilancia de las sustancias resultantes. Por el contrario, se encuentran importantes desventajas, como es la gran cantidad de óxidos necesarios para el almacenaje, así como el coste de la explotación minera y la eliminación de desechos.

### **3.5.3. Almacenamientos oceánicos**

Una posible forma de almacenar  $\text{CO}_2$  es la inyección del contaminante en los fondos oceánicos a grandes profundidades, de tal forma que permanecería alejado de la atmósfera durante siglos. Esto podría lograrse a partir de los conductos. La idea es que el  $\text{CO}_2$  disuelto se convierta en parte del ciclo global del carbono.

Debido a que el contaminante es soluble en agua, se producen intercambios naturales de éste entre la atmósfera las aguas superficiales llegando a un equilibrio. Debido a las emisiones de los dos últimos siglos, los océanos han aumentado su contenido en  $\text{CO}_2$ , disminuyendo su pH, por lo que puede tener un impacto final en el medio marino importante.

Dentro de los parámetros físicos no existe límite en relación con la capacidad de almacenamiento de  $\text{CO}_2$  en los océanos, aunque dependerá del tiempo que tarde en producirse el equilibrio atmósfera-océano.



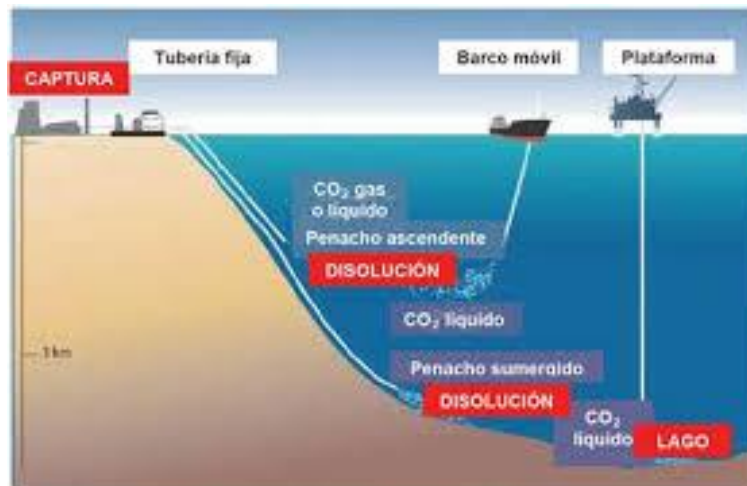


Ilustración 3-5, Almacenamientos oceánicos. Fuente: IPCC (2005).

### 3.5.4. Usos industriales

El almacenamiento geológico es solo una alternativa temporal hasta buscar soluciones respecto a la reducción de las emisiones. Existe la opción de reutilizar el CO<sub>2</sub>, dándole así un mayor valor. Estas alternativas son principalmente tres.

#### 3.5.4.1. Tratamiento de aguas

En el tratamiento de aguas residuales el CO<sub>2</sub> puede ser utilizado para neutralizar las aguas evitando la acidificación.

Otro posible uso es la remineralización de las aguas potables y el tratamiento de aguas usadas para el ocio.

#### 3.5.4.2. Industria alimentaria

- 1) Agua carbonatada, comúnmente conocida como “soda”, es agua a la que se le añade CO<sub>2</sub>. Aunque la cantidad que se introduce es relativamente pequeña, la industria de estas bebidas es realmente grande.
- 2) Envasado en atmósfera protectora. Es un procedimiento en el que se inyectan ciertos gases y aumentan la vida útil del alimento. Al inyectar CO<sub>2</sub> se pueden modificar algunas propiedades.
- 3) Aturdimiento de animales. Es una alternativa frente al aturdimiento eléctrico. Consiste en hacer respirar a los animales un aire con una alta concentración de CO<sub>2</sub>, con la principal ventaja de que no deja residuos químicos en el animal.
- 4) Refrigeración y congelación de alimentos. El CO<sub>2</sub> en estado líquido es utilizado para refrigerar alimentos a nivel industrial. Es una tecnología emergente frente a la del nitrógeno.

### 3.5.4.3. CO<sub>2</sub> en estado supercrítico

El CO<sub>2</sub> en este estado se emplea para la extracción de la cafeína y la teína, del lúpulo para la cerveza, la limpieza de ropa en seco, la grasa de cacao, etc.

### 3.5.5. Conversión en biocombustibles y biomasa

Las algas, a partir de la energía proveniente sol, convierten el CO<sub>2</sub> y el agua en biomasa. Esto sería una opción factible si no fuera por lo lento que es el proceso de generación de las algas.

Además, se pueden generar biocombustibles como el metanol y el dimetil éter, a través de reacciones químicas de hidrógeno con CO<sub>2</sub>.

## 3.6. Situación actual de la tecnología

En un informe especial del IPCC (2005) se reconocía la tecnología de captura del dióxido de carbono como una componente esencial en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Desde entonces, la tecnología de CAC está presente en los escenarios futuros para llegar al cumplimiento de los objetivos para mitigar el cambio climático [26].

En el último informe de evaluación del IPCC (2014) se sugiere que sin esta tecnología no se podrán limitar las concentraciones de CO<sub>2</sub> a 450 ppm/eq en 2100. Según un informe de IEA (2016), se requiere la captura y almacenamiento de 4 Gt de CO<sub>2</sub> por año para el año 2040 si se quiere limitar el incremento de temperatura a 2 ° C por encima de los niveles preindustriales. La importancia crítica de la tecnología de CAC ha sido recientemente afianzada por Paul Ekins et al. Climate Policy 2017 (2017) [27].

La Unión Europea ha tomado dichas consideraciones para incluir la tecnología CAC en sus estrategias, realizando numerosos estudios para esta consideración. En ellas, se realizaron estimaciones en las que se indicaba que se podían almacenar 7 Mtpa (millones de toneladas por año) de CO<sub>2</sub> hasta 2020 y hasta 160 Mtpa en 2030. También estimó que los costes para la reducción de GEI sin esta tecnología podían incrementarse hasta en un 40%.

Debido a esto, la UE puso en funcionamiento un plan de desarrollo de esta tecnología. Había seis plantas previstas para entrar en funcionamiento en 2015, con un coste competitivo de 30-50€/tonelada CO<sub>2</sub> para 2020-2025. Sin embargo, estas iniciativas no tuvieron el apoyo suficiente por parte de los estados miembros, lo que ha supuesto que el proceso se ralentizara.

Como ha señalado Reiner (2016), la realidad actual en comparación con las aspiraciones de los gobiernos pasados es muy diferente. En lugar de estar ya en la fase comercial que lleva al lanzamiento a gran escala a partir de 2025, muy pocas plantas están en trámite, por lo que hay poco aprendizaje en curso entre las diferentes opciones tecnológicas o en la reducción de costes dentro de una única tecnología.

Actualmente, solo tres proyectos están en funcionamiento en Europa. Se pueden observar en la siguiente tabla:

Nombre	País	Inicio de operación	Capacidad (Mtna)	Industria	Tipo de captura	Tipo de transporte	Tipo de almacenamiento
--------	------	---------------------	------------------	-----------	-----------------	--------------------	------------------------

<b>Sleipner</b>	Noruega	1996	1	Extracción Gas Natural	Pre-combustión	Tubería	Almacenamiento geológico
<b>Snøhvit</b>	Noruega	2008	0.7	Extracción Gas Natural	Pre-combustión	Tubería	Almacenamiento geológico
<b>Port Jerome</b>	Francia	2015	0,1	Producción de H2	Oxicombustión	Tubería	Almacenamiento geológico

Tabla 3-1 Proyectos en funcionamiento en UE. Fuente: Realización propia. Datos: Global CCS Institute

A nivel europeo, el Instituto CAC identifica solo tres proyectos reales a desarrollar para la captura y almacenamiento de dióxido de carbono. Se representan en la siguiente tabla:

Nombre	País	Inicio de operación prevista	Capacidad (Mtpa)	Industria	Tipo de captura	Tipo de transporte	Tipo de almacenamiento
<b>Norway Full Chain CCS</b>	Noruega	2023 - 2024	0.8	Varios (cemento, amoníaco...)	Varias separaciones industriales	Varios	Almacenamiento geológico
<b>Teesside Collective</b>	UK	2020	0.8	Varios	Varias separaciones industriales	Tubería	Almacenamiento geológico
<b>Caledonia Clean Energy</b>	UK	2024	3.0	Generación energética (Gas Natural)	Post-combustión	Tubería	Almacenamiento geológico

Tabla 3-2 plantas de CAC en funcionamiento en UE. Fuente: Realización propia. Datos: Global CCS Institute

A nivel mundial, el Instituto Global de CAC identifica 17 (10 de ellos en América del Norte) proyectos de CAC operativos a gran escala con una capacidad de captura de CO<sub>2</sub> de 35 Mtpa. Por otra parte, sólo dos de los 17 centros operativos funcionan con un gas de combustión para la generación de energía.

En Australia y Canadá hasta 2024, la capacidad esperada sigue siendo tan sólo un 1% de los 4000 Mtpa previstos en el escenario de 2040.

### 3.7. Barreras para la implementación

Dado el importante papel que juega CAC en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, y en el desarrollo de la tecnología BECCS, los retrasos en la implementación de esta tecnología producen un peligro en el cumplimiento de los objetivos del acuerdo de París. La instalación de la capacidad necesaria de captura prevista supone un gran reto de ingeniería.

El análisis de EASAC (2013) llegó a la conclusión de que, si la tecnología de CAC era una contribución importante para la UE en la mitigación del cambio climático, las tecnologías, la capacidad y las infraestructuras deben desarrollarse de manera constante y con mayor urgencia de la actual. Este análisis también señaló que las prestaciones tendrían que ser de alrededor 50€/t CO<sub>2</sub> para que la captura de carbono fuera económicamente atractiva (actualmente ronda los 10€/t de CO<sub>2</sub>).

Teniendo en cuenta cada uno de los componentes de la cadena de CAC (la captura, el transporte y el almacenamiento), el desarrollo de las diferentes tecnologías e infraestructuras necesarias es complicado. Por otra parte, la integración de esta tecnología en proyectos y plantas ya existentes, así como los riesgos que puedan causar y la incertidumbre sobre la financiación del gobierno, ha llevado a la retirada de muchos proyectos que estaban contemplados.

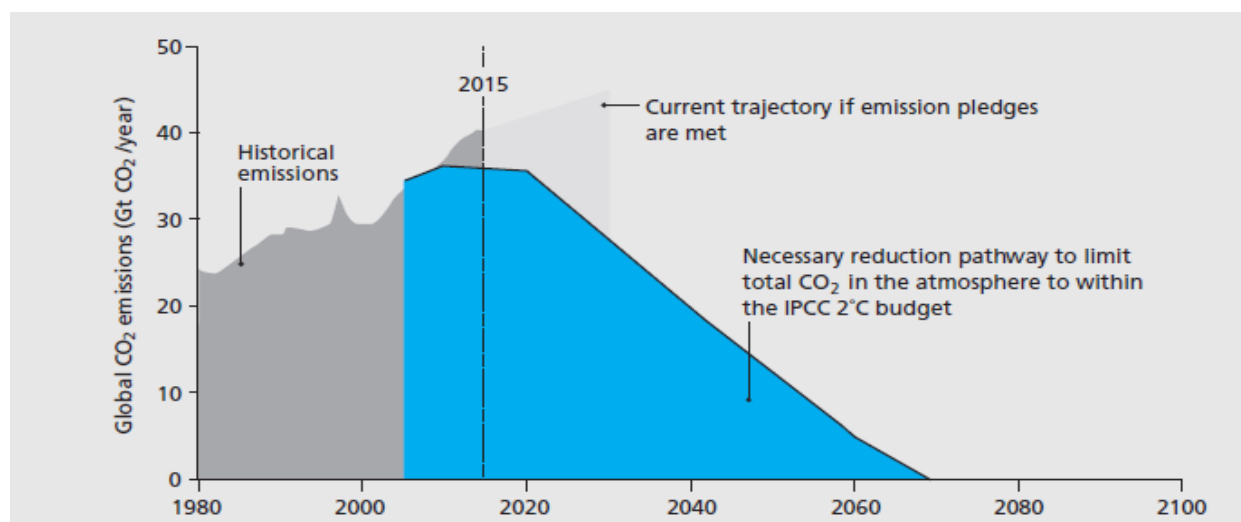


Ilustración 3-6, vías requeridas para limitar las emisiones para el escenario 2 °  
Fuente: European Academies' Science Advisory Council. (2018)

Varios estudios (ETI, 2014; Oxburgh, 2016; Reiner, 2016) han identificado las barreras que han contribuido a esta falta de progreso. Un factor clave es que el precio del carbono ha sido inferior a lo esperado, lo que debilita la inversión privada en CAC. Esto requiere la intervención del gobierno para proporcionar el entorno necesario para la inversión privada (como tomar la responsabilidad de tener lugares de almacenamiento geológico). Estas inversiones son necesarias para el desarrollo de la tecnología y su puesta en marcha para así reducir cualitativamente los costes a través del (Reiner, 2016).

En el Reino Unido se llevó a cabo un análisis (Oxburgh (2016)) que estudiaba los diversos motivos por los que no se habían llevado a cabo los acuerdos sobre CAC. En este análisis se señala la longitud y la complejidad de los proyectos, así como los riesgos que producía y el hecho de que los gobiernos no se hicieran cargo de los costes del transporte y del almacenamiento. Para superar estas barreras, el estudio defendía que el gobierno debía hacerse cargo del transporte y de las instalaciones de almacenamiento necesarias.

El estudio también calculaba un precio aproximado de 95€/MWh en la cadena completa del CAC.

El elemento de captura de CAC todavía representa el mayor coste de la cadena. En la generación de energía, por ejemplo, el 70-90% del coste total de un proyecto de CAC a gran escala se deriva del proceso de captura y compresión.

El análisis más reciente del Instituto CCS (2016) coincide en gran parte con el anteriormente descrito, ya que considera como barreras importantes las institucionales.

A nivel mundial, la tecnología de captura de CO<sub>2</sub> se ha desarrollado significativamente en la última década, los costes se han reducido y se están realizando grandes avances en las tecnologías de transformación de los biocombustibles de segunda generación para reducir más aún los costes. Por otra parte, el transporte de CO<sub>2</sub> lleva décadas practicándose bajo los códigos aceptados internacionalmente. De la misma forma, el almacenamiento en ciertas áreas ya está seleccionado, desarrollado, caracterizado y demostrada su seguridad. Al mismo tiempo, ciertos estudios defienden que hay recursos geológicos suficientes para satisfacer las demandas proyectadas.

Los principales problemas que obstaculizan el desarrollo son:

- El desarrollo de la tecnología necesaria para reducir costes, la falta de estimulación a la innovación y el no haber establecido la tecnología de captura más eficiente.
- Cómo apoyar o incentivar la inversión en CO<sub>2</sub>, así como la falta de soluciones para el transporte y almacenamiento obligatoriamente necesarios.



## 4. Biomasa con captura de CO<sub>2</sub>

El consumo de biomasa con captura de CO<sub>2</sub> es actualmente uno de los factores principales de la UE para llegar a los objetivos del 2020 y 2050.

A continuación, se van a desarrollar los análisis necesarios de ambas partes para poder concluir si podrán alcanzarse los objetivos decretados por la Unión Europea.

### 4.1. Biomasa con captura de CO<sub>2</sub> (BECCS)

BECCS es una tecnología emergente que combina las aplicaciones de energía de biomasa a gran escala (incluyendo la generación de electricidad) con la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

Se basa en el concepto emisiones negativas, ya que el CO<sub>2</sub> es absorbido de la atmósfera durante el ciclo de crecimiento de materias primas de biomasa y después, el CO<sub>2</sub> producido durante la combustión de la biomasa es capturado y almacenado indefinidamente [27] [28] [29].

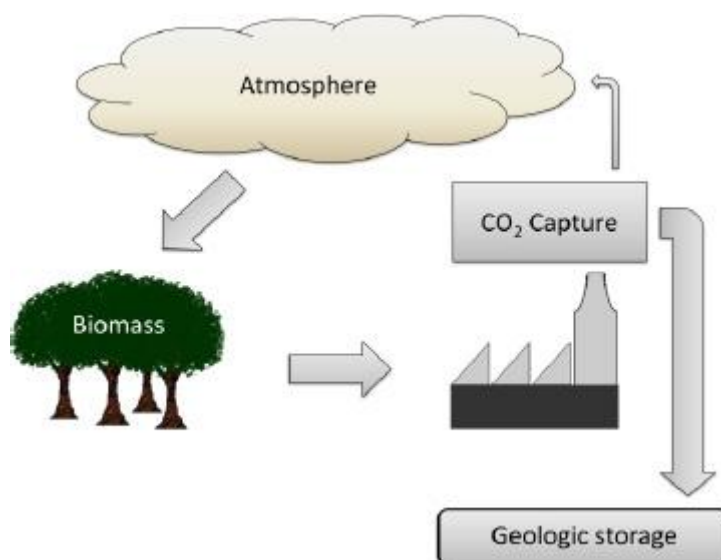


Ilustración 4-1, Explicación BECCS. Fuente: Global CCS Institute

Hay otros enfoques sugeridos para las emisiones negativas tales como la forestación, la captura directa de CO<sub>2</sub> desde el aire, etc., pero BECCS es la opción más prominente en los escenarios de mitigación del cambio climático.

Es por este motivo por el que la tecnología de biomasa con captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> ha sido incluida en la mayoría de las nuevas directas e informes para el cumplimiento de los objetivos futuros.

➤ Emisiones negativas

El hecho de que se considere la biomasa con captura una opción muy importante para mitigar el cambio climático es debido a la consideración de que tiene emisiones negativas de dióxido de carbono.

Se consideran emisiones negativas debido al proceso que sigue. Primero, los cultivos energéticos consumen CO<sub>2</sub> de la atmósfera, que unido a la producción del contaminante en la quema del combustible da un balance aproximadamente cero. Si se añade la captura de este contaminante al finalizar el proceso de combustión de la biomasa, el balance es negativo.

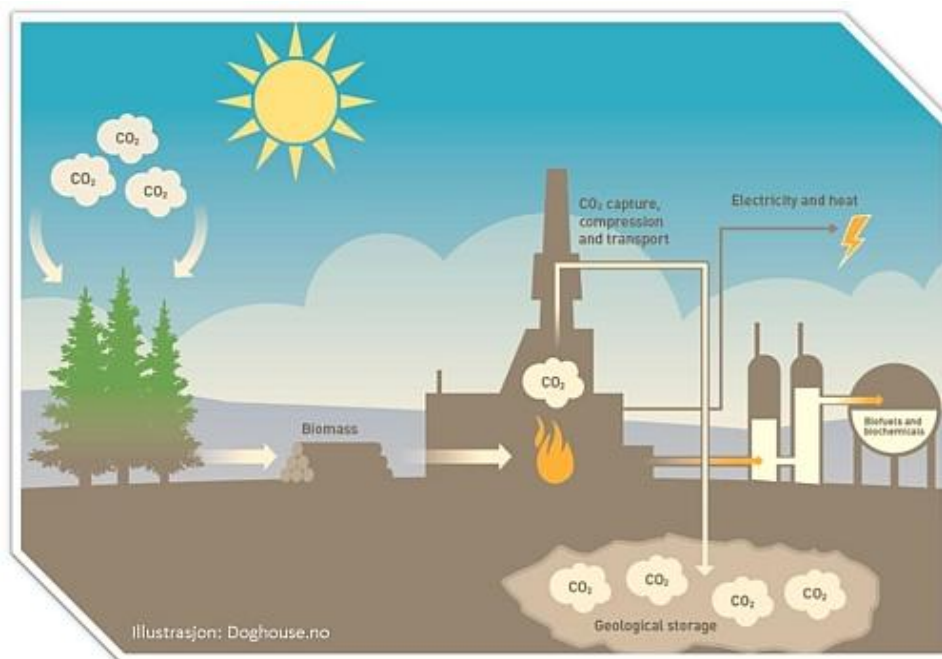


Ilustración 4-2, Emisiones negativas. Fuente: <https://airfreshener.club/quotes/carbon-storage-and-ccs-capture.html>.

Se debe indicar, que hay muchas emisiones indirectas y directas asociadas al uso de BECCS, ya que tiene múltiples etapas, como el cultivo, la recolección, el tratamiento y transporte, almacenamiento, etc.

A día de hoy, hay pocos estudios realizados sobre el Análisis del ciclo de vida de BECCS, debido a la gran incertidumbre que conlleva esta tecnología.

En la mayoría de los estudios realizados no se tiene en cuenta el impacto medioambiental que puede suponer el uso de esta tecnología, como el agotamiento del ozono, la radiación ionizante, la eutrofización, etc., por lo que no existe un balance real del ciclo de vida.



## 4.2. Estado técnico

Desde un punto de vista tecnológico, los estudios de modelos y los experimentos realizados en laboratorio, se muestra que la tecnología de captura de CO<sub>2</sub> con biomasa son posibles realizando solo pequeñas modificaciones a las fábricas y quemadores ya existentes [30] [31] [32].

Es importante añadir que la volatilización de la biomasa durante el proceso de combustión es diferente que la del carbón, lo que supone diferentes características de distribución de calor en la caldera. Por este motivo, la colocación de los intercambiadores de calor y los quemadores en la caldera deben adaptarse. Es importante añadir que, en la combustión de la biomasa, las temperaturas de salida de la caldera son menores, lo que supone también una menor eficiencia.

Hay estudios que indican que, con el uso de biomasa, las emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub> son menores, lo que supondría que no habría que modificar los controles ambientales en este aspecto. Por el contrario, las cenizas y las partículas emitidas pueden aumentar según el tipo de biomasa utilizada. Las cenizas producidas por la biomasa pueden producir mayores niveles de aglomeración y corrosión, lo que supone una búsqueda de medidas que se ve reflejado en aumento de los costes [45].

Como un ejemplo de estudio se puede explicar el caso de Audus y Freund (2005), los cuales examinaron la eficiencia de la tecnología de gasificación integrada de biomasa de ciclo combinado con CAC. Llegaron a la conclusión de que esta opción era mucho más cara que un ciclo combinado de carbón con captura de CO<sub>2</sub>.

Las tecnologías de pretratamiento de la biomasa son claves para disminuir los costes de la cadena de suministro. Por ejemplo, el suministro de biomasa procedente de América del Norte y de Europa incluye el astillado, secado y palletización de la madera, lo que permite aumentar la eficiencia de la combustión y aumentar la energía producida. La torrefacción, un proceso térmico que convierte la biomasa en un material similar al carbón, ayuda a movilizar el comercio internacional de residuos agrícolas y cultivos energéticos.

### 4.2.1. Proyectos en la Unión Europea

Actualmente, no hay plantas de BECCS en funcionamiento, pero se han realizado diversos estudios en países de la UE. Se basan en cambiar los combustibles fósiles por biomasa en plantas que cuentan con tecnología de CAC, y en su mayor parte, en la implantación de la tecnología de CAC en plantas que utilizan biomasa [27].

Proyectos de BECCS en la Unión Europea:

a) Rotterdam, los Países Bajos.

Actualmente se encuentra en la etapa de ejecución (el almacenamiento se encuentra en la etapa de identificación).

Operación puesta en marcha: 2011

Capacidad: 330 000 toneladas / año.

Instalación de captura: Producción de etanol.

Tipo de captura: fuente de alta pureza

Tipo de transporte: tubería

Tipo de almacenamiento: utilizado en invernaderos

Se basa en la vinculación de las emisiones biogénicas de una planta de etanol a invernaderos cercanos, los cuales utilizan el CO<sub>2</sub> para aumentar el crecimiento de las plantas. La parte negativa de este proyecto es que no produce emisiones negativas permanentes, ya que al degradarse las plantas volverán a emitir el contaminante.

El primer paso es construir tuberías entre la planta de etanol y los invernaderos, que quizás podrían ser utilizadas en un futuro para lograr las emisiones negativas.

b) Artenay, Francia

Actualmente se encuentra en la etapa de evaluación.

Inicio de operación: por definir

Capacidad: 45 000 toneladas / año.

Instalación de captura: Producción de etanol.

Tipo de captura: fuente de alta pureza

Tipo de transporte: tubería

Tipo de almacenamiento: acuífero salino

Se trata de una refinería de remolacha azucarera, la cual ha sido evaluada por miembros de la Universidad de Orleans y la empresa de servicios GeoGreen para la implantación de BECCS. El CO<sub>2</sub> producido se da en una corriente de alta pureza como un subproducto del proceso, que puede ser almacenado en las formaciones geológicas subyacentes de la Cuenca de París.

Han sido evaluados los parámetros técnicos y financieros, llegando a la conclusión de que los costes de almacenamiento por tonelada son muy altos para plantas de BECCS a pequeña escala.

c) Norrköping, Suecia

Actualmente se encuentra en etapa de identificación.

Inicio de operación: por definir

Capacidad: 170 000 toneladas / año.

Instalación de captura: Producción de etanol.

Tipo de captura: fuente de alta pureza

Tipo de transporte: Barco

Tipo de almacenamiento: acuífero salino

Una planta de etanol en Norrköping, Suecia, propiedad de Lantmännen, es otra oportunidad que se ha identificado como un caso en el que se puede capturar un flujo de CO<sub>2</sub> alta pureza y enviarlo a ubicaciones de almacenamiento en el Mar del Norte. La planta recientemente amplió su capacidad de producción, y es la única planta de etanol en los países nórdicos con una capacidad lo suficientemente alta como para ser adecuada para BECCS.

## d) Ketzin, Alemania

Etapas: Cancelada

Operación puesta en marcha: 2008

Capacidad: 80 000 toneladas en total.

Instalación de captura: -

Tipo de captura: -

Tipo de transporte: tubería

Tipo de almacenamiento: acuífero salino

El proyecto CO<sub>2</sub> SINK es un proyecto financiado por la Unión Europea liderado por el Centro Alemán de Investigación en Geociencias con varios socios europeos. El objetivo del proyecto es estudiar la inyección de CO<sub>2</sub> en una formación geológica en tierra. La intención era inyectar CO<sub>2</sub> de una fuente biogénica para lograr un sistema BECCS, pero debido a dificultades técnicas y reglamentarias, la gerencia del proyecto optó por comprar CO<sub>2</sub> de origen fósil a un proveedor industrial. Por lo tanto, el elemento BECCS se canceló, pero el proyecto ha continuado como un proyecto CAC de combustible fósil.

## e) Värö, Suecia

Etapas: Evaluación

Inicio de operación: por definir

Capacidad: 800 000 toneladas / año.

Instalación de captura: planta de celulosa

Tipo de captura: post-combustión

Tipo de transporte: Barco (o en la red de tuberías)

Tipo de almacenamiento: acuífero salino

Una fábrica de pulpa y papel en Värö, Suecia, propiedad de Södra Skogsägarna, ha sido identificada en una serie de estudios como una gran fuente puntual de CO<sub>2</sub> biogénico, ubicada cerca de formaciones de almacenamiento en el Mar del Norte. Actualmente, el instituto noruego Tel-Tek está llevando a cabo un estudio detallado de factibilidad de los costos y los requisitos técnicos para capturar, transportar y almacenar CO<sub>2</sub> de la planta de Värö, el cual está financiado por la UE. En el estudio, se están barajando diferentes alternativas para el transporte del CO<sub>2</sub>.

## f) Domsjö, Suecia

Etapas: Identificación

Inicio de operación: por definir

Capacidad: 260 000 toneladas / año.

Instalación de captura: planta de celulosa (BLG)

Tipo de captura: fuente de alta pureza

Tipo de transporte: Barco

Tipo de almacenamiento: acuífero salino

La fábrica de celulosa en Domsjö, Suecia, propiedad de Domsjö Fabriker, planea implementar la tecnología BLG, y ha sido identificada como un proyecto potencial de BECCS. El CO<sub>2</sub> tendría que ser transportado por barco a lugares de almacenamiento comprobados en el Mar del Norte o a sitios de almacenamiento futuros en el Mar Báltico.

## g) Norrköping, Suecia

Etapa: Identificación

Inicio de operación: por definir

Capacidad: 170 000 toneladas / año.

Instalación de captura: producción de etanol

Tipo de captura: fuente de alta pureza

Tipo de transporte: Barco

Tipo de almacenamiento: acuífero salino

Es la única planta de etanol de los países nórdicos con una capacidad de producción suficientemente alta para la implantación de BECCS. Se está estudiando la manera de implementar la captura y la mejor forma de transportarlo hasta el Mar del Norte.

## h) Skåne, Suecia

Etapa: Identificación

Inicio de operación: por definir

Capacidad: 500 - 5000 toneladas / año.

Instalación de captura: producción de biogás

Tipo de captura: procesamiento de gas

Tipo de transporte: Camión

Tipo de almacenamiento: acuífero salino

El área de Skåne en el sur de Suecia, hay diversas plantas para adecuar el biogás a un biocombustible adecuado para automóviles. El proceso produce un flujo de alta pureza de CO<sub>2</sub> como subproducto, por lo que se ha propuesto convertirlo en un proyecto de BECCS, que almacena CO<sub>2</sub> en formaciones geológicas subterráneas en el sur.

### 4.3. La demanda de recursos

Para retirar todas las gigatoneladas de CO<sub>2</sub> de la atmósfera necesarias utilizando BECCS, serían necesarias grandes cantidades de biomasa [45].

Type of biomass	Energy production (EJ/year in 2100)	Land area required (million hectares in 2100)	Water required (km <sup>3</sup> /year in 2100)
Purpose-grown crops	170	330–1320	720**
Agricultural residues	170	1980*	—***
Forest residues	170	3300–5610*	—***

\*Note that the land requirement for residues is shared with the production of agricultural crops and timber.

\*\*Water use (km<sup>3</sup>/year in 2100): (1) from crop production 280; (2) for CCS including cooling water: 450.

\*\*\*The water use for agricultural and forest residues was not provided in the study.

Ilustración 4-3, Cifras clave para la aplicación de BECCS en el sector de calor y electricidad cuando la entrega de 3,3 GtCe<sub>q</sub> / año de emisiones negativas en 2100

Fuente: European Academies' Science Advisory Council. (2018)

La Academia Nacional de Ciencias (National Research Council, 2015) evaluó la tierra, el agua y las necesidades de nutrientes de los cultivos energéticos. Se estimó que para la producción de

100 EJ/año (EJ:  $10^{18}$  julios), que equivale al 20% de la producción global de energía, podría requerir hasta un 5% de la superficie actual de la tierra (500 millones de hectáreas), suponiendo que se producen alrededor de 10 toneladas de biomasa por hectárea al año.

Además, observaron que, en los próximos 50 años, la demanda mundial de alimentos se incrementará al doble de la actual, debido al aumento de población y al aumento del consumo. Debido a los cultivos energéticos, la superficie dedicada a la ganadería se reducirá, disminuyendo también la biodiversidad asociada y aumentando por tanto el coste de los alimentos.

Para que sea aceptada es necesario que la biomasa se obtenga de forma sostenible y con mínimo de emisiones de  $\text{CO}_2$  durante la cadena de producción. Un análisis realizado por Smith y Torn (2013) de un sistema basado en BECCS indica que, por cada tonelada de carbono capturado, las emisiones provocadas en la cadena de suministro serían de aproximadamente 1,1 toneladas, además de las liberaciones de óxido nitroso producidas por la gran cantidad de fertilizantes requeridos.

Como señalaron Wiltshire y Davies-Barnard (2015), es esencial para el cálculo de las emisiones de  $\text{CO}_2$  tener en cuenta las suposiciones hechas respecto a la tierra para el cultivo de BECCS y sus efectos en el cambio directo e indirecto del uso del suelo. En su estudio, los efectos variaron de entre una eliminación de 100-120 Gt  $\text{CO}_2$  entre 2020 y 2100 si los cultivos de bioenergía se realizaran en tierras abandonadas, a posibles escenarios de empeoramiento del calentamiento global por la adición de hasta 100 Gt de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera si los bosques fueran sustituidos por cultivos bioenergéticos.

Es necesario un análisis de los distintos tipos de materia prima posibles para la biomasa, ya que según el tipo varía la necesidad de terreno y el precio de la producción. Por ejemplo, los cultivos energéticos tienen mayor densidad energética que los residuos forestales o agrícolas. Al mismo tiempo, los residuos pueden tener un menor impacto ambiental y pueden ser más baratos, ya que son productos secundarios procedentes de la industria forestal y la producción de alimentos.

#### 4.4. Ejemplo de una planta

A partir del documento Biomass Css Study [38] se han tomado los datos necesarios para poder realizar el modelo de una planta tipo de BECCS.

En el Anexo 1 se encuentra un diagrama de la planta que se va a explicar a continuación.

Las características a nivel general de la planta que se va a estudiar son las siguientes:

Tecnología de caldera: Caldera de lecho fluido burbujeante (BFB).

Vapor: Subcrítico.

Combustible: Biomasa

CAC: Postcombustión por absorción química (aminas).

$\text{SO}_x$ : El tipo de captura de  $\text{CO}_2$  requiere valores muy bajos de  $\text{SO}_x$  (menores que los límites ambientales), por lo que es necesario la inyección de piedra caliza en el lecho del horno.

$\text{NO}_x$ : No es necesario ningún sistema para cumplir los requerimientos ambientales gracias a las combustiones a baja temperatura a la salida de la caldera.

Potencia de salida: 48,9 MW

Eficiencia: 23,2 %

Coste de inversión: 256,2 MME  
€/KWe: 5240,1 €/KWe

En esta planta toda la energía necesaria para la captura del CO<sub>2</sub> es proporcionada por la turbina de la misma planta, lo que produce una pérdida significativa de la potencia producida. Además, también hay un consumo considerable de calor en los diversos intercambiadores utilizados en la compresión y secado del CO<sub>2</sub> necesario para su posterior almacenamiento geológico.

A continuación, se explica parte por parte el funcionamiento de la planta, en el Anexo 2 encontramos los valores y características de la planta (Balances, consumo de electricidad, consumo de agua, emisiones, eficiencia de la captura, y sus características básicas):

#### 1) Gestión de cenizas y almacenamiento de combustible.

Incluye el almacenamiento y manipulación de la biomasa y el almacenamiento y manipulación de la piedra caliza.

Cuenta con un equipo para recibir la biomasa desde el exterior de la planta, para almacenarla y para después transportarla a las calderas. El consumo esperado de biomasa es de 2500 t/día.

#### 2) Caldera

Es de tipo lecho fluido burbujeante. Incluye los sistemas de alimentación de combustible, el horno, los sobrecalentadores, los bancos de caldera, el paso posterior, los ventiladores y el calentador de aire.

- Horno: la combustión tiene lugar en una atmósfera reductora. Se inyecta el aire por encima de la llama para completar la combustión, lo que proporciona una combustión por etapas y minimiza las emisiones de NO<sub>x</sub>.
- Enfriamiento de los gases de combustión: Los gases de combustión del horno se enfrían en los bancos de calderas, el economizador y el calentador de aire tubular.
- Ensuciamiento: Los problemas de ensuciamiento son importantes en calderas de 100% de biomasa, ya que los alcalinos procedentes del combustible se vaporizan a temperaturas de la cámara de combustión y pueden reaccionar con otros componentes de las cenizas y del propio combustible (especialmente sulfato, cloruro, sílice y fósforo) para producir compuestos de bajo punto de fusión que pueden causar sinterización y aglomeración en el horno. Esto puede mitigarse mediante la adición de compuestos con alto contenido en alúmina, calcio y magnesio.
- Cámara de filtros: Se añade una cámara de filtros para eliminar el contenido de partículas en los gases de combustión y así cumplir con los requisitos de la unidad de captura de CO<sub>2</sub>. Una cantidad excesiva de partículas en los gases de combustión llevados a la unidad de

captura de CO<sub>2</sub> puede causar la formación de espuma, lo que compromete a la correcta operación de la unidad. Por esta razón, el contenido de partículas en la entrada de la unidad de captura de CO<sub>2</sub> se fija en 5 mg/Nm<sup>3</sup> (en base seca al 6% de O<sub>2</sub>). Este valor es mucho más bajo que los límites ambientales establecidos.

- Manejo de cenizas: El sistema de manejo de cenizas se encarga de transportar las cenizas generadas en la planta de calderas, tanto las cenizas de fondo como las cenizas volantes de las diversas tolvas.

### 3) Isla de Potencia

La unidad de potencia está compuesta principalmente por una turbina de vapor y una línea de precalentamiento. El vapor sobrecalentado de la caldera se envía a la turbina, que consta de una sección de alta presión y otra de baja, todo conectado al generador en un solo eje.

La turbina de vapor tiene múltiples extracciones para el precalentamiento del condensado y el agua de alimentación de la caldera. El vapor LP también se extrae para el uso en el hervidor y la unidad de extracción en la planta de captura de CO<sub>2</sub>.

El vapor principal de la caldera, generado a 115 bar y 540 ° C, pasa a través de las válvulas de cierre y las válvulas de control y entra en la turbina. El vapor de escape de HP fluye hacia la turbina LP y luego baja hacia el condensador a 0.03 bar, 24 ° C.

El condensado reciclado del condensador se bombea a la planta de captura de dióxido de carbono y se precalienta en el condensador superior del extractor de amina.

Una optimización de la integración entre la planta de energía y la planta de captura de CO<sub>2</sub> permite maximizar la eficiencia del proceso.

Una parte del calor recuperado en la planta de captura de CO<sub>2</sub> y en la línea de compresión se recupera precalentando el condensado, evitando parcialmente el uso de calentadores de agua de alimentación de LP. Todo el vapor de LP requerido para la planta de absorción de CO<sub>2</sub> es proporcionado por extracción de la etapa LP de la turbina de vapor.

### 4) Unidad de captura de CO<sub>2</sub>

Es un proceso de captura de CO<sub>2</sub> por postcombustión, a través de disolvente químico (etanolamina). Se considera el 90% de captura de CO<sub>2</sub> del gas de combustión.

El gas de combustión limpio con valores de NO<sub>2</sub> menores de 20 ppm y de SO<sub>x</sub> menores de 10 ppm se envía a la torre de absorción de CO<sub>2</sub>. En el proceso de la captura no se espera un aumento del NO<sub>2</sub> debido a la baja cinética del proceso.

El gas de combustión tratado fluye a la torre de enfriamiento directo donde se pone en contacto con el agua en circulación. El gas de combustión se enfría y se limpia, y luego fluye hacia el absorbedor de MEA.

En el absorbente, el gas de combustión se pone en contacto primero con una solución de MEA semi-magra, en la sección inferior de la torre, y con una solución magra completamente despojada en la parte superior de la torre. El gas de síntesis se lava y se

enfría en la sección superior de la torre con una corriente de agua circulante y con un intercambiador de calor externo.

El lavado de agua en la parte superior de la torre captura cualquier arrastre MEA. El gas de combustión sale de la parte superior de la torre y va a la pila después de ser recalentado con los gases de combustión calientes en la entrada de la unidad para evitar un penacho excesivo en la salida de la pila.

La amina del fondo se bombea a la sección de regeneración. Antes del intercambio de calor con la amina caliente eliminada del separador, el MEA rico se divide en dos corrientes: una fluye al separador y la restante al tambor de destello. El MEA flasheado se convierte en la solución semi-magra usada en la sección inferior del absorbedor, mientras que el MEA eliminado en el regenerador es el MEA magro usado en la sección superior del absorbedor.

#### 5) Unidad de compresión y secado del CO<sub>2</sub>

El CO<sub>2</sub>, debe comprimirse hasta 110 barg, antes de la exportación para el almacenamiento, el cual en estas condiciones es un fluido supercrítico (punto crítico: 31.1 °C; 73.9 bar).

Características del CO<sub>2</sub>:

Caudal: 85,9 t/h

Presión: 110 barg

Temperatura: 32 °C

Pureza: > 99,9% peso

Como descripción general, el CO<sub>2</sub> entrante a baja presión está saturado con agua a una temperatura cercana a la temperatura atmosférica. Después de la separación de posibles arrastres de líquidos, la corriente de CO<sub>2</sub> se comprime en la primera y segunda etapa de un compresor centrífugo. El enfriamiento entre etapas y la separación de agua se proporcionan en la salida de las dos primeras etapas de compresión. El enfriamiento se obtiene mediante el precalentamiento del condensado frío seguido del enfriamiento con aire o agua.

El CO<sub>2</sub> de la 2ª etapa se canaliza a través de la unidad de deshidratación, donde se elimina la humedad del agua y se seca el gas. Los secadores están diseñados para producir productos de CO<sub>2</sub> con un contenido final de agua inferior a 10 ppmv. La deshidratación se lleva a cabo a través de un desecante sólido, como Alúmina Activada y Tamices Moleculares.

La alúmina activada cumple con las especificaciones de agua de 10 ppm en gas seco, mientras que los tamices de mol que alcanzan menos de 1 ppm de CO<sub>2</sub> se comprimen aún más en un compresor de dos etapas equipado con intercambiadores entre etapas. El CO<sub>2</sub> supercrítico a 74 bar es bombeado por la bomba de CO<sub>2</sub> a 110 bar hacia la tubería para su entrega al sitio donde se vaya a transportar.



#### 4.4.1. Comparación de beneficios entre una planta BECCS y una de Biomasa

A continuación, se muestra una comparación según beneficios de una planta de biomasa con tecnología de captura de CO<sub>2</sub> y una sin esta última tecnología.

Para esto se han tomado datos y características del documento *Biomass Ccs Study* [38].

La comparación que se va a realizar es un análisis de rentabilidad entre las dos opciones que se proponen. Por un lado, se cuenta con una planta de producción de energía eléctrica a partir de biomasa y por otro, con la misma planta, pero añadiéndole la tecnología de captura de CO<sub>2</sub>.

Para esto se han tomado unos valores base del documento anteriormente citado:

Horas de funcionamiento: 7710 h/año

Energía térmica producida: 211 MWt

Energía eléctrica producida: 68,6 MWe

Consumo eléctrico de la planta base: 8,6 MWe

Coste de mantenimiento CAC: 1380000 €/año

Consumo eléctrico CAC: 11 MWe

Emisiones: 85,9 t CO<sub>2</sub>/h

Conociendo además las siguientes fórmulas:

$$MWe \text{ neto} = MWe \text{ bruto} - MWe \text{ consumo planta}$$

$$\eta = \frac{MWe \text{ neto}}{MWt} \times 100$$

$$\text{Beneficio} = \left( MWe \text{ neto} \times \text{€ MWe} \times \frac{Hf}{\text{año}} \right) - \left( E t \frac{CO_2}{h} \times \frac{Hf}{\text{año}} \times \text{€ E Co}_2 \right) - M\text{Antenimiento CAC}$$

Además, se supone una vida útil de la planta de CAC de 15 años.

En la siguiente tabla se observan los diferentes valores de cada una de las plantas.

	Planta sin tecnología de CAC	Planta con tecnología de CAC
<b>Mwe bruto</b>	68,5	68,5
<b>Consumo eléctrico planta (Mwe)</b>	8,6	8,6
<b>Consumo CAC (Mwe)</b>	0	11
<b>MWe neto</b>	59,9	48,9
<b>Rendimiento (%)</b>	28,38862559	23,17535545
<b>Emisiones (t CO<sub>2</sub>/h)</b>	85,9	0
<b>Mantenimiento CAC (€/año)</b>	0	1380000
<b>Inversión CAC (€)</b>	0	62998452
<b>Coste inversión por año CAC</b>	0	4199896,8

Tabla 4-1, valores de cada planta. Fuente: Realización propia

Como podemos observar en las fórmulas, el beneficio variará principalmente según el precio de venta de la energía eléctrica producida y del coste añadido debido a las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Para esto, se realiza una ratio según estos dos valores, que será:

$$R = \frac{\text{€ MWe}}{\text{€ t CO}_2}$$

Se dan diferentes valores a ambos parámetros, para así obtener una curva según beneficio y valor de la ratio.

Para el precio de venta de la electricidad producida se han dado valores de 25,50,75,100 y 150 €/MWe.

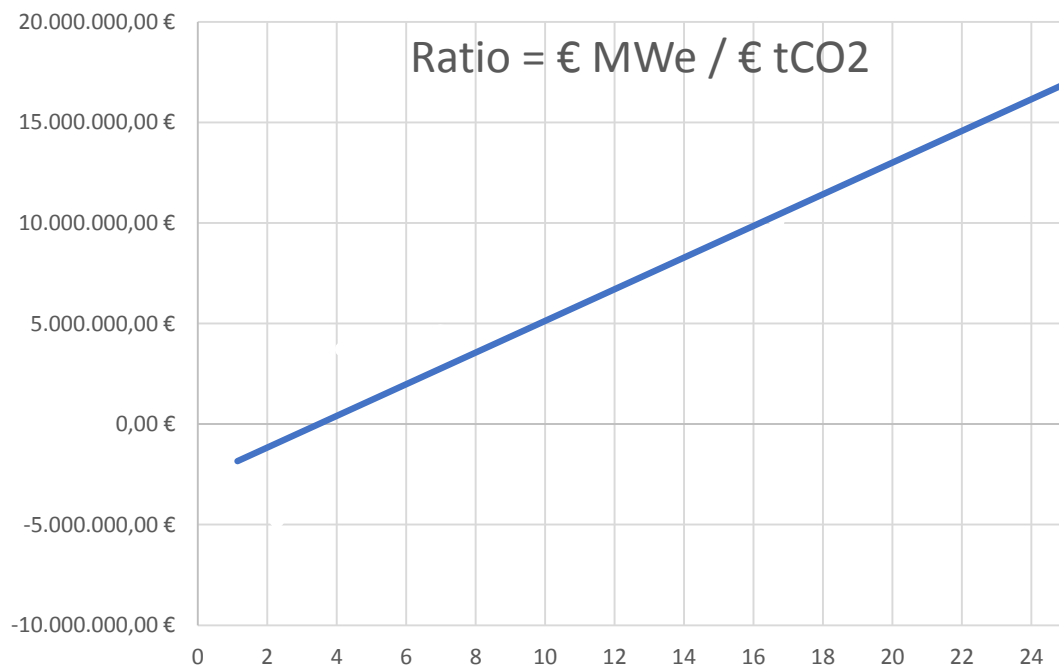
Para los costes de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera se han dado valores de 6, 14, 32 y 22 €/tCO<sub>2</sub>. Estos valores se han tomado debido a que son los costes reales que se han dado en los últimos años [39].

A continuación, se muestra en la tabla la diferencia de beneficio de cada situación respecto al valor de la ratio.

<b>R</b>	<b>Diferencia Beneficio: Sin CAC - Con CAC</b>
<b>1,136363636</b>	-6.870.211,20 €
<b>1,745810056</b>	-1.783.831,68 €
<b>2,272727273</b>	-4.749.961,20 €
<b>3,409090909</b>	-2.629.711,20 €
<b>3,491620112</b>	336.418,32 €
<b>4,166666667</b>	3.726.412,80 €
<b>5,237430168</b>	2.456.668,32 €
<b>5,681818182</b>	1.610.788,80 €
<b>6,818181818</b>	3.731.038,80 €
<b>6,983240223</b>	4.576.918,32 €
<b>8,333333333</b>	5.846.662,80 €
<b>8,729050279</b>	6.697.168,32 €
<b>10,47486034</b>	8.817.418,32 €
<b>12,5</b>	7.966.912,80 €
<b>16,66666667</b>	10.087.162,80 €
<b>20,83333333</b>	12.207.412,80 €
<b>25</b>	14.327.662,80 €

Tabla 4-2, valores de R y diferencia beneficios. Fuente: Realización propia.

En forma de curva promedio obtenemos:



Gráfica 1, valor de R. Fuente: Realización propia

Como se puede observar en la gráfica, a medida que aumenta el valor de la ratio se obtiene un mayor beneficio en la planta sin captura que en la que sí cuenta con esta tecnología.

Además, en la tabla anterior se observa que a partir de un valor aproximado de  $R=3,45$ , la planta sin CAC tiene mayores beneficios. Al ser un valor de R relativamente bajo, se puede deducir que en la mayoría de los casos la planta sin tecnología de captura de  $CO_2$  tendrá mayores beneficios.

Por este motivo, para que sea rentable la implementación de la tecnología de CAC será necesario que el precio pagado por las emisiones de  $CO_2$  sea muy alto.

## 5. BECCS en el futuro de la Unión Europea

---

Las emisiones negativas proporcionadas por BECCS son, según la Unión Europea, la esperanza para mitigar el cambio climático. Para analizar esto, se va a estudiar el futuro de esta tecnología en la UE, teniendo en cuenta cuales son los objetivos que alcanzar, la tecnología necesaria a implantar y la posibilidad de que esto ocurra.

### 5.1. Marco político y los objetivos a alcanzar

En los últimos años la Unión Europea ha tomado consciencia del problema del calentamiento global, es por esto por lo que ha regulado unos objetivos a alcanzar por los países miembros.

Entre ellos se encuentran los distintos horizontes y el acuerdo de París, no sin antes nombrar el predecesor de ellos, el protocolo de Kioto [35] [36] [37] [38].

#### 5.1.1. Protocolo de Kioto

Es un protocolo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, realizado el 11 de diciembre de 1997. En él, los países industrializados acordaron una reducción de las emisiones de GEI en un 5% para el 2008-2012 en comparación con las emisiones de 1990, para así disminuir el cambio climático. El acuerdo entró en vigor en febrero del 2005. En noviembre de 2009 los países que habían ratificado el acuerdo eran 187 (Estados Unidos no estaba entre estos) [39] [40].

Sus objetivos se basaron principalmente en las emisiones de los seis gases de efecto invernadero producidos de forma antropogénica: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido nítrico ( $\text{N}_2\text{O}$ ), y los otros tres son tipos de gases industriales fluorados.

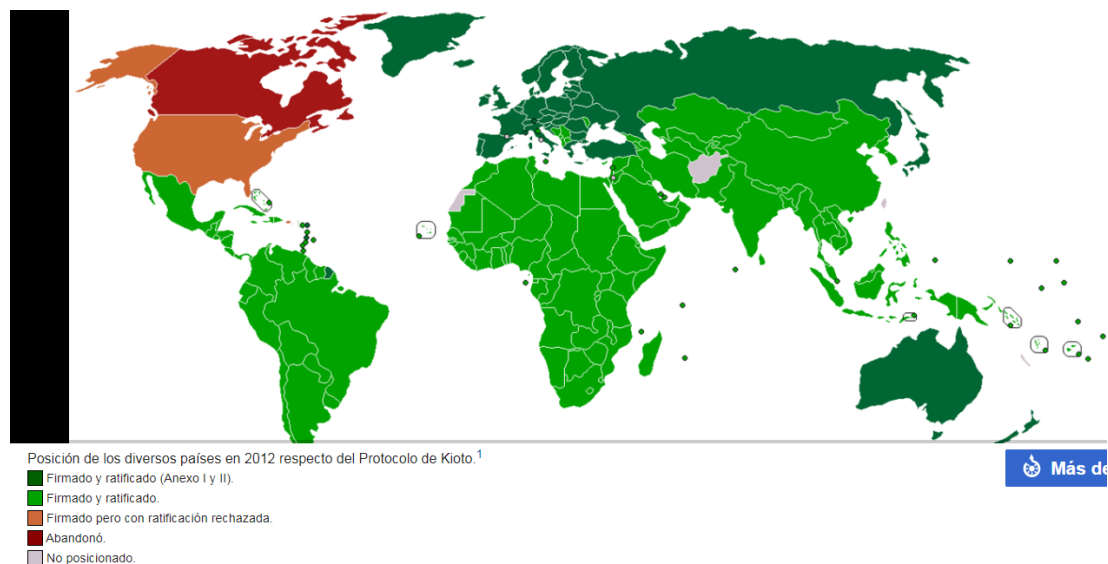


Ilustración 5-1, Países protocolo de Kioto. Fuente: <https://canalhistoria.es/hoy-en-la-historia/se-firma-el-protocolo-de-kioto/>

### 5.1.2. Acuerdo de París

En diciembre de 2015 se celebró la Conferencia de París sobre el Clima, en la cual participaron 195 países que firmaron el primer acuerdo mundial sobre el clima. El acuerdo establece un plan de acción para evitar el calentamiento global y así limitar el aumento de temperatura en 2 °C [42].

Los Gobiernos que formaron parte acordaron:

- Mantener el aumento de temperatura muy por debajo de 2 °C sobre los niveles preindustriales.
- Intentar limitar el aumento a 1,5 °C para reducir los riesgos del cambio climático.
- Aplicar reducciones basadas en los mejores criterios científicos disponibles tras haber alcanzado las emisiones su nivel máximo.

Respecto al plan de seguimiento, los Gobiernos decidieron:

- Reunirse cada cinco años para ir fijando objetivos más ambiciosos.
- Informar del estado particular de cada país a los demás Gobiernos.

Además, el pacto incluye:

- Una ayuda internacional a los países en desarrollo
- Un reconocimiento a la importancia de reducir los daños y perjuicios al mínimo debido a los efectos del cambio climático
- Una aceptación de la necesidad de una cooperación y actuación en emergencias, así como la necesidad de sistemas de alerta temprana.

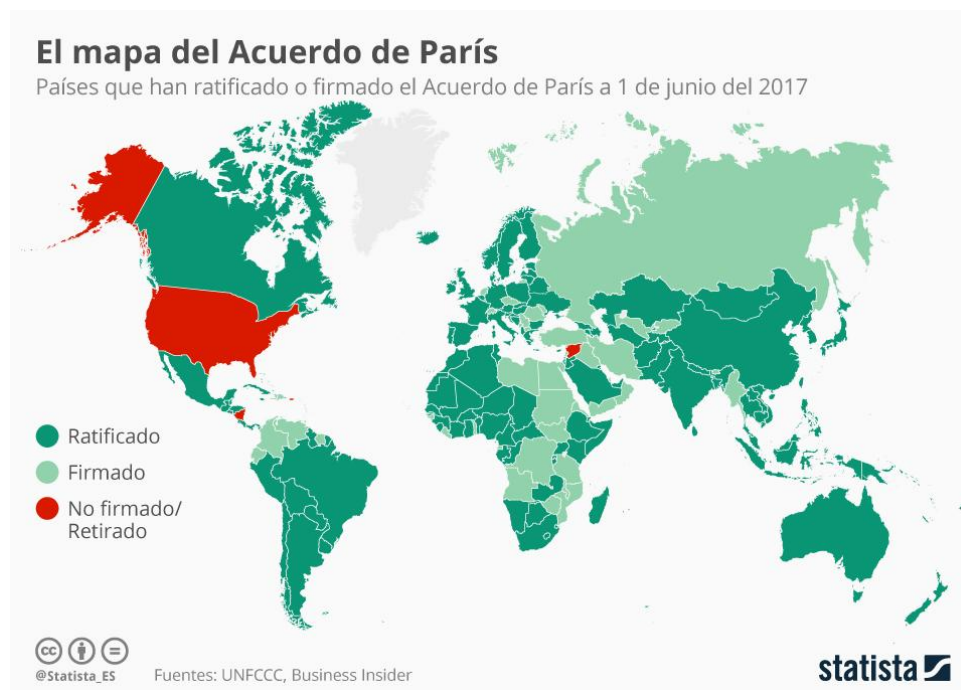


Ilustración 5-2, Países acuerdo de París. Fuente:  
<https://es.weforum.org/agenda/2017/06/que-paises-forman-parte-del-acuerdo-de-paris>

### 5.1.3. Horizontes de la Unión Europea

#### 5.1.3.1. Horizonte 2020

La directiva 2009/28/CE (“directiva sobre energías renovables”) estableció objetivos obligatorios a alcanzar en 2020 [41]:

- Reducir un 20 % las emisiones de gases de efecto invernadero en relación con los niveles de 1990
- Que el 20 % de la energía consumida en la UE provenga de fuentes renovables
- Lograr un ahorro de energía primaria de un 20 %, que se logra mediante la mejora de la eficiencia energética

Además, también incluye la participación de la energía renovable en el sector transporte de un mínimo de un 10 %.

Los biocombustibles representan entre 1 y 2,5 puntos porcentuales en la reducción de gases de efecto invernadero y en los objetivos de las energías renovables. Sin embargo, se espera que sea el principal contribuyente hacia los sub-objetivos del 10% en la reducción de gases de efecto invernadero y el 6% de renovables en el sector transporte.

### 5.1.3.2. Horizonte 2030

Fue adoptado por los dirigentes de la UE en octubre de 2014, y tiene como base el paquete de medidas sobre clima y energía de 2020 [43].

Los objetivos fundamentales del marco de clima y energía para 2030 son tres:

- Al menos una reducción del 40 % de las emisiones de gases de efecto invernadero en relación con los niveles de 1990
- Al menos el 27 % de la energía consumida por los estados miembros sea de fuentes de origen renovable
- Un ahorro de la energía primaria de al menos un 27 %

La normativa establecida favorece el acercamiento a una economía baja en carbono y a la creación de un sistema energético que:

- Cree crecimiento y empleo
- Aumente la seguridad de suministro eléctrico a los países miembros de la UE
- Reduzca la dependencia de la UE de las importaciones energéticas
- Garantice energía asequible a los consumidores

Inversiones necesarias: Durante el periodo 2011-2030, las inversiones adicionales anuales son de 38.000 millones de euros para el conjunto de la UE. Estas inversiones, serán compensadas en gran parte por el ahorro que supondrá el ahorro de combustible. El Consejo Europeo incluye medidas de seguridad para los países con menos nivel de renta, intentando garantizar la eficiencia del conjunto.

Costes del sistema energético: Los costes se basan principalmente en la renovación de un sistema energético ya envejecido. Según los estudios, el coste total del sistema energético en 2030 habrá experimentado un aumento del 0,15% del PIB de la UE.

### 5.1.3.3. Horizonte 2050

La hoja de ruta señala que en 2050 la UE deberá haber disminuido sus emisiones un 80% respecto a los niveles de 1990 exclusivamente mediante reducciones internas (es decir, sin recurrir a créditos internacionales) [44].

Este objetivo está en consonancia con el compromiso europeo de disminuir las emisiones un 80-95% en 2050, en el contexto de las reducciones que deben realizar los países desarrollados.

Para alcanzar esa meta, la UE tendrá que avanzar de manera sostenida hacia una sociedad con bajas emisiones de carbono, en la que las tecnologías limpias desempeñen un papel fundamental

Todos los sectores deben contribuir a la transición hacia una economía baja en carbono, en función de su potencial tecnológico y económico, principalmente en los sectores que más emisiones producen.

- Electricidad:

El sector eléctrico presenta el mayor potencial de reducción, ya que se espera que elimine totalmente sus emisiones de aquí al 2050.

La electricidad se obtendrá de fuentes renovables y fuentes bajas en carbono, como centrales térmicas con CAC. Para esto, serán necesarias numerosas inversiones.

#### ➤ Transporte

La reciente “Hoja de ruta hacia una economía baja en carbono en 2050”, prevé que el sector de transporte debe reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 60% en comparación con 1990 para el 2050.

A corto plazo, la mayoría de los cambios se realizarán en los motores convencionales de diésel y gasolina, ya que pueden ser más eficientes en el consumo del combustible.

A largo plazo, se espera un alto desarrollo en los vehículos híbridos y eléctricos, lo permitirá disminuir en gran cantidad las emisiones.

Por otro lado, los biocombustibles serán utilizados cada vez en mayor medida para el transporte por carretera y en la aviación, debido a la imposibilidad de hacer ciertos vehículos pesados eléctricos.

Las emisiones del transporte se pueden reducir a través de medidas que afectan a:

- La cantidad de actividad del transporte
- La eficiencia energética con la que el transporte se lleva a cabo
- La intensidad de los gases de efecto invernadero de la energía utilizada para realizar el transporte.

#### ➤ Edificios

Se espera una reducción en torno al 90% de las emisiones de los edificios residenciales y oficinas en 2050. La eficiencia energética de los edificios mejorará debido a:

- La incorporación de la tecnología de elementos pasivos a las nuevas construcciones
- La renovación de edificios antiguos para así mejorar su eficiencia
- Sustitución de los combustibles fósiles en climatización

#### ➤ Industria

Se espera que las industrias hayan reducido en más de un 80% sus emisiones para el 2050.

A partir de 2035, se aplicarán tecnologías de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, donde no sea posible reducir las emisiones mediante otros procedimientos.

En cuanto a gases distintos al CO<sub>2</sub>, se prevé importantes reducciones en las emisiones hasta niveles muy bajos.

#### ➤ Agricultura

Debido al esperado aumento de la demanda de alimentos, se espera proporcionalmente un incremento de las emisiones de GEI procedentes de la agricultura, pudiendo llegar a ser un tercio de las emisiones en 2050.



Es por esto por lo que el sector agrícola deberá disminuir las emisiones procedentes de los fertilizantes, el ganado, es estiércol. Además, deberá ayudar al almacenamiento de CO<sub>2</sub> geológico, en bosques y suelos.

Por último, es un punto importante la concienciación de la población sobre una dieta más saludable, con menos consumo de carne, lo que supondría una disminución importante de las emisiones de GEI.

## 5.2. BECCS en la Unión Europea

Para lograr los objetivos que se han indicado en el punto anterior, la Unión Europea tiene puesta sus esperanzas en las tecnologías de emisiones negativas. Esto es debido a que a día de hoy las emisiones de gases de efecto invernadero son tales, que para lograr el escenario de menos de 2°C por encima de los niveles preindustriales, no basta con emitir menos.

El IPCC tiene diversos modelos para atacar al calentamiento global. Entre ellos se encuentra el modelo P4 “Model Pathway P4”, el cual indica que la tecnología BECCS acumulará 1191 Gt de CO<sub>2</sub> para el año 2100. [47]

La mayoría de los estudios predicen que se van a sobrepasar las emisiones de CO<sub>2</sub>, para después retirar entre 450 y 1000 millones de toneladas de este contaminante para el año 2100. [45] [46] [48] [52]

En 2014 las emisiones globales de CO<sub>2</sub> ascendieron a 37,5 Gt, y con estos valores los científicos aseguran que los países deben reducir notablemente sus emisiones, ya que a este ritmo en 30 años las posibilidades de mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C para 2100 desaparecerán.

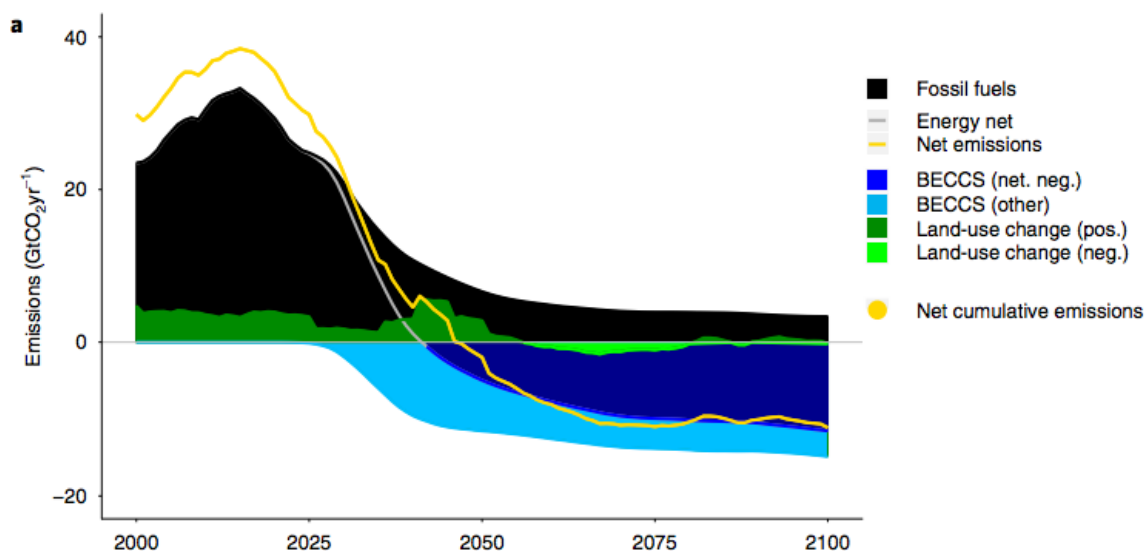


Ilustración 5-3, desarrollo de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Fuente: <https://airfreshener.club/quotes/chart-world-2100-emissions-carbon.html>.

Actualmente, como se ha explicado en este documento no existe la tecnología suficiente a gran escala para alcanzar este objetivo, por lo que el desarrollo en los años que vienen debe ser continuo y cumplir pequeños objetivos de realización.

Se están desarrollando dentro de la tecnología de BECCS tres vías, ya que el retraso tecnológico está suponiendo una dificultad para alcanzar los objetivos. Estas vías son:

- Biomasa 30% y combustibles fósiles 70% con CAC.

El primer método, el cual cuenta con un gran potencial, es aumentar la materia prima de biomasa de combustión conjunta en plantas de combustibles fósiles con tecnología de captura. Esto es debido a que el coste y la dificultad al modificar la planta ya existente para que acepte un 30% de biomasa como combustible tiene valores relativamente bajos. Debido a esto, se puede suponer que los primeros incrementos en la capacidad de BECCS se lograrán a través de esta forma. Se espera que en 2050 el 20% de la capacidad de BECCS consista en un 30% de biomasa en plantas de combustibles fósiles con CAC.

- Añadir tecnología de captura a plantas ya existentes de bioenergía.

La segunda vía es la adaptación de las plantas de bioelectricidad añadiendo tecnología de captura de CO<sub>2</sub>. El contrapunto a esto es que no todas las plantas podrán adaptarse a esta tecnología, ya que la mayoría tienen una potencia nominal de 10 MW, valor muy bajo que no hace rentable la introducción de dicha tecnología. Además, se debe añadir que las plantas con una potencia de este orden no pueden pedir subvenciones. Se estima que solo el 20% de las plantas de bioenergía podrán ser adaptadas.

También se debe añadir que en el artículo 33 de la directiva CCS (Directiva 2009/31/SE) se exige que todas las instalaciones de biomasa con una potencia superior a 300 MW se construirán con la tecnología CAC, esto excluye a una gran parte de las instalaciones.

- Planta BECCS completa.

El tercer enfoque es la construcción de instalaciones eléctricas de BECCS, pudiendo desarrollarse desde cero o con la modificación de una planta de combustibles fósiles con CAC. Se espera que en el periodo 2030-2050 se instalen unos 14 GW de capacidad.

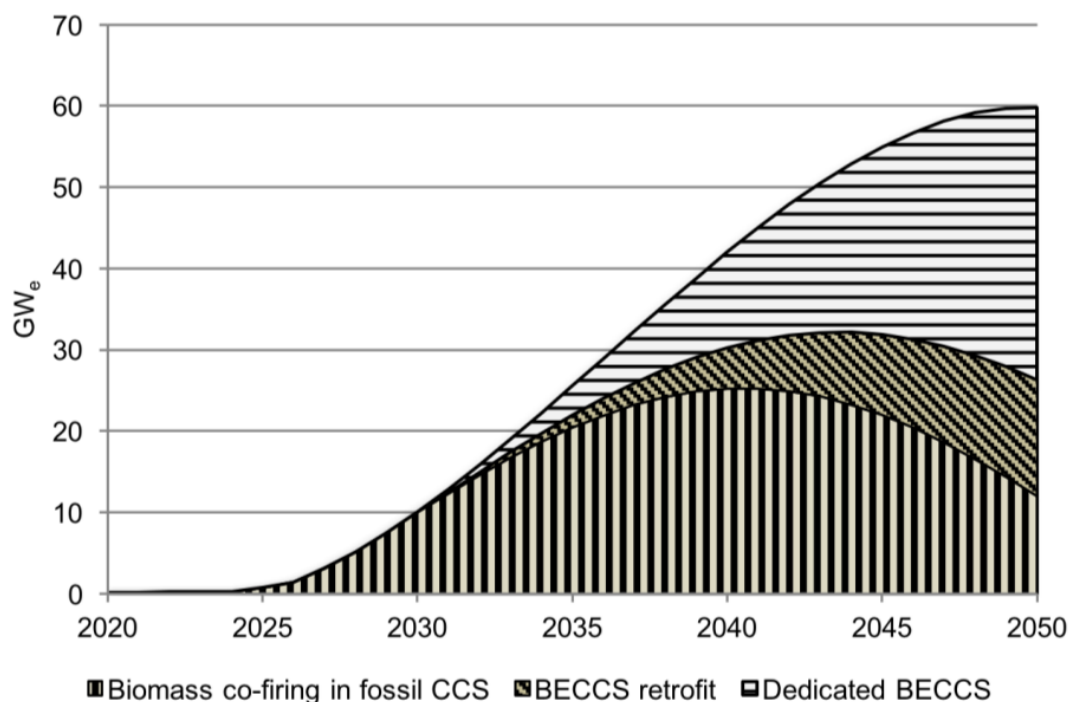


Ilustración 5-4, GW de las tres actuaciones. Fuente: Berg, T. (2016). On the deployment of Bio-CCS in the EU: Barriers and policy requirements for a 2. C pathway

Los diversos modelos predicen las capacidades necesarias para llegar a los objetivos del escenario de 2°C. Para esto se establecen unos valores:

En 2025, la instalación de BECCS debe ser de 16 GW, en 2035 de 50 GW y en 2050 de entre 54 y 64 GW. Esto implica que para 2050 deben instalarse más de 40 GW adicionales y modificar todas las plantas existentes de bioenergía deben ser equipadas con tecnología de CAC. Además, para capturar el CO<sub>2</sub> necesario, deben estar a plena carga aproximadamente el 80% del tiempo.

De acuerdo con el informe del IPCC de 2014, entre 2011 y 2100 no podían ser emitidos más de 1000 mil millones de toneladas (1000 Gt) de CO<sub>2</sub> para tener una probabilidad del 66% de alcanzar el objetivo de 2°C. Desde la publicación de este informe, se han emitido más de una quinta parte.

Respecto a la retirada de CO<sub>2</sub> de la atmósfera a partir de emisiones negativas, según Smith et al (2016), se requiere la extracción de 3,3 Gt de CO<sub>2</sub> al año a partir de 2050, para alcanzar los niveles necesarios del escenario 2°C.

Más recientemente, Marcucci et al. (2017) llegó a la conclusión de que para limitar el calentamiento a 2°C ya no es suficiente solo con emitir menos, sino que es preciso el desarrollo de las emisiones negativas a gran escala.

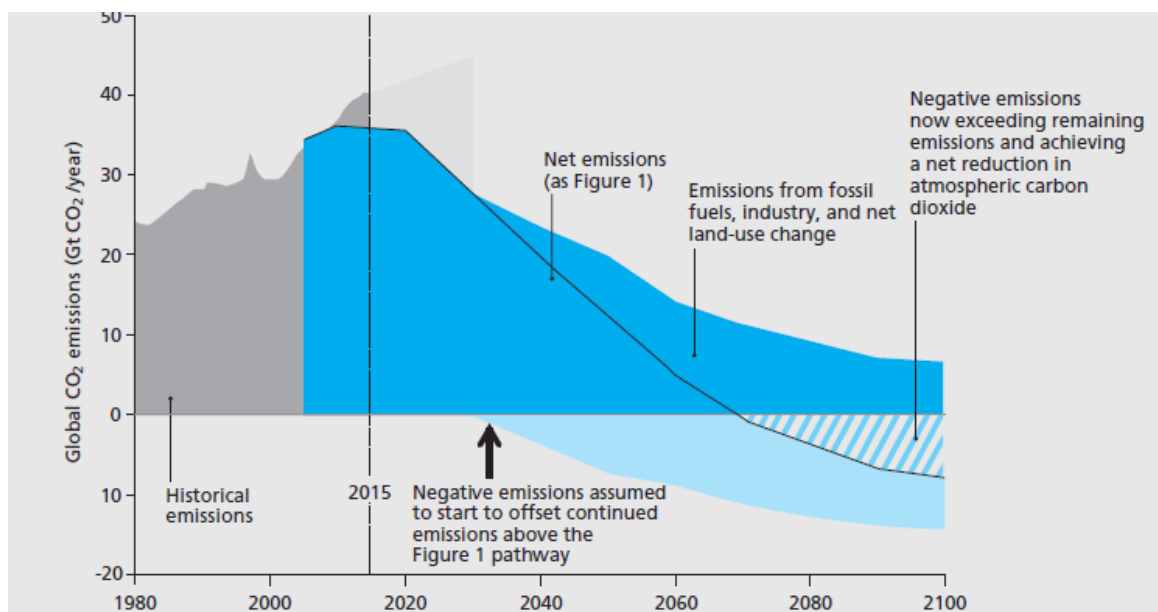


Ilustración 5-5, Emisiones negativas. Fuente: European Academies' Science Advisory Council. (2018). Easac Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets?

Es importante añadir la necesidad de financiación por parte de la UE, debido al alto coste que supone la implementación de la tecnología de BECCS. Esta financiación debe ser mayor a la actual dada para la bioenergía, que asciende a 172 €/MWh, ya que el uso de tecnología de CAC tiene unos costes asociados mucho mayores, causando que no sea rentable la implementación de esta tecnología.

### 5.3. Rutas alternativas

Además de las limitaciones tecnológicas con las que cuenta la tecnología de biomasa con captura de CO<sub>2</sub>, tiene también numerosas desventajas que no pueden ser obviadas por la Unión Europea. [49] [50] [51] [52].

#### 1) Emisiones reales de BECCS

Hay varias emisiones que se deben considerar, y que, debido a su dificultad de cálculo, solo se estiman:

- Existe un lapso entre que se cosecha y el nuevo crecimiento. La regla es que, si se corta un bosque, se necesita el mismo tiempo de crecimiento para que absorba los mismos niveles de carbono. Para que el CO<sub>2</sub> sea negativo, absorberlo debe ser mayor con el uso de la biomasa que sin él.
- Cambio del uso de la tierra. Aquí se encuentran el directo y el indirecto. Al aumentar las plantaciones bioenergéticas, el terreno utilizado para otros fines tendrá que desplazarse, causando numerosas emisiones.

- Las emisiones provenientes de la producción de la biomasa, la cadena de suministro y de CAC reduce en gran medida las emisiones absorbidas.
- Emisiones de otros contaminantes como el  $N_2O$ , se incrementan, y tiene un potencial en el calentamiento global de unas 300 veces más. Solo el uso de fertilizantes podría provocar que la bioenergía se convierta en una fuente de gases de efecto invernadero.

## 2) Barreras técnicas y costes

Para conseguir los objetivos del acuerdo de París, se necesita que BECCS funcione a gran escala. Los costes son difíciles de estimar, aunque en una síntesis se da un coste a BECCS de 86-172 €/ t  $CO_2$ , (en 2018, el precio de carbono en el comercio de emisiones de la UE fue de 8-17 €/t  $CO_2$ ).

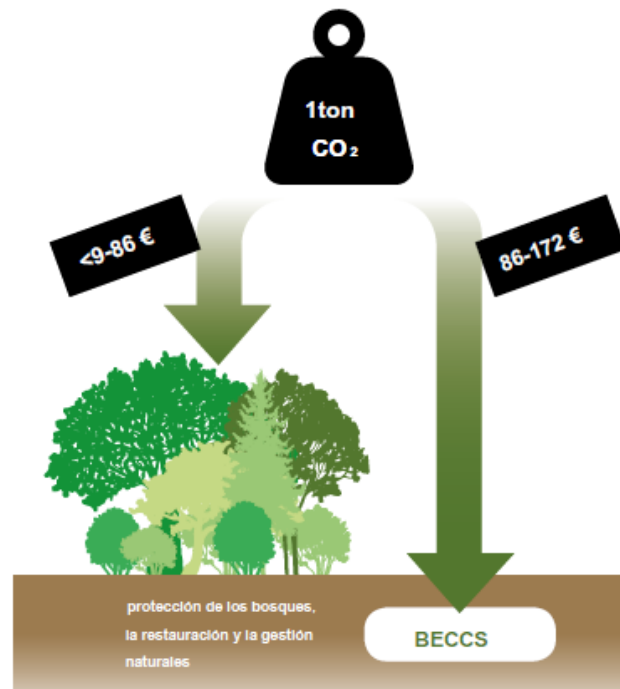


Ilustración 5-6, coste BECCS.

Fuente: Fern. (2018). Six problems with BECCS

### 3) Terreno necesario y el precio de los alimentos

A medida que va aumentando la población humana, también lo va haciendo la demanda de alimentos. Esto produce una necesidad de terreno ya sea para la ganadería como para la agricultura con un aumento exponencial. Los cultivos para BECCS requerirán de 0,1 a 0,4 hectáreas de tierra por tonelada de CO<sub>2</sub> capturado. Esto correspondería a la utilización del 25 % de las tierras cultivables. Además, este cambio de uso del terreno podría suponer un gran deterioro en el suelo disminuyendo su productividad. Debido a esto, el uso de BECCS aumentaría el precio de los alimentos.



Ilustración 5-7, terreno necesario para BECCS.  
Fuente: Fern. (2018). Six problems with BECCS.

### 4) Daños a la biodiversidad

Entre 1970 y 2012, la biodiversidad se redujo en un 58% debido al aumento de población y la necesidad del uso de la tierra. Si un bosque se convierte en un cultivo energético, la biodiversidad de ese lugar se pierde en mayor parte. A gran escala, podría reducir el número de especies terrestres.



Ilustración 5-8, daños a la biodiversidad. Fuente: Fern. (2018). Six problems with BECCS.

## 5) Consumo de agua

El consumo a gran escala de plantaciones energéticas aumentaría exponencialmente el consumo de agua en la Tierra. Esto supondría por una parte el aumento del precio de este recurso (hasta un 330% en Asia y un 460% en América Latina). Además, en la actualidad casi la mitad del planeta vive en zonas con escasez de agua, situación que va a aumentar exponencialmente con el uso de BECCS a gran escala (se duplicaría el consumo actual).

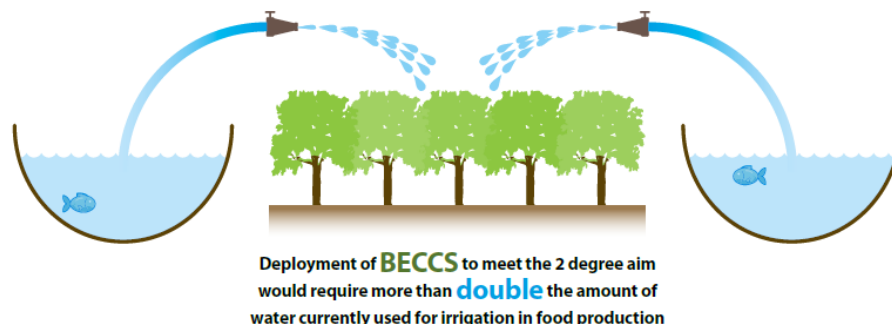


Ilustración 5-9, consumo de agua. Fuente: Fern. (2018). Six problems with BECCS.

## 6) Barrera a la transición energética

Al aumentar el valor de la tecnología de BECCS se producen a su vez grandes inversiones a esta tecnología, pudiendo reducir el interés en otras energías renovables como la solar, la eólica, etc.

Es por estos motivos, por los que se están buscando otras posibles alternativas para llegar a los objetivos del acuerdo de París, sin la necesidad de recurrir a gran escala al uso de las BECCS. Entre estos están:

- Electrificación renovable. Aumentar el uso de las energías renovables para la producción de energía eléctrica, retirando el uso de los combustibles fósiles en las centrales eléctricas y aumentar la inversión en automóviles eléctricos, obligando que en 2030 todos sean así.
- Aumentar la eficiencia. Las tecnologías disponibles deben tener una eficiencia mayor, ya que esto ayuda directamente a las emisiones. Para esto, a partir de 2015 solo deberían venderse electrodomésticos, automóviles, aviones, etc. altamente eficientes.
- Intensificación agrícola. Aumentar el rendimiento de los cultivos, adoptando el 80% de ellos los sistemas ganaderos más eficientes que incluyen mejoras genéticas.
- Bajo contenido de CO<sub>2</sub>. Atacar las emisiones de gases de efecto invernadero que no son CO<sub>2</sub>, utilizando e implantando tecnologías más eficientes y desarrolladas. Por ejemplo, para 2050 las emisiones de metano deben reducirse un 100% en el sector del petróleo y el gas, y en un 90% para la minería del carbón. También reducir

significativamente las emisiones procedentes del ganado ya que para 2050 debería reducirse a gran escala el consumo de carne.

- Reducción de la población mundial. La reducción de la fertilidad está aumentando notablemente, lo que supondrá para 2100 un descenso hasta los 6,9 mil millones de habitantes.
- Cambio del estilo de vida. La mayoría de la población mundial debe adoptar estilos de vida más sostenibles, que incluye en 2050 la adopción de dietas más saludables con un bajo consumo en carne. Además, la disminución de los automóviles privados y el uso del avión, y la disminución del consumo.



## 6. Conclusiones

---

El calentamiento global es una realidad que está cada vez más a la orden del día, es por esto por lo que, con el Acuerdo de París, numerosos países aceptaron cumplir unos objetivos relacionados con las emisiones de GEI. Para la UE, uno de los caminos para cumplir estos objetivos es el uso de la tecnología de BECCS, ya que es considerada una tecnología con emisiones negativas. Como se ha indicado anteriormente, el IPCC confía en esta tecnología a gran escala en uno de sus escenarios de mitigación: *Model Pathway P4*, en el cual BECCS sería la responsable de acumular para el año 2100, 1191 Gt de CO<sub>2</sub>.

En este trabajo se ha realizado un estudio de todos los parámetros relacionados con dicha tecnología, analizando la posibilidad de dejar en manos de las BECCS el cumplimiento de los objetivos del acuerdo de París.

A partir de este estudio, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- La confianza de la UE depositada en la tecnología de BECCS parte de la premisa de que se trata de una tecnología con emisiones netas negativas. Como se ha explicado en este documento, el análisis que se hace para llegar a esta conclusión no añade ciertos parámetros que aumentan las emisiones netas de los biocombustibles y de la biomasa. Los análisis de ciclo de vida realizados no contabilizan de una manera adecuada las emisiones por cambio indirecto del uso del suelo, ni las emisiones reales que pueden producirse al hacer cultivos energéticos a gran escala, así como no son contabilizadas las emisiones debidas a escapes al almacenar el CO<sub>2</sub>. Es por esto por lo que se puede concluir que la afirmación de que BECCS tiene emisiones netas negativas no es realmente cierta.
- Por otra parte, se ha estudiado el aumento exponencial de consumo de biomasa para el desarrollo a gran escala de la tecnología de BECCS. El aumento a gran escala de la biomasa conlleva diferentes desventajas que se deben tener en cuenta:
  - Para lograr los objetivos, la cantidad necesaria de plantaciones y cultivos energéticos que se necesitará será de 0,1 a 0,4 hectáreas por tonelada de CO<sub>2</sub> capturado, lo que equivale a 1-2 veces el tamaño de la India. Esta utilización del terreno producirá un deterioro considerable de este.
  - Debido a la necesidad de terreno requerida, el área disponible para la agricultura y la ganadería se reduciría notablemente (un 25%), lo que produciría un aumento del precio y una disminución considerable de los recursos. Además, los alimentos deberán ser desplazados en mayor volumen, lo que supondría a su vez un aumento de la contaminación debida al transporte.

- El consumo de agua necesario para mantener las plantaciones energéticas sería tal, que el precio de este recurso subiría hasta más de un 400% en algunas zonas. Además, en muchos lugares de la tierra se cuenta con una gran falta de este recurso, que se vería empeorada por el uso de esta tecnología.
  - Por otro lado, se tiene la deforestación y los daños a la biodiversidad. Para poder producirse biomasa a gran escala, será necesario eliminar ciertas zonas como bosques para la plantación de los cultivos energéticos. Este hecho no solo produciría una reducción de centros de captación naturales de CO<sub>2</sub>, sino que, además, la biodiversidad del lugar se vería afectada de tal forma que podrían hasta extinguirse ciertas especies.
  - Para la manutención de los cultivos energéticos, se precisaría además de una gran cantidad de fertilizantes, lo que supondría una gran emisión de otros GEI, como el NO<sub>2</sub>, algunos peores y más contaminantes que el CO<sub>2</sub>.
- Para 2050, y por supuesto 2100, será preciso una cantidad de MW instalados de esta tecnología muy alta. Como se ha indicado en este documento, para llegar a los objetivos del acuerdo de París, sería preciso instalar:

<b>Año</b>	<b>Potencia Instalada (GW)</b>
<b>2025</b>	16
<b>2035</b>	50
<b>2050</b>	54-64

Tabla 6-1, potencia necesaria instalada en el futuro. Fuente: Realización propia. Datos: Fuente: Berg, T. (2016). On the deployment of Bio-CCS in the EU: Barriers and policy requirements for a 2. C pathway

En la actualidad no hay plantas desarrolladas ni en funcionamiento de tecnología BECCS.

En el caso de la tecnología de CAC, nos encontramos solo con tres plantas en funcionamiento en Europa, y con otras tres que se espera que entren en funcionamiento en los próximos años. Se debe añadir que la tecnología de captura de carbono, debido al alto consumo que tiene en una planta, disminuye en gran medida el rendimiento (hasta diez puntos).

Por otro lado, solo se están evaluando seis plantas de BECCS para poder empezar a implantar esta tecnología en la UE:

<b>Pais</b>	<b>Captura</b>
<b>Artenay (Francia)</b>	45000 tCO <sub>2</sub> /año
<b>Norrköping (Suecia)</b>	170000 tCO <sub>2</sub> /año
<b>Värö (Suecia)</b>	800000 t CO <sub>2</sub> /año
<b>Domsjö (Suecia)</b>	260000 tCO <sub>2</sub> /año
<b>Norrköping (Suecia)</b>	170000 tCO <sub>2</sub> /año

Skåne (Suecia)	500-5000 tCO <sub>2</sub> /año
----------------	--------------------------------

Tabla 6-2, plantas en evaluación. Fuente: Realización propia. Datos: Berg, T. (2016). On the deployment of Bio-CCS in the EU: Barriers and policy requirements for a 2. C pathway.

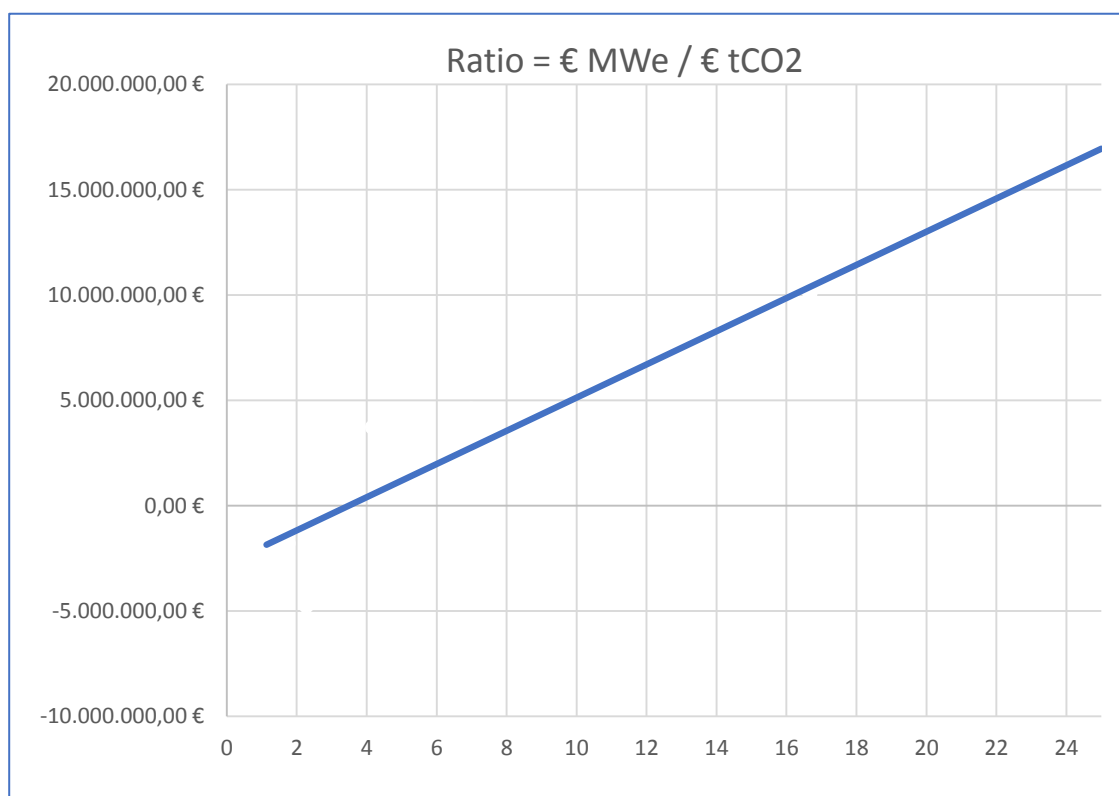
Como se puede observar, cinco de ellas se encuentran en Suiza, siendo necesario el desarrollo de esta tecnología en todos los países de la UE para poder alcanzar los objetivos. Además, ninguna de ellas ha definido aún el año de inicio de operación.

La opción de implementar tecnología de CAC a plantas ya existentes de biomasa es compleja, ya que la mayoría de dichas plantas cuentan con una potencia de alrededor de 10 MW. En el artículo 33 de la directiva CCS (Directiva 2009/31/SE) se exige que todas las instalaciones de biomasa con una potencia superior a 300 MW se construyan con la tecnología CAC, lo que produce que la mayoría de las plantas de biomasa no sea adecuada la instalación de dicha tecnología.

Además, usar la biomasa como combustible hace que la eficiencia caiga.

Con todo esto se puede concluir que, aunque la esperanza esté puesta en la tecnología de BECCS, no se están realizando estudios ni infraestructuras suficientes para alcanzar los valores adecuados para el cumplimiento de los acuerdos de París.

- Para la implantación de esta tecnología, uno de los factores más importantes son las limitaciones económicas. En este trabajo se ha realizado un estudio sobre la rentabilidad y los beneficios de una planta de biomasa respecto a una planta de BECCS. Se ha realizado una ratio para comprobar como varía el beneficio según el precio de la electricidad y el coste de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.



Gráfica 2, valor del Ratio. Fuente: Realización propia.

Como se observa en la gráfica, a medida que aumenta la ratio, aumenta la diferencia de beneficio de una planta sin captura y una planta con BECCS. Se observa que es más rentable una planta sin tecnología CAC la mayor parte del tiempo.

Se puede concluir por tanto que para que sea rentable económicamente instalar CAC el precio de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera debe tener valores muy altos. Además, la instalación de esta tecnología también reduce notablemente la eficiencia de la planta, por lo que el interés en esta disminuye más aún.

- Como se ha indicado, la tecnología no está realmente desarrollada y los costes de implantación son realmente altos. Es por esto por lo que si se quiere llegar a los objetivos se precisan numerosas actuaciones por parte de las instituciones gubernamentales.
  - Dado el gran volumen de desafíos técnicos, es preciso la realización de modelos para que el negocio obtenido por parte de BECCS sea viable.
  - Es necesario el establecimiento de un marco regulatorio más adecuado para que se puedan alcanzar los objetivos.
  - Para desarrollar la tecnología de BECCS a pesar de las altas inversiones necesarias y de la complejidad tecnológica con la que cuenta, es preciso que se creen incentivos económicos lo suficientemente buenos para que las empresas inviertan en esta tecnología.

## 7. Propuestas de mejora

---

*“Necesitamos especialmente de la imaginación en las ciencias. No todo es matemáticas y no todo es simple lógica, también se trata de un poco de belleza y poesía.”*  
-Maria Montessori-

A lo largo de este trabajo, se ha realizado un estudio de la viabilidad económica y tecnológica de la tecnología de biomasa con captura y almacenamiento de dióxido de carbono.

El motivo de este estudio es debido a que la Unión Europea, así como el IPCC, han depositado grandes esperanzas en alcanzar el objetivo del Acuerdo de París (no superar los 2°C la temperatura de la Tierra respecto a los niveles preindustriales) en esta tecnología en algunos de sus modelos (Model Pathway P4).

Como se ha indicado en las conclusiones, BECCS tiene un futuro incierto. Dicha tecnología no está desarrollada, ya que en la actualidad no se cuenta con ninguna planta en funcionamiento. Por otro lado, el coste de implantación de esta tecnología es sumamente alto, a lo que se añade la importancia de la disminución de la eficiencia de las plantas. Esto, sin incentivos económicos y sin marcos regulatorios suponen que el futuro de las empresas esté fuera de esta tecnología.

Cuando a las desventajas anteriormente citadas se le añade el hecho de que las emisiones de GEI no se han cuantificado con valores reales (emisiones ILUC, etc.), el aumento del precio de los alimentos, el consumo excesivo de agua, etc., produce que se oscurezca más aún el futuro de la tecnología BECCS. Es por esto por lo que se buscan otras opciones.

Como propuestas de mejoras y posibles soluciones, expongo:

- El incremento de los incentivos económicos y la creación de marcos regulatorios no solo en la tecnología de BECCS, sino en las demás tecnologías de captura que existen.
- Aumento de la forestación y plantación de vegetación (como bosques), en diversas zonas, así como en sitios en los que la vegetación existente fue destruida (ya fuera por urbanización del terreno, extracción de recursos naturales, etc.).
- Ayudas económicas a las demás energías renovables, así como en estudios e investigación de estas tecnologías para poder aumentar su producción y eficiencia. Crear una legislación más estricta respecto al uso de las energías renovables.
- Crear legislaciones e incentivos económicos para concienciar y educar a la sociedad de los problemas relacionados con el calentamiento global.
- Intenta reducir en la medida de lo posible, el aumento de la demografía mundial, ya que el consumo del ser humano es el responsable de los problemas actuales.

- Aumentar el coste de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.
- Atacar a las emisiones de gases de efecto invernadero que no sean CO<sub>2</sub> de una manera estricta, como el metano, el NO<sub>2</sub>, etc.
- Cambio de mentalidad. Es preciso que la sociedad comprenda el problema, y que se identifique como causa responsable, ya que el calentamiento global es causado por el estilo de vida que llevamos, principalmente en los países desarrollados. Vivimos en una sociedad donde el capitalismo nos lleva a un consumo extremista, sin miramientos, del que realmente no somos conscientes.

Es preciso la concienciación de la ciudadanía, así como un cambio en nuestro estilo de vida. En la actualidad, la industria textil (ropa, calzado y complementos) emite 75600 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. [53] Por otra parte, la industria cárnica es la responsable del 14,5 % de las emisiones de gases de efecto invernadero. [54] [55] Si se concienciara a la sociedad y se adoptara un estilo de vida con un menor consumo de carne y ropa, por ejemplo, las emisiones de gases de efecto invernadero se reduciría notablemente.

Por todo esto, concluyo que un cambio de mentalidad, así como una educación adecuada y unos incentivos económicos aportados por las instituciones gubernamentales se podría lograr la mitigación del cambio climático.

## 8. Bibliografía

---

- [1] García Garrido, Santiago. (2014). *Centrales termoeléctricas de biomasa: plantas de biomasa*.
- [2] <http://www.energiza.org/index.php/biomasa-2/56-procesos-de-conversion-de-biomasa-en-energia>
- [3] [https://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/energia/cultivos\\_energeticos.asp](https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/cultivos_energeticos.asp)
- [4] <http://www.agromeat.com/244033/que-son-los-biocombustibles-ventajas-y-desventajas>
- [5] <https://www.inforural.com.mx/tag/biocombustibles/>
- [6] Rodríguez Gómez, Patricio. (2012). *Dimensionado y simulación de plantas de generación de energía eléctrica a partir de biomasa*
- [7] Padilla Romero, Padilla. (2017). *Estudio básico del grupo turbina alternador de una planta de generación eléctrica con biomasa de 50 MWe*.
- [8] Vega, Ó. G.-D. (2010). *Retos y oportunidades de la biomasa térmica en Europa del Este y Canadá*.
- [9] European Council. (2010). *INFORME DE LA COMISIÓN AL CONSEJO Y AL PARLAMENTO EUROPEO relativo a los requisitos de sostenibilidad para el uso de fuentes de biomasa sólida y gaseosa en los sectores de la electricidad, la calefacción y la refrigeración*.
- [10] European Commission. (2014). *State of play on the sustainability of solid and gaseous biomass used for electricity, heating and cooling in the EU*.
- [11] EurObserv'ER. (2017). *Solid biomass barometer*, (December 2017).
- [12] Giuntoli, J., Agostini, A., Edwards, R., & Marelli, L. (2017). *Solid and gaseous bioenergy pathways: input values and GHG emissions*.
- [13] Carvalho, I. De, & Nassar, A. M. (n.d.). *Greenhouse Gas Emissions from Bioenergy*.
- [14] Europea, Comisión. (2005) *Plan de acción sobre la biomasa*.
- [15] <http://science.sciencemag.org/content/359/6382/1328>

- [16] Europea, C. (n.d.). *Resumen de la evaluación de impacto*.
- [17] European Council. (2016). COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT Sustainability of Bioenergy. *Accompanying the Document Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources (Recast)*, 4/4(SWD 418 final), 9–130.
- [18] Staff, C., Document, W., & Assessment, I. (2012). *IMPACT ASSESSMENT*.
- [19] Padella, R., Giuntoli, M., Koebler, J., Bulgheroni, A., & Marelli, C. (2017). *Definition of input data to assess GHG default emissions from biofuels in EU legislation*.
- [20] Martínez Berges, Isabel. (2014). *Simulación del proceso de captura de CO<sub>2</sub> mediante los ciclos de carbonatación/calcinación de CaO integrado en plantas de producción de energía*.
- [21] <https://www.europapress.es/ciencia/laboratorio/noticia-avance-captura-co2-convertir-carbon-combustible-liquido-20181012195935.html>
- [22] Romero, G. M. (2017). *Estado de la tecnología de la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>. Modelado y optimización del proceso "Calcium Looping"*.
- [23] [https://cincodias.elpais.com/cincodias/2018/04/25/companias/1524669655\\_949060.html](https://cincodias.elpais.com/cincodias/2018/04/25/companias/1524669655_949060.html)
- [24] Calvo, A., & Marcos, B. M. (2016). *CAPTACIÓN DE CO<sub>2</sub> MEDIANTE CICLOS DE CARBONATACIÓN / CALCINACIÓN*.
- [25] Peris, P. M., Rodríguez, J. D. R., & Muñoz, C. B. (2011). *Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en la industria del cemento*.
- [26] Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (n.d.). *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono*.
- [27] Global CCS Institute. (2010) *Global Status of BECCS Projects 2010*.
- [28] Gough, C., Garcia-freites, S., Jones, C., Mander, S., Moore, B., Pereira, C. Welfle, A. (2018). *Challenges to the use of BECCS as a keystone technology in pursuit of 1.5 °C*, 1–9.
- [29] Heidug, W. (2013). *A look at incentive policies for BECCS Bio- CCS can provide 'negative emissions'*.
- [30] <https://hub.globalccsinstitute.com/publications/global-status-beccs-projects-2010/2-scientific-background-beccs>
- [31] Wil Burns & Simon Nicholson, (2017). *"Bioenergy and carbon capture with storage (BECCS): the prospects and challenges of an emerging climate policy response," Journal of Environmental Studies and Sciences, Springer; Association of Environmental Studies and Sciences, vol. 7*
- [32] Fajardy, Mathilde. Mac Dowell, Niall. (2017). *Can BECCS deliver sustainable and resource efficient negative emissions?*



- [33] Executive Committee of the IEA GHG Programme. (2009). *Biomass ccs study*.
- [34] <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>
- [35] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/combatar-el-cambio-climatico/>
- [36] Barcalová, N. (2017). *Universidad de sevilla tesis doctoral regulación y competencia en el sector energético de la unión europea: retos y perspectivas de futuro*.
- [37] Kitous, A., Keramidas, K., Vandyck, T., & Saveyn, B. (2016). *GECO 2016 Global Energy and Climate Outlook Road from Paris*.
- [38] Cerdá, E., & Ovando, P. (1988). *Bioenergía en la Unión Europea Colección Estudios Económicos*.
- [39] Planning, N., & Secretariat, C. (2014). *Statistical Pocketbook. Central Bureau of Statistics*.
- [40] [https://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ner300\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ner300_en)
- [41] [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_es)
- [42] [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en)
- [43] [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es)
- [44] [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_es)
- [45] European Academies' Science Advisory Council. (2018). *Easac Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets?*
- [46] Eu, P., Eesv, S., Ec, T., General, D., & Directorate, E. (2017). *Sustainable and optimal use of biomass for energy in the EU beyond 2020 Final report*.
- [47] IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*.
- [48] Azar, C., Johansson, D. J. A., & Mattsson, N. (n.d.). *Meeting global temperature targets – the role of bioenergy with carbon capture and storage, 1–25*.
- [49] Fern. (2018). *Six problems with BECCS*.
- [50] Matthews, R., Mortimer, N., Lesschen, J. P., Tomi, J., Sokka, L., Morris, A., Sayce, M. (2015). *Carbon impacts of biomass consumed in the EU: quantitative assessment*.
- [51] Global Forest Coalition. (2018). *The risks of large-scale biosequestration in the context of Carbon Dioxide Removal*

- 
- [52] Berg, T. (2016). *On the deployment of Bio-CCS in the EU: Barriers and policy requirements for a 2. C pathway*.
- [53] Salas, G., & Condorhuaman, C. (2009). *Huella de carbono en la industria textil*, 12, 25–28.
- [54] <https://www.elmundo.es/elmundo/2010/07/20/valencia/1279645414.html>
- [55] <https://www.animanaturalis.org/p/1275/comer-carne-destruye-el-planeta>

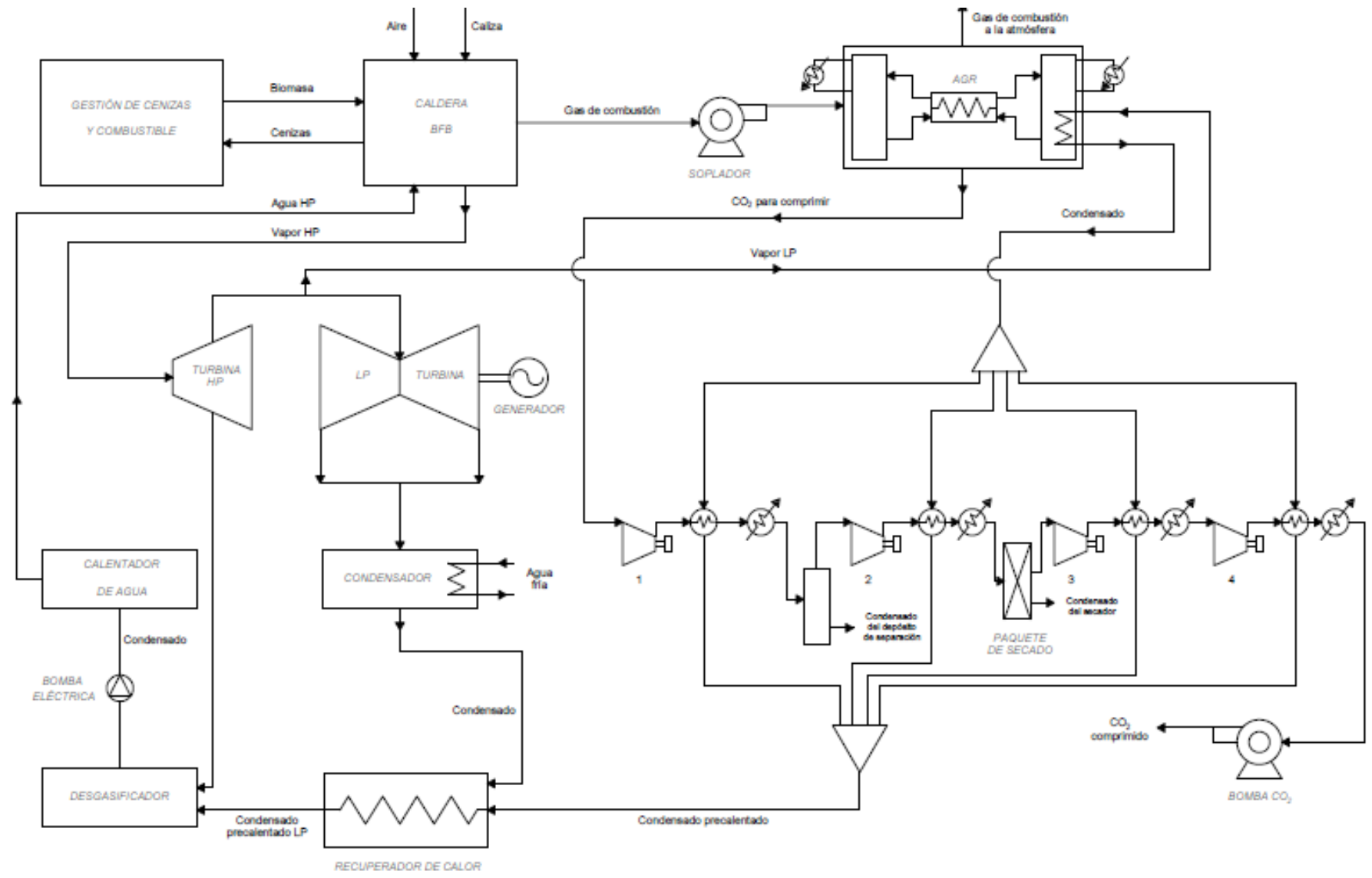
## **9. Anexos**


---

**9.1. ANEXO 1. PLANTA DE BIOMASA CON CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO<sub>2</sub>**

**9.2. ANEXO 2. CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA.**





 <p>Facultad de Ingeniería Universidad de San Carlos</p>	<p>DIAGRAMA UNIFILAR: Planta de biomasa con captura de dióxido de carbono</p>
	<p>FECHA DE AÑO</p>
<p>Nombre</p>	<p>ANEXO I</p>



## ANEXO 2

- Consumo de agua

Unidad	[t/h]			
	Agua cruda	Agua demsinerizada	Agua fría para maquinaria	Agua fría
Recepción, manejo y almacenamiento de sólidos.			23	
Caldera			11	
Planta de desulfuración de gases de combustión.				
Planta de captura de CO2			9093	
Compresión de CO2				1553
Condensador de superficie				6571
Miscelánea		4	281	
Sist. De agua fría para maquinaria				16159
Sistema de desmineralización de agua	4,5	-4		
Miscelánea			18	
<b>Balance</b>	<b>4,5</b>	<b>0</b>	<b>9426</b>	<b>24283</b>

Tabla 9-1, Consumo de agua de la planta

- Consumo de electricidad

Energía eléctrica consumida		
Unidad		[KW]
Recibimiento, manipulación y almacenamiento	Combustible	300
	Caliza	2
Caldera y tratamiento de gas	Consumo auxiliar de la caldera	3676
	Desulfuración del gas	0
	Carga, almacenamiento y manipulación de yeso	0
	Carga, almacenamiento y manejo de cenizas	76
Producción de potencia	Auxiliares de la turbina de vapor y condensadores	145
	Bombas de condensado y sistema de agua de alimentación	1607
	Pérdidas del transformador elevador	170
Utilidades	Sistema de agua fría para maquinaria	550
	Agua fría	1260
	Miscelánea balance de la planta	838
Captura de CO2	Soplador	1214
	Bombas	1176
Compresión de CO2	Compresión de CO2	8617
<b>Total</b>		<b>19631</b>

Tabla 9-2, Consumo de electricidad de la planta

- Características básicas

<b>Combustible</b>	<b>Caudal de biomasa</b>	<b>t/h</b>	<b>103,9</b>
	Biomasa LHV	kJ/kg	7300
<b>Energía Térmica De alimentación</b>		MWt	211
<b>Energía eléctrica Pot. Turbina de vapor</b>		MWe	68,5
<b>Consumo interno de electricidad</b>	Recibimiento, tratamiento y almacenaje	MWe	0,3
	Caldera y tratamiento del gas	MWe	3,8
	Captura de CO2 incluyendo sopladores	MWe	2,4
	Comprensión del CO2	MWe	8,6
	Unidad de Potencia	MWe	1,9
	Otros	MWe	2,6
<b>Energía Eléctrica Neta</b>		MWe	48,9
<b>Eficiencia</b>		%	23,2

Tabla 9-3, Características básicas de la planta

- Eficiencia de la captura

	<b>Flujo equivalente de CO2 kmol/h</b>
<b>Biomasa</b>	2169
<b>Caliza</b>	3
<b>Carbon en cenizas</b>	-5
<b>Carbono bruto producido</b>	2167
<b>CO2 almacenado</b>	1950
<b>CO2 emitido</b>	215
<b>CO emitido</b>	2
<b>Eficiencia de la captura</b>	90

Tabla 9-4, Eficiencia de la captura de la planta



- Emisiones gaseosas

Operación		
Caudal de gas húmedo	kg/s	86,9
Caudal	Nm <sup>3</sup> /h	251000
Temperatura	°C	107
Composición		
N <sub>2</sub> + Aire	% vol	88.9
O <sub>2</sub>	% vol	4.3
CO <sub>2</sub>	% vol	1.9
H <sub>2</sub> O	% vol	4.9
Emisiones		
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	200
N <sub>2</sub> O	mg/Nm <sup>4</sup>	7
SO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>5</sup>	49
CO	mg/Nm <sup>6</sup>	230
Partículas	mg/Nm <sup>7</sup>	<5

Tabla 9-5, Emisiones gaseosas de la planta

- Balances

Caldera y tratamiento de gases			
	Caudal t/h	T °C	P bara
Biomasa	104	Amb.	Amb.
Aire de la atmósfera	286	Amb.	Amb.
Agua desde el precalentador	281	226	138
Vapor HP de la caldera	278	540	115
Caliza	0,3	Amb.	Amb.
Gas a la planta de captura de CO <sub>2</sub>	469	148	1,015
Cenizas volátiles	1,1	Amb.	Amb.
Cenizas pesadas	0,2	Amb.	Amb.

Tabla 9-6, Balance de la caldera y tratamiento de gases

Unidad de producción de potencia				
	Caudal t/h	T °C	P bara	Entalpía kJ/kg
Agua HP a la Caldera	280,8	226	138	973
Vapor HP de la caldera	278	540	115	3459
Vapor MP a la turbina	226,4	143,6	4	2723
Vapor LP al intercambiado	126,1	143,6	4	2723
Condensado LP del intercambiador	126,1	137	15	577
Condensado	99	24	0,03	101
Condensado precalentado LP	274,2	175,5	12,9	744
Condensado HP	280,8	190	138,2	814
Agua fría entrada	6571	12	1,9	51
Agua fría salida	6571	19	1,4	80

Tabla 9-7, Balance de la unidad de producción de potencia

<b>Unidad de compresión y secado del CO2</b>			
	Caudal t/h	T °C	P bara
<b>CO2 para comprimir</b>	87,3	35	1,5
<b>CO2 comprimido</b>	85,9	25,9	110
<b>Condensado de la unidad de captura</b>	99	85	14
<b>Condensado precalentado a planta de potencia</b>	99	109,1	13,5
<b>Condensado del depósito de separación</b>	1,1	35	35,5
<b>Condensado del secador</b>	0,3	177	94

Tabla 9-8, Balance de la unidad de compresión y secado del CO2

Unidad de captura del CO2												
			Total		Fase líquida	Fase Gaseosa						
	T °C	P bar	Caudal masa t/h	Caudal molar kgmol/h	Caudal masa t/h	Caudal masa t/h	Caudal molar kgmol/h	Peso molecular	CO2 %Vol	Aire + N2 %Vol	O2 %Vol	H2O %Vol
<b>Gas de la caldera</b>	148	1,015	469	16998	-	469	16998	27,59	12,79	58,72	2,81	25,68
<b>Gas a la atmósfera</b>	107	1,005	313	11192	-	313	11192	28	1,9	88,9	4,3	4,9
<b>CO2 para comprimir</b>	35	1,5	87,3	2029	-	87,3	2029	43,02	96,17	0,03		3,8
<b>Vapor LP desde la turbina</b>	144	3,5	126	-	-	126	-	-	-	-	-	-
<b>Condensado a la planta de potencia</b>	137	15	126	-	126	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 9-9, Balance de la unidad de captura del CO2



