

BioPlat









Este documento ha sido elaborado por la iniciativa y trabajo de un conjunto de entidades, y de grandes expertos que forman parte de las mismas, que han hecho posible su existencia. Se trata de un documento singular tanto por sus contenidos: producción de algas para generación de energía, la hoja de ruta diseñada para su eficiente desarrollo en España y el primer inventario de los proyectos presentes en España, como por tratarse también del primer documento de consenso de este novel sector bioenergético que se ha publicado en nuestro país.

La vinculación de los conceptos: algas y estratégico, vino de la mano del Ministerio de Ciencia e Innovación, desde donde se impulsó la creación de un subgrupo de trabajo de Algas en la estructura de BIOPLAT, con objeto de agrupar a todos los agentes del sistema ciencia-tecnología-empresa que componen un sector cuyo peso específico en España resulta significativo, tanto en número de actores como en proyección de sus iniciativas. La valiosa colaboración de IDAE (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio) desde la creación del subgrupo ha supuesto un importante apoyo para la consecución de los objetivos planteados. Muchas gracias a ambas entidades.

Ha resultado determinante para el buen desarrollo del trabajo llevado a cabo en el subgrupo de Algas de BIOPLAT, la elección por los propios miembros de éste de su Coordinador, Jorge Sánchez Almaraz (AURANTIA), que ha sabido liderarlo con la ilusión, sensatez y constancia que están a la altura de su gran experiencia profesional. Muchas gracias Jorge, y al grupo que autodenominamos "redactor" del documento, Gabriel Acien (Universidad de Almería) y Miguel de la Parra (ACCIONA ENERGÍA), por haber trabajado con tanto empeño y tan buen criterio sobre cada punto y cada coma del mismo; dando forma a las importantes aportaciones hechas por los expertos componentes del propio subgrupo

de Algas de BIOPLAT, miembros sin cuyo apoyo y participación constante no hubiera sido posible contar con este documento. Además destacar la dedicación de Alfonso Calvillo, Técnico de la Secretaría Técnica de BIOPLAT. Muchísimas gracias a todos.

Y especialmente gracias también a Guillermo García-Blairsy Reina (Universidad de Las Palmas), científico español enamorado de las algas, que ha regalado a BIOPLAT sus excepcionales conocimientos sobre éstas, así como un trocito de su alma, que también está presente entre estas líneas.

MARGARITA DE GREGORIO.

COORDINADORA -SECRETARÍA TÉCNICA BIOPLAT



RESUMEN EJECUTIVO	5
1. INTRODUCCIÓN	8
2. PLANTEAMIENTO ESTRATÉGICO PREVIO 2.1 CONCLUSIONES A LOS REQUISITOS PREVIOS 2.2 ASPECTOS LEGALES PREVIOS	13 13 15
3. ASPECTOS TÉCNICOS 3.1 FACTORES A CONSIDERAR EN LA ELECCIÓN DE LA UBICACIÓN IDÓNEA DE PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE ALGAS CON FINES ENERGÉTICOS 3.1.1 Soporte físico: tierra versus mar 3.1.2 Tasa diaria de irradiación PAR (y temperatura) 3.1.3 Tipos de terreno 3.1.4 Extensión mínima 3.1.5 Contaminación del terreno 3.1.6 Altitud del terreno 3.1.7 Aporte de CO ₂ 3.1.8 Fertilizantes 3.2 SISTEMAS DE CULTIVO 3.2.1 Sistemas abiertos frente a sistemas cerrados 3.2.2 Sistemas multi-integrados 3.3 TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA 3.3.1 Raceways 3.3.2 Fotobiorreactores 3.3.2.1 Agitación 3.4 TECNOLOGÍAS DE COSECHADO 3.5 BIOCOMBUSTIBLES PROCEDENTES DE ALGAS 3.5.1 Biocombustibles de microalgas 3.5.2 Biocombustibles de macroalgas 3.6.1 Microalgas 3.6.1 Microalgas 3.6.2 Macroalgas	17 17 18 21 21 22 22 22 23 24 24 24 25 28 30 32 32 32 34 35 35
4. HOJA DE RUTA 4.1 PASOS PREVIOS 4.2 ACTORES INVOLUCRADOS 4.3 MOTIVACIONES Y CRITERIOS DE COLABORACIÓN 4.4 MODELOS DE COLABORACIÓN 4.5 CARACTERÍSTICAS DEL SECTOR DE LAS MICROALGAS 4.6 ESCENARIO TEMPORAL	45 45 48 48 49 50

5. REFERENCIAS	52
ANEXO I: LISTADO DE PROYECTOS DE ALGAS EN ESPAÑA LISTADO DE PROYECTOS POR ORDEN ALFABÉTICO LISTADO DE PROYECTOS POR ENTIDAD LISTADO DE PROYECTOS POR LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA LISTADO DE PROYECTOS POR ÁREA TEMÁTICA	55 59 63 69
ÍNDICE DE FIGURAS	
Figura 1, Esquema biorrefinería ECN	11 19
Figura 2, Productividad biomasa Figura 3, Mapa de Tredici.	19
Figura 4, Mapa radiación solar	20
Figura 5, Ejemplo de biorrefinería	26
Figura 6, Esquema proceso de obtención de aceite de microalgas	34
Figura 7, Escenario temporal	51
Figura 8, Mapa proyectos algas	69
Figura 9, Gráfico clasificación proyectos	69
ÍNDICE DE TABLAS	
Tabla 1, Miguel García Guerrero. Universidad de Sevilla (Conferencia Bio-Oil Oviedo, marzo 2008)	25
Tabla 2, Costes producción raceway	29
Tabla 3, Cuadro resumen de tipos de fotobiorreactores y sus características	33
Tabla 4. Contenido de aceite de algunas especies de microalgas	40



Resumen Ejecutivo

Este documento pretende servir de guía para ayudar a plantear y a facilitar el debate técnico de una estrategia de I+D+i destinada a la producción de biomasa con fines energéticos a través del cultivo de algas, cumpliendo los requisitos básicos de sostenibilidad, economía y escala.

La biomasa es una fuente de energía renovable clave en el cumplimiento de las metas energéticas que se han fijado tanto en Europa como en España. A medio plazo (horizonte 2020), la Directiva Europea de Energías Renovables 2009/28/CE propone las siguientes metas:

- Reducción del 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero en 2020 (en relación a los niveles de 1990).
- •Incremento del 20% en la eficiencia energética.
- Utilización del 20% de energías renovables en el total de producción energética europea.
- El 10% del total de la energía consumida por el sector transporte deberá proceder de fuentes de energía renovable.

Estos objetivos se centran en la diversificación energética y disminución de la dependencia energética externa, así como en el ahorro energético y en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. El papel que pueden jugar las algas en la consecución de estos objetivos es muy importante, aunque su participación será a largo plazo, puesto que este sector se encuentra en la fase de investigación y desarrollo tecnológico previa al desarrollo comercial a gran escala.

Las algas constituyen un grupo de organismos fotosintéticos muy diverso que han colonizado una amplia variedad de ecosistemas acuáticos y terrestres gracias a su alta plasticidad y diversidad metabólica. Es necesario explorar la alta diversidad que presentan, de las aproximadamente 100.000 especies distintas de algas que se estima que existen, el 90% está aún por valorar. Este nuevo sector presenta una serie de ventajas, potenciales aún (alta eficiencia fotosintética, posibilidad de cultivar algas tanto con agua de

Cultivos de microalgas y cianobacterias enriquecidos en el laboratorio con diferentes medios de cultivo. Fotografía cortesía del Centro de Biotecnología Marina (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria) - Banco Nacional de Algas. mar como con efluentes residuales, aprovechamiento del CO_2 de procesos industriales, etc.) frente a las tecnologías y cultivos convencionales de producción de biomasa y, sobre todo, ofrece la posibilidad de llegar a conseguir las metas propuestas con un balance energético positivo.

Con objeto de alcanzar el éxito en la producción sostenible de algas con fines energéticos resulta fundamental el desarrollo de un plan nacional de I+D+i, con el compromiso asociado de financiarlo a largo plazo. Este programa deberá estar enmarcado por tres criterios: balance energético positivo, balance ecológico positivo, y económicamente competitivo frente a los combustibles fósiles convencionales; con objeto de contar con un apoyo similar al recibido por otras tecnologías renovables para fomentar su desarrollo.

Se requiere, por tanto, fomentar la investigación y desarrollo, mediante la colaboración conjunta de científicos y tecnólogos de diferentes áreas, así como de las empresas involucradas en el sector. Sólo mediante una investigación integrada que conecte la escala de laboratorio con la de planta industrial, con la participación de grupos de investigación y empresas, será posible un avance firme en la obtención de biocombustibles a partir de la biomasa de algas. Sería aconsejable, independientemente del modelo de colaboración previsto, tener la posibilidad de disponer de un centro coordinador tecnológico en I+D+i de biomasa de algas que concentre los trabajos realizados.

CON OBJETO DE ALCANZAR EL ÉXITO EN LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE ALGAS CON FINES ENERGÉTICOS RESULTA FUNDAMENTAL EL DESARROLLO DE UN PLAN NACIONAL DE I+D+I, CON EL COMPROMISO ASOCIADO DE FINANCIARLO A LARGO PLAZO. ESTE PROGRAMA DEBERÁ ESTAR [\] ENMARCADO POR TRES CRITERIOS: BALANCE ENERGÉTICO POSITIVO, BALANCE ECOLÓGICO POSITIVO. Y ECONÓMICAMENTE COMPETITIVO FRENTE A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES CONVENCIONALES: CON OBIETO DE CONTAR CON UN APOYO SIMILAR AL RECIBIDO POR **OTRAS TECNOLOGÍAS RENOVABLES** PARA FOMENTAR SU DESARROLLO.

El desarrollo de estos programas impulsará la emergencia de un nuevo sector bioindustrial, relacionado con: producción de alimentos para consumo humano, piensos, acuicultura, pigmentos, dermocosmética, nutracéutica, biomedicina, tratamiento de aguas y gases contaminantes, industria climática, etc. Incluso es más que probable que estas nuevas bioindustrias tengan que ser desarrolladas como complemento imprescindible para hacer rentable la producción de biocombustibles de algas. La aplicación en este sentido del concepto de biorrefinería resulta esencial para poder conseguir algún día la viabilidad económica de estos procesos.

Queda de manifiesto que la producción de biomasa de algas con fines energéticos es hoy día una realidad científica con un gran potencial que aún debe ser investigada y desarrollada para poder convertirse en una realidad industrial. Para que la potencialidad del cultivo de algas con fines energéticos pueda alcanzar un nivel significativo, se proponen los siguientes criterios y actuaciones previas:

- Creación de una base de datos de proyectos en fase de ejecución. Como anexo del presente documento puede consultarse una primera recopilación de proyectos nacionales elaborada por BIOPLAT.
- Informe de las tecnologías en desarrollo e instalaciones existentes.
- Identificación de las barreras tecnológicas. El avance en este sentido debería abordar las fases de:
 - Obtención de mejores especies de algas.
 - Desarrollo de las tecnologías de cultivo: búsqueda de aumento de producción, eficiencia energética y mejora de los materiales.
 - Desarrollo del downstream (cosechado y procesado): procesos de preconcentración, deshidratación, secado, extracción de aceite y valorización integral de la biomasa.
- Definición de las áreas que necesitan un mayor esfuerzo (técnico-económico), con el fin de reducir costes y conseguir la mayor adaptación a las condiciones españolas.
- Demostración escalable con visión a gran escala.

- Estudio de las sinergias medioambientales.
- Inclusión de la energía procedente de las algas en el marco de la política nacional de energías renovables.

El desarrollo del plan debe establecer un escenario temporal definido, que podría ser el siguiente:

		CORTO PLAZO		MEDIO PLAZO			LARGO PLAZO					
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	CREACIÓN BASE DE DATOS											
2	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN											
3	CREACIÓN DE CONSORCIOS / BÚSQUEDA DE SINERGIAS											
4	DESARROLLO DOWSTREAM											
5	DESARROLLO TECNOLOGÍAS											
6	DESARROLLO BIORREFINERÍA											
7	BÚSQUEDA / DESARROLLO DE ESPECIES											
8	OPTIMIZACIÓN CONSUMOS / DESARROLLO MEDIOAMBIENTAL											
9	DESARROLLO ENERGÍA COMO PROCESO INDUSTRIAL											



Minducion

La biomasa es una fuente de energía renovable clave en el cumplimiento de los objetivos energéticos que se han fijado tanto en Europa como en España. Dichos objetivos se centran en la diversificación energética y disminución de la dependencia energética externa, así como en el ahorro energético y en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

En España, la biomasa tiene una aportación significativa dentro del total de energías renovables. Según el Plan de Energías Renovables (PER) 2005-2010, la bioenergía debería suponer prácticamente un 60% dentro de una aportación global de las energías renovables del 12,1% sobre el consumo de energía primaria a finales de 2010.

A medio plazo (horizonte 2020), la nueva Directiva Europea de Energías Renovables 2009/28/CE propone las siguientes metas:

- Reducción del 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero en 2020 (en relación a los niveles de 1990).
- Incremento del 20% en la eficiencia energética
- Utilización del 20% de energías renovables en el total de producción energética europea.
- El 10% del total de la energía consumida por el sector transporte deberá proceder de fuentes de energía renovable.

El desarrollo tecnológico, las mejoras en eficiencia energética, la reducción de costes de producción y de costes de los productos biomásicos, el desarrollo e implantación de criterios de sostenibilidad y la aplicación eficaz de medidas de fomento del uso de la bioenergía, serán aspectos decisivos en el desarrollo de esta fuente de energía.

Este documento pretende servir de guía para ayudar a plantear y a facilitar el debate técnico de una estrategia de I+D+i destinada a la producción de biomasa con fines energéticos a través del cultivo de algas, cumpliendo los requisitos básicos de sostenibilidad, economía y escala.

El papel que pueden jugar las algas en la consecución de los objetivos fijados de producción de energía renovable es muy importante, aunque su participación será a largo plazo. Actualmente es un sector con gran potencial, pero que se encuentra en la fase de investigación y desarrollo tecnológico previa al desarrollo comercial a gran escala.

Las algas constituyen un grupo de organismos fotosintéticos muy diverso que han colonizado una amplia variedad de ecosistemas acuáticos y terrestres gracias a su alta plasticidad y diversidad metabólica. Las algas se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño en:

- Microalgas: todo tipo de microorganismos fotosintéticos, procariotas o eucariotas, unicelulares o filamentosos, de tamaño inferior a 0.02 cm.
- Mesoalgas: microorganismos fotosintéticos, procariotas o eucariotas, unicelulares o filamentosos o coloniales, unialgal o plurialgal, con un rango entre 0,02 y 3 cm. Las grandes diferencias en cuanto a tecnologías y costes de cosechado hacen conveniente introducir este nuevo término.
- Macroalgas: algas pluricelulares de diversas formas y tamaños que van de pocos centímetros a varios metros de largo.

Se estima que hay de 30.000 a 100.000 especies de microalgas que incluyen representantes tanto eucarióticos como procarióticos (cianobacterias o algas verde–azuladas). Por otro lado, se considera que hay unas 15.800 especies de macroalgas repartidas entre macroalgas rojas (6.000 especies), pardas (1.800 especies) y verdes (8.000 especies, de las cuales 1.000 son especies marinas y el resto de agua dulce).

Las algas han sido empleadas como alimento humano en Oriente desde hace miles de años, y sólo en el último siglo se ha producido una intensa actividad investigadora diversificando el uso de la biomasa de algas, como pueden ser:

- Ficocoloides: agar (agarosas), carragenatos, alginatos, ulvanos.
- Alimento animal
- Biofertilizantes.
- Biorremediación
- Metabolitos secundarios (biomedicina).
- Moléculas simples de elevado contenido energético: amoniaco, metano, hidrógeno y alcoholes

- Ácidos grasos esenciales (PUFAs de cadena larga)
- Exopolisacáridos
- Antioxidantes
- Piamentos.

Todos estos avances se han producido en el ámbito de la ficotecnología, considerada como una rama de la biotecnología que tiene a los vegetales marinos como principal objeto de interés y que integra a la ficología junto a la tecnología (que incluye los desarrollos más recientes en biología celular y molecular, ingeniería química, maricultura y otras disciplinas relacionadas) con fines comerciales específicos¹. Dentro del concepto de ficotecnología se incluyen gran cantidad de bioprocesos a gran escala entre los que se encuentra el cultivo intensivo de algas, utilizando desde sistemas abiertos con irradiación natural hasta cultivos heterotróficos en fermentadores cerrados.

El inicio de la producción de microalgas comenzó hace unos 30 años, produciendo microalgas para consumo humano, con unas 500 toneladas a escala mundial producidas a finales de los años 80. Actualmente, la producción mundial es de unas 10.000 toneladas anuales (*Spirulina*, *Chlorella*, *Dunaliella y Haematococcus*), también para consumo humano y animal.

En términos de biomasa para biocombustibles la producción actual de microalgas es muy reducida, aunque visto el ejemplo anterior, el potencial es enorme. La producción de macroalgas es varios órdenes de magnitud superior, sobre todo por la importancia de la industria de los ficocoloides y de las algas alimentarias. A diferencia de otros tipos de biomasa, en el caso de las algas actualmente el destino energético no es actualmente el principal, sino que es minoritario (mayor utilización en alimentación, cosmética, etc.).

Según distintas referencias, los costes de producción de microalgas oscilan en la actualidad entre 10 €/kg (raceway) y 35 €/kg (fotobiorreactor cerrado). Se estima que los costes de producción de biomasa de macroalgas oscilan entre 0.05 €/kg (cerca de la costa) y 0.40 €/kg (en mar abierto), referenciados a pesos de biomasa seca.

Hasta hace poco tiempo, la ficotecnología (la ficología aplicada y la agronomía marina en general) estaba acotada a pequeños grupos de investigación científica, sin embargo durante los últimos años han aumentado de forma exponencial los anuncios de proyectos relacionados con la biotecnología de algas. La causa de este

ente a las tecnologías y cultivos convencionales de producción de biomasa y, sobre todo, la posibilidad de conseguir estos objetivos con un balance energético positivo. La prueba de las expectativas que esta tecnología está despertando está en que grandes empresas internacionales y departamentos de defensa, energía y medio ambiente de países líderes estén invirtiendo cantidades significativas en ficología aplicada y empezando a consorciarse².

ACTUALMENTE
ESTAMOS CONSUMIENDO
COMBUSTIBLES FÓSILES FINITOS
QUE ÚNICAMENTE PODRÁN SER
REGENERADOS O SUSTITUIDOS EN
CANTIDADES MUY PEQUEÑAS.

EL AGOTAMIENTO DE ESTOS COMBUSTIBLES FÓSILES, QUE SON PRODUCTOS DERIVADOS DE BLOOMS MASIVOS DE ALGAS MARINAS HACE MILLONES DE AÑOS CUANDO EL PLANETA ESTABA RECALENTADO, ESTÁ PROPICIANDO LA NECESIDAD DE VOLVER A GENERAR BLOOMS DE ALGAS DE FORMA CONTROLADA COMO SOLUCIÓN AL RECALENTAMIENTO GENERADO POR LA UTILIZACIÓN DE ESTOS COMBUSTIBLES.

(producir biocombustibles competitivos), el desarrollo de estos programasimpulsarálaemergenciadeunnuevosectorbioindustrial, relacionado con: producción de alimentos para consumo humano, piensos, acuicultura, pigmentos, dermocosmética, nutracéutica, biomedicina, tratamiento de aguas y gases contaminantes, industria climática, etc. Incluso es más que probable que estas nuevas bioindustrias tengan que ser desarrolladas como complemento prescindible para hacer rentable la producción de biocombustibles de es decir, como requisito sine qua non, y no con el planteamiento de

Definición de Nonomura, 1988.

² En el caso de las macroalgas, actualmente están surgiendo infinidad de proyectos encaminados a su empleo con fines energéticos Algunos de ellos son el OCEAN SUNRISE PROJECT (Japón), MACROALGAE FOR CO₂ CAPTURE AND RENEWABLE ENERGY (EE. UU.) BIOMARA (Escocia), BIO-OFFSHORE (Holanda).

"beneficios colaterales". La aplicación del concepto de biorrefinería³ se considera esencial para poder conseguir algún día una viabilidad económica de procesos basados en algas para la producción de biocombustibles. En este sentido, grandes esfuerzos en investigación y desarrollo van a ser necesarios en las etapas posteriores al cosechado de la biomasa, y el desarrollo de estrategias de valorización de la misma.

En este esquema de biorrefinería, propuesto por el Energy research Centre of the Netherlands –ECN– (Centro de Investigación Energética de los Países Bajos), puede visualizarse lo que se entiende por el concepto biorrefinería

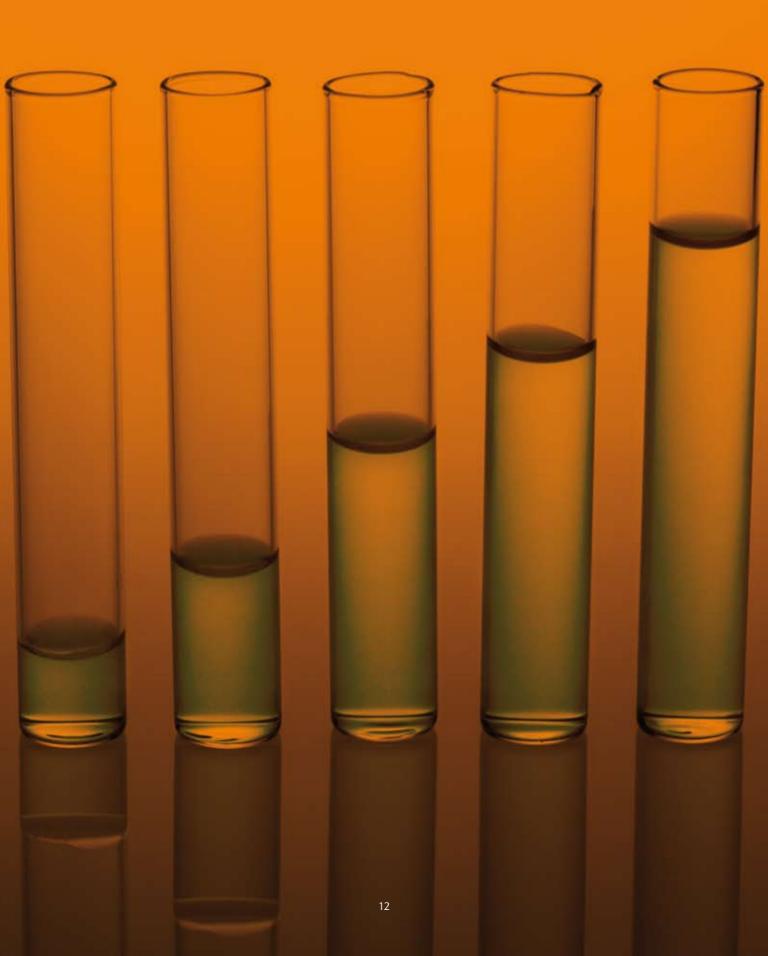
Actualmente, los expertos en ficología aplicada están centrándose en conseguir intensificar la producción de las plantas de producción de algas para suministrar estas necesidades energéticas.

Antes de plantear las ventajas y dificultades de la biomasa de algas para la obtención de biocombustibles, es necesario hacer un planteamiento estratégico previo.



Figura 1, Esquema biorrefinería ECN

³ Definición de biorrefinería: "Proceso sostenible de conversión de biomasa en un espectro variado de productos comercializables, además de en energía". International Energy Agency – IEA – (Agencia Internacional de la Energía) Bioenergy Task 42: Biorefineries: Co-production of Fuels, Chemicals, Power and Materials from Biomass.



planteamiento estratégico previo

A lo largo de este documento se establecen las bases y factores más importantes a tener en cuenta en la producción de algas. Además, se revisan las experiencias previas llevadas a cabo a nivel mundial, intentado obtener las lecciones aprendidas para no repetir los mismos errores.

Las dos características fundamentales con las que deberían contar los futuros sistemas de producción de biomasa de algas para biocombustibles, con objeto que que tengan un impacto significativo en la demanda de energía a escala nacional o global (conseguir el 1% del consumo actual de combustibles fósiles sería un valor relevante), son:

- Deberían ser sistemas medioambientalmente sostenibles: tratando de no ocupar suelo fértil, con balance energético positivo (con un balance de emisiones de gases de efecto invernadero realizado con técnicas de ciclo de vida que permita reducciones apreciables frente a los combustibles fósiles), que no contaminen el medio, con el mínimo empleo de fertilizantes, minimizando el consumo de agua y no utilizando aqua de consumo humano.
- Deberían ser rentables a costes de producción competitivos, al menos a medio-largo plazo. Ello implica contar con un proceso de producción idóneo y escalable, así como la comprobación de eficiencia en márgenes adecuados de espacio y tiempo (sistemas hiper-intensivos) y la comercialización del proceso y producto.

Además deberían aplicarse las buenas prácticas agrícolas en cuanto al uso de fertilizantes, por su coste energético y disponibilidad. Se considera una solución muy eficiente la utilización de los denominados sistemas integrados, que consiste en el uso de efluentes ricos en nutrientes como medio de cultivo alternativo, que no sólo abarata la producción de la biomasa de algas sino que también presta un servicio ambiental (depuración de las aguas).

2.1. CONCLUSIONES A LOS REQUISITOS PREVIOS

Una vez establecidos estos requisitos previos de balance ecológico y energético neutro o positivo, se presentan las siguientes opciones:

- Procesos fotosintéticos⁴.
- En el caso específico de las microalgas, se precisa una selección de áreas idóneas que combinen alta tasa de insolación y rango de temperaturas moderadas (preferentemente temperaturas medias de 20-35 °C), reuniendo las condiciones ambientales que optimicen la producción.
- Sistemas multi-integrados, empleando de efluentes ricos en nutrientes y CO₂ como medio de cultivo.

⁴ Las tecnologías de producción de biomasa por cultivo (heterotrófico) de bacterias modificadas genéticamente (p.e. las *E.coli* generadas por la empresa LS9, EE. UU.) precisarían de los efluentes industriales muy específicos y sólo serían factibles a escala local (en Brasil).

- Desarrollo de una nueva agronomía sustentada en especies de ambiente marino (o salobre, o hipersalino).
- Utilización preferente de agua dulce que no se emplee para consumo humano o agrícola. De este tipo son las aguas salobres existentes en algunos acuíferos, así como las aguas procedentes de tratamiento secundario de aguas residuales, el agua contaminada con nitratos y fosfatos procedentes de usos agrícolas, e incluso efluentes industriales acuosos más o menos contaminados.

Como organismos fotosintéticos, las algas fijan CO₂ y la producción masiva de algas requiere aporte de CO₂ o de aire enriquecido en CO₂ (tanto como fuente de carbono como para la regulación del pH del medio cultivo). Actualmente el coste del CO₂ resulta alto, pero podría reducirse empleando fuentes alternativas de CO2, aprovechando el procedente de los focos emisores de este gas (p.e. industria energética) o el contenido en efluentes procedentes de la actividad respiratoria bacteriana, piscifactorías, etc. En todo caso, en este informe no se incluye el uso de las algas para el abatimiento y secuestro de gases de efecto invernadero⁵ (CO₂, NO₂) y otros residuos procedentes de sistemas de combustión industriales.

Aunque la producción de biomasa de algas con fines energéticos es consustancial con la absorción de ${\rm CO_2}^6$, salvo para la producción de hidrógeno⁷ el proceso no puede considerarse un secuestro fotosintético, ya que los combustibles obtenidos con esta biomasa serán otra vez quemados (a pesar de ello, recientemente se han dado casos en los que aquellas empresas que aprovechan el ${\rm CO_2}$ que emiten para el cultivo de algas se están beneficiando de la posibilidad de descontar este aprovechamiento del total de sus emisiones de ${\rm CO_2}$).

RECIENTEMENTE
SE HAN VERTIDO GRAN
CANTIDAD DE EXPECTATIVAS
SOBRE LAS ALGAS COMO FUENTE DE
BIOCOMBUSTIBLES. EL NO ALCANZAR
LOS AMBICIOSOS OBJETIVOS FIJADOS
POR LOS PROYECTOS EN CURSO NO
DEBERÍA FRENAR EL AVANCE DE
ESTE SECTOR, QUE PRECISAMENTE
SE ENCUENTRA EN PLENO
DESARROLLO
TECNOLÓGICO.

⁵ Actualmente existen 4 estrategias/tecnologías de abatimiento/ secuestro de gases de efecto invernadero con micro y mesoalgas:

^{1.} Por captación fotosintética.

Por inducción de blooms oceánicos de fitoplancton, aunque diversas empresas de EE. UU. están desarrollando esta línea de negocio (PLANKTOS, CLIMOS), la efectividad del procedimiento ha sido recientemente desacreditada (2009, Global Biogeochemical Cycles)

^{3.} Por inducción de *blooms* específicos de cocolitofóridos (microalgas con exoesqueleto de CaCO₃).

^{4.} Por bioprecipitación catalítica inducida en chimenea (patente pendiente de socio).

⁶ Como máximo, el 50% de la biomasa de algas (en pslc = peso seco libre de cenizas) está compuesto por carbono, por lo que (a un 10% de eficiencia) serían necesarios 2,1 kg de $\rm CO_2/kg$ pslc de biomasa de algas.

⁷ Hay recientes experiencias encaminadas al uso de macroalgas para la producción de H₂, fuente de energía renovable que no produce CO₂ como subproducto: Park y colaboradores, 2009, *Biotechnology and Bioprocess Engineering* Vol. 14 probaron con *Ulva*, *Laminaria*, *Undaria y Porphyra*. Los mejores resultados fueron entraridos con *Laminaria*

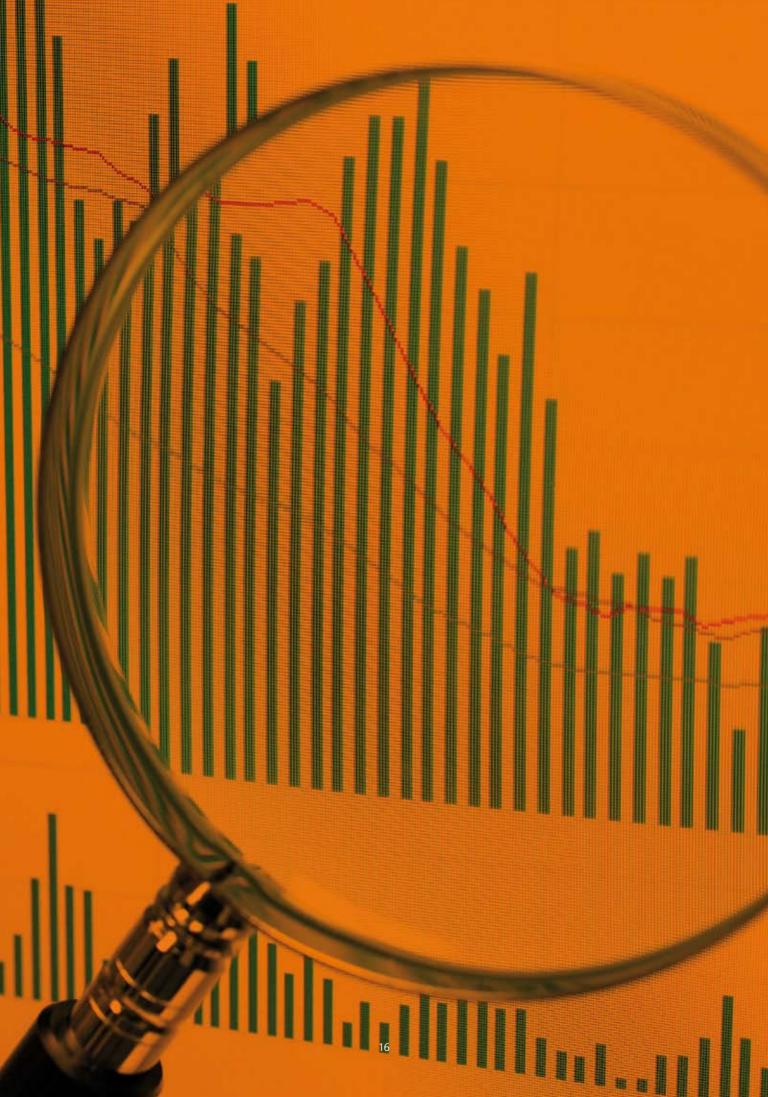


- La posibilidad de cultivar algas tanto con agua de mar como con efluentes residuales, constituye una de las principales ventajas de estos organismos. Se deben valorar el resto de ventajas que pueden presentar las algas, de forma que estas ventajas puedan conducir a una estrategia de ayuda a la investigación y el desarrollo. Este apoyo, al menos en las fases iniciales de desarrollo tecnológico (situación actual del sector de las algas) permitiría mayores avances en este campo. Las posibles ayudas no serían el único requisito para enmendar las dificultades actuales, pues existen aún barreras científicas y tecnológicas por resolver.
- Es necesario definir las bases del cálculo de eficiencia energética y de emisión de CO₂ de la producción de biomasa de algas:
 - Las plantas de producción de algas actuales (raceways) absorben entre el 20-50% del CO₂ que se inyecta al cultivo, generando la cantidad equivalente de oxígeno.
 - Resulta fundamental contar con un balance energético real (y en emisiones de CO₂) de las fases de cosechado, extracción, procesado, etc.
 - Es muy importante analizar el ciclo de vida completo de los sistemas basados en algas para establecer su viabilidad y sostenibilidad.
 A este respecto, podría ser de ayuda seguir las recomendaciones de la Algal Biomass Organization – ABO – (Organización de Biomasa de Algas⁸) para la elaboración de un análisis del ciclo de vida de los sistemas de producción de algas.

• La ingeniería genética para producción de biomasa de algas es otra posible línea de investigación⁹. Sin embargo necesita del establecimiento de un marco legal previo para poder desarrollarse. Paralelamente al avance de la ingeniería genética, hay que tener en cuenta que todavía queda por explorar la alta diversidad funcional de las algas, por lo que no debería limitarse la investigación a una sola vía de exploración. No obstante, los avances en biología molecular y concretamente en la secuenciación completa del mapa genético de diversas especies de algas, abre nuevas perspectivas biotecnológicas como el conseguir cepas con mayor contenido de triglicéridos o carbohidratos con destino energético.

⁻ ⁸ Más información en:http://www.algalbiomass.org/documents/ABOLCABrief.pdf

^{- &}lt;sup>9</sup> Un ejemplo del interés en este campo es la alianza EXXON –SYNTHETIC GENOMICS para crear una microalga oleaginosa mediante síntesis genética.





Aspectos técnicos

3.1. FACTORES A CONSIDERAR EN LA ELECCIÓN DE LA UBICACIÓN IDÓNEA DE PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE ALGAS CON FINES ENERGÉTICOS

La eficiencia de los sistemas de cultivo y de las distintas cepas de algas depende de cada ubicación geográfica, por lo que siempre es recomendable comenzar a trabajar con cepas locales. Este hecho vuelve a poner de manifiesto la importancia de tener definidas, a priori, cuáles podrían

ser las zonas potenciales de implantación de las futuras plantas de producción de algas energéticas.

El punto de partida para definir la localización perfecta es definir, para este nuevo sector de biocombustibles de algas, qué se considera economía de escala. Este concepto es la resultante de la interacción de las múltiples variables tecnológicas, muchas aún por dilucidar, que condicionan la producción de algas. Entre las variables ambientales a tener en cuenta están las siguientes:

3.1.1 SOPORTE FÍSICO: TIERRA VERSUS MAR



MACROALGAS

Las primeras propuestas de producción de biocombustibles, en la década de los 70, se basaron en provectos en EE.UU. de cultivo oceánico de macroalgas marinas (kelps, grandes feofíceas de aguas frías) en plataformas flotantes - tipo plataformas petroleras - que generaban upwellings10, utilizando barcos-segadores¹¹. Se demostró biológicamente era posible (J. H. Ryther y colaboradores), pero los temporales destruyeron las granjas piloto y el precio del petróleo volvió a bajar. La American Gas Association – AGA – (Asociación Americana de Gas) hizo algunas pruebas posteriores, el planteamiento era de una biorrefinería en la propia plataforma flotante que servía de eje de la granja radial de microalgas, pero finalmente se abandonó. Noruega rescató el proyecto unas décadas después (la petrolera NORSK-HYDRO), pero también lo abandonó

Actualmente, existe un programa internacional en Asia para hacer cinturones de macroalgas alrededor de la costa de Corea, más como sumidero de ${\rm CO_2}$ que como generador de biomasa.

Las macroalgas crecidas en cuerdas alrededor de las jaulas flotantes de salmón están siendo usadas en Chile para disminuir la carga de nutrientes en el agua y por lo tanto la eutrofización de zonas costeras. Esta biomasa producida a su vez se emplea por la industria alimentaria, pero también podría tener un uso energético¹².

MICROALGAS

En 2009, un grupo de investigadores de Silicon Valley, liderados por el Dr. Jonathan Trent, presentaron el proyecto OMEGA en colaboración con la NASA, cuya visión es el cultivo de microalgas en mallas de tubos de plástico especial flotante en aguas costeras. Plantean la utilización de aguas residuales urbanas y un cosechado simplificado debido a las propiedades de ósmosis inversa que posibilitan las propiedades del plástico, desarrollado para reciclar orina en los vuelos espaciales. Por diversos motivos (logísticos, legales, biológicos, gran limitación de áreas potenciales, técnicos, ambientales, de seguridad, costes

de mantenimiento, rendimiento, estado del arte, etc.) se puede considerar que actualmente no resultaría prioritaria esta línea de I+D en España.

Como conclusión de todo lo anterior, actualmente podría decirse que lo más razonable serían los sistemas ubicados en tierra para las instalaciones de producción de microalgas, aunque no deberían cerrarse otras posibles vías.

3.1.2 TASA DIARIA DE IRRADIACIÓN Y TEMPERATURA

Dos importantes factores limitantes de la producción de biomasa con fines energéticos, al menos en cuanto a aspectos de ecosistema se refiere, son la luz, y más concretamente la tasa diaria de irradiación PAR, y la temperatura. Es decir, la ubicación adecuada debe ser aquella que permita mantener producciones máximas de la cepa seleccionada, durante todos los días del año (g m²día¹). Idealmente, las granjas de producción no deberían pararse nunca por insuficiencia de luz, ni por excesos o carencias de temperatura. Es importante tener en cuenta que, para ceñirse a los costes de producción de biomasa que se consideran competitivos, el sistema debería operar permanentemente a valores óptimos de densidad, producción y monoespecificidad.

SI UNA UBICACIÓN OBLIGA A PARAR LA PRODUCCIÓN SOLAMENTE DURANTE, POR EJEMPLO, EL MES DE ENERO POR FALTA DE LUZ O POR BAJAS TEMPERATURAS, SIGNIFICA QUE SE ESTARÁN PERDIENDO UNOS TRES MESES DE PRODUCCIÓN (TIEMPO QUE TARDARÍA EN REACTIVARSE TODO EL SISTEMA) Y QUE, DURANTE LA OTRA MITAD DE LOS MESES PRODUCTIVOS, EL RENDIMIENTO SERÁ LA MITAD DEL QUE SE OBTIENE EN LOS MESES "BUENOS".

Pueden mencionarse algunos ejemplos:

• En Gran Canaria, teóricamente ubicada en zona idónea de producción (bajo el paralelo 30), los sistemas de cultivo de *Spirulina* en raceways tienen una producción doble durante el semestre del verano (Centro de Biotecnología Marina de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria). Cuatro grados de latitud más al sur, en el Sahara, una granja comercial que cultiva la misma cepa de *Spirulina* consigue producciones sostenidas que duplican a las obtenidas en Gran Canaria durante el verano canario, a pesar de contar con un invernadero cuyo film atenúa un 30% la radiación PAR debido a la condensación de polvo sahariano. La tasa anual de irradiación, entre dos puntos que tan sólo se separan 10 km, puede ser

¹⁰ Afloramiento en superficie de aguas frías profundas que son ricas en elementos nutrientes de plancton.

¹¹ Similares a los de la empresa californiana KELCO (el denominado proyecto WILCOX).

¹² Buschmann, A., Hernández-González, M. Varela D. (2008) Seaweed future cultivation in Chile: perspectives and challenges (Los futuros cultivos de algas en Chile: perspectivas y desafíos). International Journal of Environment and Pollution 33: 432-456.

suficientemente significativa, por lo que definir como límite general el de 30° de latitud sería algo inexacto. Y, evidentemente, enfatiza la necesidad de seleccionar previamente las zonas donde las tasas de irradiación harían rentables las plantas de producción de algas energéticas.

- En Almería (paralelo 36,5) la producción de microalgas (cultivadas en fotobiorreactores tubulares horizontales) durante los 6 meses más fríos del año, es inferior a la mitad de la que se obtiene en junio, y durante los 5 meses más duros del invierno la producción cae a un tercio de la que se obtiene en junio (Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Almería).
- Las granjas de *Spirulina* de Imperial Valley (California, EE. UU.) cierran la producción en raceways durante 4-5 meses al año (octubremarzo) debido a los problemas de estrés (baja productividad, contaminación, etc.) que originan las bajas temperaturas, que no la tasa de irradiación, en la latitud más al sur del desierto californiano de EE. UU. (latitud 32°).

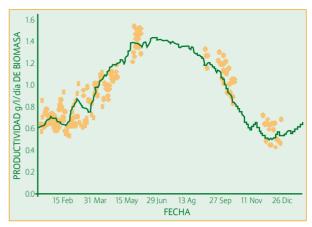


Figura 2, Productividad biomasa.

El siguiente mapa indica las zonas potenciales (amarillo) y evidentes (rojo) del planeta en función de la tasa anual de irradiación.

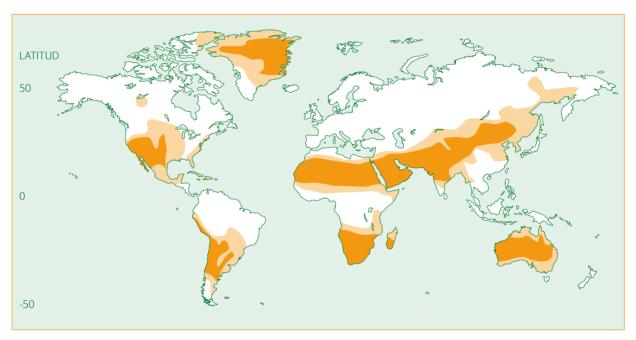


Figura 3, Mapa radiación solar.

Según los autores, este mapa indica las regiones que presentan una mayor aptitud para el cultivo de algas. Las zonas marcadas en rojo y amarillo son las localizaciones idóneas para la producción de algas. El área marcada en rojo recibe una radiación directa de 2.500-3.000 kWh/m² al año, y las regiones en amarillo reciben una radiación directa de 2.000-2.500 kWh/m² al año.¹³

¹³Comprehensive Oilgae Report: *Energy from Algae: Products, Market, Processes & Strategies* (Informe general realizado por Oilgae: *Energía de las algas: productos, mercado, procesos y estrategias*). Septiembre 2009, páginas 37-38. Más información en: www.oligae.com.

En el siguiente mapa se indican incluso los límites teóricos de producción máxima de microalgas en fotobiorreactores, asumiendo las más optimistas de las variables. Este "Mapa de Tredici" fue presentado en el encuentro celebrado por la Algal Biomass Organization – ABO – (Organización de Biomasa de Algas) en San Diego (EE. UU.) en octubre de 2009.

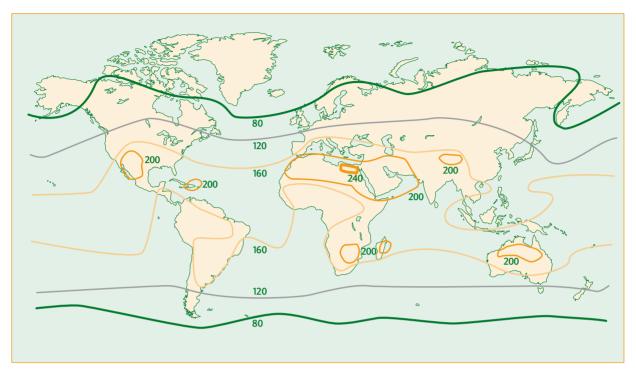


Figura 4, Mapa de Tredici.

La carencia de suficientes tasas de irradiación solar podría resolverse en función de los avances en fibra óptica, LEDs¹⁴, etc. De forma que éstos fueran de tal magnitud que el coste de la irradiación artificial en los sistemas de cultivo fuera extremadamente bajo. Esta opción debe considerar también los inconvenientes derivados de introducir cables y demás aparellaje en el sistema de cultivo, ya que se reduce la tasa de turbulencia, favorece el fouling (adherencia), etc. por lo que, aún a coste cero, haría el sistema de luz artificial menos eficiente.

A pesar de estos avances, es difícil pensar que la luz artificial pueda ser ni técnica ni económicamente viable. Una posible vía sería la mixotrofia con algunos residuos industriales.

Aunque en el caso de las microalgas la necesidad de altas tasas de irradiación de luz PAR y temperatura resulta un factor relevante para su ubicación, en el caso de las macroalgas este condicionante no es tan esencial¹⁵.

- BIONAVITAS Inc. (EE. UU.) ha anunciado (febrero 2009) el proceso Light Immersion Technology mediante el cual aporta luz artificial a raceways aumentando 10-12 veces su producción. Define su sistema como netamente positivo energéticamente, con costes prácticamente nulos en producción a gran escala. Utilizan una tecnología basada en una nueva generación de LEDS
- La empresa BARD ha anunciado recientemente (noviembre 2009) la utilización de luz artificial 24h/día para producir hasta 8.000 litros de biodiésel de algas m⁻²año⁻¹.

¹⁴ La alternativa de la utilización de LEDs está siendo desarrollada por distintas empresas, como por ejemplo:

¹⁵ Por ejemplo, la *Saccharina latissima*, posible candidato bioenergético, tiene su óptimo crecimiento (que puede llegar al 8% día) a temperaturas de 14-16 °C y dosis lumínica de 100 μmol m²s¹. Sin embargo, también existen especies de algas rojas de los mares tropicales, como por ejemplo *Kappaphycus, Eucheuma* o *Hypnea* con gran productividad a temperaturas e irradiancias muy altas.

3.1.3 TIPOS DE TERRENO

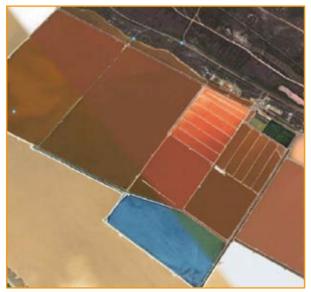
- Terrenos preferentemente no destinados a usos agrícolas.
- Planos o en muy ligera pendiente.
- Preferentemente reflectante (suelo carbonatado, costras salinas, etc.) con la finalidad de generar un efecto multiplicador por irradiación reflejada. Esta opción puede ser aprovechada en el caso de fotobiorreactores pero no en cultivo en raceways.

3.1.4 FXTFNSIÓN MÍNIMA

Actualmente las instalaciones industriales de producción de microalgas son de pequeño tamaño en comparación con las que serían necesarias para la producción de biocombustibles. Así, la mayor instalación de producción basada en reactores cerrados tubulares ocupa una superficie de 1,2 ha, mientras que las plantas de producción de microalgas en reactores raceway son un orden de magnitud mayores, alcanzando tamaños de entre 10-20 ha. En ambos casos la producción se destina a consumo humano de forma directa o a través de la obtención de compuestos

para el sector nutracéutico como el betacaroteno.

La extensión mínima de cultivo necesaria para poder hacer sostenible una instalación industrial de producción de microalgas con fines energéticos debería ser un orden de magnitud superior, de 100-200 ha. Estimaciones realizadas por diversas compañías ponen de manifiesto la necesidad de escalar incluso hasta miles de hectáreas para poder contribuir significativamente a la producción de combustibles a nivel mundial. Así, la empresa PETROALGAE de EE.UU. está considerando la instalación de superficies de cultivo de hasta 5.000 ha, mientras que el proyecto GREEN DESERTS de la Fundación AGRAMAR incrementa esta superficie hasta 6.000 ha. Para proveer el 1% de la demanda actual de petróleo en España se estima que serían necesarias 20.000 ha aunque no sería obligatorio agrupar toda esta superficie en una única instalación productiva (datos calculados a partir de las estimaciones realizadas por M. Borowitzka para Australia).



Planta de producción de biomasa de algas de 400 ha en Hutt Lagoon (Australia, abril 2006).



Planta de 35 ha de cultivo en raceways de la empresa CYANOTHEC CORP. en Hawaii (EE.UU.).

3.1.5 CONTAMINACIÓN DEL TERRENO

La ubicación escogida no debe tener contaminación por metales pesados ni radioactividad, y debe buscarse la ausencia total de sulfatos de cobre (u otras sales de cobre) en aguas y terrenos. Aunque algunos investigadores consideran que la contaminación por metales no tiene por qué ser excluvente, va que precisamente la resistencia a ciertos tóxicos puede ser una herramienta para controlar la presencia de contaminaciones en los cultivos. En este sentido, las microalgas y cianobacterias han sido referenciadas como acumuladoras de metales pesados y por tanto pueden usarse para regenerar terrenos y/o aguas. sobre todo si el uso final de la biomasa es para obtener biocombustibles. El control de contaminaciones es muy importante en la biotecnología de microalgas y ya que es imposible económicamente esterilizar el medio de cultivo de las microalgas, es necesario desarrollar resistencias en estas para que sólo ellas, o al menos preferentemente ellas, puedan crecer en el ambiente de cultivo.

3.1.6 ALTITUD DEL TERRENO

En principio la altitud del terreno no sería ningún obstáculo en el caso de la producción de microalgas ya que ésta se puede llevar a cabo tanto a nivel del mar como en cotas elevadas, siempre que haya un acceso garantizado y sencillo al agua. La altitud puede incrementar la radiación disponible en algunas localizaciones así como reducir la temperatura, y siempre que estos efectos acerquen las condiciones de cultivo hacia el rango de condiciones óptimas de las especies en cultivo será un efecto positivo. En cualquier caso la altitud del terreno no puede implicar el tener que realizar costosos bombeos de agua desde baja cota. En este sentido es necesario disponer de localizaciones de baja cota de bombeo de agua, nula o incluso negativa, para reducir el consumo de energía en el proceso.

3.1.7 APORTE DE CO,

Todos los proyectos convencionales de plantas de producción de algas parten de la base de disponer de gases de combustión, es decir, presuponen la existencia en las proximidades de las plantas de producción de algas de focos emisores de $\mathrm{CO_2}$. El uso de gases industriales como fuente de $\mathrm{CO_2}$ no sólo es necesario, sino que puede llegar a ser imperativo por los beneficios derivados de la eliminación de este tipo de contaminantes para la industria, y por tanto el beneficio económico y social que representa. Aunque el efecto estimulante sobre el crecimiento de algas por la adición de los gases de combustión al cultivo ya está demostrado, tiene los siquientes inconvenientes:

- La ausencia de grandes focos de emisión de CO₂ en las zonas geográficas donde sería posible implantar a gran escala la producción de microalgas. Las industrias generalmente no están situadas en los lugares donde las condiciones climáticas son ideales para la ubicación de plantas de producción de algas. Los costes de transporte y distribución de los gases industriales hasta el sistema de cultivo serían demasiado elevados, aunque actualmente se están empezando a desarrollar sistemas de canalización de CO₂ que podrían reducir estos costes considerablemente.
- La baja eficiencia en la captación del CO₂ procedente de gases de combustión.
- Necesidad de acondicionamiento previo de los gases.
- Posibilidad de exceso de acidificación, según la composición de gases.

A PESAR DE ESTOS PROBLEMAS, EL APORTE DE CO₂ GRATUITO O CON UN COSTE MÍNIMO RESULTA FUNDAMENTAL PARA LA VIABILIDAD ENERGÉTICA Y ECONÓMICA DEL PROCESO, ASÍ COMO EL BAJO CONSUMO DE ENERGÍA, POR LO QUE ES IMPERATIVO DISPONER DE FUENTES DE CO₂.

En el caso de utilizar de gases de combustión se debe hacer un uso eficiente de dichos gases para que no supongan una reemisión a la atmosfera. En grandes instalaciones se puede pensar en instalar generadores de electricidad/calor a partir de biogás o residuos procedentes del proceso de valorización de la biomasa.

Existen avances encaminados a resolver los problemas antes citados. Hay compañías que han desarrollado procesos que permiten depurar los gases de combustión, alcanzando hasta un 80% de eficiencia en el uso del $\mathrm{CO_2^{16}}$ acoplado a la utilización de microorganismos fotosintéticos. Asimismo, el empleo de sistemas de transferencia de materia eficaces y la utilización de estrategias de control avanzado permiten reducir las pérdidas de $\mathrm{CO_2}$ enormemente, hasta sólo el 5% del total del $\mathrm{CO_2}$ inyectado en el reactor.

ENTRE LOS POSIBLES PLANTEAMIENTOS ESTRATÉGICOS PARA PROVEER DE CO2 GRATUITAMENTE A LAS PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE ALGAS, TAMBIÉN DEBERÍA FIGURAR SU INTEGRACIÓNCONUNPOLICULTIVOMARINO (PECES, LANGOSTINOS, ETC.) QUE PUEDA SUMINISTRAR AGUA CARBONATADA POR RESPIRACIÓN, CON LA REUTILIZACIÓN DEL CO2 DE LOS FERMENTADORES DE BIOMASA DE ALGAS IN SITU.

¹⁶ Proceso patentado por ENDESA.

La utilización del CO₂ procedente de cualquier actividad respiratoria bacteriana como fermentaciones, digestiones de fangos, o fermentación de los efluentes de piscifactorías y/o de granjas de cerdos (purines) en el que crecen macro o microalgas adaptadas a las condiciones de esos efluentes, sería una opción a valorar.

Haciendo referencia específicamente a las macroalgas, el condicionante más importante para elegir la zona de cultivo es sin duda la disponibilidad de nutrientes, ya que la gran ventaja de las macroalgas frente a las microalgas es que, al ser bentónicas y/o macroscópicas, se les puede cambiar el medio de cultivo a medida que se desarrollan a muy bajo coste (o nulo, en el caso de efluentes por gravedad o en el propio mar). Pueden por ello introducirse en un medio que ya cuente con nutrientes y CO₂ disuelto, no se tiene obligatoriamente que enriquecer el agua en donde viven, simplemente se cambia. Esta diferencia es esencial,

tanto por reducir en grado sumo los costes de cosechado como por permitir cultivarlas en ubicaciones de forma natural ricas en nutrientes y CO₂ disuelto. En la costa española las aguas más ricas en nutrientes son principalmente las que están bajo la influencia del fenómeno de afloramiento *upwelling*.

3.1.8 FERTILIZANTES

Es importante tratar de eliminar los costes derivados de la utilización de fertilizantes, ya que éstos implican consumo tanto de materia como de energía. Para ello existen las siguientes opciones:

- Emplear aguas residuales industriales y/o agrícolas, con nutrientes disponibles (amonio, nitrato, fosfatos).
- Utilizar aguas procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales - EDAR. Habría, en este caso, que establecer medidas para garantizar el suministro. La posible presencia de toxicidad o microorganismos varios en estas aguas limitaría los campos de aplicabilidad de la biomasa obtenida a fines energéticos, excluyendo la utilización para alimentación humana y/o animal, a menos que se realizasen los tratamientos adecuados para anular estos efectos.

CONCLUSIONES

Además de los factores ambientales que se han destacado anteriormente, es necesario tener en cuenta las variables de índole socioeconómica que también afectan al proceso, ya que una planta de producción de biomasa requiere contar con capital humano formado tecnológicamente, mantener conexión con un sistema de I+D basado en la excelencia. así como estar relacionado con sectores tecnológicos (ingeniería de construcción, de procesos, hidráulica, química, informática etc.). El desarrollo de plantas de producción de biomasa de algas basadas en el marco de una economía sostenible, el desarrollo de I+D en forma de consorcio entre universidades, centros de investigación y empresas promoverá el impulso del conocimiento y transferencia tecnológica en la producción y uso de la biomasa de algas con vocación internacional, para llevar la innovación y el desarrollo económico a zonas de alta potencialidad para el cultivo de algas.

DEBERÍAN ABORDARSE
DE UN MODO INTEGRADO
TENIENDO EN CUENTA VARIABLES
DEL ECOSISTEMA Y SOCIOSISTEMA,
YA QUE PODRÍA RESULTAR
PELIGROSO ASUMIR SIN MÁS QUE
LAS TÉCNICAS DE CULTIVO Y LAS
CONDICIONES SOCIOECONÓMICAS
PUEDAN SER TRASLADABLES
DIRECTAMENTE DE UNA
LOCALIZACIÓN A

OTRA.

a otra

A esto debería unirse un buen sistema de gestión y comercialización del producto energético establecido en base a las demandas del mercado. En conclusión, las zonas potenciales deberían abordarse de un modo integradoteniendoencuentavariables del ecosistema y sociosistema, ya que podría resultar peligroso asumir sin más que las técnicas de cultivo y las condiciones socioeconómicas puedan ser trasladables directamente de una localización

Los grandes retos de España para incorporarse al desarrollo industrial de la biotecnología de algas serían:

- Crear plantas de producción de algas de escala suficiente para su aplicación específica a procesos de abatimiento y secuestro de CO₂ (y componentes tóxicos) de gases de combustión de grandes industrias emisoras (cementeras, refinerías, vidrieras, centrales térmicas, etc.).
- Integrar empresas de cultivos marinos (peces, crustáceos y moluscos) y de energías renovables convencionales en la producción de biocombustibles y energía hidráulica marina a gran escala. Sería necesario fomentar el desarrollo de una acuicultura y cultivos marinos intensivos sostenibles y versátiles, con objeto de mitigar el problema ecológico actual de las piscifactorías.

- Desarrollar plantas de producción de algas para aplicaciones de alto valor añadido en territorio español, impulsando el desarrollo de un nuevo sector industrial y la generación de nuevos puestos de trabajo asociados al mismo. Habría que avanzar en el acceso a la mayor fuente de biodiversidad de moléculas inéditas que aún están por explorar en el planeta (microalgas y cianobacterias) a efectos de potenciar las industrias biomédica, nutracéutica y dermocosmética.
- Llegar a ser competitivos tecnológicamente a nivel internacional.



3.2.1. SISTEMAS ABIERTOS FRENTE A SISTEMAS CERRADOS

Hay dos diseños básicos para la producción a gran escala de microalgas: sistemas abiertos en los que el cultivo está expuesto a la atmósfera, y los sistemas cerrados construidos con materiales transparentes como vidrio y policarbonato, entre otros, en los que no se produce dicha exposición a la atmósfera.



Cultivos de microalgas en cámara de cultivo con condiciones controladas de temperatura, irradiación y fotoperiodo. Fotografía cortesía de Centro de Biotecnología Marina (Universidad de las Palmas de Gran Canaria) - Banco Nacional de Algas.

Los sistemas abiertos resultan esenciales para maximizar irradiación, pero presentan los siguientes problemas:

- Las radiaciones ultravioletas y el viento provocan el oscurecimiento prematuro del fotobiorreactor, en el caso de que se utilicen plásticos de cubrición.
- Contaminación en raceways, en el caso de construirse sin cubierta.

Los reactores abiertos son muy importantes, pero aún deben ser mejorados para ser fiables, estables y más productivos. En una instalación industrial abierta de gran tamaño se debe garantizar la disponibilidad de inóculos, a través de la combinación de reactores cerrados y abiertos.

La siguiente tabla muestra las características de cultivo de microalgas en sistemas cerrados y abiertos. Se observa que cada sistema tiene sus ventajas e inconvenientes. En el caso de la producción de biomasa de microalgas debería utilizarse un nuevo sistema de producción que estuviese próximo en ventajas a los sistemas abiertos, sin olvidarse de los sistemas cerrados.

¿CULTIVO EN SISTEMA ABIERTO O CERRADO?						
	SISTEMAS CERRADOS	SISTEMAS ABIERTOS				
Control de contaminación	Fácil	Difícil				
Régimen de operación	Continuo-Semicontinuo	Semicontinuo-Estanco				
Razón área/volumen	Alta 1/10	Baja 5/10				
Densidad celular	Alta	Ваја				
Control del proceso	Fácil	Difícil				
Inversión	Alta	Ваја				
Costes de operación	Altos	Bajos				
Escalado	Difícil	Fácil				
Eficiencia de utilización de luz	Buena	Baja				

Tabla 1, Miguel García Guerrero. Universidad de Sevilla (Conferencia Bio-Oil Oviedo, marzo 2008).

En el caso de las macroalgas, los sistemas de cultivo pueden ser:

- En mar abierto sobre estructuras flotantes (long lines, redes) o en el fondo.
- En lagunas o tanques en tierra, en este caso en suspensión.

3.2.2. SISTEMAS MULTI-INTEGRADOS

Es importante destacar que los sistemas de producción de algas con fines energéticos deberían plantearse multi-integrados a todos los niveles, ya que de lo contrario se considera difícil alcanzar producciones rentables en las plantas.

- Carbonatación integrada:
 - Gases de combustión sin compresión.
 - CO₂ de respiración y/o fermentación.

Procesado integrado de la biomasa → biorrefinerías:

- La cantidad de productos derivados que pueden ser obtenidos, y su calidad (es decir, precio potencial de mercado) condicionarán el tipo de cepas y el tipo de aguas a emplear. Se estima que el precio de la biomasa de algas post-extracción de aceites, para aplicarlo a pienso animal o fertilizantes puede ser de 1 €/kg, pero debe estar libre de patógenos (p.e. no podrían emplearse aguas de EDAR que no sean tratadas previamente).
- El cultivo de las algas en efluentes puede servir de ejemplo de biorrefinería, y se muestra en el siguiente esquema:

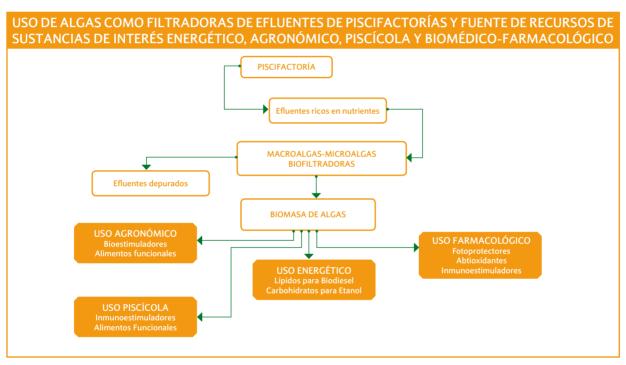


Figura 5, Ejemplo de biorrefinería.

- Producción continua:
 - La frecuencia de cosechado debe ser diaria, procesando entre un cuarto y un tercio del volumen
 - Preferiblemente sin doble ciclo (sin fase de inducción de lípidos), ya que se reduce la producción de biomasa.
- Producción integrada:
 - Policultivos marinos y/o en agua sobrante o no utilizable, que sean integrados. En los últimos años están surgiendo en muchas partes del mundo distintas iniciativas de acuicultura multitrófica integrada - IMTA¹⁷.
 - La piscicultura intensiva es actualmente rentable, entre otros aspectos, porque la eutrofización del entorno que produce tiene poco coste. Sin embargo, este hecho ya está dejando de ocurrir en los países industrializados, puesto que están surgiendo procedimientos prácticos para el tratamiento de las aguas de cultivo, siendo uno de los más interesantes la biofiltración mediante vegetales fotosintéticos, en especial las macroalgas, que es una técnica que reproduce en el sistema de cultivo un mini-ecosistema.
 - Las algas son los organismos más útiles para la biofiltración porque cuentan con la mayor productividad de todas las plantas y pueden ser cultivadas mediante métodos económicos.

Sería conveniente operar en sistemas tecnificados para su operación en continuo de forma automática, incluyendo el tratamiento de los residuos en la propia planta y el uso de efluentes industriales o municipales, aunque sólo sea como aporte de nutrientes.

En el caso concreto de las macroalgas, las premisas de la producción semicontinua y sin doble ciclo no son excluyentes para permanecer en márgenes de rentabilidad:

- En mar abierto el cultivo de macroalgas tiene una estacionalidad y un tiempo de cosecha similar al de un cultivo terrestre. En general son especies de crecimiento muy rápido con un tiempo de cosecha de 4-5 meses. Hay que plantearse por un lado la producción y por otro el procesado. La biomasa obtenida, que puede ser cosechada, secada y almacenada, puede procesarse después de forma continua, es una cuestión de escalar el cultivo y la planta de procesado.
- Para ocupar en el tiempo los parques de cultivo marinos se puede pensar en la rotación de cultivos, disponiendo de una especie de invierno-primavera y otra de verano-otoño.
- Los cultivos en suspensión en tanque sí que pueden funcionar de forma análoga a un biorreactor.
- resantes la El doble ciclo en macroalgas se entiende que bintéticos, tiene poco o nulo sentido, ya que las macroalgas una tienen valor bioenergético por su riqueza en polisacáridos estructurales y de reserva, en ningún caso por su contenido en lípidos, que rara vez supera el 5% de su peso seco.

¹⁷Como trabajos sobre este tema cabe destacar:

EN CONTINUO DE FORMA AUTOMÁTICA, INCLUYENDO EL

TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS

EN LA PROPIA PLANTA Y EL USO

DE EFLUENTES INDUSTRIALES O

MUNICIPALES, AUNQUE SÓLO

⁻ Chopin, T., Buschmann, A.H., Halling, C., Troell, M., Kautsky, N., Neori, A., Kraemer, G.P., Zertuche-González, J.A., Yarish, C., Neefus, C. (2001) *Integrating seaweeds into marine aquaculture system: a key toward sustainability*. J. Phycol. 37: 975–986

⁻ Neori, A., T. Chopin, M. Troell, A.H. Buschmann, G.P. Kraemer, C. Halling, M. Shpigel, C. Yarish (2004) *Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture.* Aquaculture 231: 361–391.

3.3 TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA

Los objetivos deseables para la producción de biomasa de algas con fines energéticos, teniendo en cuenta la situación actual del sector y mercado, serían:

- Producciones continuadas del orden de 100 t de biomasa seca por hectárea al año.
- Balance energético positivo.
- Costes de inversión inferiores a los 40 €/m².
- Consumos de energía inferiores a 50 W/m³.
- Costes de producción de biomasa menores de 500 €/t.

Los distintos puntos de vista que existen sobre el concepto y cálculo del término eficiencia fotosintética han generado disputas en la elección de la tecnología óptima de producción de biomasa de algas.

Actualmente no está claro cuál es la eficiencia fotosintética máxima de las algas. Se dan debates científicos ciertamente interesantes, pero que hacen perder la perspectiva. Por ejemplo,

DURANTE MUCHOS AÑOS LA TASA DE CRECIMIENTO FUE EL PARÁMETRO A MAXIMIZAR, CUANDO SE TRATA DE UN DATO IRRELEVANTE SI NO SE TIENE EN CUENTA LA DENSIDAD DEL CULTIVO, SI LO QUE SE PRETENDE ES PRODUCIR BIOMASA.

Además, el ámbito en el que se centra este documento no es siquiera la producción de biomasa, sino una cuestión muy diferente: determinar cuál sería la estrategia de I+D+i más adecuada para desarrollar una biotecnología que posibilite mega-producciones a costes competitivos respecto a los combustibles fósiles tradicionales, y además con balances energéticos y climáticos positivos.

Ante esta cuestión, podría resultar fácil perderse en la matriz de variables biológicas, tecnológicas, ecológicas, económicas e incluso de mercado que condicionan la respuesta, entre las que destaca la citada eficiencia fotosintética.

LA DISMINUCIÓN DE LOS COSTES DE PRODUCCIÓN Y LA MAXIMIZACIÓN DE LOS BENEFICIOS DEBE PASAR POR EL AUMENTO DE LA EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE LA BIOMASA. PARA ELLO SERÍA NECESARIO REDUCIR LOS COSTES DE CULTIVO, COMO POR EJEMPLO EL GASTO DE FERTILIZANTES Y CO₂, ASÍ COMO REDUCIR LOS COSTES DE COSECHADO. ADEMÁS, HABRÍA QUE AUMENTAR EL VALOR AÑADIDO DEL PRODUCTO OBTENIENDO NO ÚNICAMENTE BIOCOMBUSTIBLES, SINO OTROS PRODUCTOS DE INTERÉS EN LA BIOMASA RESIDUAL, ES DECIR, DESARROLLANDO EL CONCEPTO DE BIORREFINERÍA.

¿Es posible una tecnología de producción que cumpla todos estos requisitos y limitaciones?

Actualmente no hay una respuesta unívoca a esta pregunta. Prueba de ello es que no existe un consenso respecto a los costes de producción de biomasa de algas, ya que la tecnología se encuentra en una fase de desarrollo que no permite disponer de datos completamente contrastados a escala industrial. Resulta fundamental conseguir una I+D+i coordinada para reducir estos costes en un futuro próximo.

3.3.1 RACEWAYS

Actualmente, el 95% de la producción en el caso de las microalgas se genera en sistemas raceway o estanques abiertos circulares. Por ello, se inicia el trabajo comparativo con el modelo que se describe en la siguiente tabla:

TABLA RACEWAY¹⁸

La primera columna (REAL) son datos reales de una planta de producción de algas comercial (10 ha) operada de forma ideal, en la latitud adecuada, para producir microalgas con alto contenido lipídico. La segunda columna (POTENCIAL) refleja cómo se estima modificar el sistema de producción para alcanzar los criterios económicos establecidos para biomasa de algas.

COSTES DE PRODUCCIÓN DE MICROALGAS (X 1.000 US \$)	REAL Dunaliella (obtención de ß-caroteno) 10 ha de raceway (realidad actual)	POTENCIAL Planta de biocombustibles 10 ha raceway (visión optimizada al máximo)
Personal	500 (n=20)	120 (n=8)
Electricidad (0,125 US \$/kW)	180	30
Fertilizantes (N, P, K, Fe, etc.)	36	36
Impuestos locales	50	10
CO ₂ (500 US \$/t)	150	5
Agua de mar (0,25 US \$/m³)	200	5
Agua	20	10
Varios	30	20
Costes totales producción	1.166	236
Producción anual (t ps/año)	70	700
Rendimiento (g m ⁻² día ⁻¹)	2	20
Coste biomasa (en US \$/kg ps)	17	0,34
Precio mercado (US \$/kg ps)	4.000	<0,5
Ventas totales (M US \$/año)	100	<u>;</u> ؟
Mercado global	limitado	infinito

Tabla 2, Costes producción raceway.

El cultivo en raceways tiene el inconveniente de verse fácilmente contaminado, así como el difícil control de la temperatura y la dificultad de cultivar con menos de 15 cm de profundidad (por la reducción de la turbulencia y flujo) y a más de 30 cm (aumento de los costes de agitación y reducción de la densidad, con el consiguiente aumento de los costes de cosechado).

Otro problema es que en este estrecho margen de profundidad (15-30 cm) las densidades son muy bajas (0,5 g/l) y que, por tanto, precisan de muchísima más superficie (relación volumen/área real total utilizada entre 120-150 l/m²) que la que precisan los fotobiorreactores. Las producciones sostenibles en raceways son inferiores a 35 t ha¹año¹ (Richmond postula máximos de aproximadamente 60 t ha¹año¹ y Ben-Amotz sostiene que los máximos potenciales llegan a 75 t ha¹año¹).

¹⁸ Tabla expuesta por el Dr. Ami Ben-Amotz en el Algal Biomass Summit (Conferencia sobre biomasa de algas) que tuvo lugar en Seattle (EE.UU.) en octubre de 2008.

Actualmente no está completamente claro que el sistema de cultivo en raceway abierto sea el más rentable para plantas de producción de algas energéticas (enormes necesidades de espacio debido a los límites de producción propios del sistema, riesgos de contaminación, tasa de evaporación, bajas densidades óptimas, etc.), pero no existen dudas al respecto de la fuerte apuesta que se está haciendo en este sentido:

- La empresa SEAMBITOTIC (Israel) ha anunciado recientemente producciones de hasta 45 t ha¹año¹ y costes estimados de 10 €/kg empleando gases de combustión industriales (a escala raceway piloto).
 M.A. Borowitza estima los costes de producción de *Dunaliella* en estanques extensivos en 15 €/kg y sostiene que serán rentables como biocombustibles si se reduce a 0,7 €/kg.
- Algunas empresas de China afirman poder producir a costes de producción de 3,5 €/kg (Spirulina).

• La empresa SEAMBIOTIC EE.UU. (filial de SEAMBIOTIC Israel) se ha consorciado con la NASA para implantar sistemas piloto en EE.UU. mediante los prototipos desarrollados de cultivo de microalgas marinas con los gases de combustión de la central térmica de la empresa eléctrica israelí en la ciudad de Ashkelon. El director científico del programa y de la empresa es el Dr. Ami Ben-Amotz.

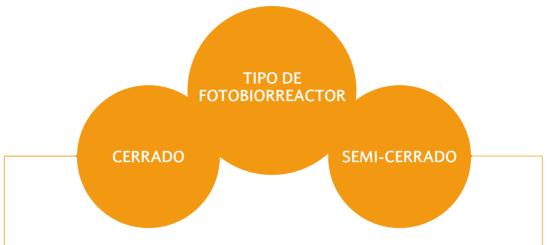


Sistemas de cultivo de microalgas tipo raceway.
Fotografía cortesía de Centro de Biotecnología Marina (Universidad de las Palmas de Gran Canaria) - Banco Nacional de Algas.

3.3.2 FOTOBIORREACTORES

Se entiende por fotobiorreactor aquellos sistemas en los que existe una separación física entre el cultivo y el medio que lo rodea, normalmente transparente, y que permite un mejor control de las condiciones de cultivo por lo que incrementan la productividad, aunque normalmente a un mayor coste.

Los fotobiorreactores se pueden clasificar de acuerdo con diversos criterios, por ejemplo:¹⁹



- entre un lazo externo que actúa como receptor solar y un sistema de burbujeo mediante sistemas mecánicos o neumáticos. El lazo externo está normalmente conformado por tubos de pequeño diámetro (entre 1 y 10 cm) unidos entre sí hasta longitudes de decenas o centenares de metros. Los tubos se pueden disponer tanto en horizontal como en vertical o inclinados. Se han escalado hasta volúmenes de 700 m³, existiendo instalaciones comerciales basadas en diversos diseños (Pulz, 2001).
- PANELES PLANOS: formados por dos láminas de plástico (rígido o flexible) verticales o inclinadas, entre las que se agita el cultivo mediante sistemas mecánicos o neumáticos. El espacio entre las láminas suele ser de entre 1 y 20 cm, y la altura de las mismas de hasta 2 m. Tienen la ventaja de posibilitar grandes superficies de cultivo expuestas a la luz por unidad de superficie de terreno (hasta 500 m² irradiados/100m²), aunque resulta difícil mantener las turbulencias adecuadas.

VERTICALES TUBULARES — COLUMNA ← DE BURBUJEO: constan de un tubo vertical de altura entre 1 y 3 m, y diámetro entre 5 y 50 cm, en el que se burbujea aire como sistema de agitación. Por su posición vertical absorben menos radiación que los dispuestos horizontalmente, pero no acumulan oxígeno. Estos reactores suelen utilizarse como sistemas de producción de inóculos debido al elevado control de las condiciones de operación que se alcanzan en los mismos. Un nuevo diseño de fotobiorreactores por agitación en vórtex¹9 sugiere que es posible generar producciones de 130 t ha¹año⁻¹, con tasas de producción volumétricas de 0,2 q ps l¹día⁻¹.

¹⁹ Sistema patentado por REPSOL.

3.3.2.1. AGITACIÓN

La agitación en los cultivos de microalgas es necesaria para homogeneizar el cultivo y minimizar así los gradientes de concentración y/o temperatura, así como para mover las células entre las zonas más interiores del cultivo, con poca disponibilidad de luz, y las exteriores próximas a la superficie, con mayor disponibilidad de luz. Cuanto mayor es la agitación, la frecuencia de exposición de las células a la luz se incrementa, aumentando la productividad hasta un valor de saturación. Sin embargo, este aumento de la agitación implica un mayor consumo de energía y por tanto una menor eficiencia energética y mayor coste de la producción²⁰.

Por otro lado, una excesiva agitación puede provocar daños en las células debido a fuerzas de cizalla, disminuyendo su productividad e incluso provocando la muerte de las mismas²¹. La agitación se puede llevar a cabo mediante sistemas mecánicos y/o neumáticos. En reactores raceway se utilizan agitadores de paletas (*padelwheels*) de muy bajo consumo energético (1-10 W/m³), mientras que en fotobiorreactores se utilizan bombas centrífugas y burbujeo de aire de mayor consumo energético (20-1.000 W/m³).

3.3.2.2. AUTOMATIZACIÓN

La automatización de los procesos de producción de microalgas es imprescindible, tanto para la reducción del coste de producción por reducción de la mano de obra necesaria como, especialmente, por mejora de la producción. Esta mejora viene dada por la adecuación de las condiciones de cultivo a los requerimientos de las diferentes estirpes y por el aseguramiento de la producción como consecuencia del mantenimiento de la estabilidad de los mismos.

La automatización puede ser a muy diferentes niveles, desde el menor nivel que implicaría la automatización sólo de los trasiegos de líquidos (medio de cultivo, cultivo, cosechado) necesarios para la operación en continuo de los reactores, hasta el mayor nivel que implicaría el control de parámetros de cultivo como el pH, la temperatura, la agitación, el oxígeno disuelto, etc. En todos los casos un mínimo control y automatización del proceso es necesario para asegurar su estabilidad y producción. A partir de aquí, mejoras como el control de pH por inyección de CO₂ y/o gases de combustión repercuten notablemente en el aumento de la productividad con bajo incremento del coste. Sin embargo, como en cualquier sistema, la automatización excesiva no sólo puede incrementar de forma insostenible el coste sino que puede incluso introducir inestabilidad en el sistema. Actualmente se están desarrollando diversas herramientas para el control y automatización de tareas en procesos de producción de microalgas²².

²⁰ E. Molina Grima, F. G. Acién Fernández, F. García Camacho, Yusuf Chisti, 1999, *Photobioreactors: Light regime, mass transfer, and scaleup.* Journal of Biotechnology, 70, 1-3, 231-247.

²¹ C. Brindley Alías, M.C. García-Malea López, F.G. Acién Fernández, J.M. Fernández Sevilla, J.L. García Sánchez and E. Molina Grima, 2004, *Influence of power supply in the feasibility of Phaeodactylum tricornutum cultures*. Biotechnology and Bioengineering, 87(6): 723-733.

²² Berenguel M, Rodríguez F, Acién FG, Garcia JL, 2004, *Model predictive control of tubular biological photobioreactors*. Journal of Process Control, 14: 377-387.

	ABIERTO	PLANO	TUBULAR
Volumen (m³)	10³	5,0	5,0
Fracción de gas retenido	0,01	0,02	0,01
Coeficiente de transferencia de masa (s-1)	0,010	0,010	0,005
Coeficiente de dispersión (m²/s)	0,0001	0,030	0,040
Tiempo de mezcla (s)	10 ⁴	150	10 ⁵
Potencia (W/m³)	1	50	100
Pb _{vol} (g l ⁻¹ día ⁻¹)	0,1	0,6	1,0
Coste (€/m³)	500	3.000	10.000

Tabla 3, Cuadro resumen de tipos de fotobiorreactores y sus características (E. Molina Grima, Universidad de Almería).

CONCLUSIONES

Las producciones en instalaciones futuras deberían ser superiores a 100 t ha⁻¹año⁻¹. Para considerar los fotobiorreactores habría que:

- Desarrollar materiales plásticos transparentes a la radiación solar, resistentes, filtrantes a radiaciones ultravioleta, antiadherentes (antifouling), rígidos, con bajo coste y reciclables.
- Desarrollar sistemas que permitan la interconectividad de módulos. Otra opción sería disponer de sistemas de producción de gran tamaño por unidad de reactor.
- Desarrollar sistemas de auto-aspiración de gases de combustión.



Fotografía cortesía del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Almería.



El problema de la producción de algas para producir biomasa no es tanto la producción, sino el cosechado. En el caso de las microalgas, el cosechado de organismos que miden entre 2 y 200 µm, y que además normalmente se cultivan a unas densidades de cosechado bajas, es muy costoso en equipos y energía especialmente si la tecnología de cosechado se basa en la centrifugación, como es el caso actualmente. Las densidades en raceway son más bajas que en fotobiorreactores, por lo que los costes de cosechado son aún superiores.

Por tanto, resulta imprescindible reducir o eliminar los costes de cosechado. La centrifugación para grandes volúmenes es actualmente inviable, por lo que habría que buscar algas de mayor tamaño que decanten bien, con el máximo reciclado de las aguas empleadas, buscando procesos de cosechado diferentes y más baratos.

Aparte de progresar en la búsqueda de nuevas especies de microalgas, sería interesante profundizar en las que tengan la capacidad de no ser "micro" en fotobiorreactores (alta turbulencia), sino "meso", es decir, agregados filamentosos con tamaños que oscilen entre 0,02 y 3 cm.

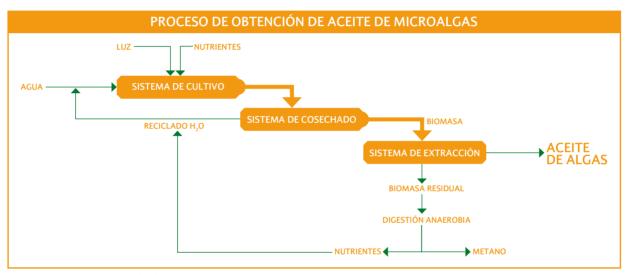


Figura 6, Esquema proceso de obtención de aceite de microalgas²³.

Entre las tecnologías de cosechado disponibles que actualmente se están investigando, se encuentran²⁴:

- Filtración: aplicable a mesoalgas, permite un óptimo reciclado del efluente.
- Floculación decantación.
- · Nanopartículas.
- Ninguna: secreción directa de hidrocarburos/biodiésel de algas al medio²⁵.

²³ Esquema recogido en la presentación del proyecto *A fully Integrated Process for Biodiesel Production from Microalgae in Saline Water (Proceso integrado de producción de biodiésel procedente de microalgas marinas)* presentado por el profesor M. Borowitza de la Universidad de Murdoch (Australia).

²⁴ A estas tecnologías habría que añadir la opción desarrollada por la empresa ALGAE VENTURE SYSTEMS (EE. UU.), que reduce muy significativamente los costes de cosechado por debajo del límite considerado como umbral crítico (35 €/t). Según esta compañía, es posible reducir los costes de 625 €/t actuales a menos de 2€/t. Esta reducción del 99% sería un hito que cambiaría la economía de la biotecnología de algas.

²⁵ La tecnología que está barajando la empresa SYNTHETIC GENOMICS (C. Venter) – EXXON, es la producción constante de cepas excretoras de hidrocarburos, lo cual elimina los problemas de cosechado de biomasa (células), pero la sustituye por un *downstream processing* en continuo del exudado de hidrocarburos (que se produciría en continuo).

3.5. BIOCOMBUSTIBLES PROCEDENTES DE ALGAS

3.5.1 BIOCOMBUSTIBLES DE MICROALGAS

La determinación del biocombustible idóneo que se debe obtener a partir de algas está considerada por algunos como una cuestión previa a resolver, prioritaria ante las cuestiones relacionadas con la producción de biomasa. Esta pregunta plantea la complejidad de la matriz biotecnología-producto a resolver. Posibilidades:

- COMBUSTIBLE DIRECTO PARA PRODUCCIÓN DE CALOR Y/O ELECTRICIDAD: su aplicación es difícilmente viable, ya que la pasta de algas obtenida tras el cosechado contiene un 80-90% de agua y un contenido en sales muy alto, que dificultan la combustión.
- HIDRÓGENO: la producción de hidrógeno metabólico a partir de microalgas portadoras de hidrogenasas, proceso complejo aún en estudio a nivel de laboratorio, requiere la producción de algas ricas en carbohidratos las cuales bajo determinadas condiciones de limitación de oxígeno constituyen la fuente de energía para procesos celulares de hidrólisis del agua y liberación de hidrógeno. Además de esta opción existe otra vía para la obtención de hidrógeno a partir de gasificación, gas de síntesis (aparece como otro tipo de biocombustibles más adelante) y reformado (enriquecimiento de la mezcla).
- BIOETANOL: la biomasa de algas contiene carbohidratos que son susceptibles de ser hidrolizados y fermentados a etanol mediante levaduras adecuadas. La composición de monosacáridos de los carbohidratos presentes en las algas no es sencilla por lo que estos procesos fermentativos deben ser aún desarrollados para poder realizarse a nivel industrial. Una alternativa a esta vía es la producción directa de etanol por algunascianobacterias, pudiéndose recuperar este etanol del medio²⁶.

METANO Y OPCIONALMENTE HIDRÓGENO:

- Procesado hidrotermal y reciclado del CO₂ a los fotobiorreactores con alta eficiencia térmica (>70%) en comparación a la eficiencia térmica de los procesos metanogénicos por digestión anaerobia (25%-35%).
- El proceso comienza a ser rentable a partir de un 15% de peso seco de biomasa en el concentrado, posibilitando el cosechado por filtración (cianobacterias filamentosasa autofloculantes).
- No precisa de la deshidratación de la biomasa necesaria en los procesos termales convencionales (90% del peso seco.) de gasificación y metanización.
- Tiempos de residencia muy cortos (minutos), por lo que bastan reactores de pequeño tamaño y un footprint (área neta ocupada) muy reducido, en comparación a la fermentación anaerobia.
- Posibilita un reciclado total de agua, nitrógeno, fósforo y CO₂.
- ACEITES: a priori parece poco rentable la estrategia de pretender generar lípidos (biodiésel o jet fuel) directamente de microalgas. Lo más adecuado sería que se plantease a través de procesos termoquímicos tipo Fischer-Tropsch, a partir de una biomasa de algas rica en polisacáridos. El problema no es tanto producir lípidos, sino cómo extraerlos y procesarlos adecuadamente. La gasificación no genera combustibles líquidos sino gaseosos en forma de gas pobre o de síntesis. Los combustibles líquidos son más valiosos.
 - Biodiésel: algunos investigadores²⁷ sugieren producciones potenciales de 18.750 l aceite ha¹año¹ (asumiendo un 20% oil en *Phaeodactylum* (una diatomea marina) y una tasas de 5 g lípidos m²día¹). Otros autores (Dr. Yusuf Christi) llegan a plantear producciones potenciales de hasta 58.760 l aceite ha¹año¹, asumiendo un 30% de aceite en la biomasa En este caso son datos reales muy favorables, ya que combina los mejores datos de producción de biomasa y de contenido en lípidos para determinar esos rendimientos máximos. De esta forma, son

²⁶ DOW CHEMICALS y ALGENOL se han consorciado y cuentan con el beneplácito del Department of Energy – DOE – (Departamento de Energía de EE. UU.). DOW CHEMICALS está desarrollando los films plásticos adecuados para los fotobiorreactores y ALGENOL la tecnología de etanolización directa. Se trata de un tipo de ingeniería genética técnica bastante conocida a nivel de laboratorio, actualmente ya existen varios proyectos en marcha para la consecución de alcoholes de cadenas más largas como el butanol. La planta piloto se está construyendo en la zona costera del estado de Texas (EE.UU.).

²⁷ Grupo del Dr. Molina Grima. Estas cantidades se han obtenido extrapolando estas producciones a partir de datos reales de cultivo durante 3 años en una instalación piloto de 220 l.

valores de máximos difícilmente alcanzables, ya que la producción de biomasa implica disminuir la producción de lípidos y viceversa.

Según Miguel García Guerrero²⁸ los reactores de 50 l/m² con productividad volumétrica media de 0,7 g de biomasa l¹día⁻¹ (o de 140 l/m² a 0.25 g l¹día⁻¹ = 35 g biomasa m⁻²día⁻¹) y con contenidos de ácidos grasos del 30% producirían 10 g de aceite m⁻²día⁻¹. La extrapolación en área daría 0,35 toneladas de biomasa (0,1 toneladas de aceite ha⁻¹día⁻¹). La extrapolación en área y tiempo considerando 300 días operativos al año rendiría 105 toneladas de biomasa, 30 t de aceite ha⁻¹año⁻¹.

Como ejemplos en el desarrollo de esta vía están los siguientes:

- i. La American Society for Testing and Materials – ASTM – (Sociedad Americana de Normalización) acaba de publicar los nuevos criterios de especificación de combustible apto para turbinas de aviación, incluidos los militares, D7566, válidos para biomasa y Fischer-Tropsch.
- ii. Soladiesel™, un biodiésel producido por la empresa SOLAZYME, ha superado las especificaciones ASTM D-975, que le confiere la aptitud para aplicarse al 100% (sin mezcla) y compatible.
- iii. El reciente consorcio EXXON-Venter (420 M€) para desarrollar nuevas microalgas oleaginosas por ingeniería genética declara, en cuanto a previsiones de futuro, que la compañía petrolera podría producir potencialmente más de 20.000 litros de combustible por hectárea y año. Los objetivos no son excesivamente ambiciosos, aunque sí realistas, similar al potencial de otras empresas.
- iv. La empresa PLANKTON POWER proyecta que, tras la planta piloto (17 M€) que están construyendo en una reserva militar de Cape Cod (EE.UU.),

podrán operar a escala comercial plantas de producción de algas que rindan 9.400.000 l de biodiésel/año en una planta de 40 ha.

- v. PETROALGAE plantea producciones sostenibles de 50 g ps m-²día-¹ (182 t ha-¹año-¹), y con expectativas de mejorar hasta 70 g ps m-²día-¹ (255 t ha-¹año-¹).
- vi. SAPPHIRE ENERGY ha suministrado biodiésel de algas a un coche que ha recorrido 6.000 km en EE. UU. (septiembre 2009) mediante su sistema patentado de *Green Crude Production*.

En lo referente a las estimaciones de producción de biodiésel de algas (t ha¹año¹), el rendimiento que han publicado la mayoría de autores se basa en cálculos sobre el contenido en lípidos totales, lo que incluye todos los compuestos liposolubles (incluidas clorofilas y carotenos además de otros compuestos no saponificables) de las células de las algas. Otro asunto distinto es el porcentaje de lípidos transformables en biodiésel (C-14 a C-24) que contienen. Además, debería valorarse la pérdida de rendimiento debida a la extracción de la biomasa de algas, sobre todo en el caso de las especies más oleaginosas como las clorofíceas

Si los cálculos se efectuaran considerando el rendimiento en aceites transformables en biodiésel extraíbles, se obtendrían datos mucho más realistas que los obtenidos con el contenido en lípidos totales. Resolver primero, o en paralelo, el problema del rendimiento y coste e la extracción de lípidos resulta una tarea prioritaria²⁹.

²⁹ Sugerencias:

⁻ La empresa ORIGIN OIL parece haberlo resuelto mediante un proceso monoetapa mediante la integración de la tecnología *Quantum Fracturing* y tratamientos electromagnéticos y de pH (el aceite flota y la biomasa sedimenta).

⁻ El consorcio público-privado-militar formado por AMES, la Universidad de lowa y CATILIN, han anunciado (abril 2009) el desarrollo de una técnica de extracción de lípidos de microalgas mediante nanopartículas que permite extraer los lípidos a las células de las algas.

²⁸ Conferencia en Oviedo 12/3/2008.

A pesar del fuerte desarrollo de proyectos para la producción de biodiésel frente al resto de biocombustibles a partir de algas, no deja de ser una línea de obtención energética más de todas las posibles. En este sentido, es importante recalcar la necesidad de aplicar el concepto de biorrefinería para consequir una valorización integral de la biomasa y todos sus componentes.

- Jet fuel: es un objetivo prioritario del programa/ gobierno de EE.UU.-Israel. Sirve de aplicación lo descrito para biodiésel.
- HIDROCARBUROS: la producción de botriocenos por la microalga *Botrvococcus* es bastante conocida aunque aún no se ha podido llevar a cabo de forma significativa. Son especies de lento de crecimiento, sólo con aqua dulce, cultivos de baja densidad y **EFECTUARAN CONSIDERANDO EL RENDIMIENTO EN ACEITES** muy baja productividad. Por tanto, TRANSFORMABLES EN BIODIÉSEL podrían no considerarse como **EXTRAÍBLES, SE OBTENDRÍAN DATOS** una estrategia prioritaria³⁰. MUCHO MÁS REALISTAS QUE LOS
- GAS DE SÍNTESIS: puede emplearse como materia prima para la obtención de biocombustibles líquidos alcoholes, además de para obtener hidrógeno.

La empresa GENIFUEL ha desarrollado (2009) un sistema muy eficiente de cosechado y gasificación de biomasa de algas, en el que se han obtenido eficiencias de gasificación próximas al 99% de la biomasa y reciclado del CO₂ en las propias plantas de producción de algas. Está basado en la utilización de biomasa húmeda y el proceso de catalytic hydrotermal gasification (gasificación hidrotérmica catalítica), el cual requiere una tecnología muy simple en un proceso monoetapa.

Comparado con los procesos anaerobios es 400 veces más rápido y se obtienen mayores rendimientos. El CO₂ es reenviado como fuente de carbonatación a las plantas de producción de algas.

3.5.2 BIOCOMBUSTIBLES DE **MACROALGAS**

SI LOS

CÁLCULOS SE

OBTENIDOS CON EL CONTENIDO EN

O EN PARALELO, EL PROBLEMA

DEL RENDIMIENTO Y COSTE DE

LA EXTRACCIÓN DE LÍPIDOS

RESULTA UNA TAREA

PRIORITARIA.

La selección de un proceso para la conversión de biomasa en energía utilizable va a estar condicionada por el producto final deseado y de las características fisicoquímicas del material. Las macroalgas tienen una composición básica promedio de: materia seca: 10-25%, humedad: 90-75%: con materia orgánica: 62-78% y minerales: 22-38%.

La materia leñosa típica tiene una constitución estructural fundamentalmente basada en celulosa y lignina, que son unos componentes que se encuentran en bajas cantidades en las macroalgas en comparación con la madera. Este hecho sugiere en consecuencia que un proceso de fermentación similar al de otros materiales vegetales como el

maíz podría ser adecuado para éstas. Por otra parte, el bajo contenido en lípidos

no sugiere su uso para producir biodiésel. Los polisacáridos presentes en las macroalgas requieren de proceso un bioquímico o termoquímico que los rompa en sus monómeros LÍPIDOS TOTALES. RESOLVER PRIMERO, constituyentes como previo a la fermentación. o bien es necesario desarrollar un proceso específico de fermentación directa.

> Otra alternativa es la producción de biogás mediante fermentación anaerobia³¹. Este proceso implica la conversión biológica de los componentes orgánicos de la biomasa en productos sencillos tales como acetatos, dióxido de carbono e hidrógeno, por acción de un grupo de bacterias no metanogénicas. Estos productos son utilizados en un siguiente paso por una población mixta de bacterias metanogénicas para producir metano y dióxido de carbono. En general las bacterias no metanogénicas son organismos de crecimiento rápido mientras que los metanógenos son generalmente de crecimiento más lento.

³⁰ No obstante, la mayoría de los trabajos presentados durante el International Phycological Congress (Tokio, agosto 2009) estaban relacionados con un macroprograma de screening (muestreo) de

³¹ De aplicación real de esta tecnología son ejemplo la TOKYO GAS COMPANY para el uso de arribazones o bien la instalación de la compañía belga SOPEX en Marruecos, diseñada para tratar residuos de agar con procesado de 12 t de residuo al día y una generación de gas esperada de 100.000 m³ al año. Los residuos finales se emplearían como fertilizantes.

PROCESOS

En general todos los estudios previos concluyen que las algas marinas son una materia prima adecuada para los procesos de digestión anaerobia, lo que está demostrado por las altas eficiencias de conversión, elevadas velocidades y buena estabilidad del proceso. La presencia de sal, polifenoles o polisacáridos sulfatados debe ser estudiada en cada caso puesto que puede dar lugar a la inhibición del proceso de fermentación.

La digestión anaerobia de algas marinas en dos fases³², redunda también en una clara mejora en la economía del proceso. Al separar la fase ácida o hidrolítica del proceso de la fase metanogénica, es posible incrementar la concentracióndemetanodisminuyendo consecuentemente posibles gastos de purificación de dicho gas. Además, en el caso de la digestión de algas esta separación produce una mayor estabilidad del proceso al emplear una primera fase que puede ejercer una función protectora de la fase metanogénica de posibles toxicidades que puedan existir en la alimentación inicial del proceso.

Las macroalgas apenas tienen lípidos, por lo que la respuesta a esta pregunta es bastante más sencilla que en el caso de las microalgas. Quizá la producción de biogás mediante metanización sea el proceso de transformación energética más directo, sencillo y viable con macroalgas, aunque también es posible la gasificación. De acuerdo a pruebas cualitativas de codigestión de purín y algas crecidas en aguas de purín previamente digerido, la codigestión mejora la digestión anaerobia al mejorar la relación C/N (el purín tiene demasiado N).

Dada la enorme cantidad de purín que hay en España (cuenta con un potencial de los mayores de Europa), el empleo de las aguas resultantes de la digestión del mismo y del CO_2 de la combustión del propio biogás, como nutrientes para producir algas que producen más biogás y obtener agua relativamente limpia, conllevaría los siguientes beneficios ambientales:

- Eliminación de las emisiones de metano.
- Eliminar las emisiones de CO₂ propias del gasoil.
- Obtener agua relativamente limpia y otros complementos alimenticios.
- Disminuir la presión antrópica sobre las fuentes de aprovisionamiento hídrico.

Los procesos de obtención de bioalcohol cuentan todavía con bastantes lagunas tecnológicas debido a la dificultad de encontrar microorganismos o enzimas suficientemente eficientes o baratos que sean capaces de hidrolizar la gran complejidad de polisacáridos que pueden encontrarse en las algas marinas. Utilizar las macroalgas como combustible directo sería el procedimiento a priori más rentable, pero se pierden completamente todos los posibles productos de alto valor añadido que contienen. Se inutilizaría el concepto de biorrefinería

³² Vergara, Fernández y colaboradores, *Biomass and Bioenergy* (*Biomasa y Bioenergía*), 32 (2008): 338-344.

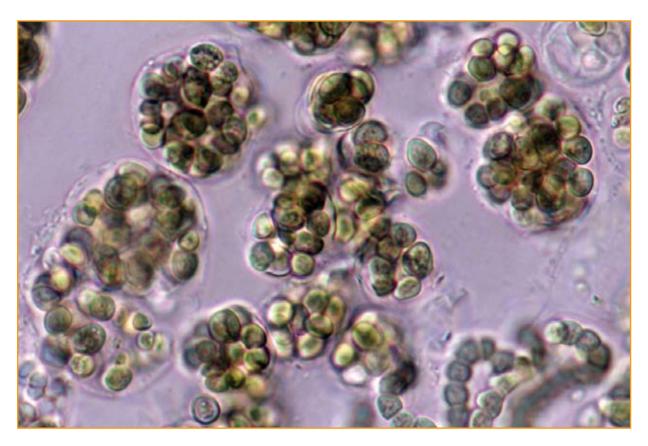


Foto al microscopio de las diferentes partes del ciclo celular de la cianobacteria excretora de polisacáridos Nostoc BNA 20_022, aislada del Barranco de Azujae en Gran Canaria. El control de las fases de mayor producción de polisacáridos es crucial en la obtención de una mayor rendimiento en la obtención de etanol o metano.
Fotografía cortesía de Centro de Biotecnología Marina (Universidad de las Palmas de Gran Canaria) - Banco Nacional de Algas.



3.6.1 MICROALGAS

Es importante tener en cuenta que el término microalgas (definidas como organismos fotosintéticos de tamaño inferior a 200 µm) es un comodín lingüístico que hace referencia a una gama de organismos fotosintéticos que abarcan no sólo unas 11 divisiones (dependiendo de las escuelas taxonómicas), sino a 2 reinos (plantas y bacterias). En comparación, todas las plantas terrestres pertenecen a una única división (clorofita), las cuales derivaron de las microalgas marinas fundadoras de tal división taxonómica. Esto implica que existe mucha más similitud (fisiológica, en composición bioquímica y pigmentaria, evolutiva, etc.) entre una microalga clorofita y cualquier planta terrestre, que entre esa misma microalga y cualquier microalga que flota a su lado y es aparentemente idéntica, pero perteneciente a otra división. Por tanto, sí resulta peligroso hablar de microalgas como si se hablara de las plantas, sería igualmente incorrecto hablar de algas, o de vegetales marinos, sin ser consciente de la enorme diversidad (imprecisión) del término.

Como se ha comentado en la introducción del presente documento, algunos autores sostienen que existen unas 50.000 especies de microalgas, mientras que otros hablan de 100.000 especies. Como referencia indicar que aproximadamente el 80% de la producción industrial actual de microalgas está basada en el cultivo de únicamente 3-5 especies (en microalgas el concepto de especie también es muy peligroso).

Todo programa destinado a la producción industrial de microalgas debería:

- Realizar una bioprospección permanente.
- Contar con instalaciones para la conservación y mantenimiento, público o privado (colecciones particulares y/o Banco Nacional de Algas), con la finalidad de proporcionar un servicio de conservación de la biodiversidad.

Se sugieren los siguientes criterios selectivos como los más importantes:

- Producción volumétrica total (en biomasa real).
- Tolerancia térmica.

- Resistencia a condiciones de cultivo adversas.
- Multi-utilidad potencial de la biomasa: gama de mercados complementarios → biorrefinería. La rentabilidad de las plantas de producción de algas energéticas previsiblemente va a estar condicionada a la obtención de ingresos equivalentes por los subproductos de la biomasa distintos a los biocombustibles de algas.
- Menor adherencia al material del fotobiorreactor.
- Facilidad de cosechado (cosechable por filtración y/o autofloculación-decantación).
- No debería considerarse la monoespecificidad como requisito del cultivo y deberían aceptarse las transiciones naturales.

Algunos géneros de microalgas, principalmente clorofíceas y diatomeas, son capaces de acumular una gran cantidad de lípidos, hasta un 80% del peso seco, pero en condiciones de estrés. Por tanto, acumulan lípidos cuando tienen limitada la posibilidad de dividirse, es decir, cuando no crecen.

ESPECIES	CONTENIDO DE ACEITE (% peso biomasa seca)		
Botryococcus braunii	25 - 75		
Chorella sp.	28 - 32		
Crypthecodinium cohnii	20		
Cylindrotheca sp.	16 - 37		
Dunaliella primolecta	23		
Isochrysis sp.	25 - 35		
Monallanthus salina	20		
Nannochloris sp.	20 - 35		
Nannochloropsis sp.	31 - 68		
Neochloris oleoabundans	35 - 64		
Nitzschia sp	45 - 47		
Phaeodactylum tricornutum	20 - 30		
Schizochytrium sp	50 - 77		
Tetraselmis suecica	15 - 23		

Tabla 4, Contenido de aceite de algunas especies de microalgas³³

³³ Tabla obtenida del XV Simposio electrónico internacional (octubre 2007). Presentación de Isabel Albarracín (Facultad de Ciencias Naturales, UNPSJB, Argentina): *Microalgas: potenciales productoras de biodiésel.*

EL GRAN RETO PARA LA INVESTIGACIÓN ESTÁ EN OBTENER ESPECIES DE MICROALGAS EN LAS QUE SE CONSIGA UN BALANCE ÓPTIMO ENTRE CRECIMIENTO Y ACUMULACIÓN DE LÍPIDOS QUE PERMITA RENTABILIZAR EL PROCESO.

El reducido tamaño de las especies de microalgas oleaginosas hace que la selección por citometría de flujo+sorter sea quizás la única alternativa: los equipos actuales no permiten muestrear especies filamentosas, lo cual obliga al empleo de centrífugas para cosechar salvo que puedan generar autofloculación.

Un proceso mucho más sencillo de seleccionar y más eficiente como convertidor energético, es el cultivo de cepas productoras de polisacáridos, puesto que en este proceso el cultivo de microalgas es muy eficiente. Sin embargo, en este caso sería necesario decidir qué tipo de polisacárido, ya que es necesario adaptar los sistemas de fermentación actuales.

En base a lo anterior, se plantean las siguientes cuestiones:

a. ¿Cuáles serían las especies/cepas de microalgas más apropiadas?

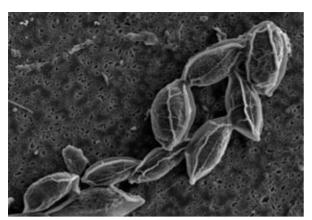
- Las que más producción de biomasa generen en el sistema más barato.
- Las locales, preferentemente.
- El 90% de especies de algas está aún por valorar.

b. ¿Cómo obtener especies/cepas, conservarlas y patentarlas?

- Creación de instalaciones para la conservación y mantenimiento, público o privado (colecciones particulares y/o Banco Nacional de Algas). Aunque ya existen bancos de microalgas de referencia a nivel mundial, el disponer de un banco de microalgas nacional permite disponer de un centro de ensayo de algas en condiciones estándar y/o definidas, como apoyo a grupos o centros.
- Es necesario desarrollar procesos a escala piloto en condiciones reales de operación, con blooms naturales y/o inoculación de cepas seleccionadas, para identificar las microalgas de mayor productividad susceptibles de ser patentadas.

c. ¿Cómo mejorarlas?

- Mejora y adaptación en condiciones de operación:
 - i. Se pueden ejercer metodologías de presión mediante factores ambientales para mejorar la productividad y/o obtener adaptaciones en las cepas seleccionadas.
- Citometría de flujo con sorter:
 - i. Proyecto CENIT-PIIBE.
 - ii. Existenalmenosdosproyectos/universidades en EE.UU. que están desarrollando la misma estrategia y con resultados prometedores.
- Ingeniería genética. A priori puede pensarse en la aparición de problemas legales. De todas formas, mientras los sistemas sean cerrados no parece haber diferencia con las técnicas que se están aplicado ya en la producción de otros biocombustibles en Europa. Además, por suerte pueden aprenderse valiosas enseñanzas de la industria agroalimentaria y de la farmacéutica. Es una línea que plantea cierto riesgo y coste, si bien puede aportar grandes beneficios. Prueba de su importancia es que sólo en el 2009:
 - i. EXXON se ha aliado con SYNTHETIC GENOMICS (C. Veter) para desarrollar microalgas artificiales genómicas oleaginosas invirtiendo 420 M€.
 - ii. La empresa TARGETEC GROWTH INTERNATIONAL (EE. UU.) ha anunciado que puede aumentar un 400% el rendimiento en oil apto para jet fuel con cianobacterias manipuladas genéticamente.
 - iii. SAPPHIRE ENERGY anuncia en la *Military Energy & Fuel Conference* (Conferencia sobre Energía y Combustibles militares) de abril del 2009 que tiene previsto producir más de 380 M l/año para el 2018 y hasta 3.800 M litros de jet fuel para el 2025 (lo que supone un 3% de la demanda de EE.UU. anual, de 135.000 M litros de combustible estándar) de cianobacterias mediante ingeniería genética.
- iv. ALLIEDMINDShaestablecidounpartenariado con la Universidad de Washington para explotar las cepas que combinan el carácter oleaginoso y alto crecimiento, obtenidas con la tecnología de la profesora Ann Cattolico.



Fotografía cortesía del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Almería.

3.6.2 MACROALGAS

En el caso de las macroalgas son muy pocas las especies de las que se dominan las técnicas de cultivo y tienen una productividad suficiente como para considerarlas candidatas para la obtención de biocombustibles y/o otras sustancias. En particular, en las costas españolas hay suficiente tecnología y experiencia para el cultivo masivo del alga parda Saccharina latissima, de algas rojas pertenecientes al género Gracilaria y de las algas verdes del género Ulva. Estos tres tipos de algas barren el espectro de condiciones y ambientes de cultivo que se pueden encontrar en España y pueden además ser cultivadas en sistemas en mar o en tanque en tierra.

El informe A Review of the potencial of Marine Algae as a source of biofuel in Ireland (Estudio del potencial de las algas marinas como fuente de biocombustibles en Irlanda), publicado en febrero de 2009 concluye que de entre las macroalgas, las especies de Laminaria y Ulva son las que presentan unas mejores expectativas, y que el procesado más rentable será la fermentación anaerobia con producción de biogás o alcohol y que en el último caso habrá que desarrollar un proceso de fermentación específico. Finalmente expone también que es necesario reducir los costes de la materia prima al menos en un 75% respecto a los niveles actuales. Concluye exponiendo que la contribución de las algas marinas al mix energético en el año 2020 va ser modesta (0,2% de la demanda de combustible para el transporte en el caso de las macroalgas y alrededor de un 1% en las microalgas) e indicando que existe un claro interés en productos no energéticos como nutracéuticos, pigmentos, proteínas, alimentos funcionales y otros constituyentes químicos.

¿Cuál podría llegar a ser la productividad de estos cultivos?

En base a las experiencias realizadas con el cultivo de *Saccharina latissima* en Galicia en sistemas de cuerdas en cortina, se ha llegado a estimar unas producciones máximas de 25 t ps ha⁻¹año⁻¹.

Tanques de cultivo de macroalgas empleadas en la biofiltración de los efluentes de psicifactorias y gases de combustión. Fotografía cortesía de Centro de Biotecnología Marina (Universidad de las Palmas de Gran Canaria) - Banco Nacional de Algas.







Hoja de Ruta

Resulta fundamental desarrollar un plan nacional de I+D+i con objeto de alcanzar el éxito en la producción sostenible de algas con fines energéticos, con el compromiso asociado de financiarlo a largo plazo. Este programa deberá estar enmarcado por tres criterios: balance energético positivo, balance ecológico positivo, y económicamente competitivo frente a los combustibles fósiles convencionales; con objeto de contar con un apoyo similar al recibido por otras tecnologías renovables para fomentar su desarrollo.

Para que la potencialidad del cultivo de algas con fines energéticos pueda alcanzar un nivel significativo, se proponen los siguientes criterios y actuaciones:

4.1 PASOS PREVIOS

- CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS DE PROYECTOS EN FASE DE EJECUCIÓN. Como anexo del presente documento puede consultarse una primera recopilación de proyectos nacionales elaborada por BIOPLAT.
- INFORME DE LAS TECNOLOGÍAS en desarrollo e instalaciones existentes.
- IDENTIFICACIÓN DE LAS BARRERAS TECNOLÓGICAS. El avance en este sentido debería abordar las fases de:
 - Obtención de mejores especies de algas. Desarrollo de una campaña programada, estandarizada y a medio plazo (5-8 años) de:

- a. Bioprospección de nuevas especies.
- b. Evaluación de su potencial productivo (alto rendimiento y baja adherencia).
- c. Identificación (convencional y genómica) y conservación (convencional y criopreservación) de las cepas estudiadas.
- d. Caracterización fisiológica de las variables de interés biotecnológico de las nuevas especies.
- e. Aumento de la investigación básica y aplicada en genética, bioquímica, fisiología y fotobiología de algas, con objeto de determinar las posibilidades de mejora de las mismas.
- f. Selección de algas de elevado crecimiento en condiciones de cultivo al exterior (bajo radiación solar), y de perfil bioquímico adecuado por su riqueza y composición en compuestos valorizables energéticamente (carbohidratos, lípidos).
- g. Estudio de resistencias a factores ambientales en las algas seleccionadas de forma que se facilite su producción a gran escala con el mínimo de contaminaciones y máxima robustez.
- Desarrollo de las tecnologías de cultivo: búsqueda de aumento de producción, eficiencia energética y mejora de los materiales. La producción de biomasa de algas debería asociarse a:
 - a. El avance de la investigación en el diseño y operación de fotobiorreactores, en la captación de luz y el uso de nuevos

materiales que permitan reducir su coste, tanto de instalación como de operación, con poco mantenimiento y larga vida útil. Los materiales plásticos de los fotobiorreactores deben ser transparentes a la radiación solar, resistentes, filtrantes a la radiación ultravioleta, antiadherentes (antifouling). rígidos, con bajo coste y reciclables. Habría que demostrar la viabilidad del uso de estos reactores en cultivo externo, minimizando el consumo de energía y maximizando su operatividad. Sería útil verificar valores de productividad a escala adecuada (planta de demostración) a lo largo de al menos un ciclo anual integrando las variaciones estacionales.



Fotografía cortesía del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Almería.

- b. La utilización preferente de aguas que no se destinen a usos agrícolas. El empleo de efluentes procedentes de piscifactorías, purines, EDAR, etc. resulta, junto con el uso de agua de mar o salobre, en principio, las opciones de mayor sostenibilidad.
- c. Procesos de gestión integral de los nutrientes (CO₂ de gases industriales como fuente de carbono, recuperación de fertilizantes, reciclaje del medio de cultivo, etc.) que permitan cerrar los balances de materia con las mínimas pérdidas.
- d. Minimizar el uso de fertilizantes favoreciendo la utilización de organismos fijadores de nitrógeno o con mínimos requerimientos de éste.
- e. Desarrollo de tecnologías y diseños de producción más simples y rentables.

- f. Establecimiento de las metodologías adecuadas de análisis de ciclo de vida real, y balances de materia y energía que permitan realizar un balance adecuado del proceso, es decir, conocer qué aportación de materia y energía es necesaria para la producción de la biomasa de algas.
- g. Los avances en sistemas de iluminación artificial (fibra óptica, LEDs, lámparas de bajo consumo, etc.) podrían resolver los problemas relacionados con la carencia de suficientes tasas de irradiación solar, si el balance económico y energético lo permite.
- Desarrollo del *downstream* (cosechado y procesado): procesos de preconcentración, deshidratación, secado, extracción de aceite y valorización integral de la biomasa.
 - a. El cosechado debería basarse en sistemas de muy bajo coste (de capital y operativos).
 El desarrollo de mesoalgas y de sistemas multiespecíficos autofloculantes deberían ser estrategias a valorar.
 - b. El procesado deberá plantearse en sistemas de biorrefinerías integradas. La búsqueda de cepas oleaginosas debería complementarse con el objetivo de obtener biomasa fermentable.
 - c. Poner a punto tecnologías de bajo coste (económico y energético) de recuperación y transformación de la biomasa hasta el producto final, que permitan concentrar el cultivo hasta valores adecuados para su procesado (10-20% peso seco).
 - d. Desarrollar un aprovechamiento integral de la biomasa producida que contemple además de la producción de biocombustibles la utilización del material residual resultante de la extracción, aplicando así el concepto de biorrefinería a la biomasa de algas.
- DEFINICIÓN DE LAS ÁREAS que necesitan un mayor esfuerzo (técnico-económico), con el fin de reducir costes y conseguir la mayor adaptación a las condiciones españolas. Identificación y valoración de todos los factores externos que pueden influir

en los costes de producción. En conclusión, se deberá hacer un análisis para detectar los factores (variables) que más afectan, y priorizar realizando un mayor esfuerzo en éstos. Probablemente los más trascendentes en la situación actual sean aquellos factores relacionados con: reducción de costes de operación y mantenimiento (en especial consumo energía, agua, $\mathrm{CO_2}$ y vida útil de las instalaciones), obtención y comercialización de los co-productos, mejora de rendimientos y reducción de costes de inversión.

 DEMOSTRACIÓN ESCALABLE CON VISIÓN A GRAN ESCALA. Según avance la investigación sería necesario contar con instalaciones piloto, que no necesariamente tienen que ser excesivamente grandes, en las que verificar y demostrar los desarrollos, de forma que los datos obtenidos permitan la implantación de la producción de algas con fines energéticos a gran escala. En la medida de lo posible, estas instalaciones piloto deberían tener un fácil acceso a puntos de emisión de CO₂ y agua marina y/o residual. La investigación debe permitir el desarrollo de módulos industriales y de sistemas de cultivo escalables que permitan conseguir producciones sostenibles a gran escala.

ESTUDIO DE LAS SINERGIAS MEDIOAMBIENTALES:

- Integración del sistema acuícola con el sistema agrícola. Si se plantease el cultivo de micrófitos de agua dulce para producción de biomasa con fines energéticos, las tecnologías de cultivo tendrían que estar ligadas a la integración del sistema acuícola de algas con el sistema agrícola convencional.
- Como plantea la Directiva Europea de Energías Renovables 2009/28/CE para el caso de los biocarburantes convencionales, el cultivo de algas podría poseer algún tipo de certificado de sostenibilidad ecológica que garantice el uso adecuado de los sistemas naturales.
- Establecimiento de los condicionantes que se requieren para QUE LA ENERGÍA PROCEDENTE DE LAS ALGAS ESTÉ CONSIDERADA EN EL MARCO DE LA POLÍTICA NACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES.

DE FORMA ESQUEMÁTICA, LOS PASOS PREVIOS PARA QUE EL PLAN PROPUESTO SEA CAPAZ DE ALCANZAR EL ÉXITO EN LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE ALGAS CON FINES ENERGÉTICOS SERÍAN:



• ESPECIES:

- -Prospección.
- -Modificación genética.

• TECNOLOGÍAS DE CULTIVO:

- -Optimización de la producción.
- -Eficiencia energética.
- -Mejora de materiales.

• DESARROLLO DEL DOWNSTREAM:

- -Procesos de pre-concentración.
- -Deshidratación.
- -Extracción y separación.
- -Nuevas tecnologías de "procesamiento en húmedo".
- -Producción de biocombustibles: biodiésel, bioetanol, biogás.

• OPTIMIZACIÓN DE INPUTS:

- -Gases.
- -Consumos de agua.
- -Consumo de nutrientes.

• BIORREFINERÍA:

- Aprovechamiento integral de la biomasa:
 - Productos energéticos.
 - Productos de alto valor añadido.
 - Nutrición.
 - Acuicultura.

4.2 ACTORES INVOLUCRADOS

Sólo mediante una investigación integrada que conecte la escala de laboratorio con la de planta industrial, con la participación de grupos de investigación y empresas, será posible un avance firme en la obtención de biocombustibles a partir de la biomasa de algas. No es necesario únicamente contar con más recursos económicos para I+D+i, sino también gestionarlos de la manera más eficiente posible.

Se consideran como actores involucrados en este plan de producción de algas con fines energéticos los siguientes:

- Sector Público:
 - Departamentos ministeriales relacionados con la innovación y la energía.
 - Organismos públicos de investigación.
 - Universidades.
- Sector Privado:
 - Sectores energéticos, químico, farmacéutico y nutricional, principalmente.
 - Empresas de cualquier tamaño.
 - Centros tecnológicos.

4.3 MOTIVACIONES Y CRITERIOS DE COLABORACIÓN

La producción de biomasa de algas con fines energéticos es hoy día una realidad científica que aún debe ser investigada y desarrollada para poder convertirse en una realidad industrial.

Se requiere, por tanto, fomentar la investigación y desarrollo, mediante la colaboración conjunta de científicos y tecnólogos de diferentes áreas, así como de las empresas involucradas en el sector, las cuales deben establecer los objetivos y alcances requeridos para hacer este tipo de procesos viables. Los trabajos a realizar deben abarcar los principales puntos críticos hasta ahora puestos de manifiesto por numerosos investigadores y, sobre todo, no deben repetir experiencias previas fallidas, permitiendo optimizar la utilización de los recursos disponibles.

Las iniciativas públicas aplicadas de forma individual, hasta el momento, no han sido capaces de alcanzar las expectativas generadas para el fomento del cultivo de microalgas; prueba de ello es que tras años de investigaciones no se han logrado desarrollos industriales significativos. A su vez, resulta tremendamente difícil para el sector privado desarrollarlo individualmente sin apoyo público, por lo que es prioritario y requisito fundamental que exista una colaboración y coordinación entre organismos públicos y privados para alcanzar el éxito, y en concreto del sistema ciencia-tecnología-empresa.



Deben estar en línea con los que existen actualmente, en este sentido serían:

- Consorcios público-privados:
 - Creación de consorcios con apoyo económico público que consigan construir y operar 2 o 3 plataformas a escala pre-industrial donde se demuestre su modularidad y/o escalabilidad (superficies aproximadas de 10-20 ha).
 - Cada uno de estos consorcios deberá estar formado por grupos industriales, centros tecnológicos y universidades.
 - Designación de un organismo de coordinación de ámbito nacional: este organismo sería dependiente del departamento ministerial que haya aportado las ayudas.
 - Estos consorcios deberían informar al organismo coordinador de los resultados obtenidos.
- Consorcios privados con soporte público económico-técnico-científico:
 - El sector público no necesitaría intervenir dentro de los consorcios privados, sino que los consorcios contratarán estos apoyos sin régimen de exclusividad, manteniendo así la independencia de los centros tecnológicos y universidades.
 - Existirá un centro nacional de coordinación vinculado al organismo público responsable del plan, donde se centralice toda la investigación pública proveniente de los centros tecnológicos y universidades.

Sería aconsejable, independientemente del modelo de colaboración, tener la posibilidad de disponer de un centro coordinador tecnológico en I+D+i de biomasa de algas que concentre los trabajos realizados. Este centro público coordinador debería:

- Posibilitar sinergia, coordinación y masa crítica en I+D
- Fomentar el desarrollo de grupos de investigación básica en taxonomía, genética, bioquímica y fisiología de algas, que sean la base de la innovación de los proyectos aplicados.
- Permitir avanzar lo más rápidamente en la identificación y resolución de los problemas, acelerando la implantación de un nuevo ecosistema industrial.

La organización de una investigación en red del sistema público (universidades, centros tecnológicos, organismos públicos de investigación, etc.) con un centro tecnológico coordinador, preferiblemente público, sobre producción de biomasa de algas con fines energéticos, favorecería las sinergias adecuadas para el avance del conocimiento básico y aplicado sobre cultivo de algas así como la diversificación de plantas de producción. Así, en zonas con dosis de radiación adecuadas se puede optar por unas cepas de algas y sistemas de cultivos diferentes al de otras zonas que se caractericen por contar con alta disponibilidad de nutrientes: efluentes industriales, plantas industriales que emitan CO₂, etc.

4.5 CARACTERÍSTICAS DEL SECTOR DE LAS MICROALGAS

Actualmente resulta extremadamente complejo establecer objetivos concretos en cuanto a producciones para los biocombustibles de algas, dada la inmadurez tecnológica del sector. Las únicas estimaciones realizadas hasta la fecha son teóricas, en base a datos de laboratorio y de pequeñas instalaciones piloto.

El desarrollo de las algas como fuente de energía renovable debería tener un tratamiento diferenciado respecto al tradicionalmente recibido por otras energías renovables, puesto que no es posible basar su desarrollo, al menos de momento, primando el producto energético final. De hecho, no está aún demostrada la viabilidad técnico-económica a gran escala, lo que pone de manifiesto la importancia de desarrollar instalaciones pre-industriales. Una vez alcanzado este desarrollo, con la capacidad de extrapolar de forma fiable los resultados obtenidos, será el momento de decidir el sistema de explotación de esta posible nueva fuente de energía.



Producción a escala piloto de la microalga lipogénica Nannochloropsis en fotobioreactores tubulares en las instalaciones del CBM.

Fotografía cortesía de Centro de Biotecnología Marina (Universidad de las Palmas de Gran Canaria) - Banco Nacional de Algas.



Cultivo de microalgas lipogénicas en fotobioreactores de 1,5 L diseñados en el CBM (Almeida et al, 2010). Fotografía cortesía de Centro de Biotecnología Marina (Universidad de las Palmas de Gran Canaria) - Banco Nacional de Algas.



Para el desarrollo del plan debe establecerse un escenario temporal definido, que podría ser el siguiente:

		COR	TOPLAZO		MEDIO	PLAZO			LAF	RGO PL	AZO	
		201	0 2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	CREACIÓN BASE DE DATOS											
2	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN											
3	CREACIÓN DE CONSORCIOS / BÚSQUEDA DE SINERGIAS											
4	DESARROLLO DOWSTREAM											
5	DESARROLLO TECNOLOGÍAS											
6	DESARROLLO BIORREFINERÍA											
7	BÚSQUEDA / DESARROLLO DE ESPECIES											
8	OPTIMIZACIÓN CONSUMOS / DESARROLLO MEDIOAMBIENTAL											
9	DESARROLLO ENERGÍA COMO PROCESO INDUSTRIAL											

Figura 7, Escenario temporal.

Referencias

- Comprehensive Oilgae Report, 2009, Energy from Algae: Products, Market, Processes & Strategies (Informe general realizado por Oilgae: Energía de las algas: productos, mercado, procesos y estrategias).
- National Algal Biofuels Technology Roadmap (Hoja de ruta nacional sobre biocombustibles de algas). U.S. Department of Energy (Departamento de de Energía de EE.UU.), 2009.
- Directiva Europea de Energías Renovables 2009/28/CE.
- Plan de Energías Renovables (PER) 2005-2010.
- G. García Reina, 1999, Agronomía marina: ¿realidad, utopía o necesidad? Editorial UNED.
- Huntley, M.E., A. Nonomura, and J. de la Noüe, 1989, Algal culture systems, in Biotreatment of Agricultural Wastewater (Sistemas de cultivos de algas en el tratamiento de aguas residuales agrícolas). Editado por M.E. Huntley, pp. 111-130, CRC Press, Boca Raton, Florida (EE.UU.).
- Jeffrey Duke, 2003, Burning buried sunshine: human consumption of ancient solar energy (Consumo humano de la energía solar almacenada). Departamento de Biología de la Universidad de Massachussets.
- Bioenergy Task 42: Biorefineries: Co-production of Fuels, Chemicals, Power and Materials from Biomass (Task 42 Bioenergía: Biorrefinerías: Co-producción de combustibles, compuestos químicos, energía y materiales procedentes de biomasa). International Energy Agency IEA (Agencia Internacional de la Energía).
- Biotechnology and Bioprocess Engineering Vol. 14 (Ingeniería de bioprocesos y biotecnología, Vol. 14), 2009. Korean Society for Biotechnology and Bioengineering (Sociedad coreana de biotecnología y bioingeniería).
- Buschmann, A., Hernández-González, M. Varela D., 2008, Seaweed future cultivation in Chile: perspectives and challenges (Los futuros cultivos de algas en Chile: perspectivas y desafíos). International Journal of Environment and Pollution 33: 432-456.
- Chopin, T., Buschmann, A.H., Halling, C., Troell, M., Kautsky, N., Neori, A., Kraemer, G.P., Zertuche-González, J.A., Yarish, C., Neefus, C., 2001, Integrating seaweeds into marine aquaculture system: a key toward sustainability (Integración del cultivo de algas en el acuisistema: una vía para la sostenibilidad). Journal of Phycology 37: 975–986.
- Neori, A., T. Chopin, M. Troell, A.H. Buschmann, G.P. Kraemer, C. Halling, M. Shpigel, C. Yarish, 2004, Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture (Acuicultura integrada: fundamento, evolución y estado del arte). Aquaculture 231: 361–391.
- Algal Biomass Summit (Conferencia sobre biomasa de algas), Seattle (EE.UU.), octubre 2008.
- E. Molina Grima, F. G. Acién Fernández, F. García Camacho, Yusuf Chisti, 1999, Photobioreactors: Light regime, mass transfer, and scaleup (Fotobiorreactores: iluminación, transferencia de masa y escalado). Journal of Biotechnology 70, 1-3, 231-247.

- C. Brindley Alías, M.C. García-Malea López, F.G. Acién Fernández, J.M. Fernández Sevilla, J.L. García Sánchez and E. Molina Grima, 2004, Influence of power supply in the feasibility of Phaeodactylum tricornutum cultures (Influencia de la aportación de energía en los cultivos de Phaeodactylum tricornutum). Biotechnology and Bioengineering 87(6): 723-733.
- Berenguel M, Rodríguez F, Acién FG, Garcia JL, 2004, Model predictive control of tubular biological photobioreactors (Modelo predictivo de control en fotobiorreactores biológicos tubulares). Journal of Process Control 14: 377-387.
- Vergara, Fernández y colaboradores, 2008, Biomass and Bioenergy 32: 338-344.
- Isabel Albarracín, Microalgas: potenciales productoras de biodiésel, octubre 2007. XV Simposio electrónico internacional. Facultad de Ciencias Naturales, UNPSJB, Argentina.
- Peter K. Campbell, Tom Beer, David Batten, Greenhouse gas sequestration by algae energy and greenhouse gas life cycle studies (Secuestro de gases de efecto invernadero con algas, estudios de ciclo de vida).
- Recommends Lifecycle Analysis of Algal Production Systems (Sugerencias en los análisis de ciclo de vida de los sistemas de producción de biomasa de algas), junio 2009. Algal Biomass Organization ABO-(Organización Nacional de Algas).
- A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae (Repaso del programa sobre especies acuáticas del Departamento de Energía de EE.UU. "Biodiésel de algas"), julio 1998. National Renewable Energy Laboratory. U.S. Department of Energy's Office of Fuels Development (Laboratorio Nacional de Energías Renovables, Departamento de Energía de EE.UU. Oficina de Investigación en Combustibles).



Listado de Augus de Algas en España



	PROYECTO	ENTIDAD COORDINADORA
1	Algae and aquatic biomass for a sustainable production of 2nd generation biofuel aquafuel (Algas y biomasa acuática para la producción sostenible de biocombustibles de 2ª generación).	Universidad de Almería.
2	Algas: soluciones integrales.	Neiker-Tecnalia, Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario.
3	Análisis de muestras biológicas la elaboración de un atlas de diatomeas bentónicas de la cuenca del Duero.	Universidad de León.
4	Aplicación de ensayos <i>in vitro</i> para la detección precoz de ficotoxinas en muestras de poblaciones fitoplanctónicas multiespecíficas.	IRTA, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries.
5	Aprovechamiento de algas como absorbedoras de ${\rm CO_2}$ y obtención de biodiésel y bioetanol.	Centro de Investigación Agraria La Orden Valdesequera.
6	Banco nacional de algas.	Centro de Biotecnología Marina, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
7	BANGEN - Banco de organismos marinos de la Macaronesia.	Instituto Canario de Ciencias Marinas.
8	Bioactividad cutánea de extractos de microalgas en cultivos bifásicos.	Fundación BIOAGRAMAR, Biotecnología Sostenible y Agronomía Marina.
9	BIOACU - Proyecto de valoración energética de cultivos de microalgas en plantas alimentadas por energías renovables (bioacumuladores: producción de biodiésel y fijación de emisiones de CO2 por cultivos de microalgas).	Instituto Tecnológico de Canarias.
10	BIOALGAL - Utilización de diferentes microalgas para extracción de principios activos para la industria cosmética y alimentaria.	Centro tecnológico LEITAT.
11	Biodiversidad marina.	Universidad de Almería.
12	BIOMAQUA - Proyecto de desarrollo e integración de tecnologías para el aprovechamiento energético integral de microalgas.	Centro tecnológico CIDAUT.
13	BIOMODULAR H2 - Producción de biohidrógeno a partir de radiación solar.	Universidad Politécnica de Valencia.
14	BIOPURÍN - Sistema integral mixotrófico (microalgas-bacterias) para la biodegradación de purines, captura de ${\rm CO_2}$ y producción de biocombustible.	Universidad de Málaga.
15	BIOSOS - Biorrefinería Sostenible.	Abengoa Bioenergía, S.A.
16	BIOTEC - Mecanismos de adaptación de la comunidad microbiana eucariota (microalgas) en ambientes ácidos extremos. Resistencia a metales pesados y su aplicación en biorremediación.	INTA, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.
17	Capacidad de biocaptación de ${\rm CO_2}$ por microalgas marinas: implicaciones en el cambio global.	Universidad de Cádiz.
18	Captura y secuestro de CO ₂ procedente de fuentes estacionarias de combustión por microorganismos fotosintéticos.	
19	Centro Tecnológico en Biotecnología de Microalgas y Agronomía Marina.	Fundación BIOAGRAMAR, Biotecnología Sostenible y Agronomía Marina.
20	Comparación de metodologías para la determinación de toxinas paralizantes en bivalvos relacionadas con el Paralytic Shellfish Poisoning (PSP). Aplicación a la acuicultura en España.	IRTA, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries.
21	Cultivo intensivo de microlagas para producción de biomasa con fines energéticos asociado la biofiltración de CO ₂ .	Centro de Biotecnología Marina, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
22	Desarrollo de fotobiorreactores para el tratamiento de purines.	ITACyL, Instituto de Tecnología Agrario de la Junta de Castilla y León; Universidad de León; Universidad de Valladolid.
23	Desarrollo de nuevos fotobiorreactores experimentales de microalgas.	Fundación BIOAGRAMAR, Biotecnología Sostenible y Agronomía Marina.
24	Desarrollo de planta industrial de producción de biodiésel de algas.	ALGAENERGY, S.A.

	PROYECTO	ENTIDAD COORDINADORA
25	Desarrollo de sistema de detección basados en el análisis de ADN para la mejora de la vigilancia de las floraciones de microalgas tóxicas para la la industria pesquera en el noroeste del Mediterráneo.	IRTA, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries.
26	Desarrollo de tecnologías de modificación genética de algas lipogénicas.	Centro tecnológico GAIKER-IK4.
27	Desarrollo de tecnologías de valorización de microalgas con fines energéticos.	Centro tecnológico GAIKER-IK4.
28	Desarrollo de un proceso de obtención de colorantes naturales de interés biotecnológico a partir de microalgas.	Universidad de Almería.
29	Desarrollo de un proceso de producción de luteina orientado al consumo humano a partir de microalgas.	Universidad de Almería.
30	Desarrollo de un proceso industrial de producción de microalgas como factor determinante para la acuicultura.	Universidad de Almería.
31	Desarrollos en alimentación, farmacia, energía y química a partir de microalgas.	Centro tecnológico LEIA.
32	Determinación de toxinas diarreicas y lipofílicas mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS-MS) y métodos citotóxicos para la evaluación de la calidad alimentaria en bivalvos.	IRTA, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries.
33	Escalado de un proceso de producción heterotrófica de algas para la producción de lípidos de interés industrial.	Universidad de Almería.
34	Estado ecológico y vulnerabilidad de ecosistemas acuáticos mediterráneos al cambio climático: indicadores funcionales y respuestas adaptativas al estrés, temperatura, radiación UV y nutrientes.	Universidad de Málaga
35	Estanques abiertos.	ALBIOOIL.
36	Estudio de comunidades microbianas en la piel y tracto digestivo de lenguado y peces de oro bajo tratamiento de pre y probióticos: bacterias y algas.	Universidad de Málaga.
37	Estudio de la viabilidad del uso de microalgas en la depuración de aguas residuales: biofijación de ${\rm CO_2}$ y producción de biocombustibles.	Universidad de Cádiz.
38	Estudio de las microalgas como biomasa precursora para la obtención de biocombustibles.	Centro tecnológico INASMET-Tecnalia.
39	Estudio del aprovechamiento de las microalgas en el entorno de las marismas del Guadalquivir.	Centro El Toruño del Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica, IFAPA; Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis (Universidad de Sevilla-CSIC); Pesquerías Isla Mayor S.A.
40	Estudio del tratamiento de aguas residuales de alto contenido en metales pesados y compuestos orgánicos persistentes con microalgas de interés económico.	Universidad de Cádiz.
41	Evaluación del cultivo de diatomeas para la producción de combustibles líquidos y sólidos.	Universitat Rovira i Virgili de Tarragona.
42	FAM - Proyecto orientado al diseño y desarrollo de nuevos formatos alimentarios elaborados a partir de microalgas.	Instituto Tecnológico de Canarias.
43	Fijación fotosintética del ${\rm CO_2}$ presente en gases generados industrialmente por cultivos de cianobacterias.	Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis (Universidad de Sevilla-CSIC).
44	Fotobiorreactor polímero flexible en agua de mar.	Algasol Renewables, S.L.
	Fotoproducción de bioetanol a partir de CO ₂ por cianobacterias.	Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis (Universidad de Sevilla-CSIC).
46	Fuentes alternativas de biomasa, microalgas en nutrición animal.	Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
47	Generación fotosintética de polímeros carbonados acoplada a la eliminación de CO_2 .	Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis (Universidad de Sevilla-CSIC); Universidad de Almería.

	PROYECTO	ENTIDAD COORDINADORA
48	GREEN DESERTS - Integrated Aqua-Agro Biotechnologies.	Fundación BIOAGRAMAR, Biotecnología Sostenible y Agronomía Marina.
49	Importancia de las toxinas marinas en los productos de la pesca y la acuicultura en Cataluña: evaluación del riesgo y propuestas para su gestión.	IRTA, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries.
50	Incremento de CO ₂ y radiación ultravioleta como factores de estrés en la modificación de la biodiversidad y producción de fitoplancton marino en escenarios de cambio climático: bases moleculares.	Universidad de Málaga.
51	Ingeniería de bioprocesos aplicada al cultivo de dinoflagelados para la producción de sustancias bioactivas. Cultivo de dinoflagelados marinos con interés alimentario, farmacológico y medioambiental.	Universidad de Almería.
52	Investigación y desarrollo de tecnologías para el aumento de eficiencia energética, captura y valorización de ${\rm CO}_2$.	Centro tecnológico LEIA.
53	LACTOMIC - Proyecto de reutilización de lactosueros de queserías para la producción por fermentación de microalgas con elevados contenidos en ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga.	Instituto Tecnológico de Canarias.
54	y de procesos de reciclado de biomasa y aprovechamiento energético.	Centro tecnológico LEITAT.
55	Microalgas marinas y de agua dulce.	Universidad de Santiago de Compostela.
56	Microalgas y biodiésel.	IRTA, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries.
57	Microecología y cambios en los ciclos biogeoquímicos del carbono y del nitrógeno en sedimentos intermareales producidos por floraciones de macroalgas.	Universidad de Cádiz.
58	Nuevas metodologías de extracción de compuestos de interés procedentes de las microalgas: procesado húmedo y extracción SWE.	Centro tecnológico LEIA.
59	Obtención de compuestos con capacidad inmunoestimulante a partir de microalgas.	Centro tecnológico AINIA.
60	Omega alga.	Monzon Biotech S.L.
61	PETROCMF - Valoración del cultivo de microalga <i>Botryococcus braunii</i> para el tratamiento de purines: obtención de biomasa y biocombustible.	Centro Mediterráneo de Fotobiología, S.L.
62	Planta piloto para la producción de microalgas para la obtención de biodiésel.	Acciona Biocombustibles, S.L. (Acciona Energía, S.A.).
63	nocivas en las bahías costeras).	IRTA, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries.
64	Proceso biológico de depuración de gases de combustión mediante el empleo de organismos fotosintéticos.	Universidad de Almería.
65	Proceso HBC para la producción de biodiésel con aceite de algas.	BECTEL Ingenieros, S.L.
66	Producción de biodiésel a partir de cianobacterias y microalgas.	Instituto Biomar, S.A.
67	Producción de biodiésel a partir de microalgas.	Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis (Universidad de Sevilla-CSIC).
68	Producción de biodiésel a partir de microalgas.	Universidad de Almería.
69	Producción de Photanol: análisis de la producción de bioalcoholes de cadena larga a partir de organismos fotosintéticos.	Universidad Politécnica de Valencia.
70	PSE Microalgas - Producción y valorización de biomasa a partir de microalgas.	Biotecnología de Microalgas, S.L.

	PROYECTO	ENTIDAD COORDINADORA
71	Refuerzo del sistema inmune mediante compuestos inmunoestimulantes a partir de microalgas.	Centro tecnológico AINIA.
72	Requerimientos de yodo y síntesis de hormonas tiroideas en microalgas marinas.	Centro El Toruño del Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica, IFAPA.
73	Selección de cepas hiperlipídicas de microalgas marinas mediante citometría de flujo.	Centro de Biotecnología Marina, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
74	Sistema del carbono en reactores de biocaptación con microalgas marinas: control de la inyección de CO ₂ y balances globales.	Universidad de Cádiz.
75	SITE - Sistema integral de transferencia energética.	Bio Fuel Systems, S.L.
76	${\sf SOST\text{-}CO}_2$ - Nuevas utilizaciones industriales sostenibles de ${\sf CO}_2$. Aplicación de microorganismos fotosintéticos para la transformación de ${\sf CO}_2$ de fermentación y transformación de ${\sf CO}_2$ mediante microalgas y conversión en productos.	Carburos Metálicos, S.L.
77	Sustainable and environmentally friendly aquaculture for the Atlantic Region of Europe (Acuicultura sostenible y respetuosa con el medio ambiente en la región atlántica de Europa).	Universidad de Bangor (Gran Bretaña); Centro El Toruño del Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica, IFAPA; Pesquerías Isla Mayor, S.A
78	Utilización de microalgas con alto contenido en aceites para la eliminación de nutrientes de aguas residuales, producción de biocombustibles y biofijación de CO_2 .	Universidad de Cádiz.
79	Valorización de CO_2 de gases de combustión mediante su fijación por microalgas.	Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis (Universidad de Sevilla-CSIC); Universidad de Almería.
80	Valorización de la capacidad bioestimuladora de microorganismos y sustancias bioactivas: aplicación en acuicultura piscícola.	Universidad de Almería; Universidad de Cádiz; Universidad de Málaga.
81	Vulnerabilidad de los ecosistemas acuáticos del sur de la península ibérica frente a factores de cambio global. Radiación ultravioleta y aporte de nutrientes minerales.	Universidad de Granada.

ENTIDAD COORDINADORA		PROYECTO
Abengoa Bioenergía, S.A.	15	BIOSOS - Biorrefinería Sostenible.
Acciona Biocombustibles, S.L. (Acciona Energía, S.A.).	62	Planta piloto para la producción de microalgas para la obtención de biodiésel.
ALBIOOIL.	35	Estanques abiertos.
ALGAENERGY, S.A.	24	Desarrollo de planta industrial de producción de biodiésel de algas.
Algasol Renewables, S.L.	44	Fotobiorreactor polímero flexible en agua de mar.
BECTEL Ingenieros, S.L.	65	Proceso HBC para la producción de biodiésel con aceite de algas.
Bio Fuel Systems, S.L.	75	SITE - Sistema integral de transferencia energética.
Biotecnología de Microalgas, S.L.	70	PSE Microalgas - Producción y valorización de biomasa a partir de microalgas.
Carburos Metálicos, S.L.	76	${\sf SOST-CO}_2$ - Nuevas utilizaciones industriales sostenibles de ${\sf CO}_2$. Aplicación de microorganismos fotosintéticos para la transformación de ${\sf CO}_2$ de fermentación y transformación de ${\sf CO}_2$ mediante microalgas y conversión en productos.
	6	Banco nacional de algas.
Centro de Biotecnología Marina, Universidad de Las	21	Cultivo intensivo de microlagas para producción de biomasa con fines energéticos asociado la biofiltración de ${\rm CO_2}$.
Palmas de Gran Canaria.		Selección de cepas hiperlipídicas de microalgas marinas mediante citometría de flujo.
Centro de Investigación Agraria La Orden Valdesequera.	5	Aprovechamiento de algas como absorbedoras de CO ₂ y obtención de biodiésel y bioetanol.
Centro El Toruño del Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica, IFAPA.	72	Requerimientos de yodo y síntesis de hormonas tiroideas en microalgas marinas.
Centro El Toruño del Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica, IFAPA; Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis (Universidad de Sevilla-CSIC); Pesquerías Isla Mayor S.A.		Estudio del aprovechamiento de las microalgas en el entorno de las marismas del Guadalquivir.
Centro Mediterráneo de Fotobiología, S.L.	61	PETROCMF - Valoración del cultivo de microalga <i>Botryococcus braunii</i> para el tratamiento de purines: obtención de biomasa y biocombustible.
Centro tecnológico AINIA.	59	Obtención de compuestos con capacidad inmunoestimulante a partir de microalgas.
Centro techologico / Ilivi/ t.	71	Refuerzo del sistema inmune mediante compuestos inmunoestimulantes a partir de microalgas.
Centro tecnológico CIDAUT.	12	BIOMAQUA - Proyecto de desarrollo e integración de tecnologías para el aprovechamiento energético integral de microalgas.
Centro tecnológico GAIKER-IK4.		Desarrollo de tecnologías de modificación genética de algas lipogénicas.
		Desarrollo de tecnologías de valorización de microalgas con fines energéticos.
Centro tecnológico INASMET-Tecnalia.		Estudio de las microalgas como biomasa precursora para la obtención de biocombustibles.

ENTIDAD COORDINADORA		PROYECTO
	18	Captura y secuestro de CO ₂ procedente de fuentes estacionarias de combustión por microorganismos fotosintéticos.
	31	Desarrollos en alimentación, farmacia, energía y química a partir de microalgas.
Centro tecnológico LEIA.	52	Investigación y desarrollo de tecnologías para el aumento de eficiencia energética, captura y valorización de CO ₂ .
	58	Nuevas metodologías de extracción de compuestos de interés procedentes de las microalgas: procesado húmedo y extracción SWE.
	10	BIOALGAL - Utilización de diferentes microalgas para extracción de principios activos para la industria cosmética y alimentaria.
Centro tecnológico LEITAT.	54	MaCaNf - Cultivo sostenible de microalgas marinas para la obtención de diferentes productos para la industria química (polímeros) y cosmética. Desarrollo de fotobioreactores sostenibles y de procesos de reciclado de biomasa y aprovechamiento energético.
	8	Bioactividad cutánea de extractos de microalgas en cultivos bifásicos.
Fundación BIOAGRAMAR, Biotecnología Sostenible y	19	Centro Tecnológico en Biotecnología de Microalgas y Agronomía Marina.
Agronomía Marina.	23	Desarrollo de nuevos fotobiorreactores experimentales de microalgas.
	48	GREEN DESERTS - Integrated Aqua-Agro Biotechnologies.
Instituto Biomar, S.A.	66	Producción de biodiésel a partir de cianobacterias y microalgas.
Instituto Canario de Ciencias Marinas.	7	BANGEN - Banco de organismos marinos de la Macaronesia.
Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis	43	Fijación fotosintética del CO ₂ presente en gases generados industrialmente por cultivos de cianobacterias.
(Universidad de Sevilla-CSIC).	45	Fotoproducción de bioetanol a partir de CO ₂ por cianobacterias.
	67	Producción de biodiésel a partir de microalgas.
Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis (Universidad de Sevilla-CSIC); Universidad de Almería.	47	Generación fotosintética de polímeros carbonados acoplada a la eliminación de CO ₂ .
Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis (Universidad de Sevilla-CSIC); Universidad de Almería.	79	Valorización de CO ₂ de gases de combustión mediante su fijación por microalgas.
		BIOACU - Proyecto de valoración energética de cultivos de microalgas en plantas alimentadas por energías renovables (bioacumuladores: producción de biodiésel y fijación de emisiones de CO ₂ por cultivos de microalgas).
Instituto Tecnológico de Canarias.	42	FAM - Proyecto orientado al diseño y desarrollo de nuevos formatos alimentarios elaborados a partir de microalgas.
	53	LACTOMIC - Proyecto de reutilización de lactosueros de queserías para la producción por fermentación de microalgas con elevados contenidos en ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga.

ENTIDAD COORDINADORA		PROYECTO
INTA, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.	16	BIOTEC - Mecanismos de adaptación de la comunidad microbiana eucariota (microalgas) en ambientes ácidos extremos. Resistencia a metales pesados y su aplicación en biorremediación.
	4	Aplicación de ensayos <i>in vitro</i> para la detección precoz de ficotoxinas en muestras de poblaciones fitoplanctónicas multiespecíficas.
	20	Comparación de metodologías para la determinación de toxinas paralizantes en bivalvos relacionadas con el Paralytic Shellfish Poisoning (PSP). Aplicación a la acuicultura en España.
IDTA localita de Decembro i Terrodo di	25	Desarrollo de sistema de detección basados en el análisis de ADN para la mejora de la vigilancia de las floraciones de microalgas tóxicas para la la industria pesquera en el noroeste del Mediterráneo.
IRTA, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries.	32	Determinación de toxinas diarreicas y lipofílicas mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS-MS) y métodos citotóxicos para la evaluación de la calidad alimentaria en bivalvos.
	49	Importancia de las toxinas marinas en los productos de la pesca y la acuicultura en Cataluña: evaluación del riesgo y propuestas para su gestión.
	56	Microalgas y biodiésel.
	63	Population Dynamics and Toxicity of Harmful Microalgae in Coastal Embayments (Dinámica de poblaciones y toxicidad de microalgas nocivas en las bahías costeras).
ITACyL, Instituto de Tecnología Agrario de la Junta de Castilla y León; Universidad de León; Universidad de Valladolid.	22	Desarrollo de fotobiorreactores para el tratamiento de purines.
Monzon Biotech S.L.	60	Omega alga.
Neiker-Tecnalia, Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario.	2	Algas: soluciones integrales.
	1	Algae and aquatic biomass for a sustainable production of 2nd generation biofuel aquafuel (Algas y biomasa acuática para la producción sostenible de biocombustibles de 2ª generación).
	11	Biodiversidad marina.
	28	Desarrollo de un proceso de obtención de colorantes naturales de interés biotecnológico a partir de microalgas.
	29	Desarrollo de un proceso de producción de luteina orientado al consumo humano a partir de microalgas.
Universidad de Almería.	30	Desarrollo de un proceso industrial de producción de microalgas como factor determinante para la acuicultura.
	33	Escalado de un proceso de producción heterotrófica de algas para la producción de lípidos de interés industrial.
	51	Ingeniería de bioprocesos aplicada al cultivo de dinoflagelados para la producción de sustancias bioactivas. Cultivo de dinoflagelados marinos con interés alimentario, farmacológico y medioambiental.
	64	Proceso biológico de depuración de gases de combustión mediante el empleo de organismos fotosintéticos.
	68	Producción de biodiésel a partir de microalgas.

ENTIDAD COORDINADORA		PROYECTO
Universidad de Almería; Universidad de Cádiz; Universidad de Málaga.	80	Valorización de la capacidad bioestimuladora de microorganismos y sustancias bioactivas: aplicación en acuicultura piscícola.
Universidad de Bangor (Gran Bretaña); Centro El Toruño del Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica, IFAPA; Pesquerías Isla Mayor, S.A	77	Sustainable and environmentally friendly aquaculture for the Atlantic Region of Europe (Acuicultura sostenible y respetuosa con el medio ambiente en la región atlántica de Europa).
	17	Capacidad de biocaptación de CO ₂ por microalgas marinas: implicaciones en el cambio global.
	37	Estudio de la viabilidad del uso de microalgas en la depuración de aguas residuales: biofijación de CO ₂ y producción de biocombustibles.
	40	Estudio del tratamiento de aguas residuales de alto contenido en metales pesados y compuestos orgánicos persistentes con microalgas de interés económico.
Universidad de Cádiz.	57	Microecología y cambios en los ciclos biogeoquímicos del carbono y del nitrógeno en sedimentos intermareales producidos por floraciones de macroalgas.
	74	Sistema del carbono en reactores de biocaptación con microalgas marinas: control de la inyección de ${\rm CO_2}$ y balances globales.
		Utilización de microalgas con alto contenido en aceites para la eliminación de nutrientes de aguas residuales, producción de biocombustibles y biofijación de CO ₂ .
Universidad de Granada.		Vulnerabilidad de los ecosistemas acuáticos del sur de la península ibérica frente a factores de cambio global. Radiación ultravioleta y aporte de nutrientes minerales.
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.	46	Fuentes alternativas de biomasa, microalgas en nutrición animal.
Universidad de León.	3	Análisis de muestras biológicas la elaboración de un atlas de diatomeas bentónicas de la cuenca del Duero.
		Estado ecológico y vulnerabilidad de ecosistemas acuáticos mediterráneos al cambio climático: indicadores funcionales y respuestas adaptativas al estrés, temperatura, radiación UV y nutrientes.
Universidad de Málaga.	14	BIOPURÍN - Sistema integral mixotrófico (microalgasbacterias) para la biodegradación de purines, captura de CO ₂ y producción de biocombustible.
Offiversidad de Maiaga.	36	Estudio de comunidades microbianas en la piel y tracto digestivo de lenguado y peces de oro bajo tratamiento de pre y probióticos: bacterias y algas.
		Incremento de CO ₂ y radiación ultravioleta como factores de estrés en la modificación de la biodiversidad y producción de fitoplancton marino en escenarios de cambio climático: bases moleculares.
Universidad de Santiago de Compostela.	55	Microalgas marinas y de agua dulce.
	13	BIOMODULAR H2 - Producción de biohidrógeno a partir de radiación solar.
Universidad Politécnica de Valencia.	69	Producción de Photanol: análisis de la producción de bioalcoholes de cadena larga a partir de organismos fotosintéticos.
Universitat Rovira i Virgili de Tarragona.	41	Evaluación del cultivo de diatomeas para la producción de combustibles líquidos y sólidos.



LOCALIZAC	CIÓN	PRO'	YECTO	ENTIDAD COORDINADORA
		24	Desarrollo de planta industrial de producción de biodiésel de algas.	ALGAENERGY, S.A.
		11	Biodiversidad marina.	
		28	Desarrollo de un proceso de obtención de colorantes naturales de interés biotecnológico a partir de microalgas.	
		29	Desarrollo de un proceso de producción de luteina orientado al consumo humano a partir de microalgas.	
		30	Desarrollo de un proceso industrial de producción de microalgas como factor determinante para la acuicultura.	
	Almería.	33	Escalado de un proceso de producción heterotrófica de algas para la producción de lípidos de interés industrial.	
	Almeria.	47	Generación fotosintética de polímeros carbonados acoplada a la eliminación de CO ₂ .	Universidad de Almería.
ANDALUCÍA.		51	Ingeniería de bioprocesos aplicada al cultivo de dinoflagelados para la producción de sustancias bioactivas. Cultivo de dinoflagelados marinos con interés alimentario, farmacológico y medioambiental.	
		51	Ingeniería de bioprocesos aplicada al cultivo de dinoflagelados para la producción de sustancias bioactivas. Cultivo de dinoflagelados marinos con interés alimentario, farmacológico y medioambiental.	
	Almería; Cádiz; Málaga.	67	Producción de biodiésel a partir de microalgas.	Universidad de Almería; Universidad de Cádiz; Universidad de Málaga.
	Almería; Sevilla.	Almería; Valorización de CO ₂ de gases de		Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis (Universidad de Sevilla- CSIC); Universidad de Almería.
	Almería; Sevilla.	80	Valorización de la capacidad bioestimuladora de microorganismos y sustancias bioactivas: aplicación en acuicultura piscícola.	Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis (Universidad de Sevilla- CSIC); Universidad de Almería.
	Cádiz.	17	Estanques abiertos.	ALBIOOIL.

LOCALIZAC	CIÓN	PRO	/ECTO	ENTIDAD COORDINADORA						
		39	Estudio del aprovechamiento de las microalgas en el entorno de las marismas del Guadalquivir.	Centro El Toruño del Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica, IFAPA; Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis (Universidad de Sevilla-CSIC); Pesquerías Isla Mayor S.A.						
		57	Requerimientos de yodo y síntesis de hormonas tiroideas en microalgas marinas.	Centro El Toruño del Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica, IFAPA.						
		35	Estudio de la viabilidad del uso de microalgas en la depuración de aguas residuales: biofijación de CO ₂ y producción de biocombustibles.							
	Cádiz.	37	Estudio del tratamiento de aguas residuales de alto contenido en metales pesados y compuestos orgánicos persistentes con microalgas de interés económico.							
ANDALUCÍA.		40	Microecología y cambios en los ciclos biogeoquímicos del carbono y del nitrógeno en sedimentos intermareales producidos por floraciones de macroalgas.	Universidad de Cádiz.						
			7		72	Capacidad de biocaptación de CO ₂ por microalgas marinas: implicaciones en el cambio global.				
									74 biocaptación con microalgas mar control de la inyección de CO ₂ y balances globales.	
				de nutrientes de aguas residuales, producción de biocombustibles y	contenido en aceites para la eliminación de nutrientes de aguas residuales,					
	Granada.	81	Vulnerabilidad de los ecosistemas acuáticos del sur de la península ibérica frente a factores de cambio global. Radiación ultravioleta y aporte de nutrientes minerales.	Universidad de Granada.						
	Málaga.	61	PETROCMF - Valoración del cultivo de microalga <i>Botryococcus braunii</i> para el tratamiento de purines: obtención de biomasa y biocombustible.	Centro Mediterráneo de Fotobiología, S.L.						

LOCALIZACIÓN		PRO'	/ECTO	ENTIDAD COORDINADORA
ANDALUCÍA.	Málaga.	14	BIOPURÍN - Sistema integral mixotrófico (microalgas-bacterias) para la biodegradación de purines, captura de CO ₂ y producción de biocombustible.	Universidad de Málaga.
		34	Estado ecológico y vulnerabilidad de ecosistemas acuáticos mediterráneos al cambio climático: indicadores funcionales y respuestas adaptativas al estrés, temperatura, radiación UV y nutrientes.	
		36	Estudio de comunidades microbianas en la piel y tracto digestivo de lenguado y peces de oro bajo tratamiento de pre y probióticos: bacterias y algas.	
		50	Incremento de CO ₂ y radiación ultravioleta como factores de estrés en la modificación de la biodiversidad y producción de fitoplancton marino en escenarios de cambio climático: bases moleculares.	
	Sevilla.	43	Fijación fotosintética del CO ₂ presente en gases generados industrialmente por cultivos de cianobacterias. Fotoproducción de bioetanol a partir de	Instituto de Bioquímica Vegetal y Fotosíntesis (Universidad de Sevilla- CSIC).
		68	CO ₂ por cianobacterias. Producción de biodiésel a partir de microalgas.	Universidad de Almería.
ARAGÓN.	Huesca (Castejón del Puente).	60	Omega alga.	Monzon Biotech S.L.
	r derite).	6	Banco nacional de algas.	
	Las Palmas.	21	Cultivo intensivo de microlagas para producción de biomasa con fines energéticos asociado la biofiltración de CO ₂ .	Centro de Biotecnología Marina, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
		73	Selección de cepas hiperlipídicas de microalgas marinas mediante citometría de flujo.	Canana.
		8	Bioactividad cutánea de extractos de microalgas en cultivos bifásicos.	Fundación BIOAGRAMAR, Biotecnología Sostenible y Agronomía Marina.
		19	Centro Tecnológico en Biotecnología de Microalgas y Agronomía Marina.	
CANARIAS.		23	Desarrollo de nuevos fotobiorreactores experimentales de microalgas.	
		48	GREEN DESERTS - Integrated Aqua- Agro Biotechnologies.	
		7	BANGEN - Banco de organismos marinos de la Macaronesia.	Instituto Canario de Ciencias Marinas.
		9	BIOACU - Proyecto de valoración energética de cultivos de microalgas en plantas alimentadas por energías renovables (bioacumuladores: producción de biodiésel y fijación de emisiones de CO ₂ por cultivos de microalgas).	Instituto Tecnológico de Canarias.

LOCALIZAC	IÓN	PRO'	YECTO	ENTIDAD COORDINADORA
CANARIAS.	Las Palmas.	42	FAM - Proyecto orientado al diseño y desarrollo de nuevos formatos alimentarios elaborados a partir de microalgas.	
		53	LACTOMIC - Proyecto de reutilización de lactosueros de queserías para la producción por fermentación de microalgas con elevados contenidos en ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga.	Instituto Tecnológico de Canarias.
		46	Fuentes alternativas de biomasa, microalgas en nutrición animal.	Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
CASTILLA Y LEÓN.	León.	3	Análisis de muestras biológicas la elaboración de un atlas de diatomeas bentónicas de la cuenca del Duero.	Universidad de León.
		66	Producción de biodiésel a partir de cianobacterias y microalgas.	Instituto Biomar, S.A.
	Valladolid.	22	Desarrollo de fotobiorreactores para el tratamiento de purines.	ITACyL, Instituto de Tecnología Agrario de la Junta de Castilla y León; Universidad de León; Universidad de Valladolid.
CASTILLA Y LEÓN.; COMUNIDAD VALENCIA- NA; PAÍS VASCO.	Valladolid (CIDAUT); Valencia (AINIA); Vizcaya (GAIKER).	12	BIOMAQUA - Proyecto de desarrollo e integración de tecnologías para el aprovechamiento energético integral de microalgas.	Centro tecnológico CIDAUT.
	Barcelona.	65	Proceso HBC para la producción de biodiésel con aceite de algas.	BECTEL Ingenieros, S.L.
CATALUÑA.	Tarragona.	4	Aplicación de ensayos <i>in vitro</i> para la detección precoz de ficotoxinas en muestras de poblaciones fitoplanctónicas multiespecíficas.	
		20	Comparación de metodologías para la determinación de toxinas paralizantes en bivalvos relacionadas con el Paralytic Shellfish Poisoning (PSP). Aplicación a la acuicultura en España.	
		25	Desarrollo de sistema de detección basados en el análisis de ADN para la mejora de la vigilancia de las floraciones de microalgas tóxicas para la la industria pesquera en el noroeste del Mediterráneo.	IRTA, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries.
		32	Determinación de toxinas diarreicas y lipofílicas mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS-MS) y métodos citotóxicos para la evaluación de la calidad alimentaria en bivalvos.	
		49	Importancia de las toxinas marinas en los productos de la pesca y la acuicultura en Cataluña: evaluación del riesgo y propuestas para su gestión.	
		56	Microalgas y biodiésel.	

LOCALIZAC	IÓN	PRO	/ECTO	ENTIDAD COORDINADORA
CATALUÑA.	Tarragona.	63	Population Dynamics and Toxicity of Harmful Microalgae in Coastal Embayments (Dinámica de poblaciones y toxicidad de microalgas nocivas en las bahías costeras).	IRTA, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries.
		41	Evaluación del cultivo de diatomeas para la producción de combustibles líquidos y sólidos.	Universitat Rovira i Virgili de Tarragona.
COMUNIDAD DE MADRID.	Madrid.	16	BIOTEC - Mecanismos de adaptación de la comunidad microbiana eucariota (microalgas) en ambientes ácidos extremos. Resistencia a metales pesados y su aplicación en biorremediación.	INTA, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.
COMUNIDAD FORAL DE NAVARRA.	Navarra (Caparroso).	62	Planta piloto para la producción de microalgas para la obtención de biodiésel.	Acciona Biocombustibles, S.L. (Acciona Energía, S.A.)
	Alicante.	75	SITE - Sistema integral de transferencia energética.	Bio Fuel Systems, S.L.
	Valencia.	71	Refuerzo del sistema inmune mediante compuestos inmunoestimulantes a partir de microalgas.	Centro tecnológico AINIA.
COMUNIDAD VALENCIANA.		13	BIOMODULAR H2 - Producción de biohidrógeno a partir de radiación solar.	
		69	Producción de Photanol: análisis de la producción de bioalcoholes de cadena larga a partir de organismos fotosintéticos.	Universidad Politécnica de Valencia.
EXTREMA- DURA.	Badajoz (Finca La Orden, Guadajira).	5	Aprovechamiento de algas como absorbedoras de CO ₂ y obtención de biodiésel y bioetanol.	Centro de Investigación Agraria La Orden Valdesequera.
GALICIA.	La Coruña (Santiago de Compostela).	55	Microalgas marinas y de agua dulce.	Universidad de Santiago de Compostela.
ISLAS BALEARES.	Islas Baleares (Mallorca).	44	Fotobiorreactor polímero flexible en agua de mar.	Algasol Renewables, S.L.
PAÍS VASCO.	Álava.	18	Captura y secuestro de CO ₂ procedente de fuentes estacionarias de combustión por microorganismos fotosintéticos.	Centro tecnológico LEIA.
		31	Desarrollos en alimentación, farmacia, energía y química a partir de microalgas.	
		52	Investigación y desarrollo de tecnologías para el aumento de eficiencia energética, captura y valorización de CO ₂ .	
		58	Nuevas metodologías de extracción de compuestos de interés procedentes de las microalgas: procesado húmedo y extracción SWE.	
		2	Algas: soluciones integrales.	Neiker-Tecnalia, Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario.

LOCALIZAC	IÓN	PRO	'ECTO	ENTIDAD COORDINADORA
PAÍS VASCO.	Guipúzcoa.	38	Estudio de las microalgas como biomasa precursora para la obtención de biocombustibles.	Centro tecnológico INASMET- Tecnalia.
	Vizcaya.	26	Desarrollo de tecnologías de modificación genética de algas lipogénicas.	Centro tecnológico GAIKER-IK4.
		27	Desarrollo de tecnologías de valorización de microalgas con fines energéticos.	Centro tecnológico GAIKER-IK4.
			BIOSOS - Biorrefinería Sostenible.	Abengoa Bioenergía, S.A.
ESPAÑA.		76	$SOST-CO_2$ - Nuevas utilizaciones industriales sostenibles de CO_2 . Aplicación de microorganismos fotosintéticos para la transformación de CO_2 de fermentación y transformación de CO_2 mediante microalgas y conversión en productos.	Carburos Metálicos, S.L.
		59	Obtención de compuestos con capacidad inmunoestimulante a partir de microalgas.	Centro tecnológico AINIA.
		70	PSE Microalgas - Producción y valorización de biomasa a partir de microalgas.	Biotecnología de Microalgas, S.L.
UNIÓN EUROPEA.		10	BIOALGAL - Utilización de diferentes microalgas para extracción de principios activos para la industria cosmética y alimentaria.	Centro tecnológico LEITAT.
		54	MaCaNf - Cultivo sostenible de microalgas marinas para la obtención de diferentes productos para la industria química (polímeros) y cosmética. Desarrollo de fotobioreactores sostenibles y de procesos de reciclado de biomasa y aprovechamiento energético.	
		1	Algae and aquatic biomass for a sustainable production of 2nd generation biofuel aquafuel (Algas y biomasa acuática para la producción sostenible de biocombustibles de 2ª generación).	Universidad de Almería.
		77	Sustainable and environmentally friendly aquaculture for the Atlantic Region of Europe (Acuicultura sostenible y respetuosa con el medio ambiente en la región atlántica de Europa).	Universidad de Bangor (Gran Bretaña); Centro El Toruño del Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica, IFAPA; Pesquerías Isla Mayor, S.A



Figura 8, Mapa proyectos algas.

CLASIFICACIÓN DE PROYECTOS POR ÁREA TEMÁTICA

El siguiente gráfico muestra la calsificación de los proyectos recopilados atendiendo al tema principal desarrolado:

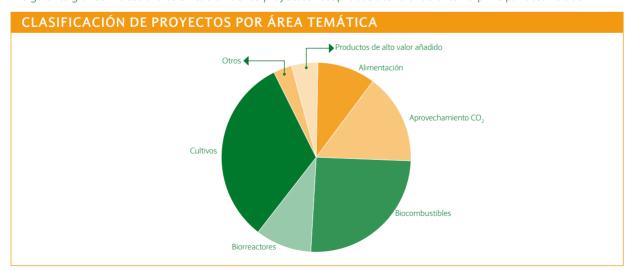


Figura 9, Gráfico clasificación proyectos.