

Proyecto Fin de Grado

Ingeniería Química

Biorrefinería con algas

Autora: María del Valle Macía Mateos

Tutor: Pedro Ollero de Castro

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Grado
Ingeniería Química

Biorrefinería con algas

Autora:

María del Valle Macía Mateos

Tutor:

Pedro Ollero de Castro

Catedrático de Universidad

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Carrera: Biorrefinería con algas

Autora: María del Valle Macía Mateos

Tutor: Pedro Ollero de Castro

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 padres y a mi familia por
creer siempre en mí.*

Agradecimientos

En primer lugar gracias a mi tutor Pedro Olleros por buscar y ofrecerme un tema del cual estuviese interesada, que era el tema de los biocombustibles. Gracias a él, he podido descubrir lo que es una biorrefinería con algas y conocer tanto su funcionamiento como los productos que se obtienen.

Gracias también al Departamento de Ingeniería Química y Ambiental y a todos los profesores que están dentro porque gracias a ellos he conseguido superarme a mí misma aunque me desanimara al ver un suspenso en un examen. Nunca llegué a imaginar que al terminar el grado ese departamento se convertiría en un pequeño hogar dentro de la escuela.

Gracias en especial a mis padres y a mi familia por apoyarme en cada decisión que he tomado aunque no fuera la correcta y por no dejar que me rindiese nunca. Gracias por soportarme en la época de exámenes y en los últimos días antes de la entrega de un trabajo.

Gracias a todos los compañeros con los que he compartido horas de clases, de prácticas y de estudios y sobretodo las dudas que hemos compartido.

Por último quiero agradecer a todas esas personas que aparecieron en mi camino porque gracias a ellas he conseguido llegar donde estoy.

Gracias a este trabajo tendré dos temas de conversación en reuniones familiares: aclarar en qué consiste la Ingeniería Química y explicar los tipos de algas que se emplean en las biorrefinerías con algas.

María del Valle Macía Mateos

Sigue siempre adelante

Sevilla, 2019

Resumen

En este proyecto, se abordará el concepto de biorrefinería en la actualidad, cuales son los distintos tipos que existen y las materias primas empleadas en el proceso. Además, se centrará en las biorrefinerías con algas que actualmente están en fase de desarrollo e investigación, comentando innovaciones y avances en las plantas pilotos.

El trabajo comenzará explicando los distintos tipos de algas que se pueden llegar a emplear y las que se están empleando en la actualidad, así como las condiciones óptimas para su cultivo. A continuación se comentará los diversos productos que se pueden obtener, pueden ir desde biocombustibles hasta alimentos para el ganado y suplementos alimenticios para las personas.

Más adelante, se mostrará un proceso típico para la obtención de estos productos y se centrará en los equipos principales, explicando los distintos tipos que existen. Además, se analizará un análisis de ciclo de vida basado en un estudio publicado.

Finalmente se presentará el panorama actual de ayudas y normativas de la Unión Europea y algunos programas que se han creado concluyendo con las perspectivas futuras de las biorrefinerías de algas y las conclusiones que se han obtenido.

Abstract

In this project, the concept of biorefinery will be addressed, the different types that exist and the raw materials used in the process. It will also focus on the biorefineries with algae that are currently under development and research talking about some innovations/advances in pilot plants.

The project will start explaining the different known types of algae and those they are currently using, as well as the optimal conditions for their cultivation. Next, we will discuss the various products that can be obtained, they can range from biofuels to food for livestock or even nutritional supplements for people.

Later, we will show a typical process for obtaining these products focused on the main equipments, explaining the different types that exist. Also, a brief life cycle analysis based on a published study will be realized.

Finally, the current panorama of aids and normative of the European Union and some programs that have been created will be presented, concluding the project with the future perspectives of algae biorefineries and the results that have been obtained.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xii
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvi
Notación	xviii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. <i>¿Qué es una Biorrefinería?</i>	1
1.2. <i>Tipos de Biorrefinerías y materias primas empleadas.</i>	1
2 BIORREFINERÍAS CON ALGAS	3
2.1. <i>Proceso de la fotosíntesis.</i>	7
2.2. <i>Tipos de algas.</i>	7
2.1.1. Macroalgas.	7
2.1.2. Microalgas.	8
2.1.3. Cianobacteria.	8
2.2. <i>Propiedades necesarias.</i>	9
2.2.1. Luz.	9
2.2.2. Concentración de CO ₂ .	9
2.2.3. Temperatura, pH y salinidad.	10
2.2.4. Nutrientes.	11
2.3. <i>Modelo del crecimiento de algas.</i>	11
2.4. <i>Esquema general de una biorrefinería de algas.</i>	13
2.4.1. Cultivo de algas.	13
2.4.2. Recolección.	17
2.4.3. Secado.	18
2.4.4. Extracción de lípidos (en el caso de producción de biodiésel).	19
2.5. <i>Análisis de ciclo de vida (ACV).</i>	20
2.5.1. Fase de definición del objetivo y el alcance.	20
2.5.2. Fase de análisis del inventario.	20
2.5.3. Fase de evaluación del impacto ambiental.	23
2.5.4. Fase de interpretación.	23
2.5.5. Ejemplo de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).	24
3 Investigación y Desarrollo en Biorrefinerías de Algas	29
3.1. <i>Estado actual de desarrollo en el mundo</i>	29
3.1.1. Proyectos de investigación y desarrollo.	29
3.1.2. Plantas piloto y plantas comerciales.	30
3.2. <i>Logros y proyectos de investigación en el mundo.</i>	31
3.2.1. Programas.	31
3.3. <i>Políticas de ayuda e incentivos.</i>	32

4	CONCLUSIÓN	11
5	Bibliografía	12
	Glosario	16

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparativa entre las características del diésel vs. Biodiésel ^[7] .	4
Tabla 2: Estimación de mercado para productos obtenidos a partir de microalgas ^[9] .	6
Tabla 3: Contenido en lípidos y productividad de biomasa de varias especies de algas	14
Tabla 4: Inventario general de una biorrefinería de algas.	22
Tabla 5: Unidades para diversas caracterizaciones de impactos, ejemplo 1 ^[15] .	23
Tabla 6: Unidades para diversas caracterizaciones de impactos, ejemplo 2 ^[15] .	23
Tabla 7: Entradas y salidas de materiales y energía.	25
Tabla 8: Valores de los índices de EROI y NER.	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Uso de la biomasa de algas [6]	3
Figura 2: Polvo de Spirulina y pastillas de Spirulina comercializadas por Ecoduna [12]	5
Figura 3: Polvo de Chlorella y pastillas de Chlorella comercializadas por Ecoduna [12]	5
Figura 4: Proceso ALDUO, empresa Cellana (Hawaii) [8]	5
Figura 5: Macroalga Spirogyla. [4]	7
Figura 6: Macroalga Spirogyla [36]	7
Figura 7: Microalga Chlamydomonas reinhardtii [4]	8
Figura 8: Microalga Chlorella [37]	8
Figura 9: La Cianobacteria UCYN-A, que vive	8
Figura 10: Cianobacteria Synechococcus sp PCC 7942 [4]	8
Figura 11: Tasa de crecimiento específico vs. Irradiancia [4]	9
Figura 12: Tasa de crecimiento máxima vs Temperatura [4]	10
Figura 13: Tasa de crecimiento diario vs pH [4]	10
Figura 14: Proceso general de producción.	13
Figura 15: Tanque abierto [14]	15
Figura 16: Esquema de un raceway [15]	15
Figura 17: Fotobiorreactor de placa plana [17]	16
Figura 18: Fotobiorreactor Tubular [18]	16
Figura 19: Fotobiorreactor Laminar [19]	17
Figura 20: Detalle de un Fotobiorreactor Laminar. Raspado de una de sus láminas [19]	17
Figura 21: Proceso de producción del biodiésel [4]	19
Figura 22: Fases del Análisis del Ciclo de Vida.	20
Figura 23: Etapas del ciclo de vida de inicio a fin [15]	21
Figura 24: Proceso de una biorrefinería con algas con sus entradas y salidas.	21
Figura 25: Sistema integrado de producción de biomasa seca de microalgas y otros productos [26]	24
Figura 26: Demanda energética no renovable y total para cada etapa del proceso.	27

Notación

exp	Exponencial
K	Grados Kelvin
kg	Kilogramos
L	Litros
mg	Miligramos
ppm	Partes por millón
s	Segundos
°C	Grados centígrados
<	Menor que
>	Mayor que

1 INTRODUCCIÓN

Según la RAE (Real Academia Española), “*una refinería es una fábrica o instalación industrial donde se refina un producto*”^[1]. Una refinería de petróleo emplea crudo como materia prima y obtiene diversos productos, entre ellos combustibles como gasoil, keroseno o GLP (Gases Licuados del Petróleo).

1.1. ¿Qué es una Biorrefinería?

Una biorrefinería es una instalación donde a partir de diversos procesos y empleando como materia prima la biomasa, se pueden obtener combustibles, energía y productos químicos. Las biorrefinerías son análogas a las refinerías de petróleo y pueden seguir procesos similares con la diferencia de emplear materia prima que respeta el medio ambiente y da valor añadido a los residuos y subproductos, reintroduciéndolos en el proceso productivo.

1.2. Tipos de Biorrefinerías y materias primas empleadas.

La biomasa puede proceder desde residuos y desechos biodegradables de origen animal o vegetal hasta residuos de las industrias.

Se pueden catalogar a las biorrefinerías por un código de colores en función también de la materia prima que emplee^[2]:

- **Biorrefinería Verde:** biomasa verde como pastos, cereales no maduros, hojas, etc.
- **Biorrefinería Azul:** biomasa acuática como algas, residuos y descartes de pescados.
- **Biorrefinería Gris:** residuos sólidos urbanos y subproductos agroindustriales.
- **Biorrefinería Blanca:** desechos de la industria agroalimentaria. Cultivos ricos en azúcares (remolacha azucarera, caña de azúcar, sorgo dulce, etc.) y en almidón (trigo, maíz, centeno).
- **Biorrefinería Amarilla:** cultivos y residuos lignocelulósicos.

También, se pueden encontrar otra manera de catalogarlas dependiendo de la materia prima empleada^[3].

- Biorrefinerías de 1ª generación:
 - Uso clásico de biomasa agrícola. Biomasa rica en azúcar (para la producción de bioetanol), rica en aceite (para la producción de biodiésel) y biomasa leñosa.
 - Es una tecnología simple y convencional.
 - Tiene baja flexibilidad e integración.
- Biorrefinerías de 2ª generación:
 - Como materia prima se emplea biomasa lignocelulósica.
 - Empleo de la materia prima en su totalidad.
 - Es una tecnología avanzada.
 - Flexibilidad e integración intermedia.

- Biorrefinerías de 3ª generación:
 - Uso de residuos agrícolas y orgánicos.
 - Biorrefinería con algas.
 - Tecnología más avanzada.
 - Alta integración y flexibilidad.

En el caso de que se emplee caña de azúcar, se extraen los azúcares que posee, se fermenta y se obtiene bio-etanol. Si se emplea un cultivo oleaginoso, se extraen los aceites que poseen las semillas, se realiza una transesterificación (proceso de intercambio de un grupo orgánico R'' de un éster con el grupo orgánico R' de un alcohol) y se obtendría biodiésel.

El uso de biocombustibles de primera generación ha suscitado mucha controversia por el empleo de materias primas que pueden competir con la alimentación del ser humano. De esta manera, las microalgas parecen postularse como una buena alternativa a esta situación, ya que presentan un rendimiento solar superior al de los cultivos de los que derivan los biocombustibles de primera generación, tienen elevado contenido de lípidos, necesitan agua de menor calidad, salada o salobre, pueden instalarse en terrenos de uso marginal e incluso algunos investigadores han demostrado que su cultivo puede ser acoplado a fuentes industriales de CO₂.

2 BIORREFINERÍAS CON ALGAS

Las algas son un tipo de plantas que se encuentran en zonas húmedas como lagos y mares. Son organismos fotosintéticos, por lo que son capaces de producir compuestos orgánicos absorbiendo energía solar. Muchas especies almacenan gran cantidad de lípidos y de almidones que se aprovechan para la producción de biocombustibles^[4]. Además, son capaces de eliminar contaminantes en aguas residuales como el nitrógeno y fósforo. Es por ello que cada vez empiezan a cobrar más importancia en el ámbito industrial.

El empleo de esta materia prima, eliminaría la competencia con las materias primas que se pueden destinar a la alimentación humana, puesto que el cultivo de algas se puede colocar en una tierra que no esté destinada al cultivo.

Las algas se clasifican en tres subgrupos: macroalgas, microalgas y cianobacterias.

En 2008, la producción global de plantas acuáticas fue de 15,8 millones de toneladas, representando un 24,8 % de la acuicultura global para un total de 7,4 millones de dólares^[5].

Las macroalgas dominan esa producción generando una fuente de materias primas a partir de la cual se extraen componentes de las algas, como el yodo, algina y carragenina, además de proporcionar productos y suplementos para el consumo humano.

El cultivo industrial de microalgas se centra principalmente en el cultivo de las especies de agua dulce *Chorella* y *Arthrospira* (anteriormente conocida como *Spirulina*) usada en suplementos alimenticios para los humanos y en piensos para animales. Otro tipo de especies de microalgas, tanto de agua salada como dulce, se emplean para la extracción de componentes de alto valor como vitaminas (C y D2), ácidos grasos omega, pigmentos naturales y antioxidantes (B-caroteno, astaxantina, luteína). Las microalgas son los organismos menos comprendidos y estudiados, pero el interés actual es el cultivo de las algas ricas en lípidos para la producción de biocombustibles como el biodiésel.

La biorrefinería de algas proporciona un amplio abanico de productos, entre los cuales podemos encontrar: biocombustibles, biofertilizantes, extractos para farmacia, cosmética, biomasa para alimentación animal y acuicultura o ácidos grasos esenciales son algunos de los productos más importantes que se pueden obtener tras el cosechado de los cultivos de estos microorganismos fotosintéticos.

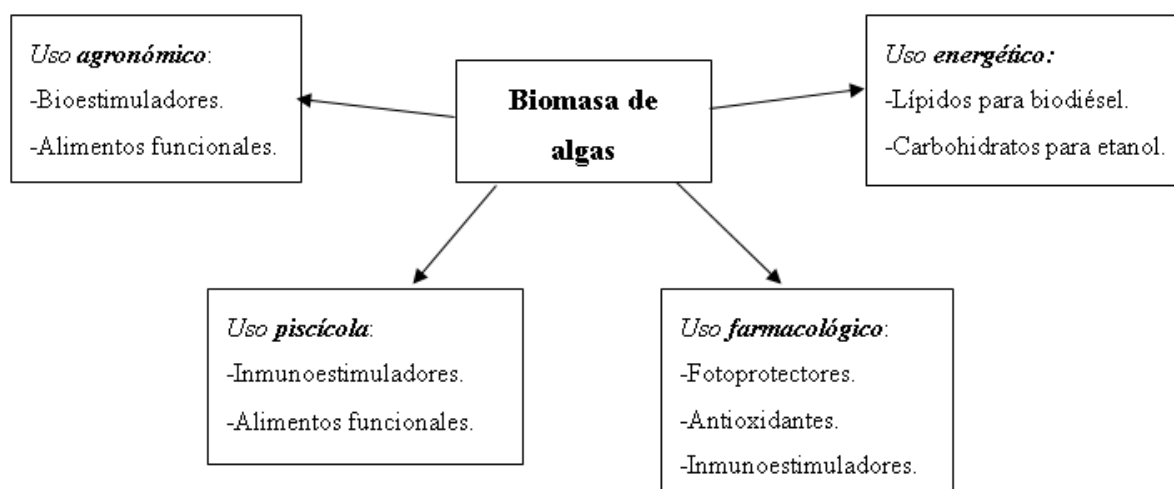


Figura 1: Uso de la biomasa de algas^[6].

▪ **Biodiésel:**

En la Tabla 1: Comparativa entre las características del diésel vs. Biodiésel, se puede mostrar una comparativa entre el diésel normal y el biodiésel.

Tabla 1: Comparativa entre las características del diésel vs. Biodiésel^[7].

PARÁMETRO	DIÉSEL (UNE-EN 590)	BIODIÉSEL
Densidad a 15 °C (kg/m ³)	820-860	875-900
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s)	2,00-4,50	3,50-5,00
Punto de ignición (°C)	>55	>110
Contenido de azufre (% peso)	<0,22	<0,01
Contaminación total (ppm)	Máx. 350	Máx. 10
Número de cetano	>46	>51
Contenido de oxígeno (% peso)	0	10,9
Poder calorífico (MJ/dm ³)	35,6	32,6
Grado de eficiencia (%)	38,2	40,7

De la tabla anterior se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- El punto de ignición del biodiésel es mayor lo que le convierte en menos explosivo y por lo tanto en el más seguro en el manejo y almacenaje.
- El número de cetano mide la calidad de ignición de un combustible. Este valor está estrechamente ligado con la emisión de humo y la calidad de la combustión. A mayor número de cetano, mejor arranque en frío, menor ruido y mayor vida útil del motor con menores emisiones. Al tener el biodiésel mayor número de cetano, se beneficia de las ventajas anteriormente citadas.
- El nivel de azufre participa en el desgaste del motor e influye negativamente en las emisiones nocivas al medio ambiente. El diésel tiene mayores emisiones de azufre.

▪ **Complementos alimenticios:**

Hay dos especies de algas que son las que más se comercializan. Las empresas los venden tanto como producto final en forma de pastillas como la biomasa seca en polvo para poder producir luego las pastillas. Las algas son una importante fuente de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI), como los omega-3, que son esenciales para la buena salud. Estos ácidos grasos esenciales son necesarios para que nuestros cuerpos mantengan una salud adecuada, pero deben obtenerse de alimentos o complementos alimenticios, ya que el cuerpo no puede producirlos.

- *Spirulina*: contribuye a la reducción de la fatiga y contiene cantidades naturalmente altas de proteína vegana (54%), vitamina K y antioxidantes importantes como la vitamina A.



Figura 2: Polvo de Spirulina y pastillas de Spirulina comercializadas por Ecoduna [12].

- *Chlorella*: contiene naturalmente altas cantidades de proteína vegana (46%), ayuda a desintoxicar el cuerpo y es rica en vitamina B12, hierro y ácido fólico.



Figura 3: Polvo de Chlorella y pastillas de Chlorella comercializadas por Ecoduna [12].

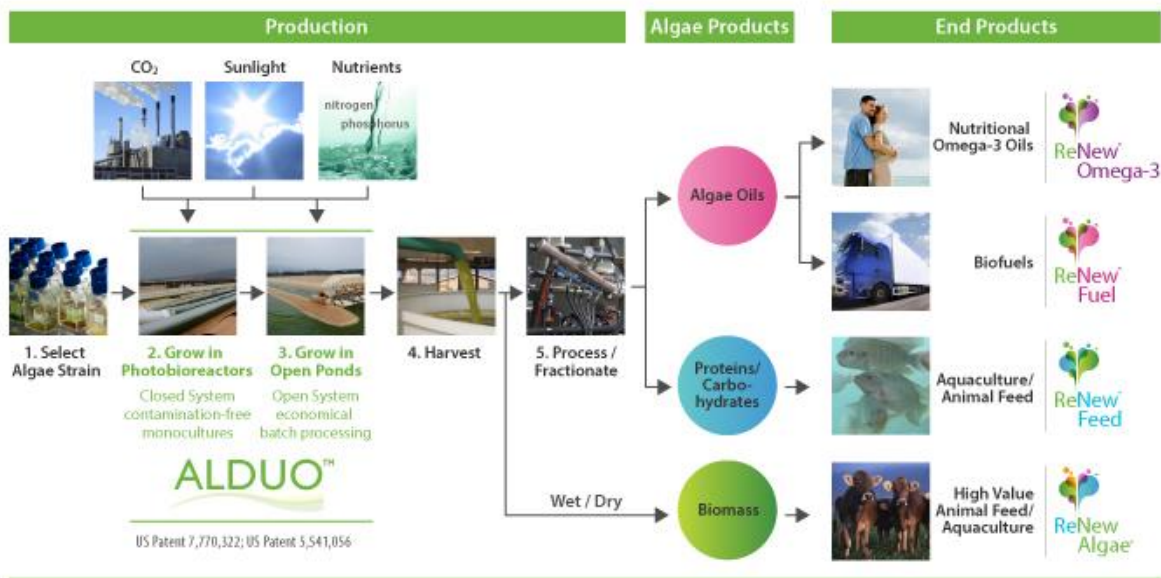


Figura 4: Proceso ALDUO, empresa Cellana (Hawaii) [8].

El proceso ALDUO es una tecnología patentada por la empresa Cellana. Es un sistema de producción fotosintética que cultiva económicamente cepas de algas patentadas a escala comercial. Sus productos son los siguientes:

- **ReNew™ Omega-3:** aceites de alto valor para la nutrición humana y los ácidos grasos poliinsaturados DHA y EPA (ácidos grasos omega-3) vendidos como productos nutracéuticos, farmacéuticos o aditivos para piensos y alimentos.
- **ReNew™ Fuel:** aceite a granel para aplicaciones relacionadas con los biocombustibles. Como el aceite de algas está compuesto básicamente por triglicéridos y ácidos grasos, es posible utilizar varias tecnologías para transformarlos en biocombustibles incluyendo la transesterificación y el hidrot ratamiento.
- **ReNew™ Feed:** la biomasa residual y los carbohidratos pueden ser usados para preparar alimentos para peces o piensos para acuicultura y ganado.

Otro producto que también se puede obtener es biogás. Este se obtiene a través de una digestión anaeróbica del agua y algas usadas en la fase de extracción de lípidos.

En la Tabla 2: Estimación de mercado para productos obtenidos a partir de microalgas; se puede observar la estimación de mercado para los productos obtenidos a partir de microalgas.

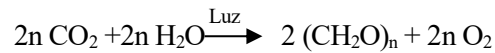
Tabla 2: Estimación de mercado para productos obtenidos a partir de microalgas^[9].

(Pulz y Gross , 2003)

	Producto	US \$ kg ⁻¹	Tamaño de mercado (US \$ · 10 ⁶)
Biomasa	Comida natural	15-28	180-200
	Alimentos funcionales	25-52	En aumento
	Aditivos	10-130	Rápido crecimiento
	Acuicultura	50-150	Rápido crecimiento
	Aplicaciones agrícolas	>10	Desarrollo incipiente
Colorantes	Astaxantina	>3.000	>50
	Phycocianina	>500	>10
	Phycoeritrina	>10.000	>2
Antioxidantes	β-caroteno	>750	>25
	Superoxido dismutasa	>1.000	Desarrollo incipiente
	Tocoferol	30-40	Mercado estancado
Ac. Grasos	Extractos – AO	20-35	10-20
	ARA		20
	EPA		>500
	DHA		30
Productos especiales	Extractos	30-80	10
	Toxinas		1-3
	Isótopos		>5

2.1. Proceso de la fotosíntesis.

La fotosíntesis es un proceso de óxido-reducción biológico, se produce una transferencia de electrones. La reacción sería la siguiente ^[10]:



El agua actúa como reductor, por lo que se oxida y los electrones liberados son transferidos al dióxido de carbono, produciendo oxígeno e hidratos de carbono. Esta reacción se lleva a cabo gracias a la luz.

Los principales factores que afectan a la fotosíntesis son:

- La **intensidad de la luz**: la velocidad de la fotosíntesis aumenta a medida que incrementa la intensidad lumínica hasta los 600 watts, valor a partir del cual permanece constante.
- La **temperatura**: a medida que ésta aumenta, aumenta la tasa fotosintética, hasta los 30 °C a partir de los cuales disminuye.
- La **concentración de CO₂**: a medida que va aumentando, también lo hace la tasa fotosintética dependiendo de la temperatura ambiente.

2.2. Tipos de algas.

2.1.1 Macroalgas.

- Las macroalgas son organismos eucariotas, por lo que dispone de un núcleo diferenciado mediante una membrana.
- Son organismos multicelulares, y se pueden diferenciar hojas, tallos y raíces.

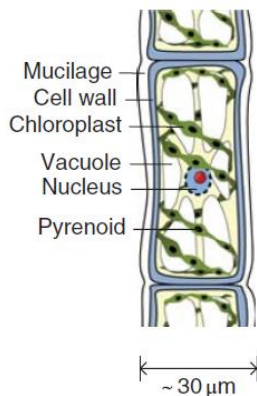


Figura 5: Macroalga Spirogylla. ^[4]

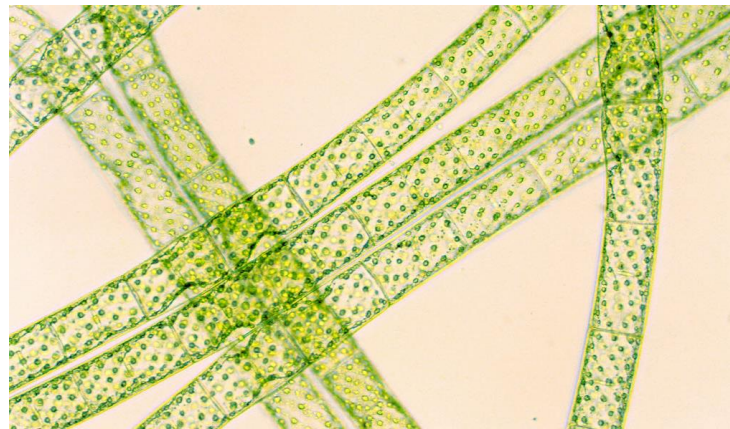


Figura 6: Macroalga Spirogylla ^[36].

2.1.2 Microalgas.

- Al igual que las macroalgas, las microalgas también son eucariotas.
- Generalmente son unicelulares, aunque algunas de ellas pueden existir como colonias.

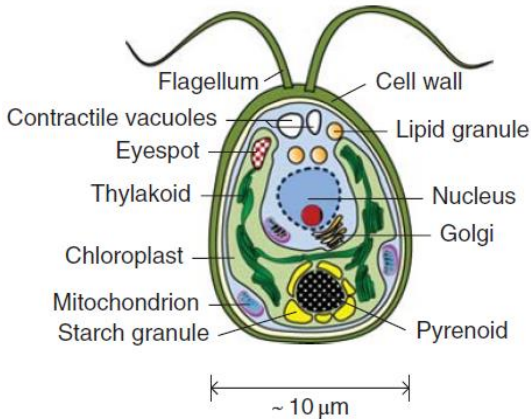


Figura 7: Microalga *Chlamydomonas reinhardtii* [4]

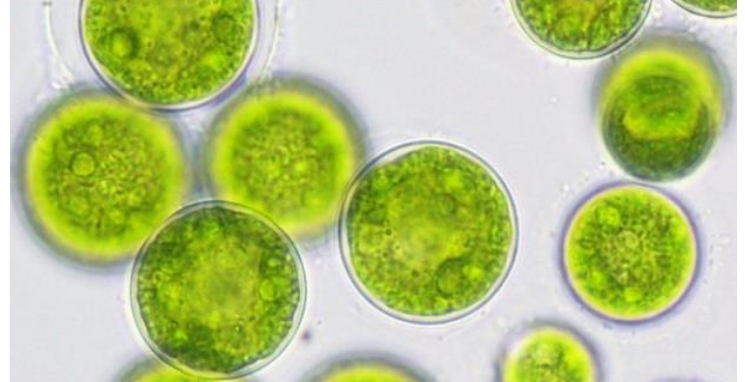


Figura 8: Microalga *Chlorella* [37].

La Microalga *Chlorella* (Figura 8) permite obtener más del 50% de su peso en forma de aceite (cultivado en ciertas condiciones). Posee un elevado contenido en ácido oleico y palmítico, que mediante varios procesos se puede transformar en biodiésel.

Las microalgas cuentan con más de 40.000 especies de agua salada y agua dulce [5].

2.1.3 Cianobacteria.

- Son organismos procariotas, es decir, carecen de núcleo celular diferenciado mediante una membrana.
- Al igual que las microalgas, son unicelulares y también pueden existir como colonias.
- Los compuestos fotosintéticos están repartidos libremente por el protoplasma celular [7].
- Son capaces de atrapar el nitrógeno disuelto en el agua rompiendo la molécula de nitrógeno y formando amonio. El nitrógeno que se captura se emplea como fuente de alimento.
- Tiene dos procesos nutricionales que suceden durante el día y la noche pero no se realizan al mismo tiempo. Durante el día se realiza la fotosíntesis y por la noche se fija el nitrógeno.

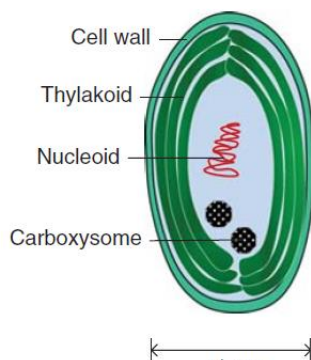


Figura 10: Cianobacteria *Synechococcus* sp PCC 7942 [4]



Figura 9: La Cianobacteria UCYN-A, que vive en simbiosis con un alga unicelular del grupo de las prinnessioficeas [38]

2.2 Propiedades necesarias.

Como se ha comentado en el apartado 2.1 Proceso de la fotosíntesis., para poder realizar un cultivo de algas, será necesario tener en cuenta las siguientes propiedades:

2.2.1. Luz.

Se basa en dos parámetros: la irradiancia de la luz y el período de luz. La respuesta de la frecuencia fotosintética a la irradiación de la luz muestra tres regiones principales con diferentes intensidades de luz (Figura 11).

- *Región limitada por la luz:* a bajas intensidades de luz, la velocidad fotosintética aumenta con el aumento de la irradiancia de luz.
- *Región saturada de luz:* después de que la irradiación de la luz alcanza la saturación, la velocidad fotosintética se detiene manteniendo un nivel constante al aumentar la irradiancia de la luz.
- *Región inhibida por la luz:* después del período de saturación de luz, la tasa de fotosíntesis se reduce con el aumento de la irradiación de la luz.

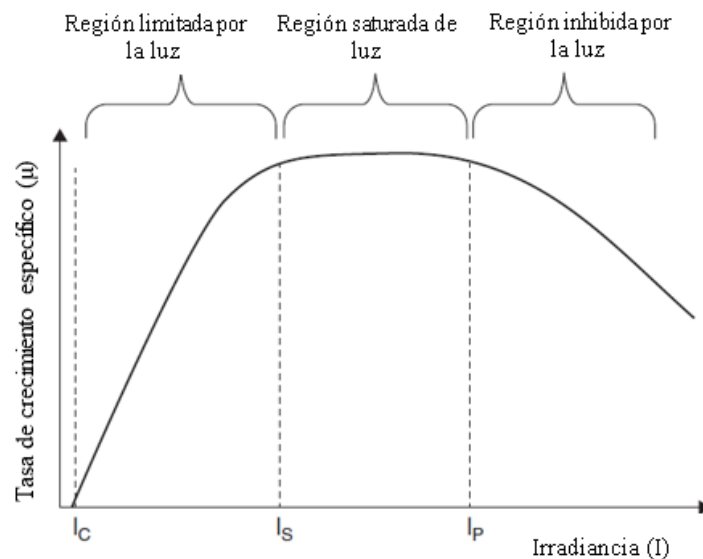


Figura 11: Tasa de crecimiento específico vs. Irradiancia^[4].

Dependiendo de la especie de alga, los rangos de cada región varían, pero las intensidades de luz más utilizadas son del rango 100-200 $\mu\text{E}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

También se debe tener en cuenta el período de exposición a la luz, ya que puede afectar al rendimiento fotosintético. Los períodos de luz más usados son 24 h/0 h, 16 h/8 h y 12 h/12 h. También hay que considerar que algunas especies de algas no crecen bien bajo ciertas condiciones de luz continua.

2.2.2. Concentración de CO₂.

El CO₂ disuelto puede reaccionar con el agua para formar bicarbonato (HCO₃⁻) e iones hidrógeno (H⁺) disminuyendo así el pH del medio. Un pH bajo generalmente inhibe el crecimiento de las algas.

Una concentración óptima de CO₂ para la mayoría de las algas es de 0,038-10 % (v/v). También hay algas que son sensibles a concentraciones superiores del 1% (v/v) de CO₂ y a la inversa, hay algunas especies de algas que pueden tolerar altas concentraciones de CO₂ hasta del 70-100% (v/v).

2.2.3. Temperatura, pH y salinidad.

La temperatura (Figura 12), el pH (Figura 13) y la salinidad son propiedades cruciales para mantener la actividad óptima de las enzimas en las células de las algas.

Las especies de algas más utilizadas actualmente, crecen bien entre los 16-35 °C. Temperaturas bajas, por debajo de los 16 °C, pueden disminuir la solubilidad del CO₂ en el medio, lo que ralentizaría el crecimiento de las algas. Por otro lado, temperaturas altas, superiores a 35 °C, pueden llegar a matar a las algas. Sin embargo, algunas especies de algas han mostrado una tolerancia mejorada a altas temperaturas (hasta 40 °C) después de un proceso de aclimatación inducido.

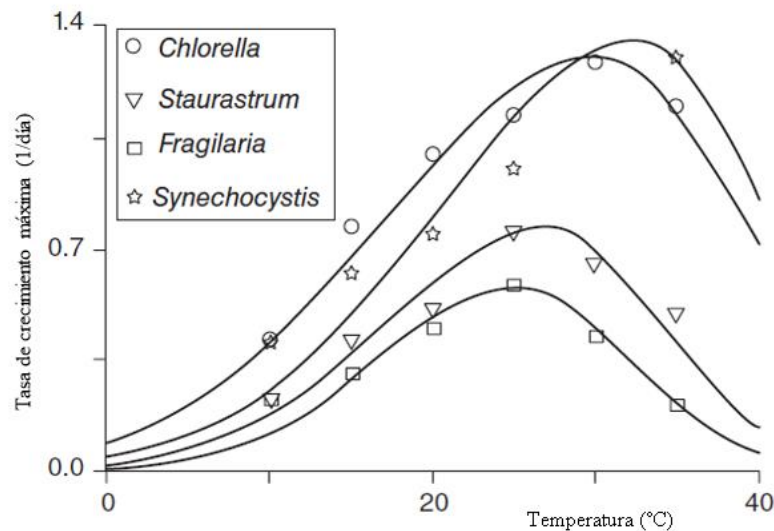


Figura 12: Tasa de crecimiento máxima vs Temperatura [4].

El rango común de pH es de 6-9.

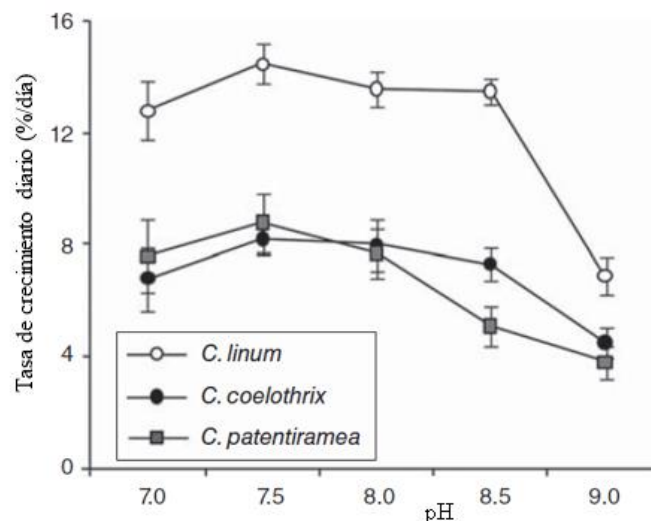


Figura 13: Tasa de crecimiento diario vs pH [4].

Los niveles óptimos de salinidad varían dramáticamente para distintas especies de algas. La salinidad baja (<1 g/L de sal) es normalmente la requerida para las algas de agua dulce, mientras que las salinidades de 20-35 g/L de sal podrían ser óptimas para las algas marinas. Algunas algas marinas, como la *Dunaliella salina*, pueden tolerar concentraciones de hasta 30-300 g/L de sal.

2.2.4. Nutrientes.

Los principales nutrientes necesarios para el crecimiento son el nitrógeno y fósforo. La captación del nitrógeno suele ser en forma de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+), mientras que el fósforo se capta en forma de fosfato soluble (PO_4^{3-}).

El mecanismo de asimilación del nitrógeno en las células de las algas es mediante la reducción enzimática de NO_3^- a NH_4^+ por una serie de enzimas. Tras esta reducción, se produce un transporte del amonio a los cloroplastos, donde se convierte en aminoácido glutamina. El fósforo se absorbe durante la fosforilación, donde se convierte principalmente en trifosfato de adenosina (ATP) y difosfato de adenosina (ADP) para uso energético.

Otros micronutrientes importantes para el proceso fotosintético son el hierro (Fe), el potasio (K), el magnesio (Mg), el calcio (Ca) y el sodio (Na).

2.3 Modelo del crecimiento de algas.

El crecimiento de las algas se ve afectado por varios factores mencionados anteriormente como son la luz, el CO_2 , la temperatura, el pH, la salinidad y la disponibilidad de nutrientes ^[4].

Algunos factores como el pH y la salinidad, pueden ser fácilmente controlados, mientras que otros pueden variar dependiendo de las condiciones ambientales como la luz solar y la temperatura exterior.

Es inviable alcanzar o mantener las condiciones óptimas para el crecimiento de algas en aplicaciones a gran escala, por lo tanto modelar el crecimiento de éstas en diferentes condiciones es crucial para predecir el rendimiento de las algas en los sistemas de cultivo en aplicaciones industriales.

El modelo de Monod es uno de los modelos cinéticos más utilizados que describen los efectos de limitar sustratos o nutrientes en el crecimiento de microorganismos. El modelo de Monod está representado por la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{\mu_{\text{máx}} \cdot S}{K_s + S} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- μ es la tasa de crecimiento específica, en 1/día.
- $\mu_{\text{máx}}$ es la tasa de crecimiento máxima en condiciones de sustrato saturado, en 1/día.
- K_s es la constante media de saturación, en mg/L.
- S es la concentración de sustratos limitantes disueltos (como el CO_2) o nutrientes (como el nitrógeno y fósforo), en mg/L.

El efecto de la temperatura se puede expresar asumiendo una variación exponencial debido a la no óptica temperatura:

$$g(T) = \exp(-j \cdot (T - T_{\text{ópt}}))^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Siendo:

- j una constante empírica para una temperatura no óptima, en $1/\text{K}^2$.
- $T_{\text{ópt}}$ es la temperatura óptima para el crecimiento autrófico, en K.

La ecuación 1 (Modelo de Monod) y la ecuación 2 se pueden combinar, dando como resultado la ecuación 3 que describe los efectos de múltiples factores como las concentraciones del CO₂ y el nitrógeno, la irradiancia lumínica y la temperatura en el crecimiento de las algas.

$$\mu = \left(\frac{C}{K_C + C} \right) \cdot \left(\frac{N}{K_N + N} \right) \cdot \left(\frac{I}{K_I + I} \right) \cdot \exp(-j \cdot (T - T_{\text{ópt}}))^2 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- C es la concentración de CO₂, en mg/L.
- N es la concentración de nitrógeno, en g/L.
- I es la irradiancia, en W/m².
- K_C, K_N, K_I son las constantes de media de saturación del CO₂, nitrógeno e irradiancia respectivamente, en mg/L, g/L y W/m² respectivamente.

Durante el cultivo de algas, las condiciones en el fotobiorreactor o en los reactores abiertos pueden ser más complicadas. Un problema es que la irradiancia tiene una distribución especial debido a la atenuación con la profundidad. Por lo tanto se emplea la ecuación 4 para describir la reducción de la irradiancia con la profundidad.

$$I = I_{\text{in}} \cdot \exp(-\alpha \cdot X \cdot Z) \quad \text{Ecuación 4}$$

Siendo:

- I es la irradiancia de la luz a una profundidad Z, en W/m².
- I_{in} la irradiancia en la superficie del medio de crecimiento, en W/m².
- α el coeficiente de atenuación de la irradiación, en L/g · m.
- X es la concentración de biomasa, en g/L.
- Z es la profundidad de cultivo, en m.

Desafortunadamente, la temperatura, el CO₂ y los perfiles de distribución de concentración de nutrientes en su cultivo en los sistemas, son factores complicados de modelar, ya que sus perfiles dependen de factores como la temperatura externa del sistema y las características de transferencia de calor. Un enfoque prometedor para abordar este problema es integrar la cinética del crecimiento de algas con la dinámica de fluidos computacional (CFD) que se emplea para resolver modelos físicos. El problema es que la integración de la CFD con cinética de crecimiento de algas puede ser computacionalmente intensivo, debido a la gran cantidad de ecuaciones cinéticas y físicas que deben resolverse y formularse. Afortunadamente, se publican modelados de algas usando CFD con frecuencia.

2.4 Esquema general de una biorrefinería de algas.

El diagrama de proceso se basará en el proceso que se emplea en la planta piloto de Cellana (Hawaii), el cual emplea como materia prima microalgas. Ha patentado el sistema ALDUO en el que se dispone de estanques abiertos y fotobiorreactores cerrados. Los pasos que se siguen son los siguientes:

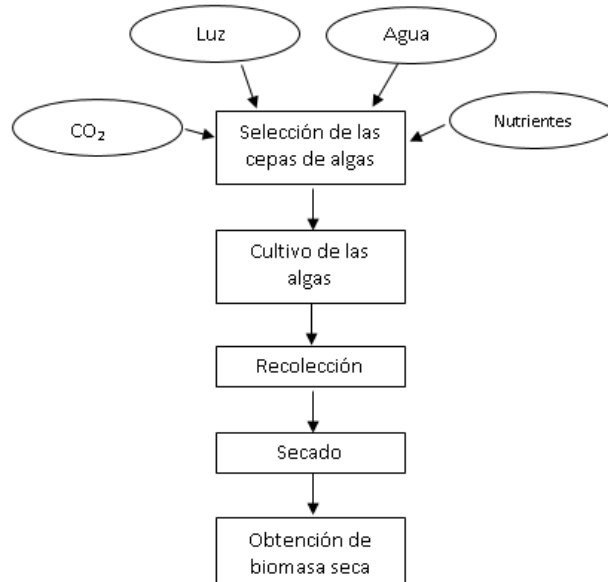


Figura 14: Proceso general de producción.

1. Selección de las cepas de algas.
2. Cultivo de las algas en el fotobiorreactor manteniendo unas condiciones constantes.
3. Crecimiento de las algas en estanques abiertos.
4. Cosechado de las algas.
5. Secado de las algas.
6. Procesado de las algas.

El procedimiento más común es el cultivo de las algas en estanques abiertos. Otros métodos de reproducción son los fotobiorreactores. Puede ser un reactor tubular, helicoidal, de bolsa, de placa plana o de capa delgada. Además se necesita para la reproducción heterotrófica un fermentador de algas^[8].

Los sistemas abiertos presentan una serie de desventajas como la disfunción debido a la poca luz y la contaminación de otros microorganismos, zooplancton y otras especies de algas autóctonas^[5].

A continuación se analizará el diagrama de bloques con las operaciones, procesos y equipos principales.

2.4.1 Cultivo de algas.

Las cepas de algas se seleccionan normalmente en función de su contenido de lípidos y la productividad de la biomasa^[4].

Además se debe considerar otras características como los nutrientes necesarios, la resistencia al estrés ambiental, la facilidad de separación y procesamiento de la biomasa y el potencial para otros productos químicos valiosos. En la siguiente tabla se muestran el contenido en lípidos y la productividad de biomasa de algunas especies de algas.

Tabla 3: Contenido en lípidos y productividad de biomasa de varias especies de algas

Especie de alga	Contenido en lípidos (% peso en seco)	Productividad de biomasa (g/L · d)
<i>Botryococcus braunii</i>	25 – 75	0,02
<i>Chaetoceros</i> sp.	15 – 40	0,04 – 0,07
<i>Chroella</i> sp.	2 – 63	0,02 – 7,70
<i>Dunaliella</i> sp.	6 - 71	0,09 – 0,34
<i>Isochysis</i> sp.	7 - 40	0,08 – 1,60
<i>Nannochloris</i> sp.	20 - 56	0,17 – 0,51
<i>Pavlova</i> sp.	31 - 36	0,14 – 0,16
<i>Spirulina</i> sp.	4 - 17	0,06 – 4,3
<i>Scenedesmus</i> sp.	2 - 55	0,004 – 0,74
<i>Tetrasebmis</i> sp.	9 - 23	0,12 – 0,32

La evaluación de los recursos y la selección del sitio deben realizarse antes del establecimiento del sistema de cultivo de algas. Los factores considerados para la evaluación de recursos y la selección del sitio incluyen el clima, las fuentes de agua, la disponibilidad de tierras, los suministros de nutrientes y las fuentes de carbono. El clima y la temperatura son factores que afectan directamente al crecimiento de las algas.

2.4.1.1 Equipos principales.

– REACTORES ABIERTOS^[13]:

También se conocen como raceway. Se emplean desde los años 50 y son los más comunes para la producción comercial de microalgas. Dentro de este tipo, se pueden clasificar en aguas superficiales naturales (estanques, lagunas y lagos) y en estanques artificiales. Los sistemas abiertos no necesitan grandes inversiones ni mantenimientos. La desventaja es que su control es más complicado por lo que tiene bajas productividades y eficiencia, además de ser más susceptibles a contaminaciones por otras algas o bacterias.

Los sistemas artificiales presentan diversos diseños: inclinados, circulares y de carrusel o canales que son los más comunes. Los tanques artificiales de canales suelen ser de hormigón ovalado y poco profundo, entre 15-30 cm. Se suele propulsar mediante paletas, hélices o inyectores de aire, esto provoca una agitación que mejora el crecimiento de la biomasa. El suelo y las paredes suelen estar recubiertas por una capa de plástico inerte.

Los rendimientos son menores que los cerrados puesto que no se puede controlar las condiciones ambientales, como la temperatura, CO₂, evaporación e iluminación. Por lo tanto el crecimiento del cultivo depende de las condiciones del medio.

Actualmente el 95% de la producción de microalgas se basa en sistemas abiertos.



Figura 15: Tanque abierto^[14].

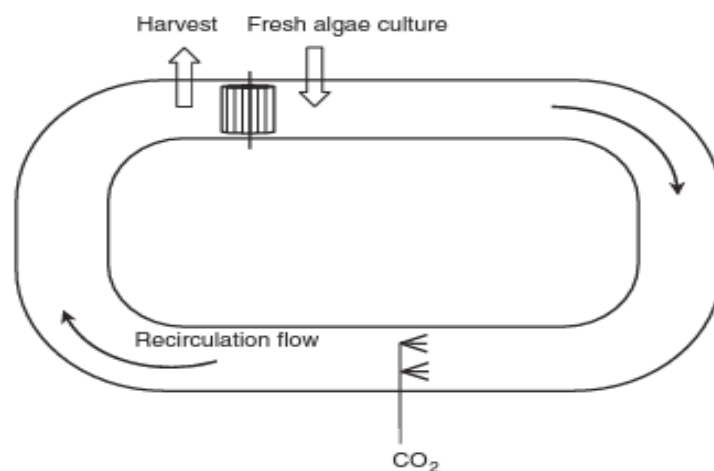


Figura 16: Esquema de un raceway^[15].

– **FOTOBIORREACTOR**^[16]:

Es un contenedor biológico artificial cuyo ambiente interno es capaz de generar las condiciones necesarias para que se lleve a cabo la fotosíntesis, aumentando su tamaño y su desarrollo. Es una manera rápida y eficiente de generar biomasa y los productos metabólicos que se encuentren dentro de ella. Por lo tanto el término fotobiorreactor se refiere a un sistema cerrado para el medio ambiente externo, es decir, no se produce un intercambio directo de gases ni contaminantes con el exterior.

Tipos de Fotobiorreactor:

- **Fotobiorreactor de Placa:** consiste en una serie de paneles o placas interconectadas dispuestas vertical u horizontalmente en cajas rectangulares. A menudo, se divide en dos partes para crear un efecto de agitación con recirculación del líquido (cultivo) del birreactor. Se emplean conexiones para realizar los procesos de llenado y vaciado, la introducción de CO₂ y el transporte de sustancias nutritivas. La introducción del CO₂ se realiza por la parte inferior para asegurarse de que éste tiene tiempo suficiente para interactuar con las microalgas en el seno del líquido del reactor.

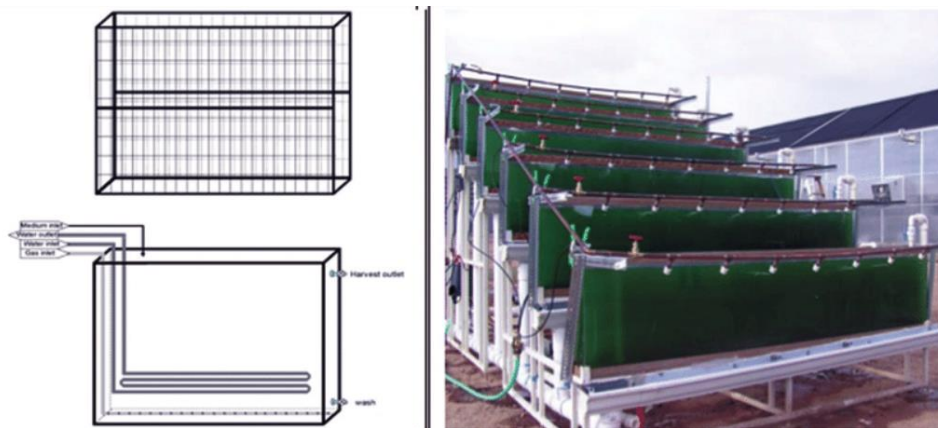


Figura 17: Fotobiorreactor de placa plana ^[17].

- **Fotobiorreactor Tubular:** consta de una serie de tubos dispuestos horizontal o verticalmente, conectados a un sistema de tuberías. El cultivo líquido de biomasa en suspensión, debe ser capaz de circular por la tubería. El material de los tubos suele ser plástico o vidrio y la circulación se mantiene constante gracias a una bomba impulsora al final del sistema. El CO₂ se introduce al principio y al final del sistema de tubos para evitar los problemas de difusión que ocasionan deficiencia de dióxido de carbono y alta concentración de oxígeno al final de la unidad durante la circulación del fluido.



Figura 18: Fotobiorreactor Tubular ^[18].

- **Fotobiorreactor de Columna de Burbujas:** es una columna vertical cilíndrica, hecha de material transparente, en la cual se introduce el gas por la parte inferior de la columna en condición de flujo turbulento ($Re > 3000$), para un óptimo intercambio de gases. El rango del diámetro es de 20-30 cm, para poder garantizar el suministro necesario de energía luminosa.
- **Fotobiorreactor Laminar** ^[19]: desarrollado por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) para la producción concentrada de biomasa de microalgas, basado en la técnica de células inmovilizadas, especialmente diseñado para utilizar el CO₂ y óxidos de nitrógeno procedentes de emisiones de instalaciones industriales, además de nitrógeno y fósforo procedentes de efluentes de depuración de aguas residuales. Consiste en una serie de paneles verticales huecos, cubiertos por ambas caras por paños de geotextil sobre los que se adhiere la población de algas para formar un biofilm directamente cosechable. Por el interior de la cámara de los paneles se puede inyectar mezclas de aire con gases enriquecidos en CO₂. El medio de cultivo, que contiene los elementos minerales necesarios para el crecimiento de las microalgas, que puede ser un efluente de una estación depuradora de aguas residuales, fluye por los paños de geotextil desde la parte superior, provocando que se forme sobre la superficie de éstos una abundante flora microalgal en forma de biofilm, que se puede cosechar por raspado, de forma manual o

mecánica. Este fotobiorreactor es de tipo modular, siendo la unidad básica un panel al que se le puede unir de forma lineal a otros paneles con la única limitación de tener asegurado el flujo constante del medio sobre su superficie y de la exposición de cada panel a las condiciones adecuadas de iluminación. La ventaja de este tipo de fotobiorreactor es que se obtiene directamente la biomasa concentrada en la capa de biofilm, por lo que no es necesario concentrarla en una centrifugadora. Esto supondría una reducción del coste energético en un 50 %.

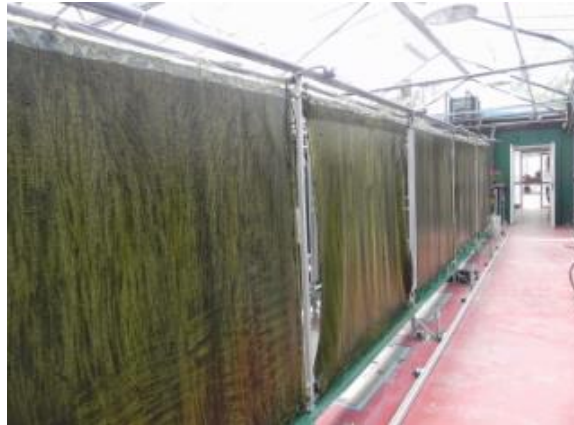


Figura 19: Fotobiorreactor Laminar^[19].



Figura 20: Detalle de un Fotobiorreactor Laminar. Raspado de una de sus láminas^[19].

2.4.2 Recolección.

La recolección es el proceso de recuperación de algas del medio de cultivo. Los sólidos disueltos en un reactor abierto suele ser de 0,5 g/L. Esta concentración debe ser concentrada al menos a 200 g/L antes de la extracción o secado de lípidos para el almacenamiento.

La recolección se suele llevar a cabo en dos pasos:

1. Uno primario que aumenta la concentración de la biomasa a 10-20 g/L
2. Uno secundario que aumenta aún más la concentración hasta 150-250 g/L.

La recolección de las algas puede representar hasta un 20-30 % del coste total de la producción de la biomasa de algas.

Las tecnologías de recolección de algas incluyen: la sedimentación basada en la gravedad, filtración con micropantallas, vibración ultrasónica, separación con membranas, centrifugación, floculación, floculación de espuma y autofloculación.

2.4.2.1 Equipos.

- **Floculación** ^[20]: las microalgas presentan una carga superficial negativa que evita la agregación de las células en suspensión. Para evitar ese efecto, se añaden compuestos químicos coagulantes o floculantes, que permiten que la carga superficial sea neutralizada. Las sales metálicas son floculantes eficaces. Las más utilizadas incluyen cloruro férrico (FeCl_3), sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$). A veces, se puede conseguir una floculación eficaz cambiando simplemente el pH de la suspensión de biomasa. Se puede lograr con valores de pH entre 11,8 y 12, sin añadir otros floculantes. Puede llegar a separar hasta el 95% de la biomasa de algas en suspensión. Sin embargo, valores extremos de pH puede causar efectos adversos. La recolección por floculación es un método demasiado costoso para operaciones de gran escala, y puede ser económicamente no viable.
- **Autofloculación**: el concepto data de los años 70 (Golueke & Oswald, 1960). La autofloculación se produce como resultado de la precipitación de fosfatos y carbonatos de calcio y magnesio que arrastran a las partículas de las microalgas cuando el pH de la mezcla es elevado. Este pH crece por el consumo de dióxido de carbono que producen las algas al realizar la fotosíntesis. Por lo que se puede afirmar que el cultivo expuesto a alta exposición de luz solar y con limitación de CO_2 , ayuda a la autofloculación de la biomasa algal, promoviendo así la floculación espontánea y la posterior cosecha natural de ésta. La fase más favorable para la floculación de las algas es la final de la fase exponencial de crecimiento.
- **Centrifugación**: es un método por el cual se pueden separar sólidos de líquidos de diferente densidad mediante una centrifugadora, la cual le da un movimiento rotatorio a la mezcla con una fuerza mayor a la de la gravedad, provocando la sedimentación de los sólidos o de las partículas de mayor densidad. La centrifugación implica un consumo grande de energía. Es uno de los procesos más utilizados porque consigue la separación de la biomasa de una forma eficiente y sin necesidad de añadir compuestos químicos. Para una producción a gran escala, la centrifugación es el método más interesante desde el punto de vista económico.
- **Filtración** ^[20]: las prensas de filtro que operan con presión o vacío son satisfactorias para separar algas relativamente grandes como la Spirulina, pero fallan para algas como la Chlorella, Dunaliella o Scenedesmus.
- **Sedimentación por gravedad** ^[20]: es el método más sencillo y menos costoso. Los parámetros que más influyen son la densidad y el diámetro de las partículas de la biomasa, y por consiguiente la velocidad de sedimentación. No es un método muy fiable ya que no siempre se recupera el mismo porcentaje de algas, además de ser un proceso lento y con un bajo rendimiento.

2.4.3 Secado.

Es posible que la biomasa recolectada deba secarse hasta alcanzar un contenido en humedad del 12-15 % p/p antes de la extracción de los lípidos. Además es necesario para el almacenamiento de la biomasa de algas que será esencial para la continua operación de una biorrefinería de algas a escala industrial.

El proceso de secado puede contribuir como un 70-80 % del coste de producción.

El secado solar es la forma más económica de secar algas desde aproximadamente un 20 % de sólidos disueltos hasta un 90 %. Sin embargo, el rendimiento es altamente impredecible debido a las variaciones del clima, la pérdida de calidad del producto y los olores desagradables. El secado solar consiste en una cámara de madera con la superficie interior pintada de negro y la parte superior cubierta con una placa de vidrio de 2 mm, pudiéndose producir una temperatura del aire de 60-65 °C.

2.4.3.1 Equipos.

En esta etapa no se suelen emplear equipos ya que requerirían altos costes de energía, pero en pequeñas producciones se pueden emplear secadores.

2.4.4 Extracción de lípidos (en el caso de producción de biodiésel).

El proceso de producción para la producción de biodiésel varía un poco con respecto al anterior. Se divide en los pasos que se muestran en la siguiente figura:

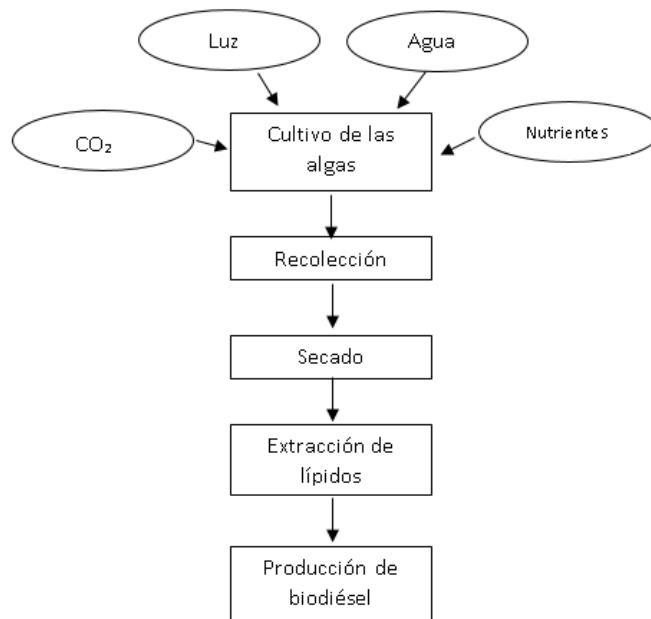


Figura 21: Proceso de producción del biodiésel ^[4].

Incluye el cultivo de las algas, la cosecha y secado de biomasa de algas, extracción de lípidos y la conversión de los lípidos en biodiésel.

Las algas se cultivan para obtener concentraciones de biomasa de algas aproximadamente de 0,5 g/L o más, seguidas por la cosecha de las algas para obtener una suspensión de algas con un total de sólidos de alrededor del 15-25 %. Esta suspensión de algas se seca para obtener una torta de algas con un contenido total de sólidos de aproximadamente 85-95 %, seguido de una extracción de lípidos y producción de biodiésel.

Se puede extraer el aceite con algas deshidratadas o con algas húmedas.

Hay varios procesos para la extracción de lípidos, como por ejemplo:

- **Extracción con fluidos supercríticos** ^[4]: un fluido supercrítico es cuando se encuentra en condiciones de presión y temperatura superiores a las críticas. En estas condiciones el fluido tiene características de gas y de líquido, adquiriendo propiedades como baja viscosidad y alta difusividad relativa que le permite penetrar fácilmente en los sólidos y ofrecer una mejor y rápida extracción, los más usados con dióxido de carbono y agua. Se licua el dióxido de carbono y se calienta a presión para que actúe como solvente en la extracción de aceites.
- **Extracción de solventes con homogeneización a alta velocidad (SHE)** ^[21]: consiste en un método de extracción con solvente combinado con alta velocidad de homogeneización, basado en el método de Folch y Bligh & Dyer. Los solventes son metanol y cloroformo. Este método consta de las siguientes etapas: agitación, centrifugación, separación y volatilización.

2.5 Análisis de ciclo de vida (ACV).

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta especialmente útil para la evaluación de tecnologías poco maduras o desarrolladas. A través de este análisis se pueden identificar las etapas que necesitan ser mejoradas para poder conseguir procesos más eficientes y sostenibles.

La norma internacional ISO 14040:2006 define ACV como “una técnica para determinar los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados a un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos potenciales asociados a estas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación a los objetivos del estudio” [22].

Hay cuatro fases en un estudio de ACV:

1. Fase de definición del objetivo y el alcance.
2. Fase de análisis del inventario.
3. Fase de evaluación del impacto ambiental.
4. Fase de interpretación.

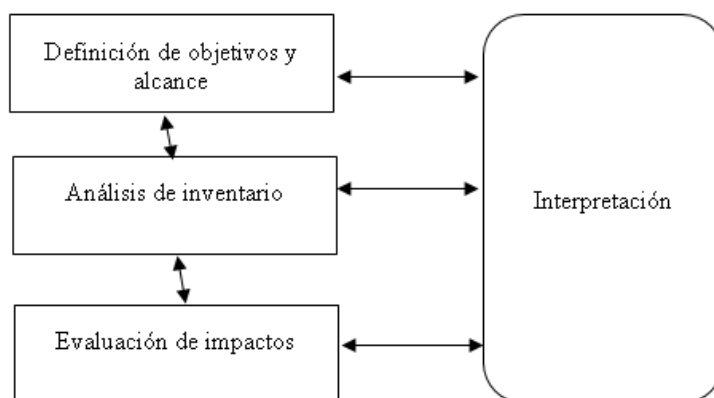


Figura 22: Fases del Análisis del Ciclo de Vida.

2.5.1 Fase de definición del objetivo y el alcance.

Se analizará una biorrefinería de algas que emplea microalgas como materia prima, para la producción de biomasa seca de microalgas para la posterior venta para la producción de complementos alimenticios, piensos o biodiésel. El objetivo será cuantificar los requerimientos energéticos y de agua para la obtención de esta biomasa seca de algas, además de ver cuál será el posible impacto ambiental. Se elegiría una unidad de análisis para partir de un dato por ejemplo a la salida: la cantidad deseada de biomasa seca de algas.

2.5.2 Fase de análisis del inventario.

Para realizar el inventario, se consideran las entradas y salidas de materiales y energías para todas las etapas descritas del proceso. La sostenibilidad ambiental se relaciona con las evaluaciones de impacto ambiental debidas a las emisiones a la atmósfera, el agua y la tierra y evitar emisiones mediante configuraciones mejoradas de procesos, materias primas, productos y distribuciones de la cadena de suministro. Debe extenderse a la formulación de todos los pasos en un ciclo de vida del producto, adquisición de la materia prima, fabricación, logística y, después del consumo, reutilización, reciclaje y vertedero. Las emisiones de los ciclos de vida de los materiales de construcción deben incluirse en el estudio de ACV, como se puede ver en la siguiente figura [15].

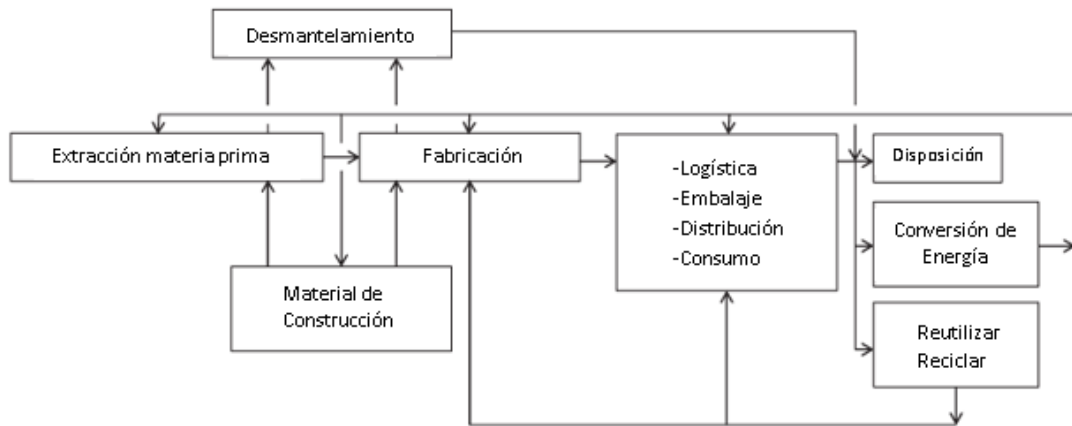


Figura 23: Etapas del ciclo de vida de inicio a fin ^[15].

En el caso de una biorrefinería de algas, se deben evaluar los beneficios ambientales resultantes y los efectos perjudiciales de los sistemas de producción basados en algas para determinar la sostenibilidad general. A pesar de ser una solución efectiva para la captura de CO₂ y evitar la tierra para la alimentación, las algas necesitan algún tipo de fertilización. El cultivo con agua limpia también podría causar el agotamiento de los recursos hídricos locales. Además, el impacto ambiental del suministro de materiales de construcción también puede ser importante, sobre todo en el caso de emplear fotobiorreactores ya que pueden necesitar materiales especiales para su fabricación.

En la siguiente figura, se puede observar el proceso y las entradas y salidas que nos podemos encontrar.

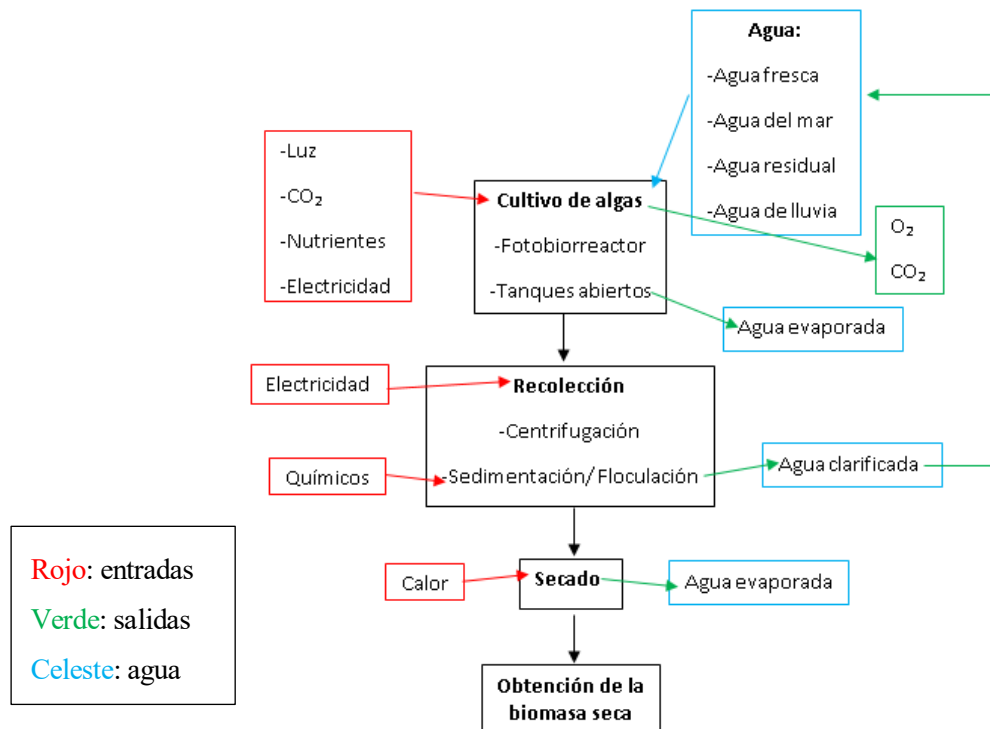


Figura 24: Proceso de una biorrefinería con algas con sus entradas y salidas.

También se debe incluir en el inventario las entradas y salidas de agua. Además se puede analizar la huella hídrica en el proceso de producción, que se refiere a:

- Volumen total de agua dulce utilizada para el proceso o actividad.
- Volumen neto de consumo de agua dulce y posibles impactos en la disponibilidad y calidad de agua en ciertas regiones o ecosistemas.

Esta medida es útil para aumentar el conocimiento de las cantidades de agua que se utilizan para obtener ciertos productos. Además, sirve como indicador de los impactos reales causados por el uso del agua. Se están desarrollando una serie de indicadores de impacto, como la acidificación, la eutrofización y la toxicidad del agua. Todas las entradas de agua deben contabilizarse en el inventario del agua. El consumo neto puede centrarse en la cantidad de agua dulce consumida en un sistema que potencialmente afecta a la disponibilidad y calidad de este recurso. Un análisis de esta huella hídrica, podría hacerse utilizando el *índice de estrés hídrico* (WSI). Puede oscilar entre 0-1 ^[23]. Calcula el porcentaje de la demanda de agua que no puede satisfacerse sin tomar medidas ^[24].

$$WSI = \frac{\text{Retirada o extracción de recursos hídricos (m}^3\text{)}}{\text{Disponibilidad total de recursos hídricos (m}^3\text{)}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Si el WSI es cercano o igual a 1, significa que ese cuerpo hídrico o cuenca se está sobreexplotando. Sin embargo, si se encuentra entre 0-0,2, se está explotando levemente ^[25].

La disponibilidad de recursos hídricos varía con la ubicación y las características climáticas de dichos lugares, como la precipitación (que aumenta la disponibilidad) y la irradiación de energía solar (que disminuye esta disponibilidad debido a la evaporación). Estas variaciones confieren dinamismo a un análisis de la huella hídrica, ya que los inventarios varían con el tiempo y el espacio.

Por lo tanto, el inventario de este proceso quedaría de la siguiente forma:

Tabla 4: Inventario general de una biorrefinería de algas.

Etapa	Entradas	Salidas
<i>Cultivo de microalgas</i>	-Microalgas. -CO ₂ . -Agua (puede provenir de distintos sitios). -Nutrientes. -Luz. -Energía eléctrica.	-Mezcla de biomasa de microalgas y agua. -Agua evaporada (en el caso de tanques abiertos).
<i>Floculación de la biomasa</i>	-Mezcla de biomasa de microalgas y agua. -Agente floculante (químicos). -Energía eléctrica.	-Biomasa húmeda de microalgas. -Agua clarificada.
<i>Centrifugación de la biomasa</i>	-Biomasa húmeda de microalgas. -Energía eléctrica.	-Biomasa húmeda de microalgas.
<i>Secado de la biomasa</i>	-Biomasa húmeda de microalgas. -Energía eléctrica (calor).	-Biomasa seca de microalgas. -Agua evaporada.

2.5.3 Fase de evaluación del impacto ambiental.

En esta fase, se analizan los resultados del inventario para evaluar el potencial de las diferentes condiciones de impactos ambientales. Los datos del inventario se convierten en efectos ambientales al multiplicar el flujo de un inventario por un factor de caracterización del impacto. El factor de caracterización del impacto de una carga ambiental (o sustancia química o contaminante), indica su intensidad del impacto con respecto a una sustancia de referencia. Por ejemplo el impacto del GWP del metano factor de caracterización 25 g de CO₂ equivalente, significa que el metano tiene 25 veces más CWP en comparación con el CO₂. Existen varias metodologías dependiendo de lo que se esté analizando. En las tablas Tabla 5y Tabla 6, se pueden ver algunos ejemplos.

Tabla 5: Unidades para diversas caracterizaciones de impactos, ejemplo 1 ^[15].

Impact Characterization	Accepted Unit
Climate change	kg CO ₂ equivalent
Ozone depletion	kg CFC-11 equivalent
Human toxicity, cancer effects	CTUh (comparative toxic unit for human)
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh
Particulate matter, respiratory inorganics	kg PM2.5 equivalent
Ionizing radiation, human health	Human exposure efficiency relative to U ²³⁵
Photochemical ozone formation	kg NMVOC (non-methane volatile organic compounds) equivalent
Acidification	kg N or S equivalent
Eutrophication, terrestrial	kg N or S equivalent
Eutrophication, aquatic	Fraction of nutrients reaching end compartment
Ecotoxicity	CTUe (comparative toxic unit for ecosystem)
Resource depletion, water	Water stress index (WSI)
Resource depletion, mineral, fossil and renewable	kg Sb equivalent

Tabla 6: Unidades para diversas caracterizaciones de impactos, ejemplo 2 ^[15].

Impact Characterization	Accepted Unit
Climate change	kg CO ₂ equivalent
Terrestrial acidification	kg SO ₂ equivalent
Freshwater eutrophication potential	kg P equivalent
Ozone depletion potential	kg CFC-11 equivalent
Fossil depletion	kg oil equivalent
Freshwater ecotoxicity	kg DCB equivalent
Ionizing radiation	kg U235 equivalent
Marine ecotoxicity	kg DCB equivalent
Marine eutrophication	kg N equivalent
Metal depletion	kg Fe equivalent
Natural land transformation	m ²
Particulate matter formation	kg PM10 equivalent
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC equivalent
Terrestrial ecotoxicity	kg DCB equivalent
Water depletion	m ³

2.5.4 Fase de interpretación.

Se analizan todos los datos obtenidos y se realiza una conclusión. Se podría llegar a ver si el proyecto puede mejorarse en ciertas partes para disminuir consumos o reducir ciertos impactos ambientales.

2.5.5 Ejemplo de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Al ser todavía procesos experimentales o desarrollados en plantas pilotos, este análisis se realizará basándose en la investigación realizada por Beatriz Silvia Garzón, V. Soler Legname, A. Viera, D. Tello y F. Cejas publicado en la revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente [26].

2.5.5.1 Definición del objetivo y el alcance.

El análisis fue de un sistema integrado de producción de biomasa de microalgas y otros productos como etanol, alimento animal, etc. El objetivo es cuantificar los requerimientos energéticos y de agua para la obtención de biomasa seca de microalgas además del impacto ambiental asociado al consumo de los recursos. La unidad funcional (o unidad de análisis) escogida fue de 1 kg de biomasa seca de microalgas lista para ser procesada para la generación de productos de valor energético y alimenticio. En la siguiente figura se muestra el sistema integrado para esta producción. El recuadro de línea discontinua representa los procesos que se tienen en cuenta a la hora de realizar este estudio. (Siendo FBR: fotobiorreactor).

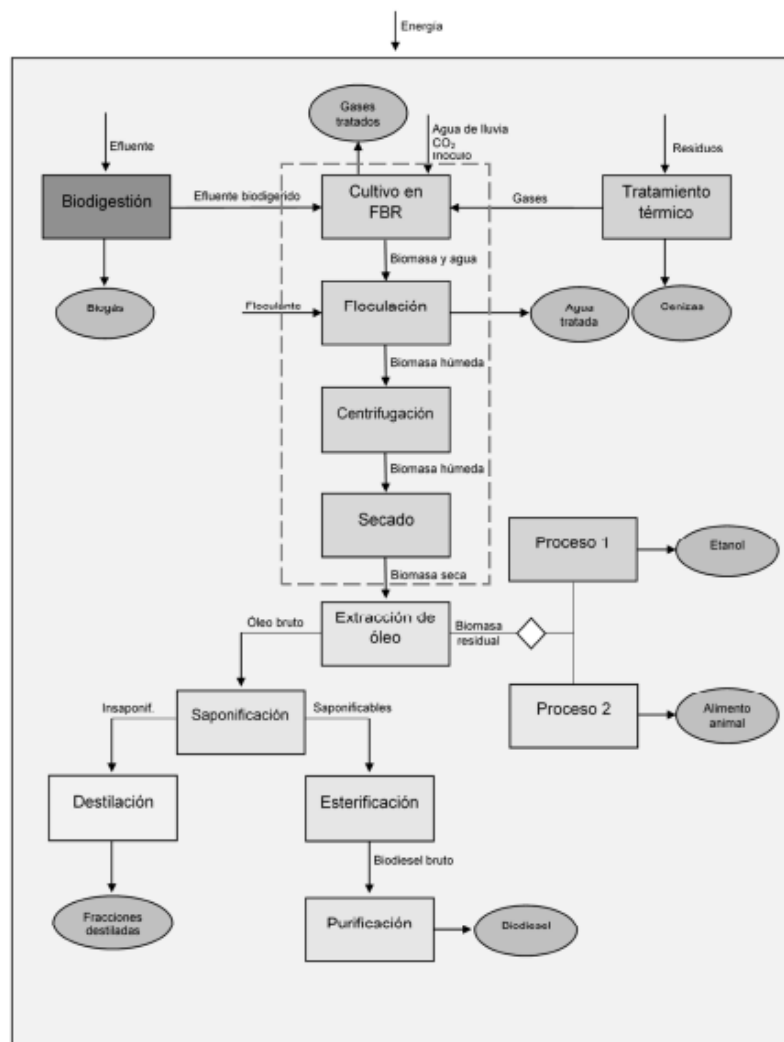


Figura 25: Sistema integrado de producción de biomasa seca de microalgas y otros productos [26].

El sistema estudiado se sitúa en Perú, en la región sur de Brasil. Tiene la capacidad de generar varios productos de alto valor comercial. Además tiene varios servicios como el tratamiento de agua residual, el tratamiento térmico de residuos sólidos no renovables y la depuración de gases de combustión, mediante el cultivo de microalgas del género *Scenedesmus*. La producción se divide en cuatro etapas, como las mencionadas en el apartado 2.4 Esquema general de una biorrefinería de algas.

1. Cultivo de microalgas: se realiza en fotobiorreactores tubulares compactos. Este proceso dura 15 días desde que se carga en el fotobiorreactor hasta la cosecha.
2. Floculación de la biomasa: se recupera la biomasa. Se conduce hasta los tanques de floculación. Allí se adiciona un agente floculante (polímero orgánico catiónico) y se mezcla mediante el burbujeo de aire y agitación mecánica dentro de los tanques. Al finalizar el proceso, la biomasa se deposita en el fondo de los tanques y el agua queda encima. Si esta agua se trata, puede ser destinada a consumo humano, consumo animal, etc.
3. Centrifugación de la biomasa: se centrifuga la biomasa hasta obtener un humedad del 90 %.
4. Secado de la biomasa: se coloca en estufas a 60 °C, donde permanecen durante tres días para reducir el contenido de humedad hasta un 5-10 %. Obteniéndose la biomasa seca de algas, que puede ser destinada a la generación de otros productos, como el biodiésel.

2.5.5.2 Análisis del inventario.

Para realizar el inventario, se consideran las entradas y salidas de materiales y energías para todas las etapas descritas anteriormente.

Tabla 7: Entradas y salidas de materiales y energía.

Etapa	Entradas	Salidas
<i>Cultivo de microalgas</i>	-Microalgas. -CO ₂ . -Agua de lluvia. -Estiércol de cerdo biodigerido. -Energía eléctrica: Llenado y circulación del fotobiorreactor y bombeo de aire.	-Mezcla de biomasa de microalgas y agua.
<i>Floculación de la biomasa</i>	-Mezcla de biomasa de microalgas y agua. -Agente floculante. -Energía eléctrica: Tanque floculador mecánico y tanques floculadores con burbujeo de aire.	-Biomasa húmeda de microalgas. -Agua tratada.
<i>Centrifugación de la biomasa</i>	-Biomasa húmeda de microalgas. -Energía eléctrica: Centrifugadora.	-Biomasa húmeda de microalgas.
<i>Secado de la biomasa</i>	-Biomasa húmeda de microalgas. -Energía eléctrica: estufas de secado.	-Biomasa seca de microalgas.

- **Análisis energético:**

El balance de energía de los biocombustibles se analiza empleando la **Tasa de Retorno de Energía (EROI)**, concepto desarrollado por Hall *et al.* (1981) y Cleveland *et al.* (1984). El índice EROI expresa la relación entre la cantidad de energía obtenida en el proceso de producción de biocombustibles y la energía no renovable requerida para la producción de dicho biocombustibles (la que se obtiene entre la que se emplea), se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$EROI = \frac{\text{Energía ganada}}{\text{Energía no renovable necesaria para obtener la energía ganada.}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Este índice es adimensional. Para:

- EROI <1: indica una pérdida neta de energía, es decir, el biocombustible necesita más energía no renovable durante su producción de la que después genera, por lo que no puede ser empleado como biocombustible. No sería un procesos sostenible os sustentable^[27].
- EROI >1: sugieren una ganancia energética neta.

Otros autores como Oliveira *et al.* (2012), emplean el índice de **Relación de Energía Neta** (NER), que muestra la relación entre la energía producida por el biocombustible y la necesaria para su producción. Al igual que en el índice EROI, valores NER <1 revelan una pérdida neta de energía y valores NER >1 indican una ganancia neta de energía. La diferencia con el índice EROI, es que el índice NER tiene en cuenta toda la energía consumida, incorporando las que provienen de fuentes renovables. También es un número adimensional. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$NER = \frac{\text{Energía producida}}{\text{Energía consumida en la producción}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Para poder calcular la energía total y la energía no renovable requerida en el proceso para el cálculo de ambos índices, esta investigación utilizó el indicador de Demanda de Energía Acumulada (CED) calculado el software SimaPro versión 8.0.5.13 para 1 kg de biomasa seca de microalgas. Una vez obtenidos los valores de energía requerida en el proceso y de energía obtenida de la biomasa seca, se determinaron los índices EROI y NER. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos.

Tabla 8: Valores de los índices de EROI y NER.

	EROI	NER
Energía ganada (MJ)	$1,406 \cdot 10^1$	$1,406 \cdot 10^1$
Energía consumida (MJ)	$1,644 \cdot 10^3$	$5,780 \cdot 10^3$
Valor del índice	$8,550 \cdot 10^{-3}$	$2,431 \cdot 10^{-3}$

En la siguiente figura se puede observar la demanda energética no renovable y total calculada mediante el software mencionado anteriormente por cada etapa del proceso de producción de 1 kg de biomasa seca de microalgas.

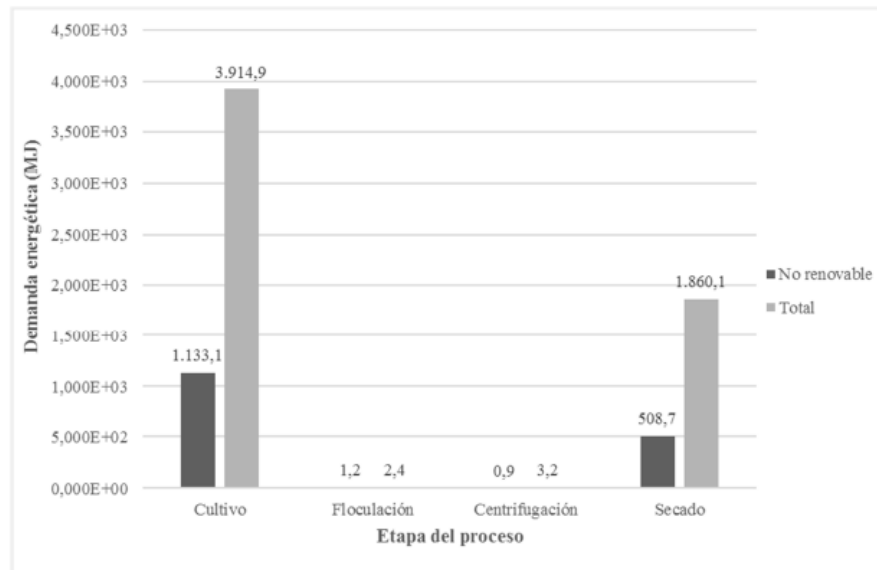


Figura 26: Demanda energética no renovable y total para cada etapa del proceso.

En la Figura 26; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Se puede observar que el mayor consumo energético se produce en el cultivo de las microalgas, seguido del secado de la biomasa, mientras que las etapas de floculación y centrifugación, son las que menos energía demandan.

2.5.5.3 Evaluación del impacto ambiental.

En este apartado se comentará el impacto por el uso de agua. El agua se consume en la etapa de cultivo ya que se emplea como medio de crecimiento de las microalgas. Este proceso requiere menos demanda de agua que otros para la producción de biocombustibles a partir de otro tipo de materia prima. Ya que esta demanda de agua para el cultivo de microalgas proviene de agua de lluvia recolectada que en el caso de este estudio, no se necesitó el aporte de más agua proveniente de otros sitios. Por lo que esto coloca al proceso en una situación ventajosa en cuanto al impacto por el uso del agua.

En este estudio no se han tenido en cuenta factores de caracterización de otro tipo de impactos como los mencionados en el apartado 2.5.4 Fase de interpretación.

2.5.5.4 Interpretación.

Las microalgas parecen ser una buena materia prima para la producción de biocombustibles, especialmente biodiésel, pero los estudios realizados no permiten tener una idea clara del impacto que genera la producción y uso de estos biocombustibles de tercera generación.

No obstante, en el estudio energético, se muestra que la producción de biomasa seca de microalgas genera una pérdida neta de energía, debido a la alta demanda energética del proceso tanto en el cultivo de las microalgas en los fotobiorreactores como en el secado de la biomasa. Por lo tanto, será necesario mejorar el proceso de producción para disminuir ese consumo energético

Innovaciones tecnológicas y aumentos en la productividad, podrían causar el balance energético de la biomasa seca de microalgas se torne a positivo, permitiendo considerar a las microalgas como una opción real para la producción de biocombustibles.

3 INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN BIORREFINERÍAS DE ALGAS

Para mejorar tanto la tecnología como los procesos productivos, es necesario realizar grandes inversiones puesto que se desea encontrar un sistema de producción eficiente que hoy en día no existe. Es por ello que se necesitan ayudas y nuevas leyes por parte de los gobiernos para que ayuden tanto a los laboratorios de investigación como a las empresas para que puedan llevar a cabo sus investigaciones.

3.1 Estado actual de desarrollo en el mundo

3.1.1 Proyectos de investigación y desarrollo.

- **Proyecto CO₂AlgaeFix:** fue un proyecto español financiado por el programa LIFE+ de la Unión Europea (UE) ^[28]. La duración de este proyecto fue del 01/marzo/2011 hasta el 30/junio/2014 aunque se anunció que se prolongaría hasta el 31/12/2015. Contó con un presupuesto de 2.980.594 € cofinanciado por la UE un 50 % (1.490.297 €). La localización del proyecto fue en Arcos de la Frontera, Cádiz (España) ^[29]. El proyecto CO₂AlgaeFix nace con el principal objetivo de fijar y capturar CO₂ procedente de plantas de generación eléctrica mediante el cultivo de microalgas, para lo cual se desarrolló un prototipo de birreactor vertical plano para poner a optimizar la eficiencia de captación de CO₂ para su transformación en biomasa y energía ^[30]. Los socios de este proyecto fueron Iberdrola y contó con el respaldo de la empresa Exalera (Grupo Everis), las universidades de Sevilla y Almería, la Agencia Andaluza de la Energía y la asociación de Madrid Biocluster.
- **Proyecto Life Seacolors:** fue un proyecto español financiado por el programa LIFE de la UE. La duración de este proyecto fue del 01/julio/2014 al 31/diciembre/2016. Contó con un presupuesto de 697,273€ cofinanciado por la UE un 50% (348.635€). Localización del proyecto Comunidad Valenciana (España). El proyecto consistió en demostrar que era posible emplear algas que es un recurso sostenible y renovable para producir tintes naturales. Después de validar el proceso, el segundo objetivo fue probar y evaluar si estos nuevos tintes naturales podrían reemplazar a los tintes sintéticos en la industria textil. El proyecto tuvo éxito y seleccionó 8 microalgas y cianobacterias con alto potencial para su explotación industrial como productores de colorantes. También desarrolló un proceso de cultivo optimizado para estas microalgas permitiéndoles crecer al aire libre y producir grandes cantidades de pigmentos ^[31].
- **Proyecto Neoalgae:** empezó siendo un proyecto y actualmente se ha convertido en una compañía de biotecnología que se centra en la acuicultura y más concretamente en las microalgas. Las emplean para obtener nuevos productos y aplicaciones que se han demostrado a nivel de laboratorio. La empresa nació el 31/octubre/2012 financiada por los propios ahorros de los socios ^[32]. La empresa tiene como objetivo llenar la brecha que existe entre la escala de laboratorio y los procesos industriales en el campo de las aplicaciones de las microalgas. Actualmente cuenta con la producción de diferentes especies de microalgas para su uso en sectores como la alimentación humana y animal, la cosmética o la farmacocósmética. Proporciona asesoramiento técnico para la implementación de fotobiorreactores para el cultivo de diferentes especies de microalgas. Además colabora con otras empresas y organizaciones en proyectos de I+D, tanto locales como internacionales. La planta de producción de encuentra en Gijón (España), y cuenta con una sala de producción con diferentes tipos de fotobiorreactores para el cultivo de especies tanto de agua dulce como salada ^[33]. En 2017, Neoalgae participó en el consorcio “Algae for healthy food (A4HW)” para producir biocompuestos de microalgas con aplicaciones alimentarias. El proyecto estaba formado por 7 socios para poder abordar el proyecto desde un punto de vista multidisciplinar y avanzar en la investigación. El plazo fue de dos años y contó con un presupuesto de

un millón de euros financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad en el programa Restos de Colaboración, y cofinanciado por Fondos Estructurales de la Unión Europea (FEDER) ^[34]. Actualmente sigue avanzando con interesantes resultados e inicia la recta final de su ejecución ^[35].

- **Proyecto Cyclalg:** El 22 de julio de 2016, se puso en marcha un proyecto europeo llamado CYCLALG con una duración de 3 años (julio 2018-julio 2019). Se trata de un consorcio formado por 6 centros tecnológicos de Euskadi, Navarra y Francia. Cuenta con un presupuesto de 1,4 M€ cofinanciado al 85% por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). CYCLALG promueve el uso de microalgas como fuente de energía renovable mediante mejoras en la viabilidad económica y sostenibilidad medioambiental del proceso y bajo la premisa fundamental de residuos cero ^[36]. Se plantea un modelo de proceso para la obtención de biodiésel, mediante el cultivo de microalgas basado en la revalorización de residuos y en su diversificación a co-productos de interés comercial. Se propone un esquema circular, donde los residuos orgánicos generados se aprovechen en el mismo proceso. Además se persigue la revalorización de residuos a diferentes productos de valor añadido en la industria química, energética y agropecuaria (bioadhesivos, metano, piensos y fertilizantes). El objetivo de este proyecto es establecer una tecnología de cultivo de microalgas estable, rentable, escalable y con características ventajosas de productividad. Dirigida a la producción de microalgas como materia prima para la obtención de biodiésel. Estudio y valorización del impacto medioambiental de las distintas vías de valorización de residuos desde una perspectiva medioambiental, empleando el análisis de ciclo de vida. Aún no ha publicados unos resultados finales.

3.1.2 Plantas piloto y plantas comerciales.

En la actualidad se pueden encontrar cuatro plantas pilotos:

- **ECODUNA** ^[12]: ubicada en Austria. Se trata de una biorrefinería integrada a escala piloto, y emplea como materia prima microalgas. Fue fundada en 2010. EL proceso de producción y la tecnología fueron desarrollados en detalle y patentados a nivel mundial. Una planta de demostración e investigación fue completada en 2012, haciendo posible el ensayo de los procedimientos de operaciones reales y estableciendo las bases para la consolidación técnica y comercial de la tecnología. Su sistema está basado en una tecnología concebida y patentada a nivel mundial para el cultivo de la biomasa a nivel mundial denominada “jardines colgantes”.
- **ALGEDOL** ^[37]: se encuentra en Florida, USA. Se dedica a la producción de algas, sobre todo al ámbito de la alimentación, producción de complementos alimenticios. Fue fundada en 2006. Y patentó una tecnología que utiliza algas para producir los cuatro combustibles más utilizados: etanol, gasolina, diésel y combustible de aviación. La mayor parte de combustible, sobre el 85%, es etanol. En octubre de 2011, Algedol inició la construcción de su Biorrefinería Integrada (IBR) a escala piloto, y el Departamento de Energía de USA (DOE), le concedió una ayuda de 25 millones de dólares para su desarrollo.
- **CELLANA** ^[8]: ubicada en Hawaii’s Big Island, USA. Se dispone de un módulo de una planta piloto. Estos módulos se pueden agrupar y aumentar la capacidad de producción. Emplean las microalgas como materia prima para producir fotosintéticamente su línea ReNew de aceites Omega-3 de EPA, materia prima de tinta a base de algas y biocombustibles y alimentos para animales. Ha patentado un sistema llamado ALDUO para la producción económica, sostenible y constante de algas fotosintéticas sin OGM (no están genéticamente modificadas) a escala industrial. Ha firmado un acuerdo con Neste Oil que es el proveedor líder mundial de diésel renovable. Opera desde 2009. Las algas se cultivan en el sistema híbrido patentado de Cellana, la tecnología ALDUO™. Emplea una combinación de fotobiorreactores y estanques abiertos. Cellana cuenta con un acuerdo con Nester Oil, el proveedor líder mundial de diésel renovable. Actualmente Cellana comercializa su sistema ALDUO™ de forma modular y escalable. Esto significa que las instalaciones comerciales pueden construirse económicamente y aún mantener la capacidad de expandirse para satisfacer la creciente demanda de productos a base de algas.
- **MURADEL** ^[33]: se encuentra en Whyalla, Australia. Se encuentra en fase de investigación. Se fundó en 2010. Esta empresa pretende comercializar el cultivo de microalgas. Entre sus investigaciones, se encuentra un cultivo con determinadas especies de alto contenido en proteínas para producir plásticos especiales, aunque de momento se encuentra en fase de investigación. También lleva a cabo una investigación de producción de biomasa de algas marinas para emplearlas en medicamentos,

cosméticos, alimentos para animales y nutrientes y pescado. Dispone de una plataforma de desarrollo tecnológico llamada Green2Black, mediante la cual se emplean neumáticos de automóviles al final de su vida útil para general aceite biocrudo. Posee una planta de demostración construida en 2013 y que empezó a funcionar a mediados de 2014.

3.2 Logros y proyectos de investigación en el mundo.

3.2.1 Programas.

- **Programa LIFE:** es un programa de la UE que financia proyectos relacionados con el medio ambiente, la conservación de la naturaleza y el clima. Se creó en 1992 para financiar proyectos de la UE y en países candidatos y vecinos. El 25 de octubre de 2018, la Comisión Europea aprobó un importante paquete de financiación para el programa LIFE, el instrumento financiero de la UE para el medio ambiente y la lucha contra el cambio climático. El presupuesto de 243 millones de euros forma parte de una inversión total de 430,7 millones de euros para apoyar los 142 proyectos seleccionados en 2018^[39].
- **Programa REBECA:** es una plataforma de desarrollo y cooperación territorial creada para fomentar la biotecnología azul dentro del ámbito geográfico de la región Macaronésia y noroeste de África. REBECA reúne a colecciones de cultivo, centros de I+D y a la Administración con la misión de conservar y poner en valor la biodiversidad y servir de embrión para el desarrollo e implantación de una industria innovadora basada en el cultivo de las microalgas y cianobacterias que suponga un motor económico y la mejora de la calidad de vida de la región. Pretende crear una red de colecciones de cultivo de microalgas y actividades biotecnológicas aplicadas y la valoración y caracterización de nuevas cepas nativas para la industria. Además, su objetivo es crear una producción de algas a escala industrial. Cuenta con la ayuda del Banco Español de Algas (BEA), la Universidad de las Palmas de Gran Canaria y la Universidad de Cabo Verde entre otras^[40].
- **ARPA-E (Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados-Energía):** es una agencia del Gobierno de los Estados Unidos encargada de promover y financiar la investigación y el desarrollo de tecnologías energéticas avanzadas. Fue creada para financiar proyectos de tecnología de la energía que traduzcan descubrimientos científicos e invenciones en innovaciones tecnológicas en áreas de alto riesgo que la industria no es probable que opere de forma independiente. No financia mejoras mínimas en tecnologías existentes^[41]. El presupuesto inicial de 400 millones de dólares de ARPA-E fue parte de la Ley de Reinversión y Recuperación Estadounidense de 2009^[42].
- **Proyecto Mariner:** es un programa dentro de la agencia ARPA-E. Trata de la investigación sobre macroalgas para inspirar nuevos recursos energéticos. El programa busca desarrollar las herramientas para permitir que Estados Unidos se conviertan en un líder mundial en producción de biomasa marina. Este proyecto se divide en cinco categorías^[43]. Tiene un presupuesto de 22 millones de dólares para financiar a 18 proyectos^[44].
 1. Diseño e implementación experimental de sistemas integrados de cultivo y cosecha.
 2. Diseño e implementación experimental de tecnologías de componentes avanzadas.
 3. Diseño y prueba de herramientas de modelado computacional.
 4. Diseño y prueba de herramientas de monitoreo acuático.
 5. Investigación y desarrollo de mejora genética avanzada y herramientas genéticas.

3.3 Políticas de ayuda e incentivos.

La nueva reglamentación europea sobre nuevos alimentos y nuevos ingredientes alimentarios (**Reglamento CE nº 258/97** ^[20]) permite superar la barrera que tradicionalmente limitaba la comercialización de productos elaborados a partir de algas. Dicha reglamentación se aplica a los alimentos y nuevos ingredientes alimentarios que no se han consumido anteriormente en cantidades significativas en la UE: *“Alimentos o ingredientes alimentarios consistentes en microorganismos, hongos o algas u obtenidos a partir de éstos*

Directiva 2009/28/CE del parlamento europeo y del consejo, es relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/11/CE y 2003/30/CE. En dicha Directiva, en el punto 89, dice *“Diseñar sus sistemas de apoyo, los Estados miembros podrán fomentar el uso de biocarburantes que aporten ventajas adicionales, en particular la diversificación que permiten los biocarburantes obtenidos a partir de desechos, residuos, material lignocelulósico y algas. Los Estados miembros podrán impulsar la inversión en la investigación y el desarrollo de estas y otras tecnologías de energía renovable que requieran tiempo para llegar a ser competitivas* ^[46]”.

Plan de energías renovables (PER) 2011-2020: el PER tiene el objetivo de lograr, tal y como indica la Directiva comunitaria, que en el año 2020 al menos el 20% del consumo final bruto de energía en España proceda del aprovechamiento de las fuentes renovables. Fue aprobado por Acuerdo del Consejo de Ministros el 11 de noviembre de 2011 ^[47]. Dentro de este plan, se contempla crear un marco regulatorio para el uso de las microalgas, conseguir procesos más sostenibles y la producción de biocarburantes a partir de algas ^[48].

4 CONCLUSIÓN

Hoy en día la producción de biocombustibles parece la mejor opción para poder sustituir a los combustibles fósiles. El problema es que las biorrefinerías de primera generación compiten con los cultivos para el consumo humano, las de segunda generación no tienen un proceso de producción totalmente implantado para poder llegar a competir con las refinerías de petróleo y por último las biorrefinerías de tercera generación, las que emplean algas como materia prima, están actualmente en fase de desarrollo.

Las algas muestran oportunidades prometedoras para la producción de biocombustibles, energía y productos de valor añadido. El problema es que todavía existen muchos desafíos que siguen sin resolverse e impiden el surgimiento exitoso de la producción comercial y a gran escala. Se puede mejorar el cultivo y la cosecha para reducir los costes de producción.

En la actualidad, todavía no se ha conseguido lograr un proceso en el que sea rentable la producción de biodiésel a escala industrial. Los estudios e investigaciones que se están llevando a cabo son a escala de laboratorios o plantas pilotos. Lo que sí que se ha conseguido es comercializar productos procedentes de algas. El ejemplo principal son los complementos alimenticios para consumo humano, piensos para animales o productos destinados a la industria farmacéutica.

La ventaja de las biorrefinerías con algas es que el cultivo de las microalgas no compite con la alimentación humana ya que los cultivos pueden llevarse a cabo en terrenos que no son útiles para la explotación agrícola, incluso en terrenos desérticos. Por eso, en el momento en el que se consiga un proceso de producción en el que sea rentable la producción de biocombustibles, será cuando pueden llegar a competir con los combustibles fósiles. La desventaja parte de ser todavía procedimientos experimentales y en fase de desarrollo, es que la producción de combustibles fósiles es un proceso totalmente consolidado y pasará mucho tiempo hasta que se logre eso con las biorrefinerías de tercera generación.

Se pueden llegar a integrar energías renovables, como la solar o la eólica, y emplear aguas residuales para el crecimiento de las algas. Así se mejorarían los aspectos ambientales en los sistemas de producción.

Una biorrefinería con algas es una gran idea ya que se conseguiría alcanzar una economía circular. Ayudaría a disminuir el uso de los recursos, a reducir la producción de residuos y a limitar el consumo de energía. Algunos de los proyectos emplean aguas residuales como medio de cultivo para aprovechar ese recurso y otros emplean CO₂ procedentes de plantas cercanas. Eso es una forma de darle un nuevo uso hasta lo que ahora se consideraba un desecho.

La unión Europea está concienciada con el desarrollo de biocombustibles, y es por ello que ha creado programas y ayudas, como el programa LIFE para proporcionar financiación a empresas cuyo objetivo sea este. En este trabajo no se han comentado las ayudas en EEUU a las empresas de este tipo, pero sí se han mencionado algunas empresas que comercializan sobre todo complementos alimenticios, que es lo que hoy día es más rentable que la producción de biodiésel a partir de algas.

En mi opinión, una biorrefinería con algas puede llegar a conseguir grandes beneficios sobre todo para el medio ambiente ya que las emisiones y el impacto ambiental son mucho menores que en una refinería convencional.

La tecnología avanza rápidamente y tenemos que ser capaces de adaptarla a los procesos que se están estudiando.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Real Academia Española, [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/?id=VckhJxg>. [Último acceso: Marzo 2019].
- [2] Cetenma, «Biorrefinerías, Informe de vigilancia tecnológica.» Diciembre 2018. [En línea]. Available: https://www.cetenma.es/wp-content/uploads/2018/12/Informe-VT-IC-4-2018_Biorref-1.pdf. [Último acceso: Agosto 2019].
- [3] A. Artech, «Biorrefinería verde basada en un concepto de Economía Circular.» 14 Julio 2017. [En línea]. Available: http://www.phytosudoe.eu/wp-content/uploads/2017/07/8_Amaya-Arteche_2nd-summer-course-PhytoSUDOE-July-2017.pdf. [Último acceso: Mayo 2019].
- [4] J. W. & Sons, Bioenergy: Principles and Applications, Wiley Blackell, 2017.
- [5] T. Díaz, «Algas: La clave del éxito,» *Ergomix*, 2013.
- [6] Malgas, «Aplicaciones de las microalgas: estado de la técnica,» Diciembre 2013. [En línea]. Available: <http://proyectomalgas.com/wp-content/uploads/2014/04/guiamalgas.pdf>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [7] E. Biofuels, «Fatty Acid Methyl Esters (FAME),» [En línea]. Available: <http://www.etipbioenergy.eu/images/fame-fact-sheet.pdf>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [8] CELLANA, [En línea]. Available: <http://cellana.com/>. [Último acceso: Febrero 2019].
- [9] A. d. I. J. V. y. E. P. H. Héctor Salvador Mendoza Guzmán, Planta piloto de cultivo de microalgas, 2011.
- [10] T. Materia, «Fotosíntesis,» Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.todamateria.com/fotosintesis/>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [11] «Control y eliminación de algas cianobacterias,» [En línea]. Available: <https://laguiadelacuario.com/algas-en-el-acuario/control-y-eliminacion-de-algas-cianobacterias/>. [Último acceso: Mayo 2019].
- [12] ECODUNA, [En línea]. Available: <https://www.ecoduna.com/unternehmen/wer-sind-wir/>. [Último acceso: Febrero 2019].
- [13] A. M. G. Céspedes, «Cultivos de microalgas a gran escala: Sistemas de producción,» Junio 2016. [En línea]. Available: <https://www.cajamar.es/pdf/bd/agroalimentario/innovacion/formacion/actividades-de-transferencia/018-microalgas2-1467367279.pdf>.
- [14] M. Segura, «La ruta natural,» 01 Septiembre 2013. [En línea]. Available: <http://www.larutanatural.eu/las-microalgas-que-cambian-el-mundo/>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [15] K. S. N. E. M. H. Jhuma Sadhukhan, Biorefineries and Chemical Processes, Chichester: Wiley, 2014.
- [16] R. A. Torres, «Biotecnología Práctica y Aplicada,» 06 Mayo 2011. [En línea]. Available: <https://bioreactorcrc.wordpress.com/2011/05/06/diseo-de-foto-bioreactores-para-el-cultivo-micro-algas->

- oleaginosas-parte-1-teora-y-generalidades/. [Último acceso: Agosto 2019].
- [17] «ResearchGate,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-a-Estructura-y-b-Fotografa-de-un-sistema-de-fotobiorreactores-de-placas_fig6_327006474. [Último acceso: Agosto 2019].
- [18] Universidad Nacional de Colombia, «Diseñan nuevo fotobiorreactor que mejoraría el cultivo de microalgas,» 24 Julio 2017. [En línea]. Available: <https://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/facultad/1673-disenan-nuevo-fotobiorreactor-que-mejoraria-el-cultivo-de-microalgas>.
- [19] U. P. d. Madrid, «Tecnologías más innovadoras UPM,» 21 Mayo 2014. [En línea]. Available: <http://upminnovatech.blogspot.com/2014/05/microalgas-solucion-sostenible-para.html>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [20] L. Renovable, «Diez maneras de cosechar microalgas para biocombustibles,» 29 Agosto 2013. [En línea]. Available: <http://latinoamericarenovable.com/2013/08/29/5227/>. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [21] Á. D. G.-D. y. V. Kafarov, «Design and adjustment of coupled microalgae oil extraction methods for the,» *Prospect*, vol. 10, n° 1, pp. 113-123, 2012.
- [22] O. B. P. (OBP), «ISO 140040:2006. Gestión ambiental-Análisis de ciclo de vida-Principios y marcos de referencia,» 27 Diciembre 2006. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [23] A. M. R. y. A. C. Salas, «Análisis de huella hídrica en la facultad de ingeniería ambiental,» 2016. [En línea]. Available: <http://fiauni.pe/sitio/wp-content/uploads/2017/04/INFORME-FINAL-DE-HH-UNI-FIA-REV.pdf>. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [24] Comisión Económica de Naciones Unidas para Europa, «Marcando el progreso: los indicadores señalan el camino,» [En línea]. Available: http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/indicadores_camino_0.pdf. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [25] C. A. F. Cardenas, «Estimación de la huella hídrica generada en el año 2016, bajo los lineamientos de la norma ISO 14046:2014 para las plantas de concreto argos ubicadas en la zona centro, Colombia,» 2017. [En línea]. Available: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/13062/2/FigueroaCardenasCindyAlexandra2018.pdf>. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [26] V. S. L. A. V. D. T. y. F. C. Beatriz Silvia Garzón, «Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente,» Octubre 2014. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/11336/12665>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [27] P. Prieto, «La Tasa de Retorno Energético (TRE): un concepto tan importante como evasivo,» 10 Diciembre 2016. [En línea]. Available: https://www.crisisenergetica.org/ficheros/TRE_tan%20importante_como_evasivo.pdf. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [28] J. Dufour, «España también apuesta por las biorrefinerías basadas en algas,» 08 Abril 2016. [En línea]. Available: <https://www.madrимasd.org/blogs/energiasalternativas/2016/04/08/132973>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [29] CO2Algaefix, 10 Abril 2016. [En línea]. Available: https://www.co2algaefix.es/sites/default/files/FINAL%20REPORT_CO2ALGAEFIX_PV.PDF. [Último

- acceso: Agosto 2019].
- [30] CO2Algaefix, [En línea]. Available: <https://www.co2algaefix.es/>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [31] Comisión Europea, « Demonstration of new natural dyes from algae as substitution of synthetic dyes actually used by textile industries,» [En línea]. Available: http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=5017. [Último acceso: Agosto 2019].
- [32] J. Fidel, «Red emprende verde,» [En línea]. Available: <https://www.redemprenderverde.es/pg/entrevistas/admin/read/53976/neoalgae>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [33] Neoalgae, [En línea]. Available: <http://neoalgae.es/es/neoalgae/>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [34] Neoalgae, «Neoalgae participa en el consorcio "Algae for Healthy World",» 27 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <http://neoalgae.es/es/noticias/proyecto-microalgas-retos-a4hw/>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [35] El País, «El proyecto Algae for Healthy World (A4HW) avanza en sus objetivos y encara la última anualidad de su ejecución,» 29 Noviembre 2018. [En línea]. Available: http://www.ipacuicultura.com/noticias/en_portada/66375/el_proyecto_algae_for_healthy_world_a4hw_avanza_en_sus_objetivos_y_encara_la_ultima_anualidad_de_su_ejecucion.html. [Último acceso: Agosto 2019].
- [36] Ministerio para la transición ecológica, «Observatorio Español de Acuicultura,» [En línea]. Available: <http://observatorio-acuicultura.es/informacion-de-interes/proyectos-de-id-destacados/cyclalg> Febrero/2019. [Último acceso: Mayo 2019].
- [37] ALGEDOL, [En línea]. Available: <https://www.algenol.com/>. [Último acceso: Abril 2019].
- [38] MURADEL, [En línea]. Available: <https://muradel.com.au/>. [Último acceso: Febrero 2019].
- [39] Comisión Europea, «Significativo impulso presupuestario para el programa LIFE de la Unión Europea,» 18 Enero 2019. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/environment/efe/content/major-budget-boost-eu%E2%80%99s-life-programme_es. [Último acceso: Agosto 2019].
- [40] REBECA, [En línea]. Available: <http://www.proyectorebeca.eu/#block1>. [Último acceso: Agosto 2019].
- [41] Wikipedia, «ARPA-E,» [En línea]. Available: programa MARINER. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [42] ARPA-E, [En línea]. Available: <https://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-site-page/arpa-e-budget>. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [43] ARPA-E, «Macroalgae Research Inspiring Novel Energy Resources (MARINER),» 09 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/documents/files/MARINER-Project-Descriptions-92117.pdf>. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [44] C. Sánchez, «EEUU quiere convertirse en el líder mundial de biomasa marina,» 25 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.energynews.es/eeuu-quiere-convertirse-lider-mundial-biomasa-marina-energia-otros-usos/>. [Último acceso: Septiembre 2019].

- [45] Eur-Lex, «Reglamento CE nº 258/97,» [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:31997R0258>. [Último acceso: 2019 Agosto].
- [46] EUR-Lex, «DIRECTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO,» 23 Abril 2009. [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32009L0028>. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [47] IDAE, «Plan de energías renovables 2011-2020,» [En línea]. Available: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/plan-de-energias-renovables-2011-2020>. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [48] IDAE, «Plan de energías renovables,» 2011. [En línea]. Available: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_PER_2011-2020_def_93c624ab.pdf. [Último acceso: Septiembre 2019].
- [49] UNE, «UNE-EN 590:2014+A1:2017; Combustibles para automoción. Combustible para motor diésel (gasóleo). Requisitos y métodos de ensayo,» 04 Octubre 2017. [En línea]. Available: UNE-EN 590:2014+A1:2017; Combustibles para automoción. Combustible para motor diésel (gasóleo). Requisitos y métodos de ensayo. [Último acceso: Agosto 2019].
- [50] University of Hawaii at Manoa, [En línea]. Available: <https://manoa.hawaii.edu/>. [Último acceso: Mayo 2019].
- [51] INNOVAGRI, [En línea]. Available: www.innovagri.es.
- [52] G. innova, «Simbiosis cianobacteria-alga para la síntesis de nitrógeno oceánico,» [En línea]. Available: <https://geoinnova.org/blog-territorio/simbiosis/>. [Último acceso: Mayo 2019].
- [53] A. H. B. S. J.-P. S. y. O. B. Laurent Lardon, «ACS Publications,» 27 Julio 2009. [En línea]. Available: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es900705j>. [Último acceso: Agosto 2019].

GLOSARIO

UNE: Una Norma Española.

UNE-EN 590:2014+A1:2017; *Combustibles para automoción. Combustible para motor diésel (gasóleo). Requisitos y métodos de ensayo*^[35].....4

ISO: International Organization for Standardization.

ISO 14040:2006; *Gestión ambiental- Análisis de ciclo de vida- Principios y marco de referencia*^[18].....20

