



ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

**Máster Universitario de Investigación en
Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos**



Estudio de la viabilidad de la valorización de las algas del género *Sargassum* del mar Caribe

Vº Bº DIRECTOR
Concepción Paredes Gil

ALUMNO
Fany Omary Arias Ruiz



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Se autoriza a la alumna **D^a. Fany Arias Ruíz**, a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: “Estudio de la viabilidad de la valorización de las algas del género *Sargassum* del mar Caribe”, bajo la dirección de D^a. Concepción Paredes Gil, debiendo cumplir las normas establecidas para la redacción del mismo que están a su disposición en la página Web específica del Master.

Orihuela, 5 de septiembre de 2023

La Directora del Máster Universitario de Investigación en Gestión, Tratamiento y Valoración de Residuos Orgánicos

CONCEPCION | Firmado digitalmente por
PAREDES|GIL | CONCEPCION|PAREDES|GIL
Fecha: 2023.09.05 12:53:13
+02'00'

Fdo.: Concepción Paredes Gil

TRIBUNAL	
FECHA:	
PRESIDENTE:	FIRMA:
VOCAL:	FIRMA:
VOCAL:	FIRMA:

REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MASTER

IDENTIFICACIONES

Autor: Fany Omary Arias Ruiz

Título: Estudio de la viabilidad de la valorización de las algas del género *Sargassum* del mar Caribe

Title: Study of the feasibility of the valorisation of algae of the genus *Sargassum* from the Caribbean Sea

Director/es del TFM: Concepción Paredes Gil

Año: 2023

Titulación: Máster Universitario en Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos

Tipo de proyecto: Revisión bibliográfica

Palabras claves: *Sargassum*, valorización agrícola, alimentación animal, compost, valorización energética, biorremediación, compuestos de valor añadido

Keywords: *Sargassum*, agricultural valorisation, animal feed, compost, energy valorisation, bioremediation, value-added compounds

Nº citas bibliográficas: 232

Nº de tablas: 7

Nº de figuras: 7

RESUMEN

La finalidad de este TFM ha sido hacer una revisión bibliográfica sobre las diferentes formas de valorización del *Sargassum* que arriba en las costas del mar Caribe.

Para ello se han tomado varios temas centrales, los cuales son valorización agro-ganadera, valorización energética, biorremediación de aguas residuales y la obtención de compuestos de alto valor añadido.

Las algas siempre han existido de manera natural en los océanos, pero en los últimos años se han estado reproduciendo de manera desordenada, siendo este una contribución al problema, también este TFM trata su composición y los diferentes factores que afectan la valorización de esta biomasa.

ABSTRACT

The purpose of this TFM has been to make a bibliographic review on the different forms of valorization of *Sargassum* that arrives on the coasts of the Caribbean Sea.

For this, several central themes have been taken, which are agro-livestock valorization, energy recovery, bioremediation of wastewater and obtaining compounds with high added value.

Algae have always existed naturally in the oceans, but in recent years they have been reproducing in a disorderly way, this being a contribution to the problem, also this TFM deals with its composition and the different factors that affect the valorization of this biomass.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mi familia, por su comprensión y por acompañarme en cada etapa que emprendo y contribuir de una forma u otra.

A la Dra. Concepción Paredes Gil, por su dedicación y entrega.

Y finalmente a todos los que han contribuido de una manera a lo largo de este proceso, mi agradecimiento eterno.

Contenido

Introducción	1
Tipos y descripción de las algas del género <i>Sargassum</i> del mar Caribe	2
Ecosistemas y condiciones para el desarrollo del <i>Sargassum</i> y su función	5
Origen del desarrollo masivo del <i>Sargassum</i>	6
Impactos medioambientales y socioeconómicos de la afluencia masiva de <i>Sargassum</i> a las costas del Caribe.....	8
Objetivos	10
Revisión bibliográfica sobre la valorización del <i>Sargassum</i>. Análisis bibliométrico	10
Composición del <i>Sargassum</i>	13
Valorización agro-ganadera	16
Uso agrícola de los extractos de <i>Sargassum</i>	16
Compost a partir de <i>Sargassum</i>	19
Uso para alimentación animal.....	20
Valorización energética	24
Digestión anaerobia.....	24
Obtención de biodiesel	27
Obtención de bioalcoholes	28
Combustión	29
Gasificación.....	31
Pirólisis.....	35
Licuefacción hidrotermal	41
Biorremediación de aguas residuales	45
Obtención de compuestos de alto valor añadido	47
Compuestos con usos medicinales	47
Ingredientes en alimentos funcionales	50
Conclusiones: Oportunidades y limitaciones de la valorización de <i>Sargassum</i>	53
Bibliografía	56

Introducción

La región del Caribe es conocida a nivel mundial por ser un lugar predilecto por muchos para hacer turismo, especialmente por sus hermosas playas de arenas blancas y aguas cristalinas; cada año esta región recibe millones de turistas, que aportan a la generación de empleos y divisas, contribuyendo directamente al desarrollo regional. El sector turístico constituye así, uno de los principales pilares económicos de los países que conforman dicha región e impactando directamente en su desarrollo social. Según la Organización mundial de Turismo (OMT) en 2021, el sector de viajes y turismo contribuyó con más de 39.300 millones de dólares estadounidenses al producto interno bruto (PIB) de la región del Caribe (Statista, 2023).

A partir del verano de 2011 existen los primeros informes de un fenómeno que se ha vuelto un verdadero problema para el desarrollo de esta actividad económica, se trata del sargazo (*Sargassum*); la marea marrón que está invadiendo la costa caribeña y destrozando su ecosistema, es un fenómeno que ya fue avistado durante las primeras expediciones de europeos que atravesaron el Atlántico para llegar al continente americano. Hace varios siglos, temerosos de que sus barcos quedaran atascados entre la maleza marina, algunos exploradores documentaron estas praderas flotantes en mitad del mar. Pero hace más de una década, este fenómeno está llegando a las regiones costeras, volviéndose una amenaza para el sector turístico y el medio ambiente. México estuvo entre los primeros países en reportarlo, pero este problema ambiental, letal para muchas especies y con efectos nocivos para la salud humana, afecta a casi toda la región del Caribe (Figura 1). En el año 2022, la cantidad de *Sargassum* alcanzó ya cifras históricas en el Atlántico en junio de ese año más de 24 millones de toneladas de esta marea parda en las costas del Caribe, desde Puerto Rico a Barbados, según un informe del laboratorio de oceanografía de la Universidad del sur de Florida.



Figura 1. Turistas nadando en la playa de Xcalacoco en Playa del Carmen, Quintana Roo (Arratibel, 2022)

Los países que conforman la región caribeña se han visto en la necesidad de invertir millones de dólares buscando posibles soluciones a este problema que les aqueja y que apunta a seguir en crecimiento. Tratando así de mitigar los daños de este fenómeno de la naturaleza y que no afecte su economía (Arratibel, 2022).

Por lo tanto, esta revisión bibliográfica de trabajo de fin de máster busca hacer un estudio de las alternativas de valorización de esta biomasa desde diferentes perspectivas y de alguna forma contribuir a las posibles vías de solución al problema anteriormente descrito.

Tipos y descripción de las algas del género *Sargassum* del mar Caribe

El *Sargassum* de manera generalizada se encuentra en el grupo de algas cafés o pardas y se encuentra disperso en todos los mares del mundo. El subgrupo de *Sargassum* pelágico, lo cual significa que flota de manera libre en el océano, ya que no tienen estructuras que lo fije al fondo del mar, se compone de dos especies de *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*, siendo el primero el más abundante en las aguas del Atlántico y son las algas que llegan al mar Caribe (Figuras 2 y

3). Dichas especies de algas pertenecen a la división Phaeophyta, que son típicamente de color café pálido-amarillento de 20 a 80 cm de diámetro y se configuran a partir de un tallo ramificado de follaje abundante con filoides acerrados y numerosos nematocistos de menos de 1 cm de diámetro. Los nematocistos son unas vesículas pequeñas que funcionan de flotadores, ya que están rellenos de gas, presumiblemente compuesto de oxígeno y pequeñas cantidades de nitrógeno. Estas dos especies de *Sargassum* se reproducen por fragmentación vegetativa. Su configuración viene dada por una amplia gama de conglomerados de diferentes tamaños y formas que obedecen de manera caprichosa a las corrientes, al viento superficial marino y al sistema de adhesión con el que cuenta en sus hojas. El *Sargassum* responde al fenómeno natural de las corrientes marinas, flotando en mar abierto en parches desde 15 cm hasta varias decenas de kilómetros. Las laminillas de Langmuir, zonas de convergencia a lo largo de frentes, ondas internas y otros efectos de la circulación superficial aglomeran a estas algas para formar mantos alargados o bien son dispersadas en pequeños parches. Cuando estas líneas son atrapadas por remolinos o giros de meso escala dibujan espirales caprichosas, o también pueden presentar formas de gotas. El *Sargassum* pelágico circula a lo largo de la zona semi templada y tropical del Atlántico, incluyendo el mar Caribe y el golfo de México y particularmente en una porción conocida el mar de los Sargazos (Uribe-Martínez y col., 2020; Durand y Sundberg, 2022).



Figura 2. Sargazo flotante (*Sargassum fluitans*).

Fuente: https://www.naturalista.mx/taxa/134103-Sargassum-fluitans/browse_photos



Figura 3. Sargazo nadador (*Sargassum natans*).

Fuente: https://www.naturalista.mx/taxa/134104-Sargassum-natans/browse_photos

En un estudio sobre las costas mexicanas, Paredes-Camacho y col. (2023) encontraron que el *Sargassum natans VIII* estuvo presente en el 1% del material recolectado. La especie tuvo ramaje de 8 a 10 cm de largo; un ramaje sin espinas; foliares simples, finamente aserrados, 2-3 cm de largo y 3-6 mm de ancho; una base ligeramente asimétrica; un vértice agudo; un color oscurecido, vena engrosada y los filodes tenían hidroides. La especie tenía vesículas esféricas, rara vez con una espina o proyección de filodes, pero algunos tenían hidroides adheridos. Además, las vesículas tenían un pedicelo pequeño y un receptáculo ausente. Sin embargo, las algas predominantes fueron el *Sargassum fluitans tipo III*, encontrándose en un 80% del material recogido: los talos (estructuras que forman las algas) tenía ramajes (cauloides con filoides y vesículas) hasta 15 cm de largo y eran abundantes; el cauloides (ejes del talo, estípites o ramas) tenía espinas y filodios foliares (hojas o láminas), estos últimos de margen serrulado, ápice agudo, costilla oscurecida y engrosada, y la base ligeramente asimétrica, con un pequeño pedicelo y soporte alargado); los filodios medían entre 1 y 3,5 cm de largo y entre 3 y 4 mm de ancho. También tenía vesículas ovales lisas. (flotadores, neumatocistos, vejigas o aerocistos) sin filodes ni proyecciones de la columna vertebral. Las vesículas se alternaban en el cauloides y tenían un pequeño pedicelo y un receptáculo ausente. Además, estos autores también encontraron el *Sargassum natans I*, el cual estuvo presente en un 16% del material recolectado. La especie tuvo frondas alternas de 6-8 cm de largo y cauloides sin espinas, filodios de hojas lineares con dientes de márgenes, un ápice agudo, una base

ligeramente asimétrica y una vena poco definida, además filodios de 3,5 a 4 cm de largo y de 1 a 2,8 mm de ancho. La especie tenía forma esférica y vesículas abundantes, con proyecciones en forma de espinas o proyecciones filoides, así como también tenía un pequeño pedicelo y un receptáculo ausente.

Ecosistemas y condiciones para el desarrollo del *Sargassum* y su función

El *Sargassum* se agrupa de manera natural en formaciones que se conocen en español como balsas o mantos de sargazo. En estos conglomerados, sin importar mucho su tamaño, forma o composición se pueden encontrar decenas de especies de peces en fases desde larval hasta adultos, crías y pequeños juveniles de tortugas de varias especies, invertebrados, crustáceos, aves marinas, etc. Algunos de ellos son endémicos del mar del *Sargassum* y pasan en ella toda su vida, siendo relevantes para la supervivencia de la propia alga (Monroy-Velázquez y col., 2019). Algunos investigadores han sugerido que la enorme productividad del *Sargassum* se debe a la relación simbiótica que se establece entre este tipo de algas y los peces que habitan en este ecosistema y que le aportan a través de sus excreciones los nutrientes que las aguas del atlántico no poseen. Las especies que habitan allí consumen gran cantidad de algas asociadas al *Sargassum*, formándose así un ciclo ecosistémico sostenible (Laiponte y col., 2021).

Las balsas de *Sargassum* funcionan para las tortugas marinas como refugio y crianza durante lo que se conoce como “los años perdidos de las tortugas”, pues se refiere que después del periodo de nado frenesial, éstas son transportadas por las corrientes marinas y eventualmente alcanzan mantos de *Sargassum* que les sirve de hábitat durante varios años. Las crías hacen un uso activo de la comunidad asociada a esas balsas, pues consumen la meiofauna asociada, medusas, huevos de peces, otros organismos sésiles e insectos (CIT-SSC, 2015).

Los requerimientos de nitrógeno y fósforo son mínimos para este tipo de algas, por lo que encuentran oportunidades de crecimiento también en aguas ligeramente enriquecidas como zonas frontales o plumas de ríos en su desembocadura al mar. Experimentalmente se ha observado que su crecimiento óptimo ocurre a temperaturas entre 24° y 30° C y con salinidades de 36 y hasta 42 partes por mil. Bajo condiciones óptimas de luz, temperatura y salinidad, el *Sargassum* puede

duplicar su masa hasta en 10 días, particularmente si se trata de la especie *Sargassum fluitans* (Uribe-Martínez y col., 2020)

Origen del desarrollo masivo del *Sargassum*

El Mar del sargazo, comúnmente conocido como giro subtropical del Atlántico Norte, es una región donde una inmensa masa de agua queda delimitada por un vasto sistema de corrientes circulares que fluyen de este a oeste (Corriente Norecuatorial) y de oeste a este (Corriente del Golfo) (Figura 4). Los vientos y el clima se combinan para dar a estas aguas una identidad muy particular; desde el punto de vista físico son aguas de mayor temperatura y salinidad, y desde el punto de vista biológico son hábitat de una gran cantidad de algas pelágicas del género *Sargassum*. El origen del *Sargassum* que habita el Mar de los Sargazo es incierto. Si bien se creía que provenía de poblaciones naturales de aguas costeras, ya en 1838 el botánico alemán Meyen, F., anticipó la teoría de que el *Sargassum* pasaba su ciclo vital en el mar abierto, que eran pelágicos, a diferencia de otras algas que crecen adheridas a las rocas. Fue hasta 1930 que Parr, A., reportó que únicamente dos de los ocho variedades de *Sargassum* encontradas en el Mar de los Sargazos componían el 90% del total de algas y todo el material analizado carecía de órganos reproductivos. Es decir, que estas algas se hallaban pre adaptadas para vivir en mar abierto en una existencia flotante cuya reproducción era asexual mediante fragmentación del talo, en donde cada segmento puede originar una nueva planta. Los primeros botánicos les dieron el nombre de *Sargassum bacciferum*, del latín bacca baya y del griego phero llevar, es decir que lleva bayas, en alusión a las vesículas de flotación que acompañan al alga y que le permite mantenerse en la superficie y facilitar su desplazamiento y transporte por efecto de las corrientes marinas y el viento. Estas características sirvieron para que en 1927 Irving Langmuir explicara que el acomodo de las hileras de *Sargassum* se debía al efecto de la convección o celdas verticales (celdas Langmuir) que giran perpendiculares a la superficie y que obligan a cualquier material flotante a permanecer en la superficie del mar (Robledo y Vázquez-Delfín, 2019).

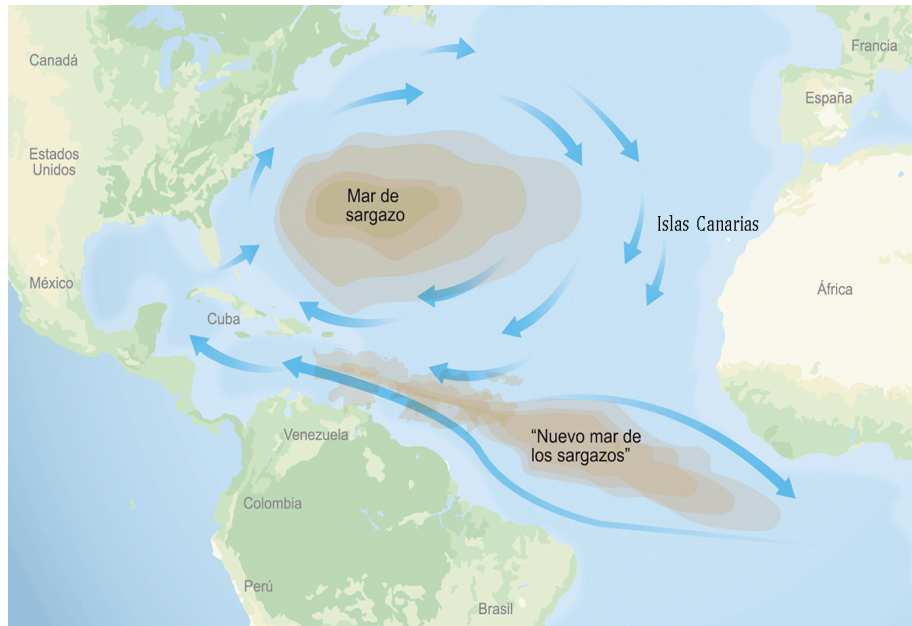


Figura 4. Mapa mar de los Sargazos.

Fuente: <https://news.proyepesca.es/articulo/el-mar-de-los-sargazos-se-esta-convirtiendo-en-una-zona-muerta/>

La presencia de *Sargassum* en pequeñas cantidades siempre fue común en la región caribeña y parte del ecosistema, pero a partir del verano del 2011 es cuando esta situación se modificó (Loime y col., 2017; Langin 2018). La llegada masiva de *Sargassum* a dicha región, se debe a una nueva población de este denominada gran Cinturón del *Sargassum* (GASD por sus siglas en inglés); que se establece en el atlántico tropical, específicamente frente a las costas de Brasil. También, se observa un desarrollo masivo del *Sargassum* en el año 2015 que ocasionó un flujo diario 10.000 toneladas de *Sargassum* en las costas del Caribe (Thompson y col., 2020) y en junio del 2018 el GASB, ya había alcanzado una extensión de 6.000 km² y un volumen superior a los 20 millones de toneladas (Wang y col., 2019; Chávez y col., 2020).

Algunos expertos han atribuido a varias hipótesis el afloramiento masivo del *Sargassum*, entre ellas a cambios en la temperatura y en las corrientes del mar, que han empujado el mar de los sargazos hacia el sur, acercando las algas al Caribe. Otros vinculan la capacidad invasora del *Sargassum* a la ausencia de ciclones en la región. Hay quienes opinan que los nutrientes que aporta el incremento de la presencia de arena del Sahara en las aguas promueven el crecimiento de *Sargassum*; y están los que atribuyen el origen del GASB a deforestación y al incremento en el

uso de fertilizantes que se arrojan a los ríos Amazonas y Orinoco. Los caudales de estos ríos transportan toneladas de materia orgánica y nutrientes hacia el océano, un hecho que, junto con el incremento de la temperatura del agua, promueve el crecimiento explosivo del *Sargassum* (Louime y col., 2017; Wang y col., 2019). En lo que parece haber consenso científico es en que todas las causas están, sin duda, vinculadas a la actividad humana (Chávez y col., 2020).

Impactos medioambientales y socioeconómicos de la afluencia masiva de *Sargassum* a las costas del Caribe

Una vez que ha empezado la afluencia masiva del *Sargassum* a las costas caribeñas, ha sido cada año de constante ascenso. Esta alga llega a las costas en grandes manchas alargadas, como hilos que van fragmentándose a medida que se acercan a la playa, donde el *Sargassum* se acumula poco a poco y cuando el volumen es grande, el alga cubre una buena porción de la playa y comienza a pudrirse y secarse al sol. Mientras tanto, el nuevo *Sargassum* se deposita en el agua formando una franja de algas que puede llegar a ocupar kilómetros de costa y que ofrece un aspecto visual desagradable. El *Sargassum* muere cuando se detiene en la playa y al descomponerse, forma la llamada marea café o brown tide, una mezcla de agua y algas en descomposición de un color café oscuro, parecido a un lodo de olor rancio. Durante este proceso de degradación, las masas de algas producen lixiviados y gran cantidad de materia orgánica, que agota el oxígeno del agua e impide el paso de la luz, produciendo la muerte de muchos organismos como pastos marinos, peces, tortugas y pepinos de mar que habitan las zonas costeras. Los efectos negativos de la marea café se resienten también mar adentro, en zonas donde el agua aún se aprecia clara y azul. Los lixiviados del *Sargassum* se diluyen afectando los arrecifes de coral y otras comunidades que reciben un inmenso aporte de nutrientes que altera toda la química del agua y produce cambios invisibles pero capaces de transformar por completo el ecosistema costero (Rodríguez Martínez y col., 2016).

Además de sus efectos ambientales, la llegada masiva de *Sargassum* tiene efectos serios para el turismo, que es un pilar de la economía caribeña. Al desintegrarse en el agua, el emblemático color azul turquesa del mar Caribe desaparece. Las masas de algas sobre la arena tienen un gran impacto visual negativo, viéndose sucias y feas. Además, del desagradable hedor que desprende al descomponerse por acciones de la luz y el sol, el cual puede llegar a ser tóxico debido al desprendimiento de ácido sulfhídrico. Algunos bañistas atraviesan las manchas de *Sargassum* para

llegar a las zonas limpias del mar y otros se aventuran a nadar entre él, aun cuando se advierte que puede irritar la piel. La mayoría, sin embargo, prefiere no entrar al agua (Martínez-González, 2019).

Los gobiernos de las diferentes naciones que componen la región del Caribe, juntos a hoteleros y demás actores interesados, se unen en esfuerzo para retirar el *Sargassum* de las playas y así, recuperar el aspecto idílico natural que es emblema del Caribe, dedicando millones de dólares en acciones para mitigar los daños de la marea marrón. En pocas cantidades, el *Sargassum* es recogido y retirado manualmente por cuadrillas de trabajadores y voluntarios. Sin embargo, para volúmenes mayores se emplean camiones y maquinaria pesada como excavadoras y cargadores, cuyo uso compacta la arena, destruye los nidos de tortugas y contribuye a la erosión de la playa, siendo además alrededor del 60% del volumen recogido arena (Rodríguez Martínez y col, 2016; Chávez y col., 2020). Actualmente, se considera más efectivo retirar el *Sargassum* en el mar e impedir que llegue a la playa, para lo cual se ha probado, con diferentes grados de éxito, la colocación de distintas barreras en el mar que tratan de impedir el avance del *Sargassum* y facilitar su colecta con barcas sargaceras. El *Sargassum* debe ser recogido de inmediato cuando llega a las barreras; de lo contrario, al acumularse, logra librar el obstáculo o se hunde a medida que comienza a descomponerse, provocando daños al ecosistema marino. Una vez recolectado, esta alga debe ser desechada correctamente y esto ha representado otro problema, pues no existen sitios acondicionados para impedir que los lixiviados que produce la descomposición del *Sargassum* se filtren a los mantos freáticos, contaminen el agua y lleguen nuevamente al mar. Toneladas de *Sargassum* han sido depositadas en terrenos baldíos, al lado de caminos y carreteras, y otros sitios inadecuados (Rodríguez Martínez y col., 2016; Chávez y col., 2020).

Entre 2018 y 2019, solo el gobierno de México destinó casi 20.000.000 de dólares para remover más de 600.000 toneladas de *Sargassum* de las playas de Quintana Roo. A eso hay que sumar el gasto de la industria hotelera en la limpieza de playas, la colocación de barreras y la compra de maquinaria y barcos. Todavía no existen evaluaciones detalladas sobre el efecto del *Sargassum* en el turismo del Caribe. Pero de 2018 a 2019 se calcula un decrecimiento del 3,9 de la ocupación hotelera solo en la Riviera Maya debido al efecto negativo de las algas. Los dueños y administradores reportan disminución en la realización de bodas, congresos, etc., como también quejas de huéspedes por la cantidad de *Sargassum* en la playa. Sin lugar a duda, la llegada masiva del *Sargassum* ha desestabilizado y cambiado la dinámica del ecosistema costero del Caribe,

representando un desafío ambiental y socioeconómico para su economía dependiente en gran parte de la actividad turística, pero también es una oportunidad de aprovechar esta biomasa natural. (Durand y Sundberg, 2022).

Objetivos

Esta revisión bibliográfica tiene como objetivo general estudiar algunas de las posibles aplicaciones y desafíos relacionados con el uso de la biomasa del *Sargassum* holopelágico, para brindar información sobre la valorización de esta alga marina.

Los objetivos específicos que se pretenden conseguir con este estudio serán:

- Analizar la bibliografía relativa a las diferentes opciones de gestión de la biomasa del *Sargassum*.
- Describir la composición de este tipo de alga para evaluar las características limitantes o positivas para su valorización.
- Revisar los diferentes usos agrícolas del *Sargassum*, así como su empleo para la alimentación animal.
- Describir los diferentes tratamientos térmicos que pueden aplicarse a este tipo de biomasa para conseguir su valorización energética.
- Mostrar la obtención de diferentes compuestos de valor añadido a partir de la biomasa del *Sargassum* y otras formas de valorización de esta alga.
- Evaluar la aplicación de las diferentes técnicas de valorización estudiadas para esta alga holopelágica y las necesidades actuales de la sociedad, para dar solución a este problema medioambiental de las costas del mar Caribe.

Revisión bibliográfica sobre la valorización del *Sargassum*. Análisis bibliométrico

Esta revisión bibliográfica se ha realizado en la base de datos Web Of Science (WOS), utilizando las palabras claves ''*Sargassum*'' and ''Use'' dicha búsqueda dio como resultado 2750 artículos que tratan el tema de la valorización de la biomasa de esta alga.

Del análisis que se ha realizado, en la figura 5 se puede ver que el año de mayor publicación ha sido el 2022 con 327 artículos, también podemos ver que, en los últimos 10 años se ha visto, una gran cantidad de artículos nuevos, en comparación a los que hubo del 2000 al 2010.

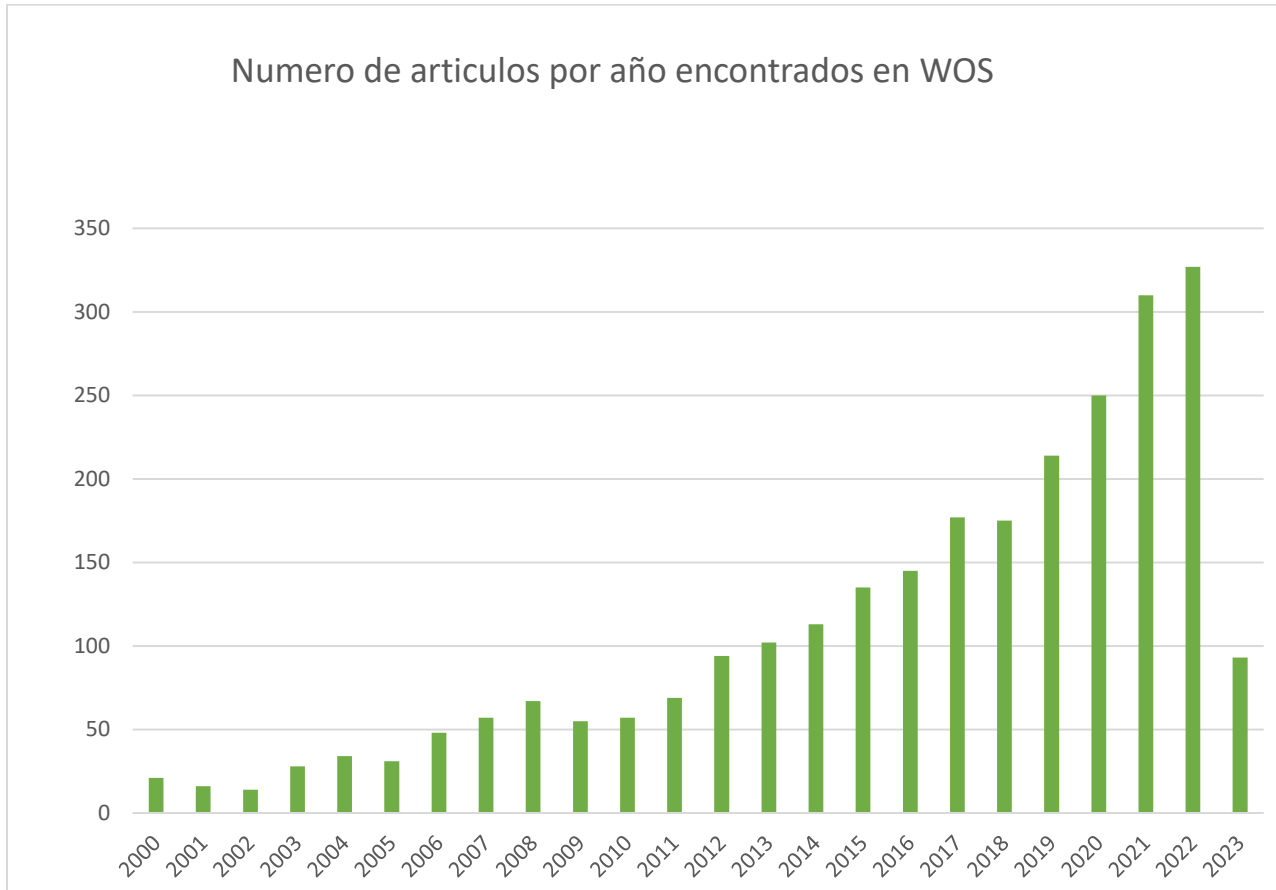


Figura 5. Numero de artículos sobre el uso del *Sargassum* por año en WOS.

Fuente (Elaboración propia)

En la figura 6 podemos apreciar que, casi todos son documentos de investigación, seguidos por las actas y artículos de revisión, aun no existen patentes, casi todos los artículos se quedan en investigación.

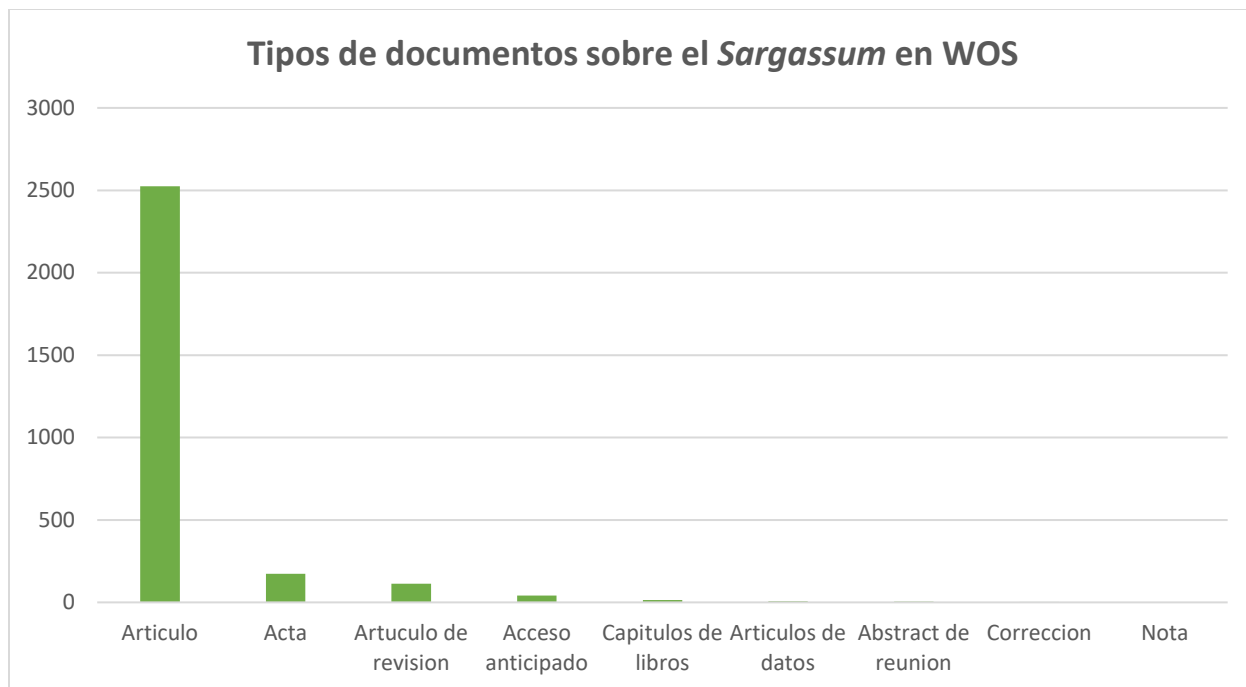


Figura 6. Tipos de documentos sobre el uso del *Sargassum* publicados en WOS.

Fuente: (Elaboración propia)

En la figura 7 podemos ver los países que han publicado más documentos sobre el tema en la base de datos WOS. China aparece en el primer lugar, con un total de 435 documentos publicados, seguida de países como, India, Corea del Sur, Estados Unidos, Brasil y Japón con un número de publicaciones > 163. México también tiene un lugar destacado con 133 documentos publicados. La mayor parte de los países donde se han publicado mayor número de documentos son países donde este tipo de alga es nativa o está generando un problema medioambiental. En el Pacífico noroeste también se han encontrado este tipo de algas, especie *Sargassum muticum*, por ello, los países con costas en esta parte del Pacífico son unos de los que más publicaciones se han encontrado (China, Corea, Japón). Respecto a los países con costas en el mar Caribe, solo se han encontrado con un número importante de publicaciones a Estados Unidos, Brasil y México. También, hay países europeos con un número de documentos publicados > 100, tales como, España y Francia debido a que esta alga es una especie invasora que ha llegado a costas de países donde no es nativa enganchada a hélices o cadenas de barcos, a través del agua de lastre de los barcos o incrustada en cascos de barcos, etc. (Katsanevakis y col., 2014).

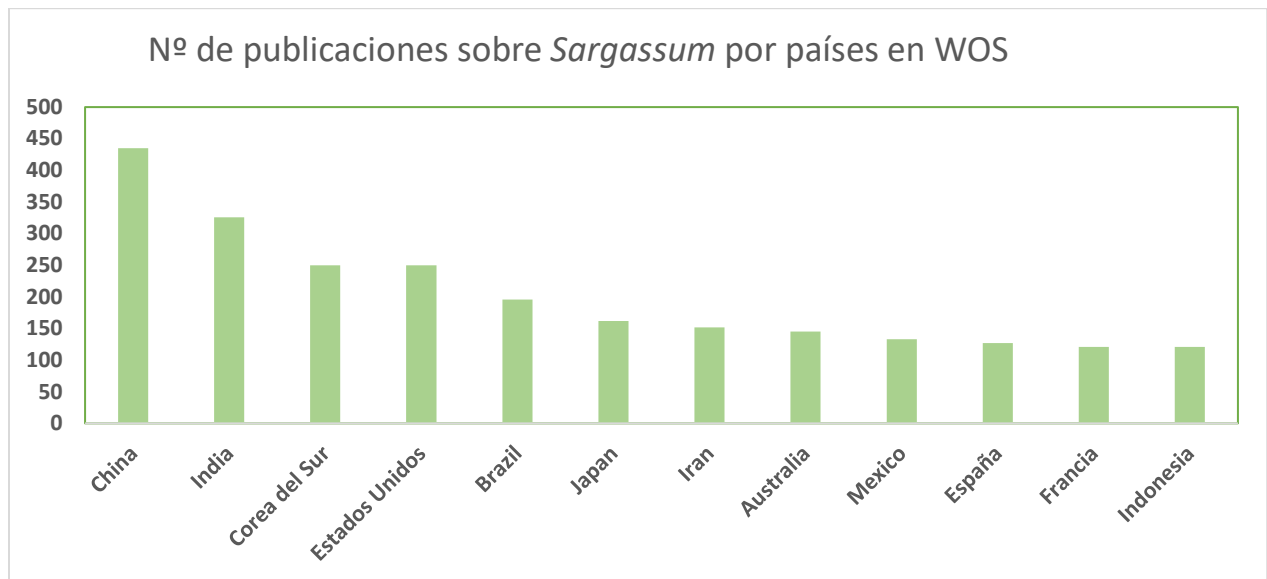


Figura 7. Publicaciones sobre el uso del *Sargassum* por países en WOS (solo mostrados los países con número de documentos publicados > 100). Fuente (Elaboración Propia)

Composición del *Sargassum*

La composición química del *Sargassum* es muy compleja y varía de una especie a otra, además de las variaciones espaciales y temporales entre las mismas especies. Este fenómeno es probablemente el resultado del crecimiento de diferentes algas a lo largo de las estaciones. Las variaciones espaciales y temporales en la composición química del *Sargassum*, se necesitan entender para desarrollar técnicas de conservación durante la floración de *Sargassum* y garantizar un eventual suministro de productos de valor agregado (Lopresto y col., 2022).

Los componentes más abundantes son los carbohidratos y cenizas, mientras que el contenido de lípidos y fibras es bajo (Milledge y Harvey 2016; Milledge y col., 2020). El contenido de humedad es generalmente alto, oscilando entre 70 y 90%, mientras que el contenido de cenizas (base seca) oscila entre el 10 y el 76% (Montingelli y col., 2015).

Dentro de los polisacáridos, el alginato es el polisacárido más abundante en las macroalgas pardas. Se han observado diferencias en la cantidad de este compuesto dependiendo de la época del año, presentando estas algas mayor cantidad durante los meses de verano cuando la temperatura del

océano y la irradiación de la luz es alta. Esta propiedad es una adaptación que apoya vitalidad celular al prevenir la deshidratación. También, laminarina y manitol, productos de la fotosíntesis exhiben valores máximos durante la primavera y verano, mientras que los fucoidanos o azúcares sulfatados prevalecen en otoño. Por lo tanto, el verano es la estación donde se generan mayor cantidad de carbohidratos en el *Sargassum* y este hecho es importante para tener en cuenta en la valorización energética de este tipo de algas (Thompson y Baroutian, 2020).

El *Sargassum* tiene una gran capacidad para absorber metales y otros elementos, incluidos los metales tóxicos que pueden filtrarse en las aguas subterráneas. Estos metales han sido detectados en muestras de este tipo de algas en costas mexicanas y dominicanas: Al, As, Ca, Cl, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, P, Pb, Rb, S, Si, Sr, Th, U, V, Zn. La concentración de arsénico varía de 24 a 172 ppm y debe ser especialmente monitoreado por su posible efecto tóxicos por encima de ciertos límites (Rodríguez-Martínez y col., 2020).

Además, en el *Sargassum* se han detectado compuestos bioactivos, como flavonoides, saponinas, taninos, fenoles, alcaloides, terpenoides y glucósidos cardíacos (Oyesiku y Egunyomi, 2014).

Respecto a la composición de las especies de *Sargassum* más abundantes en el Caribe, *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*, Milledge y col. (2020) encontraron que las muestras recolectadas en las islas Turcas y Caicos (estas islas se encuentran en el Atlántico Norte entre las Bahamas y la Republica Dominicana) en 2019 mostraron un alto contenido de humedad (82–87 %) y de cenizas (34–47 % peso seco). Estas cenizas eran ricas en cloruro de sodio y la concentración de sal fue de 2,6 a 2,9% peso, así como también fue abundante el contenido de KCl, encontrándose una concentración de potasio en el intervalo de 7443-12509 mg/kg (peso seco) en las algas de estas especies. Sin embargo, el contenido de fósforo fue menor (138-222 mg P/kg peso seco). Además, se analizaron metales pesados, siendo destacable el alto contenido de As (20,94-29,76 mg/kg peso seco), lo que supone un problema medioambiental relacionado con la eliminación de este tipo de algas (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados del análisis de metales pesados del *Sargassum* pelágico encontrado en Turcos y Caicos (Milledge y col., 2020).

		<i>Sargassum natans VIII</i>	<i>Sargassum natans I</i>	<i>Sargassum fluitans</i>
Aluminio	mg kg ⁻¹ ms	16,21	21,48	28,09
Arsénico	mg kg ⁻¹ ms	20,94	29,76	26,25
Cadmio	mg kg ⁻¹ ms	0,09	0,12	0,12
Cromo	mg kg ⁻¹ ms	0,36	ND	0,43
Cobre	mg kg ⁻¹ ms	1,25	2,71	2,91
Plomo	mg kg ⁻¹ ms	0,48	0,28	0,37
Mercurio	mg kg ⁻¹ ms	ND	0,01	0,01
Zinc	mg kg ⁻¹ ms	26,49	30,88	35,64

ms: sobre base de materia seca

Por otro lado, el contenido de fenoles de estas algas fue mayor en la especie *Sargassum natans I* (6,6 g/kg peso seco) y menor en las especies *Sargassum fluitans* (3,7 g/kg peso seco) y *Sargassum natans VIII* (2,5 g/kg peso seco) (Milledge y col., 2020). Muchos de los compuestos fenólicos presentes en est tipo de algas tienen bioactividad potencialmente útil (Tanniou y col., 2013).

En relación al contenido elemental de las especies de *Sargassum natans* y *fluitans*, se ha observado que el contenido de azufre oscila entre trazas-0,40 % (Tabla 2). Los malos olores asociados con la pudrición de estas algas cuando se acumulan en las playas están asociados a la producción de sulfuro de hidrógeno mal oliente y tóxico generado a partir del azufre presente en el sargazo (Resiere y col., 2018). El contenido de C y N de las muestras varió entre 28,34-29,23% y 1,3% y 1,7%, respectivamente, estando la relación C/N dentro del intervalo de 17,40-22,14. El contenido de C y N del sargazo pelágico varía con la temporada y sitio de cosecha y esto hace que su relación C/N pueda variar de 7 a 14 en China y alrededor de 22 a 27 en el Caribe (Lopresto y col., 2022).

Tabla 2. Contenido de cenizas y composición elemental del *Sargassum* pelágico encontrado en Turcos y Caicos (Milledge y col., 2020).

	Ash	C	H	N	S	O	Relaciones elementales	
	(% ms)						C:N	C:O
<i>Sargassum natans VIII</i>	34,26	29,23	3,68	1,68	0,4	30,76	17,4	0,95
<i>Sargassum natans I</i>	35,71	28,34	3,63	1,28	0,05	31	22,14	0,91
<i>Sargassum fluitans</i>	33,63	29,23	3,78	1,57	0	31,79	18,62	0,92

ms: sobre base de materia seca

El contenido de lípidos en las especies de *Sargassum natans* y *fluitans* fue bajo (3,58-4,56%), mientras que su contenido de fibra fue alto (31,15-37,41 %), indicando que la materia orgánica de estas algas pelágicas es bastante recalcitrante (Milledge y col., 2020).

La composición química de estas especies de *Sargassum* es espacialmente homogénea, observándose escasas diferencias sólo para algunos componentes inorgánicos, tales como; contenido de cenizas, carbono elemental y metales (Vázquez-Delfín y col., 2021).

Valorización agro-ganadera

Uso agrícola de los extractos de *Sargassum*

Las algas y sus extractos se han utilizado durante siglos en agricultura para mejorar el crecimiento de las plantas y la tolerancia al estrés. Los extractos de las algas marinas promueven y mejoran los cultivos de diferentes plantas debido a su riqueza en reguladores del crecimiento tales como, los de las auxinas (IAA e IBA, ácido indol-3 acético, ácido índole-3-butírico; respectivamente), giberelinas y citoquininas, además de osmoprotector betaínas, además de oligoelementos, vitaminas, aminoácidos y antibióticos (Nabti y col., 2017).

Está bien establecido que el ácido giberélico (GA3) es responsable de la estimulación de la germinación de semillas de diferentes plantas. Esta sustancia induce hidrólisis enzimática en la capa de aleurona que rodea el endospermo. Jennings (1968) confirmó que las algas pardas, dentro de

las que se encuentra el *Sargassum*, son muy ricas en ácido giberélico, que está involucrado en la germinación de la semilla. De hecho, el ácido giberélico actúa como una señal en el proceso de germinación de las semillas mediante la activación de la amilasa genes en células de aleurona (Sun y Gubler 2004). Las fitohormonas presentes en las algas marinas estimulan el desarrollo de las raíces debido a que promueven una mayor eficiencia de los nutrientes y la absorción de agua. De este modo, el cultivo de algas marinas y su utilización tiene un enfoque económicamente exitoso en la producción agrícola (Michalak y col., 2016).

Los extractos de algas marinas estimulan varios aspectos del desarrollo de la planta. La sequía genera estrés oxidativo y aumenta la pérdida de la membrana celular en plantas de trigo estresadas que resulta en una mayor necesidad de actividades antioxidantes (enzimáticas y no enzimáticas). Efectos fisiológicos de la aplicación de algas durante la sequía en *Triticum aestivum* fueron evaluados en presencia y ausencia de diferentes extractos de algas (*Sargassum latifolium*, *Ulva lactuca* y sus mezclas). Un pretratamiento con extracto de algas condujo a una estimulación de las actividades antioxidantes y, por lo tanto, al alivio de los efectos dañinos de la sequía en la etapa vegetativa de *Triticum aestivum* (trigo). El *Sargassum* o los extractos de *Ulva* antagonizan los efectos dañinos oxidativos de sequía no solo directamente a través de la activación del sistema antioxidante (catalasa, peroxidasa y ascorbato), sino también a través del suministro de fitohormonas y micronutrientes esencial para el crecimiento del trigo (Kasim y col., 2015).

Numerosos estudios sobre la composición de fertilizantes líquidos de algas marinas demostraron que son ricas en reguladores del crecimiento vegetal como la auxina ácido indol acético (IAA), kinetina, zeatina, giberelinas, citoquininas, ácido abscísico, etileno, así como betaínas y poliaminas (Tarakhovskaya y col., 2007; Zhang y Ervin, 2008; Zodape y col., 2008). Por otro lado, Savasangari y col. (2011) concluyeron que la mejora del crecimiento de la planta de racimo de *Cyamopsis tetragonolaba* (L.) Taub. se debe a la presencia de citoquinina y magnesio, los cuales son una hormona esencial promotora del crecimiento y un constituyente principal en la biosíntesis de clorofila, respectivamente. También se observó la mejora de la germinación, el crecimiento y productividad de la berenjena mediante el uso de líquido *Sargassum wightii* fertilizante y se relacionó con la presencia de altos niveles de varias fitohormonas en este extracto (Divya y col. 2015).

Por otra parte, los extractos líquidos de algas también se han utilizado con éxito para restaurar el crecimiento de las plantas en condiciones extremas, tales como, suelos con altos valores de pH y

temperatura altas, así como en suelos con valores de pH muy bajos y bajo contenido de agua. El efecto principal de los extractos de algas marinas contra el estrés ambiental que generaron estas condiciones se debió a citoquininas, así como a los ácidos giberélico y abscísico, que ayudaron a apoyar el crecimiento de las plantas en condiciones de escasez de nutrientes y a recuperar las plantas después del daño (Arthur y col., 2013; Briceño-Domínguez y col. 2014; El Shoubaky y Salem, 2016).

Los extractos líquidos de algas no solo son empleados como bioestimulantes sino también como biofertilizantes. La presencia de cantidades adecuadas de potasio, nitrógeno, micronutrientes, ácido húmico, polisacáridos-laminarina, alginatos y las carrageninas, además de las fitohormonas que promueven el crecimiento, presentes en las algas marinas, las convierten en excelentes biofertilizantes (du Jardin, 2015). Sridhar y Rengasamy (2010) aplicaron *Sargassum wightii* (alga parda) mezclada con *Ulva lactuca* (alga verde alga marina) y observaron un aumento del crecimiento del cacahuete (*Arachis hypogaea*). También, Mathur y col. (2015) reportaron que el empleo de fertilizante líquido a base de extractos de algas marinas de *Sargassum wightii*, *Ulva lactuca* y *Enteromorpha intestinalis* mejoraron la germinación de semillas, el crecimiento y las características bioquímicas de la planta leguminosa *Glycine max*.

Las algas marinas pueden producir grandes cantidades de metabolitos secundarios, incluidos terpenos, compuestos similares a lípidos, esteroides y aromáticos, acetogeninas, productos derivados de aminoácidos, florotaninos y otras sustancias poliméricas (Nabti y col., 2017). Se han realizado numerosos estudios sobre las actividades antimicrobianas de los extractos de algas marinas y se ha demostrado que la fuerte actividad antimicrobiana de muchas algas marinas se debe a la presencia de terpenos (Peres y col., 2012). Khan y col. (2015) utilizaron extractos de diferentes especies de algas marinas como *Sargassum tenerrimum*, *Padina tetrastromatica* y *Melanothamnus afaqhusainii* para pruebas de actividad nematocida contra el nematodo *Meloidogyne javanica* (eclosión de huevos y mortalidad de larvas), produciéndose la máxima eclosión de huevos (96 %) y mortalidad de larvas (99 %).

La comercialización de extractos de algas marinas con aplicación agrícola está muy extendida. Sin embargo, los extractos comercializados de *Sargassum spp.* son mucho menos comunes, encontrándose solo la empresa china Beijing Leili Marine Bioindustry como referente. Esta empresa propone una gama de productos a base de *Sargassum* y productos locales disponibles en el Caribe o en Indonesia (Devault y col., 2021).

Compost a partir de *Sargassum*

El compostaje es un método aeróbico utilizado para descomponer materiales orgánicos fermentables, eliminando o reduciendo patógenos, reduciendo la masa de material de desecho por evaporación y emisión de CO₂ y transformando la materia orgánica en humus. El compost obtenido se puede utilizar como enmienda orgánica/acondicionador del suelo. El compostaje generalmente se realiza en instalaciones clasificadas para la protección del medio ambiente, donde se pueden recolectar y tratar fases líquidas (y a veces gases). Este proceso consta de las siguientes fases: fase mesófila, fase termófila y fase de enfriamiento, al conjunto de estas tres fases se le denomina fase bio-oxidativa. Esta fase bio-oxidativa suele durar 3-4 meses y en ella la biodegradación es muy activa, con lixiviación significativa de líquidos y liberación atmosférica (vapor de agua, CO₂, amoníaco, aerosoles, etc.). Finalmente, el material compostado se deja madurar para que se produzca la humificación de la materia orgánica, fase de maduración, durante 1-2 meses (Devault y col., 2021).

El compostaje de algas marinas puras es difícil, por tener una relación C/N inadecuada (demasiado baja), un alto contenido mineral y elevada salinidad. Por lo tanto, generalmente requiere la adición de otros residuos orgánicos, tales como, residuos vegetales, madera o paja, que actúan como material estructurante y proporcionan, además, materia orgánica carbonada (Cole y col., 2016).

Varios estudios se han realizado sobre compostaje de *Sargassum* pelágico. Brault y col. (1984) co-compostaron *Sargassum muticum* y varios tipos de residuos verdes (75-85% de algas marinas en la mezcla) y demostraron la viabilidad técnica de utilizar *Sargassum muticum* como constituyente principal para la producción de compost conforme a la norma francesa NFU 44-051 para enmiendas orgánicas. También, se probaron varios parámetros técnicos relativos a la preparación de algas marinas, como el prensado o secado parcial de las algas al 20-25% de materia seca, lo cual fue un requisito previo para alcanzar una temperatura suficiente durante la fase termófila. El lavado para reducir el contenido de sodio y la conductividad también fue eficiente, pero perjudicial para otros compuestos de interés para la fertilización (por ejemplo, potasio). El co-compostaje de *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* con residuos alimentarios y astillas de madera fue investigado por Sembera (2013), pero se utilizaron cantidades limitadas (2%) de algas marinas y el impacto fue limitado. En un estudio más reciente del 2018, los mismos autores aumentaron la incorporación de algas al 4% (que sigue siendo relativamente bajo), obteniendo compost de buena

calidad. El lavado de las algas no tuvo un impacto significativo en la salinidad, que se mantuvo en el rango inferior aceptado por el US Composting Council (Sembera y col., 2018).

Más recientemente, los varamientos masivos de sargazo en el Caribe han conllevado a la incorporación de esta alga pelágica como materia prima de los procesos de compostaje en diferentes instalaciones de compostaje. Un ejemplo de ello, puede encontrarse en Martinica, donde tres empresas (Holdex, Idex y Société Martiniquaise des Eaux) obtuvieron la autorización para incorporar las algas recolectadas en sus compost. Se tuvo que considerar la arena y el exceso de sodio, pero el co-compostaje con residuos verdes o bagazo de caña de azúcar con hasta un 10% de *Sargassum* pelágico fresco resultó ser factible, manteniendo al mismo tiempo los productos que cumplieran con las normas francesas para compost, NFU 44-051 y 44-551. Este nivel de inclusión puede parecer relativamente pequeño, para hacer frente al varamiento masivo de *Sargassum* a la costa, pero también permite una integración relativamente fácil en las unidades de compostaje existentes, que tienen que funcionar con materias primas alternativas durante los períodos en que no se producen varamientos (Devault y col., 2021).

El empleo del sargazo para la elaboración de compost está limitado por su alto contenido de arsénico. Sin embargo, un contenido moderado de *Sargassum* ($\leq 10\%$) posibilita que el compost final no tenga un contenido elevado de este metal pesado que no permita su empleo agrícola. Si bien, se debe controlar la presencia de arsénico en los lixiviados de compost y es posible que se requieran tratamientos de remediación específicos (Devault y col., 2021).

Uso para alimentación animal

Varios estudios han demostrado que el *Sargassum* contiene compuestos bioactivos y elementos químicos que podrían servir para la alimentación animal. De todos modos, es fundamental investigar su composición nutricional y componentes potencialmente dañinos para los animales y los consumidores.

El *Sargassum* pelágico fresco tiene un alto contenido de humedad lo que dificulta transporte, almacenamiento y uso. Cuando las algas se secan y transformada (molida) en harina, la humedad se reduce a 5–17 %, que está cerca de lo deseado en las dietas de los animales. El proceso de secado reduce el volumen, el riesgo de contaminación por bacterias y hongos, evita que los extractos crudos de algas se gelifiquen, lo que permite el almacenamiento durante varios años

(Badmus y col., 2019). El método de secado (por ejemplo, secado al horno, liofilizado o secado al sol) no parece afectar el contenido de proteínas y lípidos; sin embargo, podría modificar el contenido de algunos minerales, ácido ascórbico, ácidos grasos, y aminoácidos. El método de secado al sol, por ejemplo, llevó a mayores cantidades de compuestos fenólicos y manitol y menores de fucoxantina y monosacáridos que liofilización (Machado y col., 2022).

La harina de *Sargassum* tiene un bajo contenido de energía bruta 2,2-3,3 kcal/g; en comparación con otros ingredientes energéticos empleados en la alimentación animal, como cereales en grano (3,8-4,4 kcal/g), grasas (9,2-9,4 kcal/g) y aceites (9,3-9,5 kcal/g) (Santiago Rostango y col., 2017). Además, este tipo de algas no puede incluirse en dietas animales en grandes volúmenes debido a la gran cantidad de fibra, sal y minerales potencialmente tóxicos (Carrillo-Dominguez y col., 2023).

Respecto al contenido de proteína cruda en la harina de *Sargassum*, es bajo (2,2-15,4%) en comparación con el encontrado en granos secos de destilería (27%), canola (32-38%), harina de soja (44 %), harina de carne (45–55 %) y harina de pescado (64%). La proteína relativamente baja contenida en *Sargassum* limita su uso como fuente primaria de proteína en la dieta de animales monogástricos, rumiantes, y la acuicultura, ya que estas especies animales tienen mayores requisitos (por ejemplo, pescados y camarones 35-40%, pollos de engorde 17–23% y gallinas ponedoras 16–20% (Carrillo-Domínguez y col., 2023). El contenido de proteína en el *Sargassum* podría ser aumentado a través de un proceso de biorrefinería, como se ha hecho con la *Ulva ohnoi* para producir sales, polisacáridos sulfatados y biomasa enriquecida con proteínas (Magnusson y col. 2019).

A pesar del bajo contenido proteico del sargazo su calidad es buena, ya que contiene todos los aminoácidos esenciales para aves, cerdos, peces y camarones. Sin embargo, la biodisponibilidad de aminos ácidos del *Sargassum* pelágico necesita ser evaluado por algunos compuestos, tales como alcaloides, taninos y fibra dietética (Cherry y col. 2019).

Además, hay que tener en cuenta que las algas pardas tienen una fracción sustancial de nitrógeno no proteico, que varía de 12-29%. En los rumiantes, esto no representa una limitación, ya que los microorganismos en el rumen utilizan de manera eficiente el nitrógeno no proteico para aumentar la producción de proteína bacteriana, que puede constituir del 70 al 100% del nitrógeno disponible en la parte inferior del tracto digestivo de animales que consumen dietas fibrosas con bajo contenido proteico (Shimada, 2018; Bikker y col., 2020).

El contenido de extracto de éter en el *Sargassum* pelágico es bajo (0,01-4,6%), incluyéndose en esta fracción todos los compuestos liposolubles, como vitaminas, pigmentos, y ácidos grasos (Carrillo-Domínguez y col., 2023). El *Sargassum* se considera una buena fuente de vitaminas cuando está fresco, sin embargo, cuando se convierte en comida, contiene niveles bajos de tiamina (0,02 mg/100 g), niacina (1,5 mg/100 g) y riboflavina (0,3 mg/100 g), debido al proceso de secado (Yuan, 2008). La concentración de carotenoides en *Sargassum* oscila entre 0,08 a 0,13 mg/g y consiste en β -caroteno, fucoxantina, violaxantina, diatoxantina y clorofila c (Milledge y Harvey, 2016a; Corino y col., 2019). Se ha observado que el β -caroteno es un precursor de la vitamina A, con propiedades antioxidantes para varios mamíferos y especies acuáticas (Mary y col., 2021). Entre los ácidos grasos saturados el más abundante es el ácido palmítico (24-55%), mientras que entre los ácidos grasos no saturados, la presencia de eicosapentaenoico y docosahexaenoico, aún en concentraciones bajas, es de particular interés ya que suelen ser bajos en fuentes vegetales terrestres y muy importante para el ser humano y salud animal (Gammone y col., 2019). El *Sargassum* pelágico también contiene metabolitos, como taninos, cuyo contenido moderado puede ser beneficioso en las dietas animales porque ejercen poder antimicrobiano, antioxidante, antiviral y antiinflamatorio (Tamama, 2020).

La cantidad de fibra dietética soluble, compuesta de alginatos, fucoidan, ácido algínico, ácidos urónicos alginato, fucoidan urónico, sulfatos de alginato y sulfatos de fucoidano, es más alta en el *Sargassum* pelágico que la presente en la cáscara de avena, en la harina de alfalfa y en la celulosa (Carrillo-Domínguez y col., 2023). La fibra dietética soluble puede mejorar la saciedad de los animales y producir cadenas cortas ácidos grasos, pero en niveles elevados podría aumentar la viscosidad intestinal, favoreciendo la presencia de *Escherichia coli* al tiempo que disminuye la absorción de nutrientes y, por lo tanto, tiene un impacto en el rendimiento del crecimiento y la salud intestinal (Chuang y col. 2021). Por lo tanto, la inclusión del *Sargassum* en las dietas de los animales no debe superar el 10 % para monogástricos y el 30 % para rumiantes. Adiciones por debajo del 5% podrían incluso tener beneficios potenciales para ambos grupos, como se ha demostrado para otras algas pardas. Se necesitan más estudios para dilucidar la mejor cantidad de *Sargassum* en la dieta de diferentes especies animales para minimizar los efectos secundarios indeseables y obtener los máximos beneficios (Carrillo-Domínguez y col., 2023).

Por otro lado, como se ha visto en el apartado 4, la concentración de cloruro de sodio (NaCl) es alta en el *Sargassum* y por ello, la incorporación de este tipo de alga en cantidades superiores al

10% en las dietas de los animales podría afectar negativamente el metabolismo animal. Sin embargo, en el pescado, el NaCl se absorbe directamente del agua; por lo tanto, su adición como suplemento dietético suele ser ineficaz, pero si el NaCl se agrega a través de los alimentos puede proporcionar un beneficio fisiológico para algunos peces marinos cultivados en agua dulce, dando como resultado un mayor crecimiento (Carrillo-Dominguez y col., 2023).

En relación al contenido de otros minerales, se ha encontrado que algunos minerales en el *Sargassum* pelágico son suplementos dietéticos adecuados para animales, incluyendo calcio, hierro, manganeso, potasio, selenio, sodio y zinc. Sin embargo, una limitación significativa planteada para estas algas en alimentación animal es su capacidad para absorber elementos potencialmente tóxicos debido a alginatos y fucoidanos en su pared celular, que sirven como sitios de unión para iones de metal y de semi-metal (Mohammed y col., 2022). De este modo, el arsénico merece especial atención, estando limitada su concentración en los alimentos a base de algas para animales. Según la Unión Europea, las harinas y piensos de algas marinas y los materiales generados a partir de algas no deben contener más de 40 ppm de As total, mientras que los alimentos completos para animales que contienen algas no pueden tener más de 10 ppm (DOUE, 2015).

A partir de toda la información anterior, se puede indicar que la alta cantidad de biomasa de *Sargassum* pelágico que periódicamente llega a las playas en varios países, representa una oportunidad para obtener compuestos valiosos para las industrias ganadera y acuícola. Los métodos adecuados para recolectar, procesar y almacenar estas algas para preservar la calidad de los compuestos y compensar los períodos de escasez son esenciales debido a la alta variabilidad espacial y temporal en los volúmenes de deposición de estas algas en las playas. Finalmente, cabe señalar que la concentración de elementos y la proporción de compuestos encontrados en el *Sargassum* pelágico pueden ser variables entre morfotipos, en espacio y tiempo, y dependiendo de los métodos de procesamiento empleados. Por lo tanto, después de seleccionar los mejores métodos de procesamiento para elementos o compuestos específicos, los conjuntos de sargazo destinados a la nutrición animal deben probarse periódicamente para garantizar que cumplen con las normas de seguridad (Carrillo-Domínguez y col., 2023).

Valorización energética

Digestión anaerobia

Desafíos de la digestión anaeróbica del *Sargassum*

Entre los desafíos que se encuentran a la hora de valorizar la biomasa de *Sargassum* está, la variación y cosecha estacional de las floraciones, que a su vez transportan especies como tortugas marinas juveniles, peces, etc., y además atrapan cualquier residuo plástico en su paso a través del Océano Atlántico hasta llegar a las costas del Caribe. Por lo tanto, la recolección de *Sargassum* para para la digestión anaerobia, requiere la eliminación exitosa de estas partículas, lo cual no debe hacerse en alta mar. La arena y los desechos plásticos afectan el ensuciamiento y aumentan los problemas técnicos en el digestor, mientras que los organismos marinos deben eliminarse y devolverse a sus hábitats (Milledge y Harvey, 2016b).

La llegada masiva de *Sargassum* a la región del Caribe generalmente ocurre entre marzo y septiembre de cada año. Aunque se han implementado tecnología de imágenes satelitales para monitorear las floraciones de *Sargassum* a la deriva, esta biomasa no puede considerarse materia prima sostenible y constante (Gower y King, 2011; Djakoure y col., 2017). Se deben explorar técnicas de preservación del *Sargassum* para garantizar su suministro continuo durante los intervalos de escasez. Se pueden usar métodos de bajo costo, como el ensilado y el secado al sol, para preservar las algas marinas para el suministro de todo el año a un digestor, con una pérdida mínima para el potencial bioquímico de metano (BMP) (Milledge y Harvey, 2016b).

Soluciones para la digestión anaeróbica del *Sargassum*

✓ *Pretratamiento*

Para mejorar la escisión hidrolítica de la biomasa y optimizar la concentración de carbohidratos accesibles para la digestión microbiana se han introducido tecnologías antes de la digestión anaerobia (Paul y col., 2016; Gurung y col., 2012). Además, se han aplicado métodos que incluyen el pretratamiento físico, térmico, químico y biológico a las macroalgas pardas para mejorar su BMP. Se ha observado que la maceración aceleró la biometanización de *Ulva Lactuca* sin lavar al reducir el tamaño de partícula de la biomasa, mejorando así el acceso microbiano a la materia

orgánica para la digestión (Nielsen y Heiske, 2011; Bruhn y col., 2011). Al igual que la mayoría de las especies de *Sargassum*, el alga verde *Ulva Lactuca* tiene una relación C/N inferior a 20:1 y está enriquecida con azufre, sal y fibra dietética insoluble. Esta composición química inhibe el crecimiento de las bacterias metanogénicas y reduce el potencial de metano correspondiente. Bruhn y col. (2011) informaron que la maceración promovió la degradación de los componentes fibrosos en *Ulva Lactuca* y mejoró la productividad del metano en un 56%. Este método de pretratamiento también tuvo un efecto positivo en la digestibilidad de otras algas, tales como la *Gracilaria vermiculophylla* y la *Chaetomorpha linum*, pero disminuyó el BMP de *Sargassum latissima* en relación con las muestras no tratadas (Thompson y col., 2020)

Por otra parte, la *Laminaria* sp. pretratada en un batidor Hollander durante 10 min, generó 651 mL/gVS de biogás con un contenido de metano del 53%. La fracción de biogás recolectada de muestras de algas batidas fue comparable al rendimiento predicho por Design-Expert v.8, una herramienta de software estadístico utilizada para modelar las condiciones de operación del reactor para una producción óptima de biogás (Tedesco y col., 2014). Batir es más efectivo que el fresado de bolas y los pretratamientos de microondas. Mientras que la molienda de bolas de *Laminaria* sp. a un tamaño de partícula de 1-2 mm aumentó la solubilización, el proceso inhibió la hidrólisis enzimática y la acidogénesis, disminuyendo así la producción de metano en un 21-27% en relación con las algas marinas crudas. Para lograr una biometanización óptima a partir de la molienda de bolas, es necesaria una materia prima con un contenido mínimo de agua (Montingelli y col., 2016). El pretratamiento por microondas altera la composición estructural de la biomasa al romper los enlaces de hidrógeno. Esta tecnología mejora la hidrólisis microbiana de azúcares fermentables, pero tiene un efecto menor en la solubilización (Kim y col., 2013). Además, Montingelli y col. (2016) informaron que la irradiación por microondas tuvo un efecto negativo en la bioconversión de *Laminaria* spp., disminuyendo el potencial de metano en un 26%. A partir de este resultado, los autores concluyeron que las condiciones del pretratamiento con microondas son demasiado duras para la aplicación en algas, pero lo favorecen en la biomasa rica en lignocelulosa. Por el contrario, Vivekanand y col. (2012), observaron una mayor productividad de metano de *Saccharina latissima* pretratada con explosión de vapor. La recuperación óptima de metano de 268 ml / gVS se logró a 130°C y representa una mejora del 20% en relación con la muestra cruda.

El *Sargassum* pelágico en autoclave a 121°C durante 15 min, aumentó la demanda química soluble de oxígeno (DQO) en 10 veces. Con una relación de concentración de 0,09 g/L de inóculo y 2,5

g/L de *Sargassum pelágico* se logró una recuperación óptima de metano de 541 mL/gVS. Este rendimiento fue un 60% mayor que la muestra no tratada. Sin embargo, a concentraciones más altas de *Sargassum pelágico* la formación de metano fue suprimida por la acumulación de metabolitos inhibidores solubles (Costa y col., 2015). El lavado y secado de la biomasa antes del pretratamiento térmico reduce la concentración de compuestos recalcitrantes (sal y metales pesados) producidos y mejora el BMP (Bruhn y col., 2011).

Se ha demostrado que el pretratamiento fúngico es más efectivo que el pretratamiento enzimático para mejorar la producción de biometano de algas marinas. Tapia-Tussell y col. (2018) encontraron que la aplicación de la cepa de hongos Bm-2 (*Trametes hirsuta*) mejoró la biodegradabilidad lignocelulósica y hemicelulósica en consorcios de macroalgas muestreados en México. Después de la incubación durante 29 días, el metano recogido de este proceso biológico fue 104 mL/gVS o un 28% más alto que la muestra no tratada. Lo más importante es que el pretratamiento fúngico mostró una tolerancia superior al contenido de 35,5% de cenizas, 19% fenólico y 78 g / L de metal alcalino de esta biomasa marina. Por el contrario, el pretratamiento enzimático alcanzó solo 86 mL/gVS de contenido de metano.

✓ *Co-digestión*

La alta proporción C/N de algunas especies de macroalgas marrones como *Saccharina latissima* y *Laminaria digitata* apoya su monodigestión para la producción de biogás (Tabassum y col., 2016). Sin embargo, la baja relación C/N y el alto contenido de solución salina, fenol y fibra celulósica en especies como el *Sargassum* representan un desafío para la digestión anaerobia, ya que estas propiedades inhiben la degradación microbiana y mitigan la formación de biogás (Bird y col., 1990). Además, la rica fracción de nitrógeno de este sustrato promueve la formación de amoníaco que causa inestabilidad del digester y la consiguiente falla del reactor (Akunna y Hierholtzer, 2016). Para diluir la alta concentración de sal, reducir la toxicidad del digester y aumentar el equilibrio de nutrientes C/N para una biometanación óptima, las algas marinas pueden ser co-digeridas con otros tipos de biomasa (Gurung y col., 2012). En este contexto, el estudio de la aplicación de glicerol y de aceite de fritura de desecho para ajustar la relación C/N del *Sargassum*, mejoró la bioconversión del sustrato en metano en un 56 y 46%, respectivamente (Oliveira y col., 2015). Yen y Brune (2007) encontraron que la incorporación de un 50% de papel usado en lodos de algas optimizó la relación C/N para la co-digestión a 20-25:1. Además, el papel aumentó la

actividad de la celulasa en el digestor y la concentración de nutrientes necesarios para el crecimiento de los metanógenos. Como tal, se recuperó un rendimiento óptimo diario de metano de 1607 ml / L con una mezcla de materia prima de 60% de papel usado a 40% de lodo de algas a un OLR 5 gVS / L d. El suero de látex y la paja de trigo también son buenos co-sustratos para las macroalgas. (Pake y col., 2015; Karray y col., 2017)

Otro estudio sobre la digestión anaerobia del *Sargassum* es el de Milledge y Harvey (2016b), en el cual se indica que tanto la gasificación como la digestión anaeróbica son métodos prometedores para explotar la bioenergía a partir de esta biomasa (Singh y Gu, 2010). También, un estudio reciente que analizó cuatro métodos de producción de bioenergía de microalgas encontró que la digestión anaeróbica produce más energía neta que la gasificación supercrítica, esta última requiere un mayor aporte de energía y tiene un retorno negativo de la inversión energética (Milledge y Heaven 2014; Ventura y col., 2013). Esta conclusión está respaldada por un estudio relacionado que ha demostrado que la digestión anaeróbica de "residuos de algas" puede tener un mayor retorno neto de energía y emisiones de GHG (gases de efecto invernadero) mucho más bajas que la gasificación (Delrue y col., 2012).

El potencial de biometano de *Sargassum pelágico* es bajo siendo de aproximado $0.13 \text{ L} \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{ VS}$ (Milledge y Harvey, 2016b; Yende y col., 2014; Jard y col., 2013) y considerablemente por debajo de lo típico de otras algas marinas a $0,2 \text{ L} \cdot \text{CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ VS}$ aproximadamente un 30% (Rocca y col., 2015; Lewis y col., 2012; Langlios y col., 2012).

Obtención de biodiesel

Las algas marinas no se han explorado tradicionalmente como candidatas para la producción de biodiesel debido a su bajo contenido de lípidos. Sin embargo, en un sentido más novedoso, la producción de biodiesel puede explorarse mediante la fermentación de algas con organismos altamente oleaginosos que pueden consumir los azúcares simples disponibles mediante métodos de pretratamiento y convertirlos en ácidos grasos y lípidos. Los organismos altamente oleaginoso más utilizados son las levaduras, debido a su mayor tasa de crecimiento y capacidad de valorizar los hidrolizados de desechos lignocelulósicos. Entre este tipo de levaduras se encuentra *Yarrowia lipolytica* tienen ventajas en comparación con el alto potencial de lipogénesis innato (Orozco-González y col., 2022).

Gordillo Sierra y col. (2022) pretrataron biomasa de sargazo, recolectada en la costa de Quintana Roo (México), vía AEA (Autohidrólisis de Extracción de Alginato) y sacarificación enzimática vía Fermentación en Estado Sólido fúngico, liberando 7 g/L de azúcares totales. La mezcla de azúcares se fermentó usando *Yarrowia lipolytica*, dando como resultado un contenido de lípidos totales de 0,35 g/L. También, determinaron la especiación de ácidos grasos de los lípidos para evaluar la idoneidad para la producción de biodiesel, encontrando que las especies más predominantes fueron los ácidos grasos C16:0 (palmítico), C18:0 (esteárico), C18:1 (oleico) y C18:2 (linoleico), lo que hace que estas reservas de lípidos sean la materia prima ideal para la síntesis de biodiésel debido a su similitud con los aceites de soja (Jafarihaghghi et al., 2020). Esto demuestra que una conversión de los azúcares derivados del sargazo en lípidos puede ser una fuente de combustible.

Obtención de bioalcoholes

El principal desafío para transformar el *Sargassum* en bioetanol es convertir la variedad de carbohidratos en azúcares fermentables que no solo incluyen glucosa, sino también otras hexosas (galactosa, manosa) y pentosas (xilosa). Se necesita un tratamiento previo para deconstruir la biomasa, asegurando al mismo tiempo la liberación de polisacáridos. Según Harun y col. (2013) esto se puede lograr mediante procesos hidrotermales, explosión de vapor, oxidación húmeda y simplemente molienda. El siguiente paso es convertir los polisacáridos en monosacáridos, lo que se puede lograr mediante procesos termoquímicos (ácido diluido o álcali) y utilizando temperaturas suaves (50-100 ° C), evitando la formación de compuestos inhibitorios, como furfurales. Una alternativa es la sacarificación enzimática; Sin embargo, la eficiencia es subóptima debido a su baja especificidad, ya que algunas enzimas están diseñadas para materiales lignocelulósicos. En un estudio de Torres y col. (2019) las enzimas obtenidas de fuentes marinas, como el alginato liasas y laminarasas, pueden usarse para la sacarificación, pero tienen bajas eficiencias. Después de obtener los monosacáridos, la fermentación se puede llevar a cabo utilizando *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia stipitis* o *Pachysolen tannophilus*. Para el alga parda *Laminaria digitata*, hidrolizada con ácido y enzimas después de la fermentación con *S. cerevisiae*, el rendimiento de bioetanol alcanzó el 94% según Kosta y col. (2017), mientras que las especies

de *Sargassum* tuvieron un rendimiento del 65-85% después del pretratamiento con ácido diluido en un estudio de Borines y col. (2013). Actualmente, no hay informes que desaconsejen los procesos de fermentación con *Sargassum* para la producción de bioetanol. El desafío será lograr un mayor grado de conversión de hidrólisis de polisacáridos a monosacáridos, y encontrar, o incluso diseñar mediante ingeniería metabólica, levaduras más flexibles que utilicen glucosa y los otros azúcares que se encuentran en los hidrolizados.

Combustión

La combustión es un proceso termoquímico empleado para la valorización energética de los residuos. Otros procesos termoquímicos son la gasificación, la pirolisis y la licuefacción. En la tabla 3 se muestran las principales características de estos procesos.

Tabla. 3: Principales características del proceso termoquímicos de conversión.

Fuente: Tobio-Perez y col. (2023)

Procesos	Temperatura(°C)	Presión (MPa)	Secado	Producto de energía primaria
Combustión	700-400	> 0,1	Necesario	Calorífica
Gasificación	500-1300	> 0,1	Necesario	Gas de síntesis
Pirolisis	380-530	0,1-0,5	Necesario	Aceite de pirolisis
Licuefacción	250-330	5-20	No requerido	Aceite de licuefacción

La combustión directa ha sido el principal método para obtener energía a partir de biomasa seca (Demirbas y col., 2010). La bioenergía mundial producida actualmente por combustión directa es de alrededor del 95% (Abbas y col., 2020). Sin embargo, la combustión de macroalgas no ha sido ampliamente explotada. Existen diferencias considerables entre la combustión de macroalgas y la de la biomasa tradicional debido a su estructura y sus características físicas y químicas, que están

influenciadas por sus diferentes entornos de vida. El contenido de humedad de la biomasa puede reducir el calor disponible en comparación con la biomasa seca en un 20% (Demirbas, 2010). Por otro lado, el alto contenido de cenizas y su composición química causan corrosión en las calderas y emisiones considerables (Milledge y Harvey, 2018; Milledge y Harvey, 2016). Bruhn y col., (2011) notaron que el alto contenido de cenizas y álcalis es el principal desafío en la combustión directa de la macroalga *Ulva lactuca*. Estos factores limitan técnicamente la combustión directa para explotar el *Sargassum* con fines energéticos (Smith y Ross, 2016). Wang y col. (2009) evaluaron las propiedades de combustión de dos macroalgas marinas, el clatrato de *Enteromorpha* y el *Sargassum natans* con diferentes resultados y condiciones. El análisis comparativo mostró que las macroalgas en estudio tienen un alto contenido de cenizas. La eficiencia de la combustión de biomasa con bajo poder calorífico y alto contenido de cenizas es la principal ventaja de los reactores de lecho fluidizado. Las temperaturas de ignición (IT) de ambas macroalgas son bajas en comparación con la biomasa terrestre, pero el *Sargassum natans* tiene una temperatura de ignición de 4 °C más alta que el clatrato de E. La temperatura de deformación inicial (IDT) de *Sargassum natans* es de 721°C, que es inferior a la biomasa leñosa. Su temperatura de fusión es baja debido a los metales alcalinos en la ceniza. El alto contenido de K, Na y Mg de las macroalgas puede causar problemas de ensuciamiento durante la combustión. En la Tabla 4 se muestra las condiciones de proceso y los principales resultados de la combustión directa de la especie de *Sargassum natans*.

Tabla 4. Combustión directa de la especie de *Sargassum natans* (Tobio-Perez y col., 2022)

Biomass	Condiciones de operación		Principales resultados
<i>Sargassum natans</i>	Combustión directa	Muestras: 17mg	IT: 242°C
		Tamaño de partícula <0.18 mm	IDT: 721°C
		Caudal de aire: 100mL/min	Contenido de ceniza: 29,09
		Temperatura: 1200°C	K: 17,2%
		Velocidad de calentamiento: 200°C/min	Na: 11,78%
			Mg: 4,45%

IT: temperaturas de ignición; IDT: temperatura de deformación inicial.

Gasificación

La gasificación es el proceso termoquímico de oxidación parcial a través del cual la biomasa se convierte en un gas combustible por descomposición térmica a altas temperaturas (Gopirajan y col., 2021). Como productos fundamentales del proceso, se obtienen diferentes gases, alquitrán y mezclas carbonizadas. La fase gaseosa se puede utilizar para la combustión en motores, los alquitranes son la base de diversos productos químicos y carbón activado que se pueden obtener de la fase sólida y tienen múltiples usos industriales.

Las investigaciones sobre la gasificación de combustibles carbonosos se han centrado tradicionalmente en las reacciones entre combustibles sólidos y reactivos gaseosos (Pattar y Gowreesh, 2017). Sin embargo, otras reacciones han atraído menos atención en el pasado, ya que son relativamente menos importantes en la gasificación de carbón y carbón, como la reacción de compuestos de alquitrán. El alquitrán puede definirse como una mezcla de hidrocarburos condensables, incluidos los compuestos aromáticos con hasta cinco anillos, así como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), pero desde 1998, la Agencia Internacional de la

Energía (AIE), la Dirección General de Energía de la Comisión Europea (DG XVII) y el Departamento de Energía de los Estados Unidos han acordado definir los alquitranes como todos los hidrocarburos con un peso molecular superior al benceno (Valderrama y col., 2018).

En la tabla 5 se muestran los resultados de la gasificación y co-gasificación del *Sargassum horneri*

Tabla. 5. Proceso de gasificación del *Sargassum horneri* (Tobio-Perez y col., 2022)

Biomasa		Condiciones de operación		Principales resultados	
<i>Sargassum horneri</i>	Gasificación de vapor	Gasificador tubular de caída libre		Ea: 97,12-122,10 KJ/mol	
				30% H ₂ O-N ₂	Composición del gas producido
				Tasa de flujo: 100mL/min	H ₂ : 39,58 mL/g
				Velocidad de calentamiento: 15°C/min	CO: 42-8 mL/g
				Temperatura: 750-900°C	CO ₂ : 11-31mL/g
				Tiempo de reacción: 2h	CH ₄ : 12,5 mL/g
<i>Sargassum horneri</i>	Co-gasificación	Reactor de lecho fijo		Composición del gas producido:	
				Caudal de agua:	H ₂ : 4-31 mmol/g
				0.09cm ³ /min	CO: 1-3,5mmol/g
				Velocidad de calentamiento: 20°C/min	CO ₂ : 7-17.5mL/g
				Temperatura: 650-750°C	CH ₄ : <2 mmol/g
				Tiempo de reacción: 2h	

Ea: Energía de activación.

Aunque se han realizado algunos estudios sobre el uso de algas como materia prima en los procesos de gasificación, estos son todavía limitados y existen pocos informes del uso de biomasa de *Sargassum*. Li y col. (2019) estudiaron las propiedades y cinéticas de gasificación de vapor, el rendimiento de los productos y la composición del gas de síntesis derivados del *Sargassum horneri* y dos biomásas lignocelulósicas. Se aplicaron tres modelos cinéticos para describir la cinética de reacción a diferentes temperaturas (750, 800, 850 y 900 °C). La energía de activación de gasificación (Ea) del biocarbón de *Sargassum horneri* varió en el rango de 97,12-122,10 kJ/mol y fue más alta que los valores reportados para las otras biomásas. Estos resultados pueden ser

consecuencia de la diferencia de componentes entre macroalgas y biomasa lignocelulósica. El *Sargassum horneri* no mostró el mayor rendimiento en la formación de productos gaseosos, un comportamiento atribuido al alto contenido de cenizas de la biomasa de *Sargassum*. Los autores sugirieron que el alto contenido de cenizas cubre la superficie de carbono, reduciendo el área de contacto entre el agente de vapor y la superficie del carbono fijado, lo que causa una disminución en la intensidad de la reacción. Para *Sargassum horneri*, cuando la temperatura aumentó de 750 a 900 °C, la fracción volumétrica de H₂ y CO₂ aumentó mientras que el CO y el CH₄ disminuyeron. Se demostró que un aumento en la temperatura de gasificación tiene un efecto significativo en la velocidad de cambio de gas de agua y las reacciones de reformado de vapor metano.

También, Kaewpanha y col., (2014) realizaron un estudio sobre la cogasificación por vapor de *Sargassum horneri* y biomasa terrestre. Los resultados mostraron que el mayor rendimiento de producción de gas se obtuvo cuando se utilizó biomasa de *Sargassum*. Los autores atribuyen este resultado a las diferencias en la composición química del tipo de biomasa utilizada. *Sargassum horneri* tiene un mayor contenido de cenizas (13,5%) y un gran número de especies alcalinas y alcalinotérreas en relación con la biomasa terrestre (0,6-2%). Esto sugiere que las especies alcalinas y alcalinotérreas actúan como catalizadores en la co-gasificación del vapor para producir gas rico en hidrógeno. Además, las especies alcalinas y alcalinotérreas como K y Ca juegan un papel clave en la formación de sitios activos para la reacción de gasificación de carbono superficial. Esto puede reducir la producción de alquitrán, deteniendo inicialmente la formación de alquitrán o catalizando la descomposición del alquitrán y disminuyendo la formación de carbón. Por lo tanto, los resultados de la co-gasificación mostraron mejoras en la producción de gas para biomasa terrestre cuando se agregó biomasa de *Sargassum*.

Por otro lado, el ensuciamiento, la deposición, la corrosión y la aglomeración de partículas son los principales problemas operativos, no solo en la combustión, sino también en los procesos de gasificación industrial. He y col. (2020) evaluaron el comportamiento de las aglomeraciones de ceniza de dos especies de macroalgas (una especie marina y otra de agua dulce) durante su combustión o gasificación de vapor, en un reactor de lecho fijo a 900 °C y diferentes tiempos de reacción. Los autores encontraron que, durante la gasificación de vapor de macroalgas marinas, se forman más aglomerados en comparación con la combustión, y la fracción de masa de Na y K en los aglomerados también es mayor. Los autores sugirieron que las especies de macroalgas marinas

podrían ser más adecuadas como materia prima en reactores de lecho fluidizado, especialmente en procesos de combustión. Por el contrario, no recomendaron el uso de especies de macroalgas de agua dulce, ya que forman grandes aglomerados tanto en combustión como en gasificación de vapor. Una alternativa podría ser la co-combustión o la co-gasificación, ya que la adición de materia prima con altos niveles de Ca y pocos elementos formadores de cenizas puede mitigar la formación de aglomerados.

Para la eliminación de las especies alcalinas y alcalinotérreas presentes en el *Sargassum* y que dificultan el rendimiento de su gasificación, Lane y col. (2018) estudiaron el efecto del pretratamiento con carbonización hidrotermal (HTC), sobre el comportamiento de combustión y gasificación de macroalgas, con énfasis en la devolatilización y la reactividad del carbón. Los autores encontraron que HTC causa una disminución en la liberación de volátiles y un aumento en el rendimiento de carbón durante la devolatilización. Los resultados mostraron que los componentes carbonizados de las macroalgas se volvieron menos reactivos después de HTC. Esto demuestra que el tratamiento HTC elimina los metales alcalinos, al menos parcialmente. La energía de activación fue de 282 kJ/mol, un 52% mayor en comparación con la biomasa no tratada. También, Guo y col. (2017) evaluaron el comportamiento de gasificación de carbón de macroalgas secas alimentadas y no tratadas. Las diferencias entre los valores notificados para la biomasa seca alimentada y la biomasa no tratada fueron menores, en lo que respecta a HTC. Esto indica que HTC podría tener un mayor impacto en la reactividad del carbón que el secado de estas algas.

Por otro lado, el proceso de gasificación requiere biomasa seca y la biomasa de *Sargassum* tiene un alto contenido de humedad. Sin embargo, lograr la gasificación de macroalgas utilizando biomasa húmeda podría ser económica y energéticamente más atractivo que el proceso de gasificación tradicional.

En la gasificación de agua supercrítica (SCWG), la biomasa con alto contenido de humedad (más del 50%) se gasifica en presencia de vapor de agua supercrítico (22,1 MPa, 374 ° C) (Pandey y col., 2019). El agua en estas condiciones tiene dos funciones en la reacción, el reactivo y el catalizador. Cherad y col., (2013) realizaron un estudio sobre el SCWG de cuatro especies de macroalgas con composiciones químicas similares a *Sargassum muticum*. Los autores encontraron que se obtienen altas eficiencias de gasificación (92%) cuando se utiliza un catalizador (Ru/Al₂O₃), con un aumento del 30% del rendimiento de gases inflamables en el producto. Sinag y col. (2011)

obtuvieron entre 12 y 13 g de H₂ por kilogramo de algas por gasificación de agua supercrítica en una autoclave discontinua a 500 °C y un tiempo de residencia de 60 min. Los autores no declararon el porcentaje de conversión de carbono o las eficiencias de gasificación y no se refirieron al uso de catalizadores. Onwudili y col. (2013) informaron de los análisis de composición de productos del SCWG catalizado y no catalizado de dos microalgas y una macroalga, encontrando que las macroalgas (ricas en carbohidratos) producían más hidrógeno que las microalgas, destacando el potencial de la gasificación hidrotermal de las macroalgas para la producción de hidrógeno y metano. Sin embargo, no hay estudios concretos sobre las especies de *Sargassum* (*Sargassum natans* y *Sargassum fluitants*) que afectan el aérea del mar Caribe, por lo que el camino a seguir aún es largo.

Pirólisis

El bio-oil se obtiene de la conversión termoquímica de la biomasa, ya sea por pirólisis o licuefacción. A diferencia de la combustión o la gasificación, la pirólisis tiene lugar en ausencia de oxígeno para producir gases no condensables, bioaceite y biochar (Álvarez y col., 2019).

El rendimiento de cada producto depende de varios factores (composición y tipo de biomasa, temperatura y tiempo de pirólisis). La pirólisis lenta, la pirólisis rápida y la pirólisis de flash son las tres variantes convencionales de este proceso, que se distinguen por las condiciones de operación en las que se llevan a cabo, como la temperatura de pirólisis, el tiempo de pirólisis y la velocidad de calentamiento. La pirólisis lenta tiene lugar a temperaturas moderadas (550-950°C), velocidades de calentamiento inferiores a 60°C/min y largos tiempos de pirólisis (> 5 min) para generar biochar como producto principal (Yu y col., 2017 Lee y col., 2020). Para promover la formación de bioaceites, la pirólisis rápida se utiliza a altas temperaturas (850-1250°C), velocidades de calentamiento superiores a 60°C/min y tiempos que no superan los 10 s (Tripathi y col., 2016). Una forma de intensificar la pirólisis rápida es con un rango de temperatura similar pero a velocidades de calentamiento más altas (> 1000 °C/min) y un tiempo de residencia de menos de 2 s este sería el proceso de pirólisis de flash. También, se ha reportado pirólisis intermedia que tiene lugar entre las condiciones de pirólisis lenta y rápida. Del mismo modo, la torrefacción se señala como otra forma de pirólisis conocida como pirólisis leve, que ocurre a temperaturas más

bajas que la pirólisis lenta. Lee y col. (2020) han publicado recientemente una revisión sobre pirólisis convencional y avanzada de macroalgas y microalgas para la producción de biochar, bio-oil y syngas. Los autores encontraron que la conversión termoquímica de la biomasa de algas por pirólisis ha sido ampliamente tratada. Sin embargo, los resultados mostraron que hay más estudios publicados sobre microalgas en comparación con macroalgas. Los autores citaron 23 estudios sobre pirólisis de más de 30 especies de macroalgas, pero solo 3 pertenecientes al género *Sargassum* (6%). Esto implica que, en la literatura, hay estudios limitados sobre la pirólisis del *Sargassum*. La Tabla 6 resume varias especies de *Sargassum* que se han utilizado en la pirólisis, las condiciones de operación del proceso y los rendimientos del producto.

Tabla 6. Pirolisis de varias especies de *Sargassum* (Tobio-Perez y col., 2022)

Especies de <i>Sargassum</i>	Condiciones de operación			Bio-carbón (%)	Bio-aceite (%)	Gas (%)	Energía activación
	T (°C)	HR (C/min)	PS (mm)				
<i>Sargassum nd</i>	450	-	1-2	49,7	-		-
<i>Sargassum muticum</i>	400	-	-	67,7	11,3	16,5	-
<i>Sargassum natans</i>	400-660	-	<0,25	47-53	28-38	15-24	-
<i>Sargassum horneri</i>	40-800	3-4	-	48-60	-	-	-
<i>Sargassum horneri</i>	400-600	3-5	0,5-0,9	38-51	13-26	25-48	-
<i>Sargassum fusiforme</i>	250-700	7	-	32,8	.	-	-
<i>Sargassum tenerimum</i>	300-450	10	-	33-38	40-43	21-23	-
<i>Sargassum nd</i>	400-700	10	3-4	31-40	19-48	24-28	
<i>Sargassum spp</i>	40-900	10-25	1-2	-	-	-	35-640
<i>Sargassum pallidum</i>	800	10-50	-	-	-	-	203-204
<i>Sargassum thunbergii</i>	800	10-50	0,12	-	-	-	185-199
<i>Sargassum sp</i>	30-800	5-20	0,4-15	44-75	20-37	4-19	183-526
<i>Sargassum polycystum</i>	25-1000	5-40	<0,5	-	6		4-19

T: Temperatura, HR: velocidad de calentamiento, PS: tamaño de partícula

La pirólisis rápida del *clatrato de Enteromorpha* y *Sargassum natans* fue investigada por Roberts y col., (2015). Estos autores encontraron que el rendimiento máximo del bioaceite de *Sargassum natans* se obtuvo a 500 °C (37,7 %) (Tabla 6). El *Sargassum horneri* también fue sometido a pirólisis rápida por Li y col. (2020), realizando este proceso en cuatro etapas en la descomposición térmica de la biomasa: predeshidratación (30-200°C), pirólisis de precalentamiento (200-230°C), craqueo térmico (230-500°C) y descomposición lenta de residuos (> 500°C). El rendimiento máximo del biochar (59,9%) se obtuvo a 700°C. Los autores no informaron el rendimiento asociado con el producto gaseoso y el bio-aceite obtenido. Además, Wei y col. (2019) desarrollaron pirólisis de *Sargassum horneri* a diferentes temperaturas (400-600°C) y obtuvieron un rendimiento medio de 43,31% de biochar, 19,74% de bio-oil y de 36,96% de gas. También, en un estudio de Biwas y col. (2017) utilizaron *Sargassum tenerrimum* en un reactor de lecho fijo a diferentes temperaturas (de 300 a 450 C), siendo el rendimiento máximo de bio-aceite fue del 43,4%, obtenido a 450 °C.

Como se muestra en la Tabla 6, la biomasa de *Sargassum* generalmente produce un alto contenido de biochar por unidad de masa (31-75%) en comparación con el biochar obtenido de otra biomasa lignocelulósica (28-32%) (Wang y col., 2013). En comparación con el biochar lignocelulósico que puede exceder los 30 MJ/kg en su poder calorífico (HHV) (Basu, 2010), el residuo sólido de la pirólisis de *Sargassum* tiene un HHV bajo (< 18%). Se debe a su composición química. El biochar de *Sargassum* tiene un bajo contenido de C (< 30%) y es particularmente rico en nutrientes (Kositkanawuth y col., 2017). Estas características hacen que el biochar sea potencialmente atractivo para ser utilizado como sustrato en aplicaciones agrícolas.

Por otra parte, Milledge y col. (2015) aplicaron pirólisis lenta a *Sargassum muticum* a 400 °C y obtuvieron 67,6% de biochar y 11,3% de bioaceite (Tabla 6). Los valores de HHV de ambos productos fueron similares y superiores a 15 MJ/kg. También, Li y col. (2012) obtuvieron bio-oil de la pirólisis de *Sargassum thunbergii* a 800°C con un HHV casi el doble que el reportado por Milledge y col. (2015). Además, otro aspecto que influye en la diferencia entre los dos valores de HHV es la temperatura de pirólisis y estos mismos autores (Li y col., 2012) descubrieron que la variación en la temperatura de pirólisis influye en el valor calorífico del bioaceite obtenido para las mismas especies de macroalgas. A medida que aumenta la temperatura de pirólisis (de 300 a 700°C), el HHV del bioaceite aumenta de 19,19 a 21,57 MJ/kg. Sin embargo, las condiciones de

trabajo óptimas no corresponden necesariamente al bioaceite con el mayor valor calorífico. Los autores obtuvieron el rendimiento máximo de bio-aceite (59,1%) a 500°C con 21,25 MJ/kg. Se identificaron varias especies de macroalgas, incluyendo especies de sargazo, con un poder calorífico entre 15 y 37 MJ/kg (Kositkanawuth y col, 2017; Li y col., 2012; Hu y col., 2013)

El alto contenido de oxígeno del aceite es un desafío asociado con el uso de macroalgas como materia prima de pirólisis, lo que resulta en un bajo poder calorífico. De esta manera, Kositkanawuth y col. (2017) propusieron la copirólisis del *Sargassum* (las especies no fueron descritas por los autores) y el poliestireno como una fuente potencial de energía renovable para mejorar la calidad del petróleo. Inicialmente, la biomasa de *Sargassum* se secaba al sol durante 24 h, luego se colocaba en un horno a 100 °C, hasta lograr un contenido de humedad inferior al 5%. Los autores determinaron que el mayor rendimiento de bio-aceite se obtuvo a 600°C. Luego, se desarrolló un estudio de copirólisis a la temperatura óptima para varias mezclas de *Sargassum* y poliestireno. La cantidad de bio-aceite se incrementó del 3% (pirólisis de *Sargassum*) al 29% (copirólisis de 67% de *Sargassum* y 33% de poliestireno). Disminuyeron la cantidad de oxígeno en el bio-aceite de 9 a 0,3% y aumentaron el contenido de carbono de 74,4 a 89,3%.

Por otro lado, la presencia de agua influye en la calidad del bio-aceite pirolítico. El alto contenido de agua en el bio-aceite provoca la reducción de su valor calorífico. Sin embargo, Hu col. (2013) afirmaron que el valor calorífico del bioaceite de algas verde azuladas (31,9 MJ/kg) es mayor que el del bio-aceite de la pirólisis de materiales de celulosa (19,2-22,3 MJ/kg). Aunque no hay informes específicos sobre el contenido de agua en el bio-aceite de *Sargassum*, se reportan valores entre 14 y 32% para otras especies de macroalgas (Aboulkas y col. 2017; Hu y col., 2013).

Utilizando el método de cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC/MS), es posible determinar los compuestos orgánicos presentes en el bio-aceite. Los compuestos identificados, según las diferencias en su estructura química, se pueden clasificar en grupos: cetonas, hidrocarburos, compuestos fenólicos, furanos, compuestos que contienen nitrógeno, ácidos y otros (éteres, aldehídos, etc.). Biswas col., (2017) identificaron que en el bio-aceite de *Sargassum tenerrimum*, la presencia de compuestos del grupo de fenoles es mayoritaria (23,6%), seguida de ésteres (13,9%) y compuestos que contienen nitrógeno (10,1%). Roberts y col. (2015) obtuvieron que el bio-aceite de *Sargassum natans* contenía más esteroides y compuestos alcohólicos, mientras que el contenido de hidrocarburos, ácidos carboxílicos y sus derivados era menor, en comparación

con *E. clatrato*. Estos autores también reportaron porcentajes más altos de compuestos ácidos y cetonas (18,95 y 12,77, respectivamente) en *Sargassum natans*, y los compuestos fenólicos no superaron el 2% para esta especie de *Sargassum*. Li y col. (2020) identificaron que los compuestos nitrogenados predominan en el bio-aceite pirolítico de *Sargassum horneri* (30-45%), señalando que la presencia de compuestos de los grupos furano y alcano (< 5%) son menores que el resto. Por lo tanto, el análisis (cuantitativo y cualitativo) de los compuestos presentes en los bio-aceites pirolíticos de *Sargassum* y otras macroalgas depende de la especie, el tipo de pirólisis y las condiciones de operación, y la influencia de la temperatura de pirólisis en la distribución de los componentes del bio-aceite está bien referenciada.

También, se ha investigado la cinética de la pirólisis del *Sargassum*. Ali y Bahadar (2017) estudiaron la cinética de la pirólisis de *Sargassum* pelágico mediante análisis termogravimétrico (TGA), después del secado al aire de la biomasa. De acuerdo con su análisis cinético, la pirólisis de *Sargassum* pelágico puede describirse cinéticamente como reacciones paralelas independientes de cinco correspondientes a cinco pseudocomponentes (agua, hemicelulosa, celulosa, lignina/proteína y biochar). La celulosa y la hemicelulosa tuvieron la tasa de degradación más rápida durante la pirólisis, a diferencia de la lignina y la proteína, que mostraron la tasa más lenta. Por lo tanto, la lignina y la proteína controlan principalmente la tasa de descomposición pirolítica de *Sargassum pelágico*. Los autores encontraron que la energía de activación aparente de la pirólisis aumenta exponencialmente cuando la degradación térmica aumenta del 10 al 90%.

Por otra parte, Díaz-Vázquez y col. (2015) estudiaron la efectividad de diferentes tratamientos de desmineralización de la biomasa de *Sargassum* (una mezcla de *Sargassum fuitans*, *Sargassum natans* y *Sargassum flipendula*). El tratamiento con ácido nítrico logró la mayor reducción en el contenido de cenizas (de 27,46 a 0,99%). Sin embargo, los autores concluyeron que la desmineralización con ácido cítrico es más efectiva porque reduce el contenido de cenizas hasta en un 7% sin afectar la composición orgánica y la estructura de la biomasa. La biomasa tratada con ácido cítrico resultó en una disminución del 8% en el contenido de humedad y en un aumento de más del 10% en volátiles. El contenido fijo de carbono después de la desmineralización también aumentó en comparación con la biomasa no tratada. En este contexto, Ross y col. (2009) utilizaron agua nano Pura y una solución de ácido clorhídrico como pretratamiento de desmineralización para tres especies de macroalgas pardas. El tratamiento de desmineralización con ácido clorhídrico

fue más efectivo ya que logró una mayor reducción en el contenido de metales y un aumento en el valor calorífico de los productos de pirólisis.

Licuefacción hidrotermal

La licuefacción de biomasa sólida en combustibles líquidos también se puede hacer por proceso hidrotermal. La licuefacción hidrotermal (HTL) es un proceso prometedor para la producción de biocombustibles a partir de biomasa. Utiliza menos energía para producir biocombustibles en comparación con otras técnicas de producción de biocombustibles. La técnica HTL es la ruta de conversión de biomasa húmeda a bio-aceite en condiciones subcríticas (200-380°C y 4-28 MPa durante 5-120 min) (Ross y col., 2009; Galadima y Muraza, 2018.) A través de la HTL se puede obtener varios subproductos como bio-carbón, bio-oil, gas de síntesis, productos químicos y fertilizantes (Tobio-Perez y col., 2022).

El hidrochar o bio-carbón es una sustancia sólida que es estable, hidrófoba y friable, con un valor de combustible similar al carbón. El hidrochar ofrece muchas aplicaciones basadas en sus propiedades, incluyendo combustible sólido, materia prima de gas de síntesis, adsorbente, precursor de catalizador, enmienda del suelo, secuestro de carbono, aditivos de digestión anaeróbica y compostaje, y material para el almacenamiento de energía electroquímica. El hidrochar tiene el potencial de reemplazar el carbón en las centrales eléctricas (Rustamaji y col., 2022)

Además, Gollakota y col. (2018) consideran que la baja temperatura de funcionamiento, la eficiencia energética relativamente alta, así como la baja generación de alquitranes son parámetros que deberían llamar la atención de los investigadores sobre el proceso de licuefacción. El uso de biomasa húmeda como materia prima y agua como disolvente son las principales ventajas del proceso HTL en comparación con otras técnicas de conversión. Ross y col., (2008) informaron que las tecnologías de conversión más apropiadas para las macroalgas son aquellas basadas en procesos hidrotermales.

Se han encontrado estudios centrados en la producción de biocombustibles a partir de HTL de biomasa de algas (Anastasakis y Ross, 2011; Tian y col., 2014). Sin embargo, las publicaciones

sobre HTL de *Sargassum* siguen siendo limitadas en comparación con otras macroalgas. Se ha informado de biomasa de *Sargassum* pelágico desmineralizada y no desmineralizada para la producción de bio-oil por HTL (Díaz y col., 2015). El proceso se llevó a cabo a 350°C y altas presiones (5-21 MPa) durante 60 min como se detalla. El HTL de *Sargassum* no tratado y tratado con ácido cítrico dio como resultado rendimientos de bio-aceite de 18,4 y 22,2% (base seca sin cenizas), respectivamente. La composición química del bio-oil obtenido de la biomasa tratada reveló que la desmineralización favorece la generación de alcanos y ácidos grasos, obteniendo un producto con mayor contenido energético.

El proceso HTL se puede llevar a cabo en presencia de un catalizador, lo que reduce el tiempo de residencia y la temperatura de funcionamiento del proceso HTL, y aumenta el rendimiento del bioaceite. Rahbari y col. (2019) estudiaron la influencia del uso de ferrita de níquel (NiFe_2O_4) como catalizador en el HTL de *Sargassum pelágico*, en el rendimiento de bio-aceite. Los autores seleccionaron tres niveles de temperatura (250, 300 y 350°C) para estudiar las condiciones de HTL con y sin catalizador. Durante el proceso catalítico, a medida que aumentaba la temperatura, el rendimiento del bioaceite era mayor. Sin embargo, en la HTL no catalítica la tendencia fue diferente. El rendimiento del bio-aceite aumentó cuando la temperatura varió de 250 a 300° C y luego disminuyó de 300 a 350°C. Los autores atribuyeron este comportamiento a la mayor conversión de compuestos a la fase gaseosa y a la descomposición secundaria de compuestos en moléculas más ligeras. El rendimiento máximo del bio-aceite fue del 7,20%, correspondiente a la temperatura más alta en presencia de catalizador, mientras que el rendimiento más bajo de bio-oil fue de 4,04% a 250 °C sin catalizador.

En la Tabla 7 se muestran las condiciones de operación y los productos obtenidos de la licuefacción hidrotermal de diferentes especies de *Sargassum*.

Tabla 7. Licuefacción hidrotermal de varias especies de *Sargassum* (Tobio-Perez y col., 2023)

Especie de <i>Sargassum</i>	Condiciones de operación			Bio-carbón (%)	Bio-oil (%)	Gas (%)	Producto acuoso (%)
	T (°C)	P (Mpa)	t (min)				
<i>Sargassum pelagico</i>	350	5-21	60	29-3-1	18-22,2	-	
<i>Sargassum sp</i>	250-350	8-22	-		4-7,2	-	
<i>Sargassum patens</i>	320-380	-	15-90	28-39	22-38	23-45	5-12
<i>Sargassum tenerrimum</i>	260-300	4-8,3	15	24-61,2	11-16,3		
<i>Sargassum tenerrimum</i>	280	4-8,3	15	-	16,3	11,9	
<i>Sargassum tenerrimum</i>	280	4-8,3	15	-	23,8	8,6	
<i>Sargassum tenerrimum</i>	280	4-8,3	15	-	22,8	10	
<i>Sargassum tenerrimum</i>	260-300	4-8,3	15	32-44	3-32	5-15	
<i>Sargassum sp</i>	260-340	-	30	32-40	3-10	22-26	32-35
<i>Sargassum muticum</i>	345	-	10	43	6	18	26

El *Sargassum tenerrimum* fue utilizado por Biswas y col. (2017) para la producción de bio-aceite por HTL en un rango de temperatura de 260-300°C. Los resultados indicaron que a 260°C, el rendimiento de bio-aceite fue más bajo, lo que sugiere que la descomposición de la biomasa fue incompleta, favoreciendo la formación de productos sólidos. Por lo tanto, el aumento de la temperatura debería acelerar la descomposición, lo que trae un aumento en la producción de bio-oil. Sin embargo, el rendimiento del bio-aceite mostró inicialmente un aumento a medida que la temperatura aumentó de 260 a 280°C (11,5 y 16,3%), pero el rendimiento disminuyó con el

aumento de la temperatura a 300°C (14,7%). Por encima de 280°C, se incrementó la descomposición de la biomasa en productos solubles en agua, lo que condujo a una reducción en la formación de bio-oil. La conversión máxima de *Sargassum tenerrimum* se observó (75,8%) a 300°C. En otro estudio de Biswas y col. (2018), el HTL de la misma especie de *Sargassum* se llevó a cabo en varios catalizadores de base sólida (CaO apoyado en CeO₂, Al₂O₃ y ZrO₂) y utilizando diferentes solventes (agua y agua-etanol). El proceso se desarrolló variando las cantidades de catalizador (5-25%), así como la temperatura de reacción. Con la licuefacción catalítica, se mejoró la calidad del bio-aceite, reduciendo su contenido de oxígeno y nitrógeno. Los valores más altos de conversión de biomasa (70,5%), rendimiento de bio-aceite (33%) y HHV (28 MJ/kg) se obtuvieron en el sistema de co-solvente agua etanol y con el catalizador CaO/ZrO₂.

Los tratamientos de desmineralización, la presencia de catalizadores y otros parámetros de funcionamiento son algunos factores que influyen en la eficiencia de conversión de la biomasa, así como en los rendimientos de los productos HTL. También se ha discutido el efecto de la temperatura en la distribución de los productos HTL. En los procesos hidrotermales, el aumento de la temperatura puede promover las reacciones de hidrólisis, transformación y repolimerización, lo que favorece la producción de bio-aceite. Sin embargo, algunos estudios han informado que, por encima de cierta temperatura, el rendimiento de bio-aceite disminuye para algunas macroalgas, incluido el *Sargassum*. Este comportamiento se atribuye a la aparición de reacciones secundarias de compuestos de bio-aceite. Un tiempo de residencia de menos de 40-50 min aumenta el rendimiento del bio-aceite y los tiempos de residencia más largos causan una disminución en la formación de bio-oil, un comportamiento atribuido a la re-polimerización y re-condensación de bio-crudo. Sin embargo, un estudio de Xu y Savage (2015) señaló que el rendimiento de biocrudo total no se ve afectado por el tiempo de residencia. Los autores justificaron este comportamiento mostrando que un tiempo de residencia prolongado reduce el rendimiento del bioaceite soluble en agua, pero aumenta el rendimiento del bioaceite insoluble en agua.

La composición de la biomasa de algas también tiene una gran influencia en la distribución de productos HTL. Esto se evidenció en los resultados obtenidos por He y col. (2020) quienes utilizaron *Sargassum pelagico* y *Nannochloropsis Sp*, para la producción de bio-aceite por HTL. Según la composición de ambas biomasa, el *Sargassum* tiene el mayor contenido de cenizas y carbohidratos, mientras que *Nannochloropsis* tiene un mayor contenido de lípidos y proteínas.

También, el rendimiento de bioaceite para *Sargassum* (3-9,5%) fue menor que los obtenidos con *Nanochloropsis* (39-54%). Sin embargo, el rendimiento de biochar para *Sargassum* (32–40%) fue mayor que para *Nanochloropsis* (15–37%). Este comportamiento se debe al alto contenido de cenizas del *Sargassum*, lo que contribuye a la formación de sólidos. Por otro lado, cuanto mayor sea la cantidad de proteínas y lípidos contenido, la biomasa es más propensa a transformarse en bio-petróleo (Tobio-Perez y col., 2022).

Biorremediación de aguas residuales

El agua, siendo un recurso esencial para la supervivencia de todos los organismos vivos, está constantemente expuesta a la contaminación de una variedad de fuentes (Gray, 2017). Los problemas relacionados con la calidad del agua son un gran desafío para la humanidad en el siglo actual (Lu y col., 2015). Las descargas de contaminantes en las aguas causan eutrofización y destrucción ecológica severa (Wang y Yang, 2016). La presencia de metales pesados tiene efectos nocivos para la salud humana, y una vez que ingresan al ecosistema pueden comenzar a bioacumularse en la cadena alimentaria (Jehan y col., 2020). Además, la contaminación por bacterias y virus plantea un importante problema de salud en los países en desarrollo (Schwarzenbach y col., 2010). El *Sargassum* puede tener aplicaciones potenciales en la biorremediación del agua, mejorando así la contaminación de este recurso.

El nitrógeno y el fósforo son los principales elementos implicados en la eutrofización (Davis y col., 2006). En los ecosistemas naturales, también se cree que estos elementos son los principales nutrientes limitantes para el crecimiento de algas marinas (Pedersen y col., 2010). Las algas absorben sus nutrientes a través de mecanismos que implican difusión pasiva por un gradiente de concentración, difusión facilitada en la que están involucradas las proteínas del canal y transporte activo contra un gradiente de concentración (Roleda y Hurd, 2019). La absorción de nutrientes resulta tanto en el crecimiento de algas como en la disminución de la concentración de nutrientes disueltos, mejorando así la calidad del agua (He y col., 2008). El consumo de nitrógeno y fósforo de algas marinas ha encontrado aplicaciones en la biorremediación de efluentes, particularmente de aquellas aguas procedentes de la acuicultura (Shpigel y col., 2018)

Otro enfoque es la acuicultura multitrófica integrada (IMTA) que busca la acuicultura sostenible, en la que la eutrofización se reduce mediante la integración de organismos de diferentes niveles tróficos dentro del mismo sistema (Troell y col., 2009). En IMTA una especie se complementa con otra que permite que otros organismos utilicen alimentos no consumidos, desechos y otros materiales disueltos (Kleitou y col., 2018). En estos sistemas, los mejillones y las algas marinas pueden actuar como biofiltros, consumiendo nitrógeno y fósforo y reduciendo así sus concentraciones (Holdt y Edwards, 2014). Mai y col. (2010) evaluaron el uso de *Sargassum* pelágico para la biorremediación de aguas del cultivo de langostino. Los autores encontraron que el *Sargassum* no redujo significativamente el crecimiento del camarón y que los niveles de nitrógeno y fósforo se redujeron significativamente en comparación con el monocultivo de camarones. También, Yu y col. (2014) evaluaron la capacidad de biofiltrado de *Sargassum hemiphyllum* para la biorremediación de aguas de ostras y piscifactorías, concluyendo que el gran cultivo de esta alga puede reducir el impacto ambiental de la acuicultura. Del mismo modo, *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans* también pueden tener el potencial de ser empleados como un biofiltro en IMTA como en el caso de las especies de *Sargassum* citadas anteriormente.

Otra aplicación potencial de las algas en la biorremediación de efluentes es su uso para la eliminación de metales pesados en un proceso denominado biosorción. Este proceso fisicoquímico implica diferentes mecanismos que incluyen adsorción, complejación superficial, intercambio iónico y precipitación. Entre estos mecanismos potenciales, el intercambio iónico es el más relevante en la biosorción de iones de metales pesados por algas (Zeraatkar y col., 2016). Las algas pardas, incluido el *Sargassum*, se presentan como uno de los sustratos más prometedores para la biosorción de metales pesados (Davis y col., 2003). En estas algas, la biosorción de cationes divalentes ocurre principalmente debido a la presencia de sitios de ácido carboxílico en el polímero de alginato, sin embargo, los grupos de ácido sulfónico de fucoïdanes o grupos hidroxilo presentes en todos los polisacáridos pueden desempeñar un papel importante dependiendo de las condiciones de pH (Vijayaraghavan y col., 2009). Se han desarrollado múltiples modelos matemáticos para optimizar la capacidad de biosorción.

La biorremediación de efluentes utilizando algas puede tener ventajas únicas. Una variedad de sistemas de cultivo puede adaptarse para su uso en procesos de biofiltración o tratamiento de biosorción, incluidos estanques artificiales (Gutzeit y col., 2005), depuradores de césped de algas

(Mulbry y col., 2010) e incluso estructuras en alta mar (Buck y Buchholz, 2004). Además, la biomasa se puede cosechar fácilmente mediante el uso de redes o una malla debido a su gran tamaño, facilitando así la eliminación de los contaminantes capturados por las algas (Neveux y col., 2018). El uso de *Sargassum* para la biofiltración requerirá capturar las algas antes de que comiencen a morir en tierra, y dará como resultado un mayor aumento de la cantidad de biomasa de algas. Del mismo modo, si se van a emplear algas vivas para la biosorción de metales, las algas pueden proliferar si se incorporan cuando los nutrientes todavía están disponibles en el agua. Por lo tanto, esta aplicación puede servir mejor como un paso inicial hacia la valorización de algas marinas que deberá combinarse con otras aplicaciones para evitar una mayor acumulación de biomasa (Amador-Castro y col., 2021)

Obtención de compuestos de alto valor añadido

Compuestos con usos medicinales

Las algas producen metabolitos secundarios para hacer frente a las duras condiciones ambientales, lo que a su vez permite que estos organismos sean una fuente de compuestos únicos que pueden usarse en aplicaciones relacionadas con la salud (Plaza y col., 2008). La fucoxantina es una xantofila que es característica de las algas marrones, tipo de alga donde se encuentra incluido el *Sargassum* pelagico (Karpinski y Adamczak, 2019). Este carotenoide es de especial interés debido a sus efectos antioxidantes y antiinflamatorios que se asocian con un menor riesgo de cáncer, obesidad y diabetes (Terasaki y col., 2009; Gammone y D'Orazio, 2015). El fucosterol es otro compuesto que se encuentra predominantemente en las algas pardas que tiene una gama de beneficios biológicos que incluyen propiedades antioxidantes, antidiabéticas y anticancerígenas y reductoras del colesterol (Abdul y col., 2016). Además, las algas, incluida *Phaeophyta*, son una fuente de otras moléculas antioxidantes como flavonoides y compuestos fenólicos que pueden complementarse en los alimentos para aumentar sus propiedades nutricionales (Amador-Castro y col., 2021).

También se ha estudiado los fucoidanos, que son polisacáridos sulfatados que se encuentran principalmente como parte de la pared celular de las algas marrones. Estos compuestos exhiben

propiedades biológicas interesantes, como actividades anticoagulantes, inmunomoduladoras, antitumorales y antiinflamatorias (Ale y Meyer, 2013). Su bioactividad se asocia con diferentes factores relacionados con su estructura, como su grado de sulfatación, peso molecular, composición de monosacáridos y la posición de los grupos sulfatados en la columna vertebral macromolecular (Wijesinghe y Jeon, 2012). Se ha podido contactar que, de las variaciones estacionales en el contenido de polisacáridos, la estructura de los fucoidanos aislados de distintas especies de algas pardas presenta variaciones considerables, lo que resulta en diferentes actividades biológicas (Ustyuzhanina y col., 2014). No siendo diferente en los fucoidanos extraídos de especies de sargazo que presentan diversas actividades biológicas.

Las fracciones de fucoidanos extraídas de *Sargassum glaucescens* han mostrado actividad antioxidante de manera dependiente de la dosis en diferentes pruebas antioxidantes (Huang y col., 2016). La actividad antioxidante de los extractos de fucoidanos obtenidos de *Sargassum polycystum* fue observada por Palanisamy y col. (2017). Los autores también informaron que los extractos inhibieron el crecimiento de células de cáncer de mama MCF-7 in vitro. Los extractos de *Sargassum mclurei* inhibieron la formación de colonias de células de cáncer de colon DLD-1 (Thinh y col., 2013). Cong y col. (2016) identificaron además que un fucoidano purificado a partir de extractos de *Sargassum fusiforme* inhibía la migración del tubo dependiente de la dosis y la migración de formación de tubos de las células endoteliales microvasculares humanas; sugiriendo que el compuesto puede servir como un agente antiangiogénico. El fucoidano obtenido de *Sargassum wightii* exhibió actividad antibacteriana contra patógenos comunes como *Escherichia coli*, *Vibrio cholera* y *Pseudomonas aeruginosa*, por lo que exhibió potencial como antibiótico natural (Marudhupandi y Kumar, 2013).

Otro polisacárido presente en las paredes celulares de las algas pardas es el alginato, el cual fuera de las aplicaciones en alimentos y biorremediación, ha sido investigado debido a sus usos potenciales en el campo biomédico. Una aplicación común del alginato es en el desarrollo de apósitos para heridas debido a sus características únicas que incluyen biocompatibilidad, no inmunogenicidad, alta capacidad de absorción y bajo costo (Aderibigbe y Buyana, 2018). La naturaleza altamente hidrófila del alginato permite que el polímero absorba el exudado de la herida y mantenga el microambiente de humedad, que es un parámetro crítico para la cicatrización de heridas (Summa y col., 2018). Además, el alginato puede ser reticulado con diferentes materiales

orgánicos e inorgánicos generando apósitos para heridas con características biológicas y mecánicas mejoradas. Los apósitos de alginato también pueden servir como plataforma para la entrega sostenida de sustancias bioactivas a la herida (Ma y col., 2019).

También, podemos encontrar la aplicación de compuestos extraídos de algas en la ingeniería de tejidos que es un campo multidisciplinario que tiene como objetivo el desarrollo de sustitutos biológicos para restaurar la función normal de los tejidos y órganos dañados o, en última instancia, reemplazarlo (Lee y col., 2018). La gelificación de alginato a pH y temperaturas fisiológicas hace que este polímero sea adecuado para aplicaciones en esta área (Sarker y Boccaccini, 2018) especialmente para el desarrollo de soportes para el cultivo de diferentes células (Lin y col., 2010; Golafshan y col., 2017; Gepp y col., 2017; Farokhi y col., 2020). Los alginatos han sido ampliamente estudiados para aplicaciones en la administración de fármacos. Por lo general, el alginato de sodio se emplea como agente aglutinante de tabletas y el ácido alginico se usa en tabletas comprimidas como desintegrante para la liberación rápida del fármaco. Sin embargo, el alginato de sodio también puede promover la desintegración dependiendo de la cantidad utilizada durante la formulación (Tønnesen y Karlsen, 2002). Actualmente, las micropartículas de alginato para la administración de fármacos están ganando considerable atención para aplicaciones similares (Gonçalves y col., 2016; Agüero y col., 2017; Uyen y col., 2020).

Otro estudio sobre las aplicaciones de algas con uso medicinales es el de Devault y col. (2021), el cual nos dice que, en cuanto a las aplicaciones cosméticas, las variedades de *Sargassum pelágico* han sido objeto de numerosos estudios relacionados con sus propiedades saludables y compuestos bioactivos. Sin embargo, como afirman Liu y col. (2012) en la conclusión de su revisión, muchos estudios carecen de una caracterización fitoquímica adecuada de los extractos utilizados. También, Namvar y col. (2013) investigaron las propiedades antiproliferativas y antiangiogénicas de los polifenoles de *Sargassum muticum*, mientras que los extractos etanólicos de *Sargassum serratifolium* recientemente demostraron que estos pueden tener potencial contra ciertas enfermedades óseas osteoclásticas, y osteoartritis (Kim y col. 2018). Por otro lado, Heo y col. (2010) se centraron en compuestos lipídicos e investigaron la fucoxantina, mientras que Buwono y col. (2018) centraron su estudio sobre los extractos de esteroides para propiedades antiinflamatorias y analgésicas, o Lim y col. (2018) también observaron propiedades hepatoprotectoras de meroterpenoides de *Sargassum serratifolium*.

Muchos estudios informan de la actividad de los FCSP (polisacáridos que contienen la fucosa) de *Sargassum pelágico*, indicando que este tipo de compuestos tienen potencial antioxidante y antimicrobiano (Fan, 2018), poder antitumoral (Chen y col., 2018), potencial inmunomodulador, actividad antiinflamatoria (Guerra Dore y col., 2013), potencial como anticoagulante y antitrombótico (Yu y col., 2017), potencial hepatoprotector (Jin y col., 2018), actividad neuro-protectora (Thuy y col., 2015) y poder antiviral. También, Fu y col. (2018) han descrito otros polisacáridos de *Sargassum pelagico* por sus propiedades prebióticas, por ejemplo, laminarina o polisacáridos complejos.

Por lo tanto, el *Sargassum* contiene una gran cantidad de compuestos con propiedades medicinales y su empleo para este fin sería recomendable. Sin embargo, se plantea una dificultad y es el alto contenido de metales pesados y arsénico en este tipo de algas, que podría dificultar el alcance de los requisitos reglamentarios para los medicamentos (Devault y col., 2021). El desarrollo de productos de salud requiere los más altos estándares de calidad que puede ser un problema cuando se utilizan este tipo de algas cosechadas de floraciones que contienen contaminantes potencialmente desconocidos. Este punto podría resolverse mediante pasos de procesamiento y purificaciones extensas si es necesario. Además, es necesaria una reproducibilidad muy alta de la composición y la bioactividad de los productos de salud, que podrían ser más fáciles de obtener de algas marinas cultivadas (o al menos de la cosecha controlada) (Gellenbeck, 2012). Es probable que la composición de moléculas complejas en algas marinas que se encuentran en floraciones a la deriva presente una mayor variabilidad, debido a diversos factores ambientales como el origen geográfico, los nutrientes y las condiciones climáticas. Los metabolitos específicos como la fucoxantina seguirían siendo objetivos más fáciles ya que su contenido puede variar, pero no su composición.

Ingredientes en alimentos funcionales

Las algas se han utilizado como fuente de alimento desde el siglo IV en Japón (McHugh, 2003). Para el año 2015, la producción de algas marinas era de aproximadamente 30 millones de toneladas por año, y el 85% de este volumen se destinaba a la producción de productos alimenticios para consumo humano (Ferdouse y col., 2018). Las algas se consumen principalmente en los países asiáticos, especialmente Japón, donde el consumo diario promedio varía entre 4 y 8 g de algas

secas per cápita (Fleurence, 2016). Las principales algas consumidas son kombu (*Saccharina japonica* previamente clasificada como *Laminaria japonica*), nori (*Porphyra* spp.) y wakame (*Undaria pinnatifida*) (Ferdouse y col., 2018). Algunas especies de *Sargassum* también se consumen en los países asiáticos como fuentes de alimento y como medicina tradicional (Wang y col., 2013). Debido a su composición nutricional y la presencia de compuestos bioactivos, el *Sargassum* puede tener usos potenciales como alimento para el consumo humano o animal. Sin embargo, el uso de estas algas para la alimentación puede enfrentar desafíos debido a los compuestos tóxicos acumulados, como los metales pesados, tal y como se ha comentado en el apartado anterior.

Aunque el *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans* poseen una alta cantidad de carbohidratos, especialmente en forma de alginatos y polisacáridos sulfatados. Estos compuestos se consideran fibras y no se digieren en gran medida en el intestino humano (MacArtain y col., 2007). A pesar de su baja digestibilidad, las fibras ejercen funciones importantes como la modulación de la absorción de nutrientes, el metabolismo y la microbiota colónica (Fuller y col., 2016). Las recomendaciones de ingesta de fibra varían según el sexo y la edad de los individuos, con valores que oscilan entre 19 y 38 g por día (Slavin, 2005). La ingesta adecuada de fibra se ha asociado con un menor riesgo de enfermedades cardíacas, trastornos gastrointestinales y diabetes tipo 2 (Quagliani y Felt-Gunderson, 2016). Milledge y col. (2020) informaron que el contenido total de fibra en estas especies varía entre el 31 y el 37% de la biomasa seca. Las cantidades de fibra en el *Sargassum* son más altas que las reportadas para granos de consumo común como el arroz, el maíz y el trigo (Spiller, 2001). Por lo tanto, al ser considerados como fibra dietética, los alginatos pueden ser beneficiosos para la salud humana (Brownlee col., 2005)

Los alginatos, además de funcionar como fibra, han encontrado numerosas aplicaciones en la industria alimentaria. En la industria de alimentos y bebidas, se utilizan como agentes espesantes para productos como mermeladas y salsas de frutas y también se pueden emplear para mejorar la aceptabilidad de algunos alimentos procesados bajos en grasa cuando se combinan con otros agentes espesantes (Brownlee y col., 2009). También se han utilizado como agentes gelificantes y estabilizadores de emulsiones (Fawzy y col., 2017). Recientemente, el uso de polímeros de algas como el alginato y la carragenina para el desarrollo de películas y recubrimientos comestibles para alimentos han ganado atención, ya que tiene la ventaja de preservar la calidad de los alimentos sin

contribuir a la generación de residuos (Tavassoli-Kafrani y col., 2016). Los recubrimientos a base de alginato han mejorado con éxito la vida útil de múltiples alimentos, incluidas las ciruelas (Valero y col., 2013), las fresas (Peretto y col., 2017) y el pescado (Song y col., 2011).

El contenido de proteínas en algunas algas puede ser alto. En términos de perfil de aminoácidos, los ácidos aspártico y glutámico representan los bloques de construcción de proteínas más abundantes (Lourenço y col., 2002). Por otro lado, las algas muestran bajas concentraciones de lisina, triptófano, cisteína, treonina y metionina (Pangestuti y Kim, 2015). *Sargassum vulgare*, contrariamente a la tendencia general tiene altos contenidos de metionina, incluso más, abundante que un huevo de gallina; sin embargo, este no es el caso de *Sargassum fluitans* (Ramos y col., 2000). Además, Milledge y col. (2020) reportaron que el perfil de aminoácidos en *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans* sigue el perfil de aminoácidos recomendado por la Organización Mundial de la Salud, sin embargo, este perfil puede verse afectado por la variación estacional.

El *Sargassum* no es una fuente abundante de lípidos, pero contiene AGPI (ácidos grasos poliinsaturados) que pueden ser beneficiosos para la salud humana. Los AGPI omega-3 (n-3) y omega-6 (n-6) tienen efectos metabólicos opuestos; las dietas ricas en AGPI n-6 están relacionadas con un aumento de los niveles de inflamación, mientras que se ha demostrado que los AGPI n-3 reducen la inflamación (Saini y Keum, 2018). De estos compuestos, los AGPI n-3 son los más deseables, ya que el alto consumo de AGPI n-6 puede provocar una inflamación aguda asociada con el cáncer (Blücher y Stadler, 2017). Los aumentos en la ingesta dietética de AGPI n-3 están relacionados con un menor riesgo de enfermedades como el cáncer, la diabetes, la obesidad y el Alzheimer y la demencia (Shahidi y Ambigaipalan, 2018). Alrededor del 50% de los lípidos totales de *S. natans* son AGPI con una relación n-6/n-3 de 0,55 (van Ginneken col., 2011). Por lo tanto, la composición de ácidos grasos del *Sargassum* puede estar asociada con efectos beneficiosos para la salud.

Uno de los grandes retos en cuanto al uso de algas marinas como alimento deriva de su alto contenido en minerales. Los minerales son micronutrientes inorgánicos que regulan varios procesos bioquímicos en nuestro cuerpo y su consumo es esencial para mantener una buena salud (Mohammadifard y col., 2019). Sin embargo, una ingesta excesiva de minerales conduce a efectos negativos para la salud. Esto es de especial importancia teniendo en cuenta que las algas tienen una fuerte capacidad de absorción de minerales y su contenido mineral puede ser de 10 a 100 veces

mayor que el observado en los vegetales (Circuncisao y col., 2018). También, Rodríguez-Martínez y col. (2020) analizaron el contenido mineral en muestras de *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* de la costa del Caribe mexicano, encontrando elementos tóxicos como arsénico y manganeso en todas las muestras. Asimismo, el 86% de las muestras contenían niveles de arsénico por encima de la normativa europea (40 ppm) para poder utilizar la biomasa como alimento animal) (Rodríguez-Martínez y col., 2020). Milledge y col. (2020) también han encontrado altas concentraciones de arsénico (124 ppm) para muestras mixtas de especies de *Sargassum natans* y *fluitans*. Además, Addico y deGraft-John (2016) encontraron que en algunas muestras recolectadas de *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans* contenían niveles de arsénico de hasta 53 ppm. Teniendo en cuenta estudios previos, el *Sargassum*, particularmente cuando se extrae del mar, requerirá ser analizado en busca de contaminantes tóxicos antes de ser utilizado como fuente de alimento para animales o humanos, lo que resultará en un aumento de los costos. Además, es importante tener en cuenta que los cambios en las condiciones ambientales resultarán inequívocamente en variaciones en la composición de esta alga, cambiando así sus propiedades nutricionales. Aun así, el *Sargassum* es una fuente de metabolitos secundarios de alto valor con beneficios potenciales para la salud humana (Amador-Castro y col., 2021)

Conclusiones: Oportunidades y limitaciones de la valorización de *Sargassum*

Al finalizar esta revisión bibliográfica de TFM las principales conclusiones fueron:

El *Sargassum* en el Caribe representa no sólo un tema económico, también medioambiental, social y un gran desafío para los actores involucrados.

La variabilidad estacional, composicional, y la baja relación C/N que posee esta biomasa son otros puntos deficientes, no se puede considerar una biomasa continua y su valorización por medio de compostaje sin su mezcla con otros residuos sería imposible. Además, estas algas poseen una alta composición mineral y una alta salinidad, factores también limitantes para su digestión anaerobia.

Una solución a esto sería el co-compostaje y la co-digestión con otros residuos que aporten a las necesidades propias de esta biomasa para este tipo de valorización.

También, se ha visto que algunos factores limitan el uso de rutas convencionales para producir biocombustibles a partir de biomasa de sargazo. El alto contenido de cenizas de la biomasa influye en la eficiencia de los procesos de extracción de energía y distribución de productos. Por otro lado, el alto contenido de humedad en la biomasa del *Sargassum* es también un factor limitante para los procesos de combustión, gasificación y pirólisis, por lo que la aplicación de procesos hidrotermales puede ser más recomendable; sin embargo, la inclusión de un paso previo de secado al sol puede evitar este inconveniente. Se necesitan muchos estudios para seleccionar una tecnología o una combinación de ellas para abordar los desafíos técnicos, económicos y energéticos asociados.

Por otra parte, también se han encontrado estudios sobre los compuestos medicinales de las algas pardas, algunos autores resaltan que esto carecen de una caracterización adecuada de los extractos investigados, pero si se sabe de la actividad y la funcionalidad de estos compuestos sobre ciertas enfermedades, por lo que sería interesante hacer uso de ellos viniendo de una biomasa que está de manera libre en los océanos.

A pesar de que el *Sargassum* posee compuestos bioactivos en su composición, a la hora de valorizar esta biomasa los metales pesados que las algas adquieren por su paso por los océanos representan un gran limitante, ya que su valorización podría poner en riesgo la salud humana y el medio ambiente.

Otro lugar donde este tipo de algas pueden encontrar cabida y ser parte de la solución al problema que generan, es la biorremediación de agua, siendo ésta un recurso vital para ser humano y muchas veces se ve afectada por actividades propias del hombre y terminan siendo aguas contaminadas. Las algas pardas, como el *Sargassum*, se presentan como uno de los sustratos más prometedores para la biosorción de metales pesados, como han sido empleadas otras especies de algas.

El *Sargassum* representa una gran problemática para la región del Caribe y para el medio ambiente en general, sin embargo, la literatura existente sobre la valorización de esta biomasa es muy variada y hay muchos limitantes en la composición de la misma que hacen que no haya un tratamiento único recomendable, por lo que hay que seguir aunando esfuerzo en encontrar una solución viable

a la problemática de la acumulación de este tipo de algas en las costas. Es importante seguir investigando, ya que este impacto es cada vez más creciente.

Bibliografía

- Abbas, T., Issa, M., Ilinca, A. (2020). Biomass cogeneration technologies: A Review. *J Sustain Bioenergy Syst* 10:1–15.
- Abdul, Q., Choi, R., Jung, H., Choi, J. (2016). Health benefit of fucosterol from marine algae: a review: health benefit of fucosterol. *J. Sci. Food Agric.* 96: 1856–1866.
- Aboulkas, A., Hammani, H., El Achaby, M., Bilal, E., Barakat, A., El Harf, K. (2017). Valorization of algal waste via pyrolysis in a fixed-bed reactor: production and characterization of bio-oil and bio-char. *Bioresour Technol* 243: 400–408.
- Addico G., deGraft-Johnson, K.A.A. (2016). Preliminary investigation into the chemical composition of the invasive brown seaweed *Sargassum* along the West Coast of Ghana. *Afr. J. Biotechnol.* 15: 2184–2191.
- Aderibigbe, B.A., Buyana, B. (2018). Alginate in wound dressings. *Pharmaceutics* 10: 42.
- Agüero, L., Zaldivar-Silva, D., Pena, L., Dias, M.L. (2017). Alginate microparticles as oral colon drug delivery device: a review. *Carbohydr. Polym.* 168: 32–43.
- Akunna, J., Hierholtzer, A. (2016). Co-digestion of terrestrial plant biomass with marine macroalgae for biogas production. *Biomass Bioenergy* 93: 137–43.
- Ale M., Meyer S. (2013). Fucoidans from brown seaweeds: an update on structures, extraction techniques and use of enzymes as tools for structural elucidation. *RSC Adv.* 3: 8131-8141
- Ali, I., Bahadar, A. (2017). Red Sea seaweed (*Sargassum* spp.) pyrolysis and its devolatilization kinetics. *Algal Res* 21: 89–97.
- Alvarez, B., Godbout, S., Roux, E., Palacios, J., Raghavan, V. (2019). Bio-oil yield and quality enhancement through fast pyrolysis and fractional condensation concepts. *Biofuel Res J* 24: 1054-1064

- Amador-Castro F., García-Cayuela T., Alper H., Rodriguez-Martinez V., Carrillo-Nieves A. (2021) Valorization of pelagic sargassum biomass into sustainable applications: Current trends and challenges. *Journal of Environmental Management* 283: 112013
- Anastasakis, K, Ross, AB (2011) Hydrothermal liquefaction of the brown macro-alga *Laminaria saccharina*: Effect of reaction conditions on product distribution and composition. *Bioresour Technol* 102: 4876–4883.
- Arratibel, A. J. (2022). El sargazo, la marea parda que amenaza las costas del Caribe: ¿ha llegado para quedarse?. *El País América*. Disponible en: <https://elpais.com/america-futura/2022-08-17/el-sargazo-la-marea-parda-que-amenaza-las-costas-del-caribe-ha-llegado-para-quequedarse.html> (Fecha de acceso 13 de abril 2023)
- Arthur, G., Aremu, A., Moyo, M., Stirk, W., Van, J. (2013). Growth promoting effects of a seaweed concentrate at various pH and water hardness conditions. *South Afr. J. Sci.* 109: 1-6.
- Badmus, U., Taggart, M., Boyd, K. (2019). The effect of different drying methods on certain nutritionally important chemical constituents in edible brown seaweeds. *J Appl Phycol* 31: 3883-3897.
- Basu, P. (2010) Biomass gasification and pyrolysis. Elsevier, Oxford
- Bikker, P., Stokvisa, L., van Krimpen, M., van-Wikselaar, P., Cone, J. (2020). Evaluation of seaweeds from marine waters in northwestern Europe for application in animal nutrition. *Animal Feed Sci Tech* 263: 114466.
- Bird, K., Chynoweth, D., Jerger, D. (1990). Effects of marine algal proximate composition on methane yields. *J Appl Phycol* 2(3): 207–213.
- Biswas, B, Fernandes, AC, Kumar, J, Muraleedharan, UD (2018) Valorization of *Sargassum tenerrimum*: Value addition using hydrothermal liquefaction. *Fuel* 222: 394–401.
- Biswas, B., Singh, R., Krishna, B., Kumar, J., Bhaskar, T. (2017). Pyrolysis of azolla, *sargassum tenerrimum* and water hyacinth for production of bio-oil. *Bioresour Technol* 242: 139–145.

- Blücher, C., Stadler, S.C. (2017). Obesity and breast cancer: current insights on the role of fatty acids and lipid metabolism in promoting breast cancer growth and progression. *Front Endocrinol* 8: 293
- Borines, M. G., de Leon, R. L., and Cuello, J. L. (2013). Bioethanol production from the macroalgae *Sargassum* spp. *Bioresour. Technol.* 138: 22–29.
- Briceño-Domínguez, D., Hernández, G., Moyo, M., Stirk, W., Van J. (2014). Plant growth promoting activity of seaweed liquid extracts produced from *Macrocystis pyrifera* under different temperature conditions. *J. Appl. Phycol.* 26: 2203-2210
- Brownlee, I.A., Allen, A., Pearson, J.P., Dettmar, P.W., Havler, M.E., Atherton, M.R., Onsøyen, E. (2005). Alginate as a source of dietary fiber. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 45: 497–510.
- Bruhn, A., Dahl, J., Nielsen, H., Nikolaisen, L., Rasmussen, M., Markager, S. (2011). Bioenergy potential of *ulva lactuca*: Biomass yield, methane production and combustion. *Bioresour Technol* 102: 2595-2604.
- Buck B., Buchholz C (2004). The offshore-ring: a new system design for the open ocean aquaculture of macroalgae. *J. Appl. Phycol.* 16, 355–368
- Buwono N., Risjani Y., Arsad S. (2018). Anti-inflammatory and analgesic activity from brown algae *Sargassum polycystum*. *Pharm. Sci. Res.* 10: 2092-2096
- Carrillo-Dominguez S., Rodriguez-Martinez R., Diaz-Martinez M., Magana-Gallegos E., Cuchillo-Hilario M. (2023). Potential application of pelagic *Sargassum* spp. in animal feeding. *J Appl Phycol.* 35: 433-444.
- Chávez V., Uribe-Martínez A., Cuevas E., Rodríguez-Martínez R.E., van Tussenbroek B.I., Francisco V., Estévez M., Celis L.B., Monroy-Velázquez L.V., Leal-Bautista R., et al. (2020). Massive Influx of Pelagic *Sargassum* spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014-2020: Challenges and Opportunities. *Water* 12: 2908.
- Chen L., Chen P., Liu J., Hu C., Yang S., He D., Yu P., Wu M., Zhang X. (2018). *Sargassum fusiforme* polysaccharide SFP-F2 activates the NF- κ B signaling pathway via CD14/IKK and P38 axes in RAW264.7 cells. *Mar Drugs* 16:264

- Cherad, R, Onwudili, JA, Ekpo, U, Williams, PT, Lea-Langton, AR, Carmargo-Valero, M (2013). Macroalgae supercritical water gasification combined with nutrient recycling for microalgae cultivation. *Environ Prog Sustain Energy* 32: 902-910.
- Cherry, P., O'Hara, C., Magee, P., McSorley, E., Allsopp P. (2019). Risks and benefits of consuming edible seaweeds. *Nutr Rev* 77: 307-329.
- Chuang, W., Lin, L., Shih, H., Shy, Y., Chang, S., Lee, T. (2021). The potential utilization of high-fiber agricultural by-products as monogastric animal feed and feed additives: A review. *Animals* 11: 2098.
- Circuncisao, A.R., Catarino, M.D., Cardoso, S.M., Silva, A.M.S. (2018). Minerals from macroalgae origin: health benefits and risks for consumers. *Mar. Drugs* 16: 400.
- CIT-SSC (2015). Nota Conceptual sobre la importancia de *Sargassum* y el Mar de los Sargazos para las Tortugas Marinas del Atlántico. CIT-CCE7-2014-Tec.9 - SSC/2014/1/Doc. 2. Disponible en: <http://www.iacseaturtle.org/docs/tecnicos/Mar-Sargazos-Tortugas%20Marinas-esp.pdf> (Fecha de acceso 10 de julio 2023)
- Cole, A., Roberts, D., Garside, A., de Nys, R., Paul, N.A. (2016). Seaweed compost for agricultural crop production. *J Appl Phycol* 28: 629- 642.
- Corino, C., Modina, S., Di Giancamillo, A., Chiapparini, S., Rossi, R. (2019). Seaweeds in pig nutrition. *Animals* 9: 1126.
- Costa, J., Oliveira, J., Pereira, M., Alves, M., Abreu, A. (2015). Biohythane production from marine macroalgae *Sargassum* sp. coupling dark fermentation and anaerobic digestion. *Bioresour Technol* 190: 251-256.
- Davis, A.P., Shokouhian, M., Sharma, H., Minami, C. (2006). Water quality improvement through bioretention media: nitrogen and phosphorus removal. *Water Environ. Res.* 78: 284–293
- Davis, TA, Llanes, F, Volesky, B, Mucci, A. (2003). Metal selectivity of *Sargassum* spp. and their alginates in relation to their α -L-guluronic acid content and conformation. *Environ Sci Technol* 37: 261–267.

- Delrue, F., Seiter, P.A., Sahut, C., Cournac, L., Roubaud, A., Peltier, G., Froment, A. (2012). An economic, sustainability, and energetic model of biodiesel production from microalgae. *Bioresource Technology* 111: 191–200.
- Demirbas A., Demirbas M. (2010) Algae as a new source of biodiesel green energy and technology. Springer, London
- Devault D.A., Pierre R., Marfaing H., Dolique F., Lopez P. (2021). *Sargassum* contamination and consequences for downstream uses: a review. *J Appl Phycol.* 33: 567-602.
- Díaz-Vázquez, L., Rojas-Pérez, A., Fuentes, M., Robles, I., Jena, U., Das, K. (2015). Demineralization of *Sargassum* spp. macroalgae biomass: selective hydrothermal liquefaction process for bio-oil production. *Front Energy Res* 3: 1–11.
- Divya, K., Roja, M., Padal, S. (2015) Effect of seaweed liquid fertilizer of *Sargassum wightii* on germination, growth and productivity of brinjal. *Int. J. Adv. Res. Sci. Eng. Technol.* 2: 868-871.
- Djakoure, S., Araujo, M., Hounsou-Gbo, A., Noriega, C., Bourles, B. (2017). On the potential causes of the recent Pelagic *Sargassum* blooms events in the tropical North Atlantic Ocean. *Biogeosci Discuss*, <https://doi.org/10.5194/bg-2017-346>
- DOUE (2015). Reglamento (UE) 2015/186 de la Comisión, de 6 de febrero de 2015, por el que se modifica el anexo I de la Directiva 2002/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que respecta a los niveles máximos de arsénico, flúor, plomo, mercurio, endosulfán y semillas de Ambrosia Texto pertinente a efectos del EEE. *Diario Oficial de la Unión Europea* L31: 11-17.
- du Jardin P. (2015). Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Sci. Hort.* 196: 3-14
- Durand L., Sundberg J. (2022). Algas, monstruos y el final del paraíso. En: Martín Dabezies, J.; Arregui, A.G. (Eds.), *Vitalidades. Etnografía en los límites de los humanos*. Nola Editores, Madrid, pp. 189-207.
- El Shoubaky, G., Salem, E. (2016). Effect of abiotic stress on endogenous phytohormones profile in some seaweeds. *IJPPR* 8: 124-134.

- Fan S., Yu G., Nie W., Jin J., Chen L., Chen X. (2018). Antitumor activity and underlying mechanism of *Sargassum fusiforme* polysaccharides in CNE-bearing mice. *Int J Biol* 112: 516–522
- Farokhi M., Jonidi Shariatzadeh F., Solouk A., Mirzadeh H. (2020). Alginate based scaffolds for cartilage tissue engineering: a review. *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.* 69: 230–247.
- Fawzy, M.A., Gomaa, M., Hifney, A.F., Abdel-Gawad, K.M. (2017). Optimization of alginate alkaline extraction technology from *Sargassum latifolium* and its potential antioxidant and emulsifying properties. *Carbohydr. Polym.* 157: 1903–1912.
- Ferdouse, F., Holdt, S.L., Smith, R., Murúa, P., Yang, Z. (2018). The Global Status of Seaweed Production, Trade and Utilization. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma
- Fleurence, J. (2016). Seaweeds as food. In: *Seaweed in Health and Disease Prevention*. Elsevier, pp. 149–167.
- Fu X., Cao C., Ren B., Zhang B., Huang Q., Li C. (2018) Structural characterization and in vitro fermentation of a novel polysaccharide from *Sargassum thunbergii* and its impact on gut microbiota. *Carbohydr Polym* 183:230–239
- Fuller S., Beck E., Salman H., Tapsell L. (2016). New horizons for the study of dietary fiber and health: a review. *Plant Foods Hum. Nutr.* 71: 1–12.
- Galadima, A, Muraza, O (2018) Hydrothermal liquefaction of algae and bio-oil upgrading into liquid fuels: Role of heterogeneous catalysts. *Renew Sustain Energy Rev* 81: 1037–1048.
- Gammone, M., Riccioni, G., Parrinello, G., D’Orazio, N. (2019). Omega-3 polyunsaturated fatty acids: Benefits and endpoints in sport. *Nutrients* 11: 46.
- Gammone, M.A., D’Orazio, N. (2015). Anti-obesity activity of the marine carotenoid fucoxanthin. *Mar. Drugs* 13: 2196–2214
- Gellenbeck K. (2012). Utilization of algal materials for nutraceutical and cosmeceutical applications. what do manufacturers need to know? *J Appl Phycol* 24: 309–313

- Gepp, M., Fischer B., Schulz A., Dobringer J., Gentile L., V'asquez, J., Neubauer, J. C., Zimmermann, H. (2017). Bioactive surfaces from seaweed-derived alginates for the cultivation of human stem cells. *J. Appl. Phycol.* 29: 2451–2461.
- Ghadiryfar M., Rosentrater K., Keyhani, A., Omid, M. (2016). A review of macroalgae production, with potential applications in biofuels and bioenergy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54: 473–481.
- Gollakota, ARK, Kishore, N, Gu, S (2018) A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renew Sustain Energy Rev* 81: 1378–1392.
- Gonçalves, V.S.S., Gurikov, P., Poejo, J., Matias, A.A., Heinrich, S., Duarte, C.M.M., Smirnova, I. (2016). Alginate-based hybrid aerogel microparticles for mucosal drug delivery. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 107: 160–170.
- Gopirajan, P., Gopinath, K., Sivaranjani, G., Arun, J. (2021). Optimization of hydrothermal gasification process through machine learning approach: Experimental conditions, product yield and pollution. *J Clean Prod* 306:127302
- Gordillo Sierra A.R., Amador-Castro L.F., Ramírez-Partida A.E., García-Cayuela T., Carrillo-Nieves D., Alper H.S. (2022). Valorization of Caribbean *Sargassum* biomass as a source of alginate and sugars for de novo biodiesel production. *Journal of Environmental Management* 324: 116364.
- Gower, J., King, S. (2011). Distribution of floating *sargassum* in the Gulf of Mexico and the Atlantic Ocean mapped using MERIS. *International Journal of Remote Sensing* 32: 1917-29.
- Gray, N. (2017). *Water Technology*. CRC Press, Londres.
- Guerra Dore C., Faustino A., M. G. das C., Pofirio Will LSE., Costa T., Sabry D., de Souza Rêgo LAR de., Accardo C., Rocha H., Filgueira L., Leite E. (2013). A sulfated polysaccharide, fucans, isolated from brown algae *Sargassum vulgare* with anticoagulant, antithrombotic, antioxidant and anti-inflammatory effects. *Carbohydr Polym* 91: 467–475

Guo, P., Saw, W.L, Eyk, PJ, Stechel, EB, De Nys, R, Ashman, PJ (2017) Gasification reactivity and physicochemical properties of the chars from raw and torrefied wood, grape marc, and macroalgae. *Energy Fuels* 31: 2246-2259.

Gurung, A., Van, S., Kang, W., Qambrani, N., Oh, S. (2012). Evaluation of marine biomass as a source of methane in batch tests: a lab-scale study. *Energy* 43: 396-401.

Gutzeit G., Lorch D., Weber A., Engels M., Neis U. (2005). Bioflocculent algal–bacterial biomass improves low-cost wastewater treatment. *Water Sci. Technol.* 52: 9–18.

Harun, R., Yip, J., Thiruvankadam, S., Ghani, W., Cherrington, T., and Danquah, M. (2013). Algal biomass conversion to bioethanol—A step-by-step assessment. *Biotechnol. J.* 9: 73–86.

He, P., Xu, S., Zhang, H., Wen, S., Dai, Y., Lin, S., Yarish, C. (2008). Bioremediation efficiency in the removal of dissolved inorganic nutrients by the red seaweed, *Porphyra yezoensis*, cultivated in the open sea. *Water Res.* 42: 1281–1289

He, S., Zhao, M., Wang, J., Cheng, Z., Yan, B., Chen, G. (2020). Hydrothermal liquefaction of low-lipid algae *Nannochloropsis* sp. and *Sargassum* sp.: Effect of feedstock composition and temperature. *Sci Total Environ* 712: 135677.

Heo, S., Yoon, W., Kim, K., Ahn, G., Kang, S., Kang, D., Affan, A., Oh, C., Jung, W., Jeon, Y. (2010). Evaluation of anti-inflammatory effect of fucoxanthin isolated from brown algae in lipopolysaccharide-stimulated RAW 264.7 macrophages. *Food Chem Toxicol* 48 :2045-2051

Holdt, S. L., Edwards, M. D. (2014). Cost-effective IMTA: a comparison of the production efficiencies of mussels and seaweed. *Journal of Applied Phycology* 26: 933-945.

<https://news.proypesca.es/articulo/el-mar-de-los-sargazos-se-esta-convirtiendo-en-una-zona-muerta/>

https://www.naturalista.mx/taxa/134103-Sargassum-fluitans/browse_photos

https://www.naturalista.mx/taxa/134104-Sargassum-natans/browse_photos

- Hu, Z., Zheng, Y., Yan, F., Xiao, B., Liu, S. (2013). Bio-oil production through pyrolysis of blue-green algae blooms (BGAB): Product distribution and bio-oil characterization. *Energy* 52: 119–125
- Jafarihaghighi F., Ardjmand M., Salar Hassani M., Mirzajanzadeh M., Bahrami H. (2020). Effect of fatty acid profiles and molecular structures of nine new source of biodiesel on combustion and emission. *ACS Omega* 5: 16053-16063.
- Jard, G., Marfaing, H., Carrere, H., Delgenes, J.P., Steyer, J.P., Dumas, C. (2013) French Brittany macroalgae screening: Composition and methane potential for potential alternative sources of energy and products. *Bioresource Technology* 144: 492–498.
- Jehan, S., Khattak, S., Muhammad, S., Ali L., Rashid, A., Hussain, M.L. (2020). Human health risks by potentially toxic metals in drinking water along the Hattar Industrial Estate, Pakistan. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, 2677–2690.
- Jennings, R. (1968). Gibberellin antagonism by material from a brown alga. *New Phytol.* 68: 683-688.
- Jin W., Liu B., Li S., Chen J., Tang H., Jiang D., Zhang Q., Zhong W. (2018). The structural features of the sulfated heteropolysaccharide (ST-1) from *Sargassum thunbergii* and its neuroprotective activities. *Int J Biol Macromol* 108: 307–313
- Kaewpanha, M., Guan, G., Hao, X., Wang, Z., Kasai, Y., Kusakabe, K. (2014) Steam co-gasification of brown seaweed and landbased biomass. *Fuel Process Technol* 120: 106-112.
- Karray, R., Karray, F., Loukil, S., Mhiri, N., Sayadi, S. (2017). Anaerobic co-digestion of Tunisian green macroalgae *Ulva rigida* with sugar industry wastewater for biogas and methane production enhancement. *Waste Management* 61: 171–8
- Kasim, W., Hamada, E., Shams El-Din, N., Eskander S. (2015). Influence of seaweed extracts on the growth, some metabolic activities and yield of wheat grown under drought stress. *Int J Agri Agri R* 7:173-189.
- Katsanevakis S., Wallentinus I., Zenetos A., Leppäkoski E., Cinar M., Oztürk B., Grabowski M., Golani D., Cardoso A. (2014). Impacts of invasive alien marine species on ecosystem services and biodiversity: a pan-European review. *Aquatic Invasions* 9: 391-423.

- Khan SA, Abid M, Hussain F (2015) Nematicidal activity of seaweeds against *Meloidogyne javanica*. *Pak J Nematol* 33: 195-203.
- Kim H., Park C., Kim G., Park E., Jeon Y., Kim S, Hwang H., Choi Y. (2018). *Sargassum serratifolium* attenuates RANKL-induced osteoclast differentiation and oxidative stress through inhibition of NF- κ B and activation of the Nrf₂/HO₁ signaling pathway. *Biosc Trends* 12: 257–265.
- Kim S., Ly H., Kim J., Choi J., Woo H. (2013). Thermogravimetric characteristics and pyrolysis kinetics of alga *Sargassum* sp. biomass. *Bioresour Technol* 139:242–248.
- Kleitou, P., Kletou, D., David, J. (2018). Is Europe ready for integrated multi-trophic aquaculture? A survey on the perspectives of European farmers and scientists with IMTA experience. *Aquaculture* 490: 136-148.
- Kositkanawuth, K., Bhatt, A., Sattler, M., Dennis, B. (2017). Renewable energy from waste: investigation of co-pyrolysis between *Sargassum* macroalgae and polystyrene. *Energy Fuels* 31: 5088-5096.
- Kostas, E. T., White, D. A., and Cook, D. J. (2017). Development of a biorefinery process for the production of speciality chemical, biofuel and bioactive compounds from *Laminaria digitata*. *Algal Res.* 28: 211–219.
- Langin K. (2018). Seaweed masses assault Caribbean islands. *Science* 360: 1157-1158.
- Langlois, J., Sassi, J., Fard, G., Steyer, J., Delgenes, J., Helias, A. (2012). Life cycle assessment of biomethane from offshore-cultivated seaweed. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 6: 387–404.
- Lapointe B.E., Brewton R.A., Herren L.W., Wang M., Hu C., McGillicuddy D.J. Jr, Lindell S., Hernandez F.J., Morton P.L. (2021). Nutrient content and stoichiometry of pelagic *Sargassum* reflects increasing nitrogen availability in the Atlantic Basin. *Nat Commun.* 12(1): 3060.
- Lee X., Ong H., Gan Y., Chen W. (2020). State of art review on conventional and advanced pyrolysis of macroalgae and microalgae for biochar, bio-oil and bio-syngas production. *Energy Convers Manag* 210:1–34.

- Lee X., Ong H., Gan Y., Chen W. (2020). State of art review on conventional and advanced pyrolysis of macroalgae and microalgae for biochar, bio-oil and bio-syngas production. *Energy Convers Manag* 210: 1–34.
- Lewis, J., Salam, F., Slack, N., Winton, M., Hobson, L. (2012). Product Options for the Processing of Marine Macro-Algae—Summary Report; The Crown Estates: London, UK.
- Li, D., Chen, S., Zhang, X., Chen, F., Ye, N (2012) Comparative evaluation of the pyrolytic and kinetic characteristics of a macroalga (*Sargassum thunbergii*) and a freshwater plant (*Potamogeton crispus*). *Fuel* 96: 185–191.
- Li, J., Qiao, Y., Chen, X., Zong, P., Qin, S., Wu Y. (2019). Steam gasification of land, coastal zone and marine , by thermal gravimetric analyzer and a free-fall tubular gasifier: biochars reactivity and hydrogen-rich syngas production. *Bioresour Technol* 289: 1-9.
- Li, J., Zhu, Y., Wang, C., Wei, W., Liu, Z., Tian, Y. (2020). Golden seaweed tides from beach inundations as a valuable sustainable fuel resource: fast pyrolysis characteristics, product distribution and pathway study on *Sargassum horneri* based on model compounds. *Algal Res* 48: 1–11
- Lim S., Kwon M., Joung E., Shin T., Oh C-W., Choi J., Kim H. (2018). Meroterpenoid-rich fraction of the ethanolic extract from *Sargassum serratifolium* suppressed oxidative stress induced by tert-butyl hydroperoxide in HepG2 cells. *Mar Drugs* 16: 374
- Lin N., Lin J., Bo L., Weidong P., Chen S., Xu R. (2010). Differentiation of bone marrow-derived mesenchymal stem cells into hepatocyte-like cells in an alginate scaffold. *Cell Prolif* 43: 427–434.
- Liu, F., Liu, X., Wang, Y., Jin, Z., Moejes, F.W., Sun, S. (2018). Insights on the *Sargassum horneri* golden tides in the Yellow Sea inferred from morphological and molecular data. *Limnol. Oceanogr.* 63: 1762–1773.
- Lopresto, C.G., Paletta, R., Filippelli, P., Galluccio L., de la Rosa C., Amaro E., Jáuregui-Haza U., de Frias J.A. (2022). *Sargassum* Invasion in the Caribbean: An Opportunity for Coastal Communities to Produce Bioenergy Based on Biorefinery-An Overview. *Waste Biomass Valor.* 13: 2769-2793.

- Louime C., Fortune J., Gervais G. (2017). *Sargassum* invasion of coastal environments: a growing concern biogas production from marine algae view project meta-metabolomics of complex microbial communities view project. *Am. J. Environ. Sci.* 13: 58-64.
- Lourenço, S.O., Barbarino, E., De-Paula, J.C., Pereira, L.O. da S., Marquez, U.M.L. (2002). Amino acid composition, protein content and calculation of nitrogen-to-protein conversion factors for 19 tropical seaweeds. *Phycol. Res.* 50: 233–241 .
- Lu, Y., Song, S., Wang, R., Liu, Z., Meng, J., Sweetman, A.J., Jenkins, A., Ferrier, R.C., Li, H., Luo, W., Wang, T., 2015. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China. *Environ. Int.* 77, 5–15.
- Ma, R., Wang, Yajing, Qi, H., Shi, C., Wei, G., Xiao, L., Huang, Z., Liu, S., Yu, H., Teng, C., Liu, H., Murugadoss, V., Zhang, J., Wang, Yonggui, Guo, Z. (2019). Nanocomposite sponges of sodium alginate/graphene oxide/polyvinyl alcohol as potential wound dressing: in vitro and in vivo evaluation. *Compos. B Eng.* 167: 396–405.
- MacArtain P., Gill C., Brooks M., Campbell R., Rowland I. (2007). Nutritional value of edible seaweeds. *Nutr. Rev.* 65: 535–543
- Machado, C., Maddix, G., Francis, P., Thomas, S., Burton, J., Langer, S., Larson, T., Marsh, R., Webber, M., Tonon, T. (2022). Pelagic *Sargassum* events in Jamaica: Provenance, morphotype abundance, and influence of sample processing on biochemical composition of the biomass. *Sci Tot Environ* 817: 152761.
- Magnusson, M., Glasson, C., Vucko, M., Angell, A., Neoh, T., Nys, R. (2019). Enrichment process for the production of high-protein feed from the green seaweeds *Ulva ohnoi*. *Algal Res* 41: 101555.
- Mai, H., Fotedar, R., Fewtrell, J. (2010). Evaluation of *Sargassum* sp. as a nutrient-sink in an integrated seaweed-prawn (ISP) culture system. *Aquaculture* 310: 91-98
- Martínez-González, G. (2019). Sargazo: la irrupción atípica de un ecosistema milenario. *Salud Publica Mex.* 61: 698-700.
- Marudhupandi, T., Kumar, T.T.A. (2013). Antibacterial effect of fucoidan from *Sargassum wightii* against the chosen human bacterial pathogens. *Int. Curr. Pharmaceut. J.* 2: 156–158.

- Mary, A., Artavia Mora, J., Ronda Borzone, P., Richards, S., Kies, A. (2021). Vitamin E and beta-carotene status of dairy cows: a survey of plasma levels and supplementation practices. *Animal* 15: 100303.
- Mathur, C., Rai, S., Sase, N., Krish, S., Jayasri, M. (2015). Enteromorpha intestinalis derived seaweed liquid fertilizers as prospective biostimulant for Glycine max. *Braz Arch Biol Technol* 58: 813-820.
- McHugh, D. (2003). A Guide to the Seaweed Industry, FAO Fisheries Technical Paper. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- Michalak, I., Miller, U., Sówka, I., Chojnacka, K. (2016). Characterization of biological properties of co-composted Baltic seaweeds in germination tests. *Eng. Life. Sci.* 17: 153-164.
- Milledge, J.J., Harvey, P.J. (2016a). Golden tides: problem or golden opportunity? The valorisation of *Sargassum* from beach inundations. *J. Mar. Sci. Eng.* 4: 60.
- Milledge, J., Harvey, P. (2016b). Ensilage and anaerobic digestion of *Sargassum muticum*. *J Appl Phycol* 28: 3021-30.
- Milledge, J., Harvey, P. (2018). Anaerobic digestion and gasification of seaweed. In Rampelotto PH, Trincone A (eds) Grand challenges in marine biotechnology. Springer International Publishing.
- Milledge, J., Heaven, S. (2014). Methods of energy extraction from microalgal biomass. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 13: 301–320
- Milledge, J., Staple, A., Harvey, P. (2015). Slow pyrolysis as a method for the destruction of japanese wireweed, *Sargassum muticum*. *Environ Nat Resour Res* 5: 28–38
- Milledge, J.J., Maneein, S., Arribas Lopez, E., Bartlett, D. (2020). *Sargassum* inundations in Turks and Caicos: methane potential and proximate, ultimate, lipid, amino acid, metal and metalloid analyses. *Energies* 13: 1523.
- Mohammadifard, N., Humphries, K., Gotay, C., Mena-Sánchez, G., Salas-Salvado, J., Esmailzadeh, A., Ignaszewski, A., Sarrafzadegan, N. (2019). Trace minerals intake: risks and benefits for cardiovascular health. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 59: 1334–1346.

- Mohammed, C., Lalgee, L., Kistow, M., Jalsa, N., Ward, K. (2022). On the binding affinity and thermodynamics of sodium alginate heavy metal ion interactions for efficient adsorption. *Carbohydr Polym Technol Appl* 3: 100201.
- Monroy-Velázquez L.V., Rodríguez-Martínez R.E., van Tussenbroek B.I., Aguiar T., Solís-Weiss V., Briones-Fourzán P. (2019). Motile macrofauna associated with pelagic *Sargassum* in a Mexican reef lagoon. *Journal of Environmental Management*. 252: 109650.
- Montingelli, M., Benyounis, K., Stokes, J., Olabi, A. (2016) Pretreatment of macroalgal biomass for biogas production. *Energy Convers Manag* 108: 202-209.
- Montingelli, M.E., Tedesco, S., Olabi, A.G. (2015). Biogas production from algal biomass: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43: 961-972.
- Mulbry W., Kangas P., Kondrad, S. (2010). Toward scrubbing the bay: nutrient removal using small algal turf scrubbers on Chesapeake Bay tributaries. *Ecol. Eng.* 36: 536–541
- Nabti E., Jha B., Hartmann, A. (2017). Impact of seaweeds on agricultural crop production as biofertilizer. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 14: 1119-1134.
- Namvar F, Mohamad R, Baharara J, Zafar-Balanejad S, Fargahi F, Rahman HS (2013). Antioxidant, antiproliferative, and antiangiogenesis effects of polyphenol-rich seaweed (*Sargassum muticum*). *Biomed Res Int* 2013:604787.
- Neveux N., Bolton J., Bruhn A., Roberts A., Ras M. (2018). The bioremediation potential of seaweeds: recycling nitrogen, phosphorus, and other waste products. En: *Blue Biotechnology*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Alemania, pp. 217–239
- Nielsen H., Heiske, S. (2011). Anaerobic digestion of macroalgae: methane potentials, pre-treatment, inhibition and co-digestion. *Water Sci Technol* 64: 1723-9
- Oliveira, J., Alves, M., Costa, J. (2015). Optimization of biogas production from *Sargassum* sp. using a design of experiments to assess the co-digestion with glycerol and waste frying oil. *Bioresource Technology* 175: 480–485.

- Onwudili, JA, Lea-Langton, AR, Ross, AB, Williams, PT (2013). Catalytic hydrothermal gasification of algae for hydrogen production: Composition of reaction products and potential for nutrient recycling. *Bioresour Technol* 127: 72-80.
- Orozco-González J.G., Amador-Castro F., Gordillo-Sierra A.R., García-Cayuela T., Alper H.S., Carrillo-Nieves D. (2022) Opportunities Surrounding the Use of *Sargassum* Biomass as Precursor of Biogas, Bioethanol, and Biodiesel Production. *Front. Mar. Sci.* 8:791054.
- Oyesiku, O.O., Egunyomi, A. (2014). Identification and chemical studies of pelagic masses of *Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillon and *S. fluitans* (Borgessen) Borgesen (brown algae), found offshore in Ondo State, Nigeria. *Afr. J. Biotechnol.* 13: 1188-1193.
- Pake, A., Cheewasedtham, C., Cheewasedtham, W. (2015). Treatment of natural rubber latex serum waste by co-digestion with macroalgae, *Chaetomorpha* sp. and *Ulva intestinalis*, for sustainable production of biogas. *Chemical Papers* 69(3): 416–24.
- Palanisamy S., Vinosha M., Marudhupandi T., Rajasekar P., Prabhu, N. (2017). Isolation of fucoidan from *Sargassum polycystum* brown algae: structural characterization, in vitro antioxidant and anticancer activity. *Int. J. Biol. Macromol.* 102: 405–412.
- Pandey, B., Prajapati, Y., Sheth, P. (2019). Recent progress in thermochemical techniques to produce hydrogen gas from biomass: A state of the art review. *Int J Hydrog Energy* 44: 25384-25415.
- Pangestuti, R., Kim, S.-K., 2015. Seaweed proteins, peptides, and amino acids. In: Tiwari, B.K., Troy, D.J. (Eds.), *Seaweed Sustainability*. Academic Press, San Diego, pp. 125–140.
- Paredes-Camacho, R.M.; González-Morales, S.; González-Fuentes, J.A.; Rodríguez-Jasso, R.M.; Benavides-Mendoza, A.; Charles-Rodríguez, A.V.; Robledo-Olivo, A. (2023). Characterization of *Sargassum* spp. from the Mexican Caribbean and Its Valorization through Fermentation Process. *Processes*. 11: 685.
- Pattar N., Gowreesh S. (2017). Tar formation, reduction and technology of tar during biomass gasification/pyrolysis-an overview. *Int J Eng Res Technol IJERT* 6:62–70.

- Paul, R., Melville, L., Sulu, M. (2016). Anaerobic digestion of micro and macro algae, pretreatment and Co-Digestion-Biomass - a review for a better practice. *International Journal of Environmental Science and Development* 7: 646-50.
- Pedersen, M.F., Borum, J., Fotel, F.L., 2010. Phosphorus dynamics and limitation of fast and slow-growing temperate seaweeds in Oslofjord, Norway. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 399: 103–115.
- Peres, J., De Carvalho, L., Gonzalez, E., Berian, L., Darc-Felicio, J. (2012). Evaluation of antifungal activity of seaweed extracts. *Cienc Agrotec Lavras* 36: 294-299.
- Peretto, G., Du, W.-X., Avena-Bustillos, R.J., De, J., Berrios, J., Sambo, P., McHugh, T.H. (2017). Electrostatic and conventional spraying of alginate-based edible coating with natural antimicrobials for preserving fresh strawberry quality. *Food Bioprocess Technol.* 10: 165–174.
- Plaza, M., Cifuentes, A., Ibáñez, E. (2008). In the search of new functional food ingredients from algae. *Trends Food Sci. Technol.* 19: 31–39.
- Quagliani, D., Felt-Gunderson, P. (2016). Closing America's fiber intake gap. *Am. J. Lifestyle Med.* 11: 80–85
- Rahbari, H, Akram, A, Pazoki, M, Aghbashlo, M (2019) Bio-Oil production from *Sargassum* macroalgae: A green and healthy source of energy. *Jundishapur J Health Sci* 11: e84301
- Ramos, M.V., Monteiro, A.C.O., Moreira, R.A., Carvalho, A.D.F., a, F.U. (2000). Amino acid composition of some Brazilian seaweed species. *J. Food Biochem.* 24: 33–39.
- Resiere, D.; Valentino, R.; Nevière, R.; Banydeen, R.; Gueye, P.; Florentin, J.; Cabié, A.; Lebrun, T.; Mégarbane, B.; Guerrier, G. (2018). *Sargassum* seaweed on Caribbean islands: An international public health concern. *Lancet* 392: 2691.
- Roberts, D., Paul, N., Dworjanyan, S., Bird, M., Nya, R. (2015). Biochar from commercially cultivated seaweed for soil amelioration. *Sci Rep* 5: 1–6.
- Robledo, D., Vázquez-Delfín E. (2019). *Sargazo, conociendo el enemigo*. Disponible en: <https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/sargazo-conociendo-al-enemigo/?print-posts=pdf/> (Fecha de acceso: 14 abril 2023).

- Rocca, S., Agostini, A., Giuntoli, J., Marelli, L. (2015). Biofuels from Algae: Technology Options, Energy Balance and Ghg Emissions: Insights from a Literature Review; Publications Office of the European Union: Luxembourg.
- Rodríguez-Martínez R., Tussenbroek B., Jordán-Dahlgren E. (2016). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe mexicano (2014-2015). En: García-Mendoza E., Quijano-Scheggia S.I., Olivos-Ortiz A., Núñez-Vázquez E.J. (Eds.), Florecimientos algales nocivos en México. RedFAN-CICESE, Ensenada, México, pp. 353-365.
- Rodríguez-Martínez, R.E., Roy, P.D., Torrescano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S., Collado-Vides, L., García-Sánchez, M., van Tussenbroek, B.I. (2020). Element concentrations in pelagic *Sargassum* along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019. *PeerJ* 8: 1-19.
- Roleda, M.J., Hurd, C.L. (2019) Seaweed Nutrient Physiology: Application of Concepts to Aquaculture and Bioremediation. *Phycologia* 58: 552-562.
- Ross, A., Anastasakis, K., Kubacki, M., Jones, J. (2009) Investigation of the pyrolysis behaviour of brown algae before and after pre-treatment using PY-GC/MS and TGA. *J Anal Appl Pyrolysis* 85: 3–10.
- Ross, A., Jones, J., Kubacki, M., Bridgeman, T. (2008). Classification of macroalgae as fuel and its thermochemical behaviour. *Bioresour Technol* 99: 6494–6504.
- Rustamaji H., Prakoso T., Rizkiana J., Devianto H., Widiatmoko P., Guan G. (2022). Synthesis and characterization of hydrochar and bio-oil from hydrothermal carbonization of *Sargassum* sp. using choline chloride (ChCl) catalyst. *International Journal of Renewable Energy Development* 11: 403-412.
- Saini, R., Keum, Y. (2018). Omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids: dietary sources, metabolism, and significance - a review. *Life Sci.* 203: 255–267.
- Sarker B., Boccaccini, A. (2018). Alginate utilization in tissue engineering and cell therapy. In: Rehm, B.H.A., Moradali, M.F. (Eds.), *Alginates and Their Biomedical Applications*, Springer Series in Biomaterials Science and Engineering. Springer Singapore, Singapore, pp. 121–155.

- Savasangari, S., Nagaraj, S., Vijayanand, N. (2011). Influence of seaweed liquid extracts on growth, biochemical and yield characteristics of *Cyamopsis tetragonolaba* (L.) Taub. *J. Phytol.* 3: 37-41.
- Schwarzenbach, R.P., Egli, T., Hofstetter, T.B., von Gunten, U., Wehrli, B. (2010). Global water pollution and human health. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 35: 109–136
- Sempera, J. (2013). Composting as an alternative management system for wild taro (*Colocasia esculenta*) and brown algae (*Sargassum fluitans* and *Sargassum natans*). Trabajo Fin de Máster, Texas State University, USA 119 pp
- Sempera, J., Meier, E., Waliczek, T. (2018). Composting as an alternative management strategy for Sargassum drifts on coastlines. *Horttechnology* 28: 80-84
- Shahidi, F., Ambigaipalan, P. (2018). Omega-3 polyunsaturated fatty acids and their health benefits. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* 9: 345–381.
- Shimada, M. (2018). Nutrición Animal. Cuarta edición. Editorial Trillas. México. pp. 390.
- Shpigel, M., Shauli, L., Odintsov, V., Ben-Ezra, D., Neori, A., Guttman, L. (2018). The sea urchin, *Paracentrotus lividus*, in an Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) system with fish (*Sparus aurata*) and seaweed (*Ulva lactuca*): nitrogen partitioning and proportional configurations. *Aquaculture* 490: 260–269.
- Sinag, A, Schumacher, M, Yanik, J, Kruse, A (2011). Hydrothermal conversion of seaweeds in a batch autoclave. *J Supercrit Fluids* 58: 131-135.
- Singh, J., Gu, S. (2010). Biomass conversion to energy in India-a critique. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 1367–1378.
- Slavin, J.L. (2005). Dietary fiber and body weight. *Nutrition* 21: 411–418.
- Smith, A., Ross, A. (2016). Production of bio-coal, bio-methane and fertilizer from seaweed via hydrothermal carbonization. *Algal Res* 16:1–11
- Song, Y., Liu, L., Shen, H., You, J., Luo, Y. (2011). Effect of sodium alginate-based edible coating containing different anti-oxidants on quality and shelf life of refrigerated bream (*Megalobrama amblycephala*). *Food Contr.* 22: 608–615.

- Spiller, G.A. (2001). CRC Handbook of Dietary Fiber in Human Nutrition, third ed. CRC Press, Boca Raton, Fla.
- Sridhar, S., Rengasamy, R. (2010). Significance of seaweed liquid fertilizers for minimizing chemical fertilizers and improving yield of *Arachis hypogaea* under field trial. *Rec. Res. Sci. Tech. 2*: 73-80.
- Statista. (2023). *Contribución total del turismo al PIB en los países del Caribe 2021*. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/1284756/contribucion-total-del-turismo-al-pib-en-los-paises-del-caribe/> (Fecha de acceso: 11 abril 2023).
- Summa, M., Russo, D., Penna, I., Margaroli, N., Bayer, I.S., Bandiera, T., Athanassiou, A., Bertorelli, R. (2018). A biocompatible sodium alginate/povidone iodine film enhances wound healing. *Eur. J. Pharm. Biopharm. 122*: 17–24.
- Sun, T., Gubler, F. (2004). Molecular mechanism of gibberellin signaling in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 55*:197-223.
- Tabassum, M., Wall, D., Murphy, J. (2016). Biogas production generated through continuous digestion of natural and cultivated seaweeds with dairy slurry. *Bioresour Technol* 219: 228–38.
- Tamama, K. (2020). Potential benefits of dietary seaweeds as protection against COVID-19. *Nutr Rev* 79: 814-823.
- Tanniou, A.; Esteban, S.L.; Vandanon, L.; Ibanez, E.; Mendiola, J.A.; Cerantola, S.; Kervarec, N.; La Barre, S.; Marchal, L.; Stiger-Pouvreau, V. (2013). Green improved processes to extract bioactive phenolic compounds from brown macroalgae using *Sargassum muticum* as model. *Talanta* 104: 44-52.
- Tapia-Tussell, R., Avila, J., Maldonado, J., Valero, D., Olguin, E., Perez, D. (2018) Biological pretreatment of Mexican caribbean macroalgae consortiums using bm-2 strain (*trametes hirsuta*) and its enzymatic broth to improve biomethane potential. *Energies* 11: 494.
- Tarakhovskaya, E., Maslov, Y., Shishova, M. (2007). Phytohormones in algae. *Russ J Plant Physiol* 54: 186-194.

- Tavassoli-Kafrani, E., Shekarchizadeh, H., Masoudpour-Behabadi, M. (2016). Development of edible films and coatings from alginates and carrageenans. *Carbohydr. Polym.* 137: 360–374
- Tedesco, S., Marrero, T., Olabi, A. (2014). Optimization of mechanical pretreatment of Laminariaceae spp. biomass-derived biogas. *Renewable Energy* 62: 527-34.
- Terasaki, M., Hirose, A., Narayan, B., Baba, Y., Kawagoe, C., Yasui, H., Saga, N., Hosokawa, M., Miyashita, K. (2009). Evaluation of recoverable functional lipid components of several brown seaweeds (Phaeophyta) from Japan with special reference to fucoxanthin and fucoesterol contents. *J. Phycol.* 45: 974–980.
- Thin, D., Menshova, R., Ermakova, S., Anastyuk, S., Ly, B., Zvyagintseva, T. (2013). Structural characteristics and anticancer activity of fucoidan from the Brown alga *sargassum mcclurei*. *Mar. Drugs* 11: 1456–1476.
- Thompson T.M., Young B. R., Baroutian S. (2020). Pelagic *Sargassum* for energy and fertiliser production in the Caribbean: a case study on Barbados. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 118: 109564.
- Thuy T., Ly B., Van T., van Quang N., Tu H., Zheng Y, Seguin C., Mi B., Ai U. (2015) Anti-HIV activity of fucoidans from three brown seaweed species. *Carbohydr Polym* 115:122–128
- Tian, C, Li, B, Liu, Z, Zhang, Y, Lu, H (2014) Hydrothermal liquefaction for algal biorefinery: A critical review. *Renew Sustain Energy Rev* 38: 933–950
- Tobio-Perez I., Alfonso-Cardero A., Diaz-Dominguez Y., Pohl S., Piloto-Rodriguez R., Lapuerta M. (2022). Thermochemical conversion of *Sargassum* for energy production: A comprehensive review. *Review. Bioenerg. Res.* 15: 1872-1893.
- Tønnesen H., Karlsen J. (2002). Alginate in drug delivery systems. *Drug Dev. Ind. Pharm.* 28: 621–630
- Torres, M. D., Kraan, S., and Domínguez, H. (2019). Seaweed biorefinery. *Rev. Environ. Sci. Bio Technol.* 18: 1–54.

- Tripathi M., Sahu J., Ganesan P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 55: 467–481.
- Troell, M., Joyce, A., Chopin, T., Neori, A., Buschmann, A.H., Fang, J.G. (2009). Ecological engineering in aquaculture - Potential for integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine offshore systems. *Aquaculture* 297: 1-9.
- Tripathi M., Sahu J., Ganesan P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 55: 467–481.
- Uribe-Martínez, A., Guzmán-Ramírez, A., Arreguín-Sánchez, F. Cuevas, E. (2020). El sargazo en el Caribe mexicano, revisión de una historia impensable. En: Rivera-Arriaga, E., I. Azuz-Adeath, O. D. Cervantes Rosas, A. Espinoza-Tenorio, R. Silva Casarín, A. Ortega-Rubio, A. V. Botello y B. E. Vega-Serratos (Eds.). *Gobernanza y manejo de las costas y mares ante la incertidumbre. Una guía para tomadores de decisiones*. Universidad Autónoma de Campeche, Red Internacional de Costas y Mares, Campeche, México. pp. 743-763.
- Ustyuzhanina N., Bilan M., Ushakova N., Usov A., Kiselevskiy M., Nifantiev N. (2014). Fucoidans: pro- or antiangiogenic agents? *Glycobiology* 24: 1265–1274. h
- Uyen, N.T.T., Hamid, Z.A.A., Tram, N.X.T., Ahmad, N. (2020). Fabrication of alginate microspheres for drug delivery: a review. *Int. J. Biol. Macromol.* 153: 1035–1046.
- Valderrama, M., Martínez, A., Silva, E., Almazán, O. (2018). Reduction of tar generated during biomass gasification: A review. *Biomass Bioenergy* 108:345–370.
- Valero, D., Díaz-Mula, H.M., Zapata, P.J., Guillén, F., Martínez-Romero, D., Castillo, S., Serrano, M. (2013). Effects of alginate edible coating on preserving fruit quality in four plum cultivars during postharvest storage. *Postharvest Biol. Technol.* 77: 1–6.
- van Ginneken, V.J., Helsper, J.P., de Visser, W., van Keulen, H., Brandenburg, W.A. (2011). Polyunsaturated fatty acids in various macroalgal species from north Atlantic and tropical seas. *Lipids Health Dis.* 10: 104.
- Vázquez-Delfín, E., Freile-Pelegrín, Y., Salazar-Garibay, A., Serviere-Zaragoza, E., Méndez-Rodríguez, L.C., Robledo, D. (2021). Species composition and chemical characterization of

- Sargassum* influx at six different locations along the Mexican Caribbean coast. *Sci. Total Environ.* 795: 148852.
- Ventura, J.R.S., Yang, B., Lee, Y.-W.; Lee, K., Jahng, D. (2013). Life cycle analyses of CO₂, energy, and cost for four different routes of microalgal bioenergy conversion. *Bioresource Technology* 137: 302–310.
- Vijayaraghavan, K., Teo T., Balasubramanian, R., Joshi, U., 2009. Application of *Sargassum* biomass to remove heavy metal ions from synthetic multi-metal solutions and urban storm water runoff. *J. Hazard Mater.* 164, 1019–1023
- Vivekanand, V., Eijssink, V., Horn, S. (2012). Biogas production from the brown seaweed *Saccharina latissima*: thermal pretreatment and codigestion with wheat straw. *J Appl Phycol* 24: 1295-301.
- Wang M., Hu C., Barnes B.B., Mitchum G., Lapointe B., Montoya J.P. (2019). The great Atlantic *Sargassum* belt. *Science* 364: 83-7.
- Wang W., Lu J., Wang C., Wang C.-S., Zhang, H., Li, C., Qian, G. (2013). Effects of *Sargassum fusiforme* polysaccharides on antioxidant activities and intestinal functions in mice. *Int. J. Biol. Macromol.* 58: 127–132.
- Wang, Q., Yang, Z. (2016). Industrial water pollution, water environment treatment, and health risks in China. *Environ. Pollut.* 218: 358–365
- Wang, S., Jiang, X., Han, X., Liu, J. (2009). Combustion characteristics of *Enteromorpha clathrata* and *Sargassum natans*. *Energy Fuels* 23:5173–5178.
- Wang, S., Wang, Q., Jiang, X., Han, X., Ji, H. (2013). Compositional analysis of bio-oil derived from pyrolysis of seaweed. *Energy Convers Manag* 68: 273–280.
- Wei Y., Tang J., Li J. (2019). The characteristics of products from pyrolysis of seaweed in molten carbonates. *Am Soc Agric Biol Eng* 62: 787–794
- Wijesinghe W., Jeon, Y. (2012). Biological activities and potential industrial applications of fucose rich sulfated polysaccharides and fucoidans isolated from brown seaweeds: a review. *Carbohydr. Polym.* 88: 13–20

- Xu, D, Savage, P (2015) Effect of reaction time and algae loading on water-soluble and insoluble biocrude fractions from hydrothermal liquefaction of algae. *Algal Res* 12: 60-67.
- Yen, H., Brune, D. (2007). Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane. *Bioresour Technol* 98(1): 130–4.
- Yende, S., Harle, U., Chaugule, B. (2014). Therapeutic potential and health benefits of *Sargassum* species. *Pharmacogn Rev.* 8: 1–7.
- Yu K., Lau B., Show P., Ong H., Ling T., Chen W. (2017). Recent developments on algal biochar production and characterization. *Bioresour Technol* 246: 2–11.
- Yu, Z, Zhu, X, Jiang, Y, Luo, P, Hu, C (2014). Bioremediation and fodder potentials of two *Sargassum* spp. in coastal waters of Shenzhen, South China. *Mar Pollut Bull.* 85: 797-802
- Yuan, Y. (2008). Marine algae constituents. En: Barrow, C., Shahidi, F. (eds) *Marine nutraceuticals and functional foods*. CRC Press, Boca Raton, pp 259-296.
- Zeraatkar, A.K., Ahmadzadeh, H., Talebi, A.F., Moheimani, N.R., McHenry, M.P. (2016). Potential use of algae for heavy metal bioremediation, a critical review. *J. Environ. Manage.* 181: 817–831
- Zhang, X., Ervin, E. (2008). Impact of seaweed extract-based cytokinins and zeatin riboside on creeping bentgrass heat tolerance. *Crop Sci.* 48: 364-370.
- Zodape, S., Kawarkhe, V., Patolia, J., Warade, A. (2008). Effect of liquid seaweed fertilizer and quality of okra (*Abelmoschus esculentus* L). *J. Sci. Ind. Res.* 67: 1115-1117.