



Informe de potencial de producción de biocombustible gaseoso a partir de algas de Galicia y Asturias.

Fecha: Enero 2022

Contenido

1. Introducción	3
1.1. Propiedades de las algas	4
1.2. La digestión anaerobia y la producción de metano	4
2. Objetivo	6
3. Evaluación del potencial de producción de metano	6
3.1. Algas utilizadas	6
3.2. Caracterización físicoquímica	8
3.3. Determinación del potencial metanogénico.	9
4. Conclusiones	12
5. Anexo 1: Metodología.....	13
5.1. Caracterización físicoquímica.....	13
5.2. Potencial metanogénico y biodegradabilidad.....	13
6. Bibliografía.....	15

1. Introducción

Las macroalgas poseen un alto valor en los ecosistemas litorales mundiales. Esto se debe principalmente a su utilización en la industria para obtener todo tipo de productos dentro del sector alimentario, farmacéutico, cosmético, textil, etc.

Las macroalgas pueden dividirse en cuatro tipos en función de su tamaño y forma celular: unicelulares, coloniales (donde las células están unidas en una matriz o por un mucílago), filamentosas (algas multicelulares formadas por un talo) y multicelulares de talo complejo (que corresponden a una evolución de las anteriores)¹.

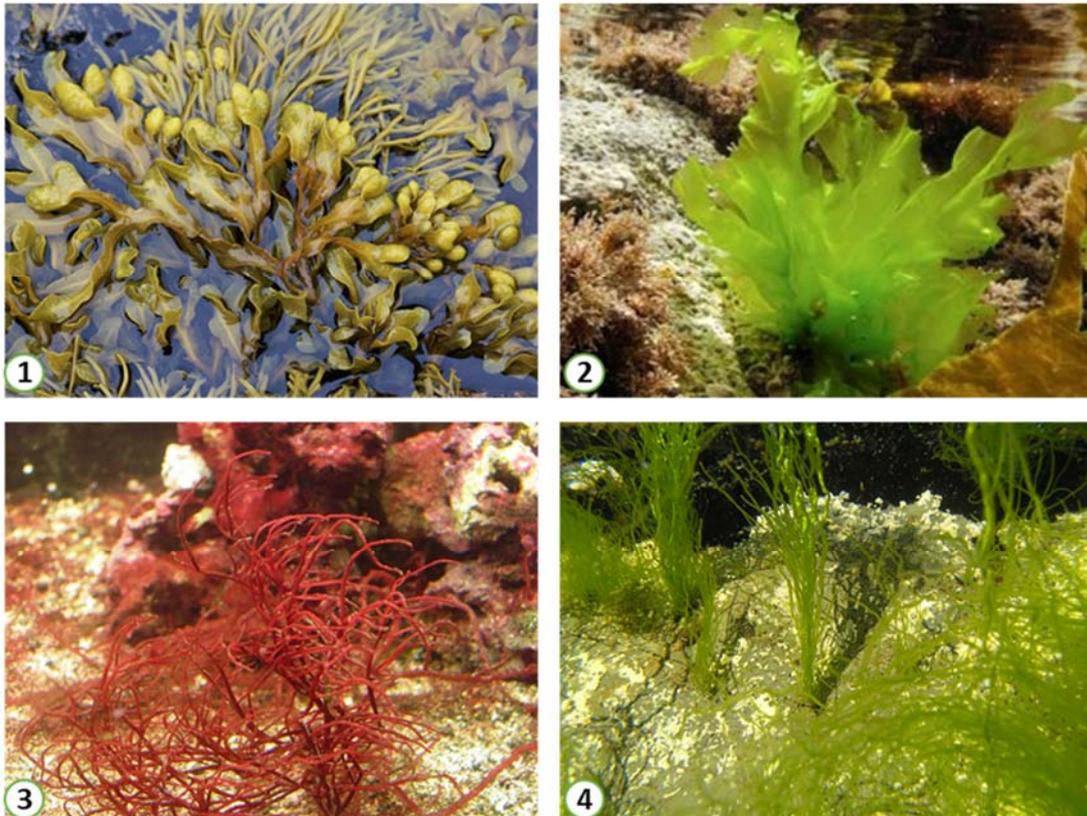


Figura 1. Imágenes de macroalgas: 1. *Fucus*, 2. *Ulva lactuca*, 3. *Gracilaria* y 4. *Ulva intestinalis*

Por otro lado, las grandes acumulaciones de algas y fanerógamas marinas de las playas arrojadas por el mar son conocidas como arribazones vegetales. La recolección de estas suele tener fines industriales o agropecuarios y su retirada está relacionada mayoritariamente con fines turísticos, aunque en el caso de las costas gallegas se hace debido a que las algas provocan pérdidas económicas ya que su acumulación en los bancos marisqueros provoca falta de oxígeno en los cultivos y causa su mortandad. Las algas retiradas de las playas suelen ser llevadas a vertederos, donde suponen un gran problema medioambiental debido a su acumulación por su difícil eliminación.

Gracias al desarrollo de tecnologías como la digestión anaerobia, que permiten la obtención de energía a partir de biomasa de diferente origen y de residuos, surge la posibilidad de que las algas de arribazón sean empleadas como fuente de generación biogás.

1.1. Propiedades de las algas

Las algas pueden ser clasificadas en función de su división celular, encontrándose las que poseen células procariotas y las que poseen células eucariotas, pero la principal división se suele hacer en función de su pigmentación¹.

- **Algas verdes:** Se trata de algas con una sustancia de reserva alimenticia de almidón y con una pared celular compuesta de celulosa. Se dividen en dos subgrupos fundamentales, que son las diatomeas (unicelulares y sin flagelos) y las dinoflageladas (unicelulares con flagelos, como su nombre indica. Son responsables de las mareas rojas, fenómeno que genera sustancias tóxicas tanto para peces como para humanos).
- **Algas pardas:** Su hábitat es marino y son todas multicelulares. Su reserva alimenticia consta de laminaria (un polímero de la glucosa) y su pared celular se compone de ácido alginico.
- **Algas rojas:** Es el grupo de algas más dominante en los mares. Cuentan con una reserva de almidón y su pared celular se divide en dos capas, una interna de celulosa y externa de material gelatinoso.
- **Algas azul-verdosas:** Tienen una estructura celular totalmente primitiva, con ausencia de membrana que rodee al núcleo y sin cromosomas, cloroplastos o mitocondrias. Se tratan básicamente de bacterias oxigénicas.

4

De manera general, las macroalgas contienen gran cantidad de carbohidratos (hasta el 60 %), una cantidad de proteínas media/alta (10 - 47 %) y una baja cantidad de lípidos (1 - 3 %), con un contenido en cenizas variable (7 - 8 %)².

La fracción de carbohidratos incluye una gran variedad de polisacáridos, que al hidrolizarse da lugar a monosacáridos como la glucosa en las algas pardas, manosa en las algas verdes y galactosa en las algas rojas. Estos carbohidratos son compuestos que pueden ser fácilmente degradables en un proceso de digestión anaerobia.

La composición físicoquímica de las algas varía, no solo entre las diferentes especies, sino también como respuesta a cambios estacionales y ambientales. Así, durante el verano, las macroalgas tienden a producir una mayor cantidad de sólidos volátiles y azúcares, mientras que, en primavera generan menos sólidos volátiles pero mayor contenido en proteínas y compuestos minerales. Esta fluctuación en la composición va a influenciar el potencial de producción de metano, ya que se pudo observar que al incrementarse el contenido en azúcares se produce un incremento del biogás producido².

1.2. La digestión anaerobia y la producción de metano

La digestión anaerobia es un proceso biológico que sucede de forma natural en el medio ambiente donde la materia orgánica se degrada en ausencia de oxígeno.

La digestión anaerobia produce biogás, que es una mezcla de gases combustibles utilizados en diferentes aplicaciones como fuente de energía, y también, un digestato o residuo orgánico que puede ser utilizado como fertilizante en suelos agrícolas.

Este fenómeno se puede reproducir a nivel industrial en digestores y aprovechar los productos resultantes con fines energéticos y/o como enmiendas orgánicas del suelo.

El biogás está compuesto, fundamentalmente, de metano (50-70% CH₄), dióxido de carbono (30-50% CO₂), ácido sulfhídrico (H₂S) y otros gases (NH₃, N₂, H₂...). El metano es el principal gas combustible y, la mezcla de gases tiene una potencia calorífica en torno a 5500 kcal/m³ (con un 60% de CH₄).

El proceso de digestión engloba diferentes etapas en las que intervienen diversas poblaciones de microorganismos.

La primera fase es la **hidrólisis** de la materia orgánica, donde los compuestos complejos se transforman en moléculas solubles y degradables como azúcares, aminoácidos, alcoholes y ácidos de cadena larga. Este pretratamiento del material mejora propiedades como la viscosidad y la solubilidad facilitando la degradación del producto en fases posteriores y aumentando la velocidad del proceso. En la siguiente etapa, **acidogénesis**, las bacterias acidogénicas actúan sobre los compuestos provenientes de la hidrólisis transformándolos en ácidos de cadenas más cortas como ácido acético, butírico, propiónico y valérico, mientras que en la **acetogénesis**, estos productos intermedios son convertidos por las bacterias acetogénicas en ácido acético, H₂ y CO₂. En la última etapa del proceso, **metanogénesis**, las bacterias metanogénicas forman metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) a partir de los compuestos anteriores.

5

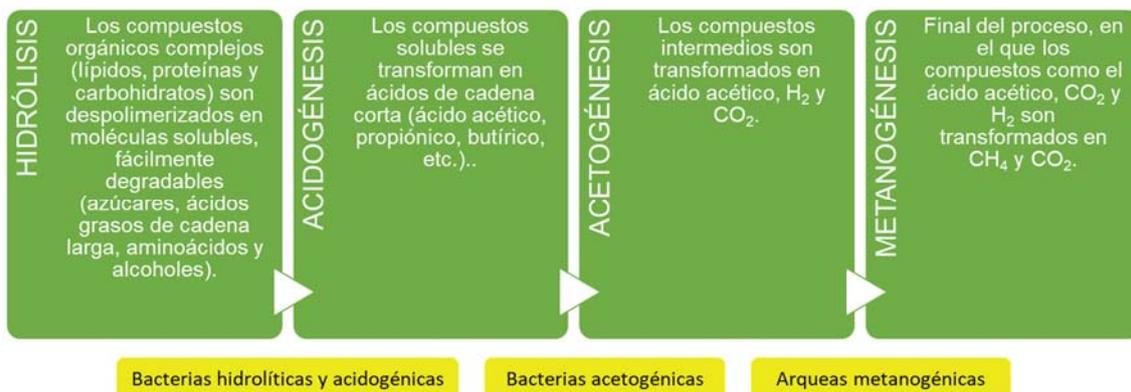


Figura 2. Etapas del proceso de digestión anaerobia

La composición química del sustrato y las condiciones de funcionamiento del proceso condicionan el desarrollo de las diferentes poblaciones bacterianas. De esta forma, las características de la materia prima (humedad, carga orgánica, posibles inhibidores, etc) y los parámetros ambientales y operacionales del sistema son determinantes para obtener buenos rendimientos de producción de biogás.

En este contexto, el proyecto "VALORALGAE: Cerrando la cadena de valor en la acuicultura marina a través de la valorización energética de las algas de arribazón" persigue promover la **sostenibilidad del sector acuícola marítimo** a través de la implantación de un proceso innovador de **valorización de algas de arribazón** mediante su transformación en biocombustibles que permitan la obtención de energía renovable. Las opciones de valorización seleccionadas son: transformación en un combustible renovable gaseoso (biogás) a través de digestión anaerobia, y el aprovechamiento de las algas como combustible sólido (pellets). Ambos combustibles permitirán la

generación de energía renovable de emisiones neutras. Adicionalmente, se estudiará la viabilidad de aprovechar ese gas renovable y/o pellets como fuente de energía para lonjas, puertos o cofradías, cumpliendo así con la filosofía de economía circular dentro del sector acuícola marino.

2. Objetivo

El objetivo de este trabajo es analizar la composición físico-química de distintas especies de macroalgas de arribazón recogidas en las playas seleccionadas en etapas previas del proyecto y establecer su potencial metanogénico.

3. Evaluación del potencial de producción de metano

3.1. Algas utilizadas

Se estudiaron cuatro tipos de algas de arribazón: *Ulva lactuca*, *Ulva intestinalis* (o *Enteromorpha*), *Fucus spp.*, y *Gracilaria spp.*, mostradas en las figuras a continuación (de Figura 3 a Figura 6).

La *Ulva lactuca* se clasifica dentro de las algas verdes foliáceas¹. Posee talo verde laminar, foliáceo, lobulado, formado por 2 capas de células, fijado al sustrato por rizoides que crecen como expansiones de las células basales del talo. Puede llegar a medir 1 m de longitud, de contorno más o menos redondeado, a veces dividido. Su hábitat es intermareal, es decir, se encuentra en charcas, rocas cercanas a la playa, etc. Su principal función es alimentaria, aunque también se puede usar para la producción de compuestos farmacéuticos.



Figura 3. *Ulva lactuca*.

La *Ulva intestinalis* (*Enteromorpha*) se clasifica dentro de las algas verdes tubulares. Tiene talo verde laminar, tubular, más estrecho en la zona basal y formado por 2 capas de células. Mide unos 30 cm de largo y hasta 3 cm de ancho, y no está muy ramificado. Color verde oscuro. Su hábitat abarca desde el intermareal hasta el submareal. Sus usos son en la industria alimentaria y farmacéutica.



Figura 4. *Ulva intestinalis*.

La *Gracilaria spp.* pertenece a las algas rojas. Su hábitat abarca desde el litoral hasta 15 de profundidad. Sus funciones son muy extendidas, desde la industria alimentaria hasta la producción de dentífricos.



Figura 5. *Gracilaria spp.*

La *Fucus spp.* pertenece a las algas pardas, que son las que más uso industrial tienen. Es una fronde de 15 a 120 cm de longitud y 25 mm de anchura, acintado, de ramificación dicótoma, con un nervio central y margen entero, fijada por un disco cónico. A ambos lados del nervio o en las dicotomías vesículas aéreas, del tamaño de un guisante. Criptas pilíferas presentes, pero no tan abundantes como en *Fucus spiralis*. Cuerpos reproductores, receptáculos, de 26 mm de anchura y hasta 8 cm de largo, pardo amarillentos al final de lámina, bulbosos y granulares. Su hábitat es intermareal, formando una banda característica, pegada a las rocas.



Figura 6. *Fucus spp.*

A la hora de estudiar la producción de metano de las especies de algas elegidas es necesario establecer una serie de parámetros físico-químicos de las muestras como son la cantidad de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO).

3.2. Caracterización fisicoquímica

Teniendo en cuenta las características y el origen de la algas, se realizó la caracterización fisicoquímica según lo establecido en el Anexo 5.1, tal cual fueron recogidas de la zona de muestreo y tras ser sometidas a un pretratamiento de lavado con agua dulce.

Los datos obtenidos tanto de las muestras de algas sin lavar como lavadas se reflejan en la Tabla 1 y en la Tabla 2.

La concentración de sólidos ha sido expresada en unidades de porcentaje de sólidos totales (ST) y volátiles (SV) en base húmeda, también se ha determinado el ratio SV/ST y la humedad.

Tabla 1. Resultados de las muestras sin lavar.

Nombre	ST (%)	SV (%)	Ratio (SV/ST)	Humedad (%)
<i>Ulva lactuca</i>	31,7 ± 1,9	7,8 ± 0,5	0,25	68,3 ± 1,9
<i>Enteromorpha</i>	43,6 ± 3,0	5,2 ± 0,4	0,12	56,4 ± 3,0
<i>Gracilaria spp.</i>	25,4 ± 4,6	9,7 ± 0,7	0,38	74,6 ± 4,6
<i>Fucus spp.</i>	13,7 ± 0,4	10,4 ± 0,4	0,76	86,3 ± 0,4

El ratio SV/ST cercano a la unidad indica un contenido muy bajo en compuestos inorgánicos. Este ratio se emplea como una aproximación al contenido en materia orgánica de la muestra y, por lo tanto, a una posible mayor biodegradabilidad por unidad de masa. En este caso, se observa que el ratio SV/ST presenta valores bajos en las muestras de *Ulva*, *Enteromorpha* y *Gracilaria*, debido principalmente a la presencia de arenas y otros compuestos inorgánicos. La muestra de *Fucus*, al ser recogida de una zona rocosa, no presentaba tantos compuestos inorgánicos.

Tabla 2. Resultados de las muestras lavadas.

Nombre	ST (%)	SV (%)	Ratio (SV/ST)	Humedad (%)
<i>Ulva lactuca</i>	10,6 ± 0,1	7,8 ± 1,4	0,74	89,4 ± 1,0
<i>Enteromorpha</i>	20,0 ± 2,0	12,0 ± 0,6	0,60	80,0 ± 2,0
<i>Gracilaria spp.</i>	20,1 ± 1,3	16,1 ± 0,9	0,80	79,9 ± 1,3
<i>Fucus spp.</i>	14,2 ± 0,7	12,1 ± 0,6	0,82	85,8 ± 0,7

Una vez realizado el lavado, el contenido de sólidos totales de todas las muestras disminuyó, de forma que tras el lavado presentan un valor en el ratio SV/ST superior a 0,60, que se ha establecido como límite para considerar que es adecuado para una digestión anaerobia, ya que un contenido elevado de compuestos inorgánicos da lugar

a problemas operacionales en equipos mecánicos y la disminución del volumen útil de trabajo.

A partir de estudios previos en los que se realizó la caracterización de macroalgas se puede establecer que existe diversidad en los valores obtenidos. Atendiendo a los resultados de las muestras lavadas, donde se elimina la variabilidad de los compuestos inorgánicos, puede observarse que los valores obtenidos en las algas de arribazón recogidas en la playa de A Barra (Redondela) se encuentran en el rango reportado por otros autores^{3, 4, 5}.

Por ejemplo, para la *Ulva*, que suele ser la especie de macroalga más estudiada y caracterizada, por ejemplo, Bruhn³ presenta valores de 9,84 % de ST y 7,16 % de SV para la muestra lavada, mientras que Costa et al.⁵ determinó valores de 15,8 % ST y 7,4 % SV para *Ulva* recogida en un tanque de acuicultura.

Teniendo en cuenta que la presencia de compuestos inorgánicos (que originan un ratio SV/ST bajo), se continuó la caracterización fisicoquímica considerando únicamente las algas lavadas.

El contenido de materia orgánica se estableció a partir de la determinación de la demanda química de oxígeno, (DQO), que establece la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo. Los datos de DQO, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de contenido en materia orgánica.

Muestra	DQO total (gO ₂ /kg)	Ratio DQO/SV
<i>Ulva lactuca</i>	134,2 ± 36,4	1,71
<i>Enteromorpha</i>	105,8 ± 36,4	2,05
<i>Gracilaria spp.</i>	119,0 ± 14,1	1,23
<i>Fucus spp.</i>	132,8 ± 28,1	1,28

Puede observarse en la Tabla 3 que los valores obtenidos con respecto al contenido de materia orgánica oxidable por unidad de masa son análogos a los de los sólidos volátiles de la Tabla 2 en el caso de *Gracilaria* y *Fucus*, de forma que un mayor contenido de SV da lugar a contenidos de DQO más elevado. En el caso de *Enteromorpha* se puede observar que el ratio DQO/SV es el más elevado, indicando una mayor oxidación de la materia orgánica presente. La muestra de *Ulva lactuca* presentó un valor intermedio entre las demás especies.

3.3. Determinación del potencial metanogénico.

La determinación del potencial metanogénico se realiza mediante una fermentación anaerobia de las muestras, trabajando en discontinuo. El ensayo se llevó a cabo según las condiciones establecidas en el Anexo 5.2 de Metodología y empleando inóculo procedente del digestor anaerobio de lodos de la EDAR de Bens (A Coruña).

Los resultados obtenidos en el ensayo en discontinuo para las muestras, donde los valores se muestran en volumen de metano acumulado por unidad de masa volátil, se presentan en la Figura 7.

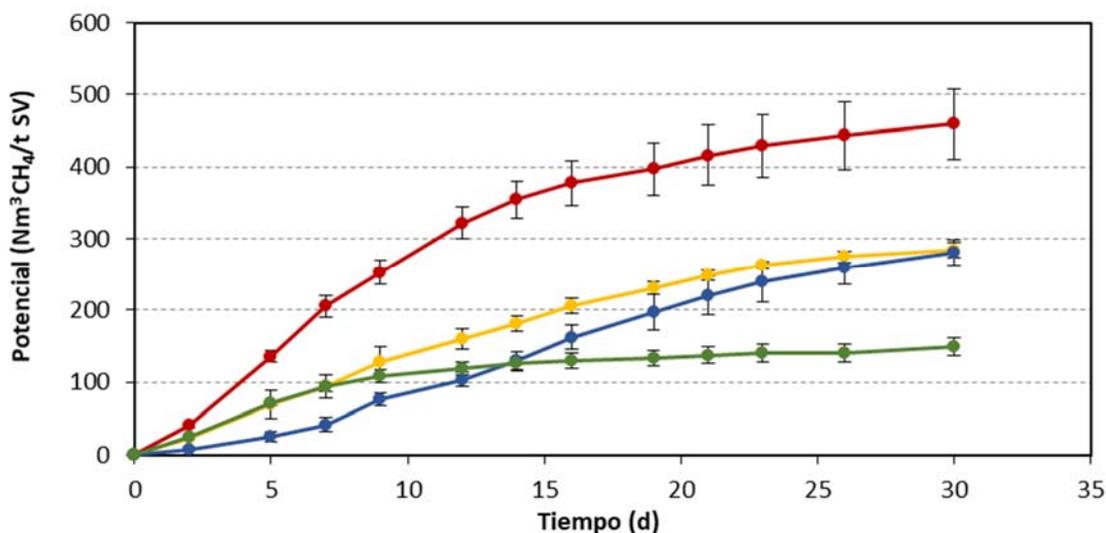


Figura 7. Producción de metano para *Ulva Lactuca* (●); *Enteromorpha* (●); *Gracilaria* spp. (●); y *Fucus* spp. (●)

Puede observarse como la producción de metano comienza en cuanto se pone en contacto cada una de las algas con el inóculo, sin que se observe una fase de retardo. Dicha producción se mantuvo durante los 30 días que duró el ensayo, si bien puede observarse que a partir del día 10 de operación disminuye en el caso del *Fucus spp.*, y a partir del día 25 en el resto de las muestras.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4 y en la Tabla 5.

El potencial de producción se ha determinado teniendo en cuenta la masa de cada una de las algas empleadas como sustrato y su contenido en sólidos volátiles (SV).

La muestra de *Enteromorpha* fue la que presentó un mayor potencial de producción de biometano, alcanzando un valor de 472,8 Nm³ CH₄/t SV. Las muestras de *Ulva lactuca* y *Gracilaria* presentaron valores muy similares, en torno a 300 Nm³ CH₄/t SV, mientras que *Fucus* solamente alcanzó una producción ligeramente superior a 150 Nm³ CH₄/t SV, lo que supone un valor un 66,9 % inferior al de *Enteromorpha*. Debido al diferente contenido en agua que presentan las algas muestreadas, los valores referenciados por unidad de masa sufren variaciones, siendo el alga *Gracilaria* la que presenta el mayor valor de potencial, con 30,8 Nm³ CH₄/t.

Tabla 4. Potencial de producción de biometano.

Muestra	Potencial (Nm ³ CH ₄ /t SV)	Potencial (Nm ³ CH ₄ /t)	Biodegradabilidad (%)
<i>Ulva lactuca</i>	300,1 ± 19,9	23,5 ± 1,6	50,1 ± 3,3
<i>Enteromorpha</i>	482,8 ± 49,4	24,9 ± 2,5	65,8 ± 6,9
<i>Gracilaria</i> spp.	318,5 ± 5,1	30,8 ± 0,5	74,1 ± 1,2
<i>Fucus</i> spp.	154,2 ± 14,3	16,1 ± 1,5	34,5 ± 3,2

Adicionalmente se presenta el porcentaje de biodegradabilidad, calculado como el porcentaje de la materia orgánica (DQO_{total}) que se degrada y convierte en metano frente al valor máximo teórico de 0,35 Nm³ CH₄/kg DQO eliminada. De esta forma, sabiendo el contenido en materia orgánica de un sustrato expresado en términos de DQO, es posible estimar el valor máximo teórico a alcanzar si se considera una eliminación del 100 %.

Con este parámetro puede observarse que la biodegradabilidad de *Fucus* tras 30 días de ensayo ha sido la más baja, con un valor en torno al 35 %, mientras que con *Gracilaria* se consiguió un 74 % de biodegradabilidad.

Con respecto al contenido en metano, puede observarse que se encuentra en el rango de 61 a 66 %, lo que hace que el biogás producido pueda dar lugar a un buen aprovechamiento energético, con *Fucus* y *Ulva* presentando los valores más elevados. En la Tabla 5 se presentan los valores de potencial en términos de biogás por unidad de sólido volátil y por unidad de masa.

Tabla 5. Potencial de producción de biogás.

Muestra	Contenido en CH ₄ (%)	Potencial (Nm ³ biogás/t SV)	Potencial (Nm ³ biogás/t)
<i>Ulva lactuca</i>	64,1 ± 1,3	468,0 ± 31,0	36,7 ± 2,4
<i>Enteromorpha</i>	61,7 ± 3,0	766,0 ± 80,0	39,5 ± 4,1
<i>Gracilaria spp.</i>	62,1 ± 0,9	512,8 ± 8,3	49,7 ± 0,8
<i>Fucus spp.</i>	66,2 ± 0,7	236,5 ± 21,5	24,6 ± 2,5

Por lo tanto, a partir de los ensayos de determinación de potencial metanogénico realizados de manera discontinua se puede establecer que las macroalgas pueden ser una fuente apropiada para la producción de metano. A lo largo de los últimos años se ha realizado diversos estudios a escala laboratorio para establecer el potencial metanogénico. Como se ha comentado anteriormente, dicho potencial varía en función de la composición de las algas evaluadas, que a su vez puede depender de factores ambientales.

Las macroalgas verdes y pardas (*Gracilaria*, *Laminaria*, *Asophyllum* y *Ulva*) suelen presentar potenciales de metanización que varían entre los 140 y los 280 Nm³ CH₄ por tonelada de sólido volátil (SV), con algunos estudios⁶ en los que mediante pretratamientos se pueden alcanzar valores de 100 a 425 Nm³ CH₄/tSV, que son valores que hacen comparables a las macroalgas con otros cultivos terrestres.

Por ejemplo, el lodo de depuradoras urbanas puede presentar valores⁷ de a 350 Nm³ CH₄/tSV, mientras que los residuos ganaderos⁸ (purín vacuno, purín porcino o gallinaza) pueden presentar valores de 196, 347 y 272 Nm³ CH₄/tSV.

En la Tabla 6 se presenta una tabla comparativa con diversas especies de macroalgas y las referencias bibliográficas asociadas.

Tabla 6. Tabla comparativa de producción de metano de diversas macroalgas.

Tipo de alga	Potencial (Nm ³ CH ₄ /t SV)	Referencia
<i>Ascophyllum</i>	110	9
<i>Gracilaria</i>	280-400	10, 11
<i>Laminaria sp.</i>	180-300	12
<i>Macrocystis pyrifera</i>	180-430	13
<i>Sargassum</i>	120-190	14
<i>Ulva lactuca</i>	200-480	15, 16
<i>Fucus vesiculosus</i>	147	4

4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos tras la realización de la caracterización fisicoquímica (**Tabla 1**, **Tabla 2** y **Tabla 3**) y la determinación de los ensayos de potencial (**Tabla 4** y **Tabla 5**) se puede extraer que las algas estudiadas pueden tener valor como fuente de producción de metano.

Para poder emplearlas en un proceso de digestión anaerobia será necesario eliminar los compuestos inorgánicos presentes, principalmente las arenas, ya que podrían causar problemas operacionales.

Teniendo en cuenta la abundancia en las zonas de marisqueo y la disponibilidad para su recogida tal como se ha visto en el informe de "Informe de valoración sobre el escenario inicial en Galicia y Asturias", y el potencial metanogénico y la biodegradabilidad calculada, se establece que la *Ulva lactuca* puede ser la más interesante para ser estudiada en una operación de digestión anaerobia en continuo.

A modo de resumen, los resultados obtenidos para *Ulva lactuca* son:

Tabla 7. Principales valores de caracterización

ST (%)	SV (%)	DQO total (gO ₂ /kg)	Potencial (Nm ³ CH ₄ /t)	Contenido en CH ₄ (%)	Potencial (Nm ³ biogás/t)	Biodegr. (%)
10,6 ± 0,1	7,8 ± 1,4	134,2 ± 36,4	23,5 ± 1,6	64,1 ± 1,3	36,7 ± 2,4	50,1 ± 3,3

5. Anexo 1: Metodología

5.1. Caracterización fisicoquímica

La caracterización fisicoquímica de los residuos, realizando triplicados para cada analítica, se llevó a cabo según la metodología que se expone a continuación.

Las medidas sobre la fase soluble de los residuos sólidos se realizaron sobre el lixiviado generado tras poner en contacto la fracción sólida con agua destilada (dilución 1:5) en agitación durante 30 min.

- Humedad y contenido en sólidos totales (ST) y volátiles (SV) y sólidos en suspensión totales (SST) y volátiles (SSV). Se realizó la determinación por triplicado, según la metodología del “*Standard methods for the examination of water and wastewater*”¹⁷
 - 2540 B Total Solids Dried at 103-105 °C
 - 2540 E Fixed and Volatile Solids Ignited at 550 °C
 - 2540 G Total, Fixed, and Volatile Solids in Solid and Semisolid Samples
- Contenido en materia orgánica (DQO). Se realizó la determinación en reflujo cerrado, según la metodología del “*Standard methods for the examination of water and wastewater*”
 - 5220 D. Closed Reflux, Colorimetric Method

5.2. Potencial metanogénico y biodegradabilidad

La determinación del potencial metanogénico y de la biodegradabilidad anaerobia se basa en el seguimiento de la descomposición anaerobia de una muestra orgánica (substrato) con inóculo (microorganismos), en un medio suplementado con nutrientes y medio tampón, de forma que se evalúa la cantidad de metano producido. En este estudio se ha empleado inóculo procedente del digestor anaerobio de la EDAR de Bens (A Coruña).

El seguimiento experimental para la realización de los ensayos de biodegradabilidad se ha basado en protocolos existentes¹⁸, adaptando estos a las condiciones deseadas.

- El potencial metanogénico (BMP) evalúa la cantidad de metano que se puede producir durante el proceso de digestión anaerobia de un residuo. Se expresa principalmente en unidades de volumen de CH₄, o biogás, por unidad de materia orgánica, L_{CH₄}/kg_{DQO}, pero también se puede convertir a unidades de L_{CH₄}/kg_{SV} o de m³_{CH₄}/t_{residuo}.
- La biodegradabilidad anaerobia expresa el porcentaje de materia orgánica del residuo (medida en términos de DQO) que se ha degradado y convertido a CH₄ frente al total presente en la muestra. Si se considera un biogás formado exclusivamente por CH₄ y CO₂, y teniendo en cuenta que la DQO del CO₂ es nula, la DQO eliminada en el residuo se correspondería con la DQO obtenida en forma de metano, lo cual significa un valor teórico máximo de 350 L_{CH₄}/kg_{DQO}.

El seguimiento de la producción de biogás se realizó mediante el *Analizador Automático de Medición de Metano* (AMPTS II) de *Bioprocess Control* (**Figura 8**). Este equipo consta de un baño termostático donde se colocan los digestores, unas trampas de fijación de CO₂ para medir únicamente el CH₄ producido, una unidad medidora del metano producido por cada digestor y un software donde se registran la producción que

se va obteniendo a lo largo del proceso. Cada digestor tiene un cabezal con un dispositivo de agitación, para mantener las condiciones homogéneas. Una vez finalizado el ensayo se realizó una medición por cromatografía gaseosa de la composición del biogás presente en el espacio de cabeza de cada uno de los reactores.

En paralelo a las muestras, se realizaron dos ensayos adicionales. Un test de biodegradabilidad del inóculo (sin adicionar sustrato), denominado “blanco” para cuantificar la producción debida solamente al inóculo, para restar la producción en los ensayos realizados a los residuos. Un test de actividad del inóculo, denominado “control” en el que se utilizó una mezcla de ácidos grasos formada por ácido acético, ácido butírico y ácido propiónico.

14



Figura 8. Sistema AMTPS II

El ensayo se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones:

- realizando triplicados para cada una de las muestras
- en un rango de temperatura mesófila $36 \pm 1^\circ\text{C}$.
- adición de macro y micronutrientes al lodo.
- se ha realizado ajuste de pH de la mezcla antes de iniciar el ensayo (valor de 7,8) y se ha añadido bicarbonato para mantener la alcalinidad del medio.
- se ha partido de un contenido en materia orgánica, proporcionado por el sustrato, en torno a $5,0 \text{ gO}_2/\text{kg}$.
- se ha empleado una relación de inóculo/sustrato en torno a $1,8 \text{ gSSV/gSV}$ para las muestras, y un valor de $1,0 \text{ gSSV/gDQO}$ en la determinación de la actividad metanogénica del inóculo.

La composición de gas se midió en el espacio de cabeza de cada uno de los viales empleados, mediante el uso de un cromatógrafo de gases Clarus 580GC (Perkin Elmer).

6. Bibliografía

- ¹ Salamanca, E. J. P. (2005). *Algas como indicadores de contaminación*. Universidad del Valle.
- ² Barbot, Y. N., Al-Ghaili, H., & Benz, R. (2016). A review on the valorization of macroalgal wastes for biomethane production. *Marine drugs*, 14(6), 120.
- ³ Bruhn, A., Dahl, J., Nielsen, H. B., Nikolaisen, L., Rasmussen, M. B., Markager, S., ... & Jensen, P. D. (2011). Bioenergy potential of *Ulva lactuca*: biomass yield, methane production and combustion. *Bioresource technology*, 102(3), 2595-2604.
- ⁴ Romagnoli, F., Pastare, L., Sabūnas, A., Bāliņa, K., & Blumberga, D. (2017). Effects of pre-treatment on Biochemical Methane Potential (BMP) testing using Baltic Sea *Fucus vesiculosus* feedstock. *Biomass and Bioenergy*, 105, 23-31.
- ⁵ Costa, J. C., Gonçalves, P. R., Nobre, A., & Alves, M. M. (2012). Biomethanation potential of macroalgae *Ulva* spp. and *Gracilaria* spp. and in co-digestion with waste activated sludge. *Bioresource technology*, 114, 320-326.
- ⁶ Akila, V., Manikandan, A., Sukeetha, D. S., Balakrishnan, S., Ayyasamy, P. M., & Rajakumar, S. (2019). Biogas and biofertilizer production of marine macroalgae: An effective anaerobic digestion of *Ulva* sp. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 18, 101035.
- ⁷ Koçer, A. T., & Özçimen, D. (2018). Investigation of the biogas production potential from algal wastes. *Waste Management & Research*, 36(11), 1100-1105.
- ⁸ Marañón Maison, E., Fernández Nava, Y., & CASTRILLÓN PELÁEZ, L. (2009). Manual de Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales. *Universidad de Oviedo. Proyecto PROBIOGAS*.
- ⁹ Hanssen, J. F., Indergaard, M., Østgaard, K., Bævre, O. A., Pedersen, T. A., & Jensen, A. (1987). Anaerobic digestion of *Laminaria* spp. and *Ascophyllum nodosum* and application of end products. *Biomass*, 14(1), 1-13.
- ¹⁰ Singh, J., & Gu, S. (2010). Commercialization potential of microalgae for biofuels production. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(9), 2596-2610.
- ¹¹ Parmar, A., Singh, N. K., Pandey, A., Gnansounou, E., & Madamwar, D. (2011). Cyanobacteria and microalgae: a positive prospect for biofuels. *Bioresource technology*, 102(22), 10163-10172.
- ¹² Vanegas, C., & Bartlett, J. (2013). Anaerobic digestion of *Laminaria digitata*: the effect of temperature on biogas production and composition. *Waste and Biomass Valorization*, 4(3), 509-515.
- ¹³ Dębowski, M., Zieliński, M., Grala, A., & Dudek, M. (2013). Algae biomass as an alternative substrate in biogas production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 596-604.
- ¹⁴ Bird, K. T., Chynoweth, D. P., & Jerger, D. E. (1990). Effects of marine algal proximate composition on methane yields. *Journal of applied phycology*, 2(3), 207-213.
- ¹⁵ Briand, X., & Morand, P. (1997). Anaerobic digestion of *Ulva* sp. 1. Relationship between *Ulva* composition and methanisation. *Journal of applied phycology*, 9(6), 511-524.
- ¹⁶ Allen, E., Browne, J., Hynes, S., & Murphy, J. D. (2013). The potential of algae blooms to produce renewable gaseous fuel. *Waste management*, 33(11), 2425-2433.
- ¹⁷ Federation, W. E., & APH Association. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. *American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA*.
- ¹⁸ Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., ... & Van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water science and technology*, 59(5), 927-934.

 VALORALGAE



valoralgae.es