

INVASIÓN DE SARGAZO EN PLAYAS DEL CARIBE, UNA OPORTUNIDAD PARA EL DESARROLLO DE NUEVOS MATERIALES

INVASION OF SARGASSUM ON THE CARIBBEAN BEACHES: AN OPPORTUNITY FOR THE DEVELOPMENT OF NEW MATERIALS

Claudia Antonio Hernandez^{1*}
Edith Osorio de la Rosa²
Mirna Valdez Hernández³
Abraham Pacio Castillo⁴
Mauricio Pacio Castillo¹

<https://orcid.org/0000-0001-6592-0834>
<https://orcid.org/0000-0003-4976-4928>
<https://orcid.org/0000-0002-6636-5032>
<https://orcid.org/0000-0001-7771-398X>
<https://orcid.org/0000-0002-4053-9962>

NÚMERO ESPECIAL POSGRADO ICUAP
Recibido: 20/diciembre/ 2023
Aprobado: 26/febrero/ 2024
Publicado: 7/marzo/ 2024

¹Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 14 sur y Av. San Claudio, Col. San Manuel, 72570, Puebla, Puebla, México.

²CONAHCYT- Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Departamento de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Chetumal, México.

³El Colegio de la Frontera Sur, Herbario Chetumal, México.

⁴Área de Ciencia de Materiales, Departamento de Materiales, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México.

*col537330@colaborador.buap.mx
eosorio@conahcyt.mx
mavaldez@ecosur.mx
pacio1904@gmail.com
mauricio.pacio@correo.buap.mx

RESUMEN

El calentamiento global afecta diversos aspectos climáticos, ambientales y biológicos, incluyendo la intensificación de fenómenos naturales como huracanes, sequías extremas y la alteración de los ecosistemas marinos. Dentro de este contexto, la arribazón masivos de sargazo en las costas del Caribe mexicano emerge como una problemática ambiental de creciente preocupación. Este fenómeno ha mostrado un incremento notable en la última década, no solo representa un desafío para la conservación de la biodiversidad marina, sino que también impacta negativamente en el sector turístico debido a la acumulación de algas en las playas y el desprendimiento de olores desagradables por su descomposición. Investigaciones recientes sugieren que el calentamiento global podría estar exacerbando este fenómeno a través del aumento de la temperatura del mar y cambios en las corrientes oceánicas, favoreciendo la proliferación y el desplazamiento del sargazo hacia las costas caribeñas. En el presente trabajo se muestra un breve recorrido sobre las problemáticas ambientales y de ecosistema originadas a partir de la llegada de miles de toneladas de sargazo a las costas del caribe mexicano. Inicialmente, se presenta el contexto ecológico y su importancia histórica desde sus primeros avistamientos. Posteriormente, se analiza su composición química y se exploran posibles aplicaciones para el desarrollo de nuevos materiales para hacer uso y aprovechamiento de la biomasa que recalca y hasta ahora se ha desperdiciado.

Palabras claves: Sargazo, mar de los sargazos, carbón activado, supercapacitor, electrodos.

ABSTRACT

Global warming affects various climatic, environmental and biological aspects, including the intensification of natural phenomena such as hurricanes, extreme droughts and the alteration of marine ecosystems. Within this context, the massive arrival of sargassum on the coasts of the Mexican Caribbean emerges as an environmental problem of growing concern. This phenomenon, which has seen a notable increase in the last decade, not only represents a challenge for the conservation of marine biodiversity, but also negatively impacts the tourism sector due to the accumulation of algae on beaches and the release of odors unpleasant due to their decomposition. Recent research suggests that global warming could be exacerbating this phenomenon through increased sea temperatures and changes in ocean currents, favoring the proliferation and movement of sargassum towards the Caribbean coasts. This work shows a brief overview of the problems caused by the arrival of thousands of tons of sargassum to the coasts of the Mexican Caribbean. Initially, the ecological context and its historical importance from its first sightings are presented. Subsequently, its chemical composition is analyzed and possible applications are explored for the development of new materials to make use of and take advantage of the biomass that lands and until now has been wasted.

Keywords: Sargassum, sargasso sea, activated carbon, supercapacitors, electrode.

INTRODUCCIÓN

A partir del 2011 en las costas del mar caribe, se ha visto una creciente población de algas marinas conocidas como Sargazo, las cuales no son nuevas en nuestro territorio, ya que sus primeros avistamientos fueron reportados a finales del siglo XV por Cristóbal Colón durante sus viajes al nuevo Mundo, de donde se deriva el nombre del “mar de los sargazos”. Este mar se extiende sobre el corazón del Océano Atlántico Norte, delimitado por el flujo de las principales corrientes oceánicas en el sentido de las agujas del reloj, donde, al oeste se encuentra la Corriente del Golfo, al este la corriente de Canarias, y las Corrientes Ecuatoriales y al sur la corriente de las Antillas (Feigl, 2016). Como estas corrientes no son fijas y varían de acuerdo a los vientos los límites precisos del Mar de los Sargazos también lo hacen, así que, en 2011 se delimitó un mapa plasmado en el reporte la protección y gestión del mar de los Sargazos (The Protection and Management of the Sargasso Sea) considerando las dimensiones de dicho mar y variaciones de las corrientes debido a los vientos, como se muestra en la figura 1 (De redacción, 2022; Laffoley et al, 2011).

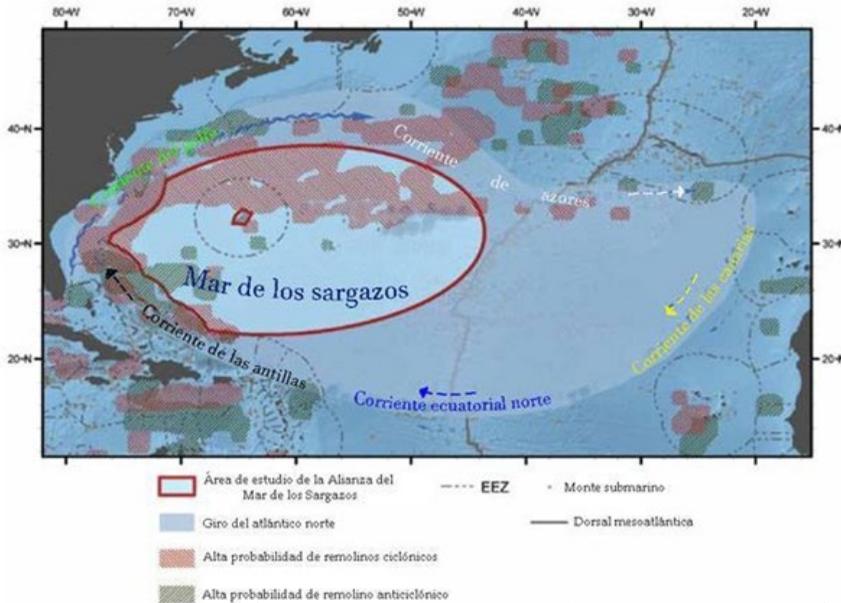


Figura 1. Límites y ubicación del Mar de los sargazos extraído del reporte la protección y gestión del mar de Los Sargazos (Laffoley et al, 2011, <https://eprints.soton.ac.uk/358065/>).

El sargazo también conocido como lenteja marina, no siempre se ha considerado una amenaza, al contrario se le intentó dar un uso. En 1772 fue utilizada como alimento para los marineros de la época manteniendo a las tripulaciones sanas y robustas, además se le atribuyeron propiedades diuréticas y antiescorbúticas de acuerdo a lo reportado por el Dr. Vicente de Lardizábal Dubois en su libro Consuelo de Navegantes; El sargazo como

antiescorbútico. Sin embargo en 1794 el médico cirujano de la Armada Antonio Corbella publicó una Disertación médico-chirúrgica que incluía a esa enfermedad aún con el consumo del sargazo por la deficiencia de vitamina C, retirando la recomendación de comer dichas algas. Por otra parte, se ha intentado darles una aplicación en la medicina alternativa y en la industria alimentaria de ganado, lo cual se sigue haciendo en la actualidad (Feigl, 2016; ; Vicente de Lardizábal Dubois, s. f.).

En este sentido, para promover la importancia del sargazo, se creó la Alianza del mar de los Sargazos bajo el liderazgo del Gobierno de las Bermudas en 2010, mostrando sus propiedades, así como el valor de su ecosistema en mar abierto, el papel que presenta en el sistema terrestre y oceánico, además del estudio científico, todo esto a escala mundial.

Por ello, el 11 de marzo de 2014 se firmó la declaración de Hamilton sobre la conservación del mar de los sargazos por los gobiernos de Bermudas, Azores, Mónaco, el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte, Estados Unidos de América y las Islas Vírgenes, destacando el desarrollo de planes de trabajo para el cuidado, divulgación, estudio científico y cooperación de los gobiernos con el objetivo de preservarlo (Laffoley et al, 2011; Declaración de Hamilton sobre la colaboración para la conservación del mar de los sargazos, 2014).

En este trabajo se presenta el estudio del tipo de sargazo que con mayor frecuencia llega a las costas caribeñas conocida como Sargazo natans (*S. natans*) y Sargazo fluitans (*S. fluitans*), la importancia que presenta para la vida marina, el ecosistema que contiene, las problemáticas que ha presentado en territorio Mexicano para el sector ambiental y económico, además de algunas aplicaciones potenciales que se encuentran en estudio con la finalidad de mitigar los daños que causan los arribos.

¿Qué es el sargazo?

El sargazo es una macroalga pelágica parda (Phaeophyceae) originalmente ubicada en el mar de los sargazos, su registro fósil posiblemente sea del mar de Tetis en la era mesozoica (De Redacción, 2022; Godínez-Ortega, 2021). Puede alcanzar talos (tallos) de hasta 60 m formando grandes bosques sumergidos manteniéndose a flote gracias a sus pequeñas vejigas de aire en forma de uva (llamados neumatóforos o aerocistos) logrando así grandes islas entrelazadas. El nombre pelágico se deriva a partir de su ciclo de vida el cual es flotando, su reproducción es de manera asexual, es decir, por fragmentación del talo. El botánico español Hipólito Ruiz López fue uno de los primeros en publicar imágenes y características de esta alga en 1798 nombrándola *Fucus natan* encontrada en el océano Atlántico, en la Figura 2 se muestra una de las primeras imágenes registradas para la clase *S. natans* I, caracterizada por sus hojas largas y delgadas. Como se observa, las algas no tienen raíces sino que tienen anclajes que las pueden retener en el fondo del mar o del océano. La estructura del talo o estípite puede ser dura, llena de gas, blanda o flexible, corta o larga

y en algunos casos, puede estar completamente ausente según el tipo de alga, presenta estructuras equivalentes a hojas llamadas láminas, en ellas se realiza la fotosíntesis, algunas especies de algas tienen una sola lámina, mientras que otras tienen muchas (Barsanti et al., 2014; Ruiz, 1798; Ortigón-Aznar et al., 2020).

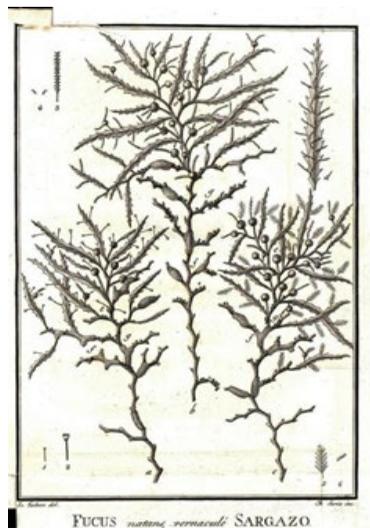


Figura 2. Imagen del sargazo *Fucus natans* I extraída de la descripción taxonómica de Hipólito Ruiz (1798, <https://bibdigital.rjb.csic.es/idurl/1/12722>).

El sargazo pelágico es un género muy diversificado con casi 361 especies, de acuerdo con su taxonomía se han clasificado en tres grupos: las algas verdes (Chlorophyta), las algas café o pardas (Phaeophyta) y las algas rojas (Rhodophyta). Las especies de macroalgas dominantes registradas en los arribazones de las costas caribeñas en México son del tipo Phaeophyta y se subdividen en *Sargassum fluitans* III, *Sargassum natans* I y *S. natans* VIII (Figura 3a). Cada especie presenta características específicas en su forma física, por ejemplo el *S. fluitans* tiene espinas en sus talos a diferencia del *S. natans* cuyos tallos se encuentran lisos (Figura 3b), los aerocistos del *natans* I son los más pequeños comparados con las otras dos especies alcanzando diámetros de 2.1–3.6 mm aproximadamente, esféricos y frecuentemente presentan una espina distal como se observa en la Figura 3c, sus hojas son lineales con 1–40 mm de largo y 1–3 mm de ancho de acuerdo a la escala es decir son delgadas (Figura. 3c). El *S. fluitans* presenta aerocistos de 2 hasta 5 mm de diámetro y no son totalmente esféricos sino más bien oblongas, sus hojas van de 1 a 50 mm de largo por 1 a 4 mm de ancho casi similares a las del *S. natans* VIII por lo que algunas veces tienden a confundirlas, solo que la cantidad de hojas es mayor en el *S. fluitans*, para *S. natans* VIII el tallo es liso, las hojas son anchas de hasta 7.3 mm, las vejigas no tienen espinas y son esféricas (Figura 3d). Una característica que comparten las tres especies es que

las hojas tienen ápices en formas puntiagudas y que pueden entrelazarse para formar grandes islas (Ortegón-Aznar et al., 2020; Godínez-Ortega et al., 2021; Schell, 2015).



Figura 3. Tipos y características principales del Sargazo de acuerdo con lo publicado por Schell, J. (2015, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2015.70>).

La gran cantidad de sargazo pelágico en el Caribe se ha atribuido principalmente al alto contenido de nutrientes en el agua como nitrógeno y fósforo, posiblemente generados por la eutrofización de aguas costeras caribeñas, que no es otra cosa más que el exceso de nutrientes orgánicos provenientes principalmente de las actividades humanas. En aguas enriquecidas con nutrientes, tanto *S. natans* como *S. uigans* duplican su biomasa en un promedio de 10 días, en comparación con los 50 días aproximados en aguas oceánicas del Mar de los Sargazos teniendo una floración 5 veces más, lo que se refleja en arribos con mayor frecuencia por año, además del cambio en las temperatura de la superficie del mar, así como de la fuerza de los vientos (Barsanti et al., 2014; Rodríguez-Martínez, 2016).

Importancia del sargazo en la vida marina

El mar de los sargazos es considerado un bosque tropical dorado flotante de acuerdo con la alianza del mar de los sargazos, ya que contiene una gran variedad de vida marina que se ha adaptado a él. Se sabe de al menos 10 especies endémicas (Figura 4) como son: el cangrejo del sargazo, camarón del sargazo, pez aguja, anémona del sargazo, babosa del sargazo, caracol del sargazo, crustáceos, gusanos y la especie más representativa de este hábitat, el pez del sargazo. La mayoría de estas especies suelen camuflarse de alguna forma, siendo el pez del sargazo el más relevante, ya que sus aletas están modificadas y gracias a ello pueden arrastrarse alrededor de todo el sargazo (Laffoley, 2011; Luis et al., 2021).



Figura 4. Especies endémicas del mar de los sargazos; a) cangrejo del sargazo, b) camarón del sargazo, c) pez aguja, d) anémona del sargazo, e) babosa del sargazo y f) pez del sargazo las imágenes fueron extraídas de la web. <https://inaturalist.ca/>, <https://ocean.si.edu/ocean-life> y Laffoley (2011, <https://eprints.soton.ac.uk/358065/>).

Conforme dicho bosque tropical se desplaza, acumula “pasajeros” aumentando la diversidad de invertebrados que se posan sobre él; esta biodiversidad cambia conforme las estaciones. Por ejemplo, el tiburón peregrino (*Cetorhinus maximus*) hace movimientos estacionales regulares hacia el mar de los Sargazos durante los meses de invierno a profundidades de 200 a 1000 m. Además, proporciona hábitat a más de 127 especies de peces, por lo que es un refugio de vida a cielo abierto dentro del océano con un ecosistema superficial característico basado en sargazo, albergando sus propias comunidades únicas, actuando al mismo tiempo como zona de cría y fuente de alimentación para peces como; delfines, atunes, peces espada y marlines. Otras especies migran a través del mar de los Sargazos, incluidos tiburones ballena, tiburones tigre, mantarrayas, etc. Las tortugas marinas pasan sus primeros años de vida en él, los cuales son conocidos como los “años perdidos” utilizando el sargazo como refugio seguro dentro del cual crecer. Por todo esto, organismos internacionales como la Comisión del Mar de los Sargazos y la Comisión Internacional para la Conservación del Atún del Atlántico (CICTA o ICCAT por sus siglas en inglés) han mostrado que es de vital importancia la preservación de este ecosistema manteniendo acuerdos para su conservación y estudio (Laffoley et al 2011; Mansfield et al 2021).

Problemáticas en las costas caribeñas

A partir del 2011, en las estaciones de la primavera y verano, el Cinturón de Sargazo se desplaza desde la costa de África hasta el Golfo de México de acuerdo al Observatorio de la Tierra de la NASA (NASA Earth Observatory, 2023), generando lo que conocemos como arribazones. Dicho fenómeno inunda las costas caribeñas, repercutiendo en la industria turística y,

por lo tanto, en la economía del país, ya que Quintana Roo contribuye considerablemente al producto interno bruto del país y desde luego a la economía local. En el verano del 2018 se vio una floración de algas de más de 20 millones de toneladas en mar abierto, causando muchos estragos en las costas del Atlántico tropical, el cinturón de algas para dicho año se puede observar en la Figura 5 en comparación con el 2011, donde las áreas rojas y naranjas representan la mayor densidad de sargazo. En el 2020 la recolección del alga en el mar y tierra fue de aproximadamente 19 mil toneladas, para el 2021 se tuvo un total de 44 mil 913 toneladas, para junio del 2022 se recolectaron aproximadamente 19 mil toneladas, de acuerdo a la Secretaría de marina (Infobae, 2022; Wang et al., 2019).

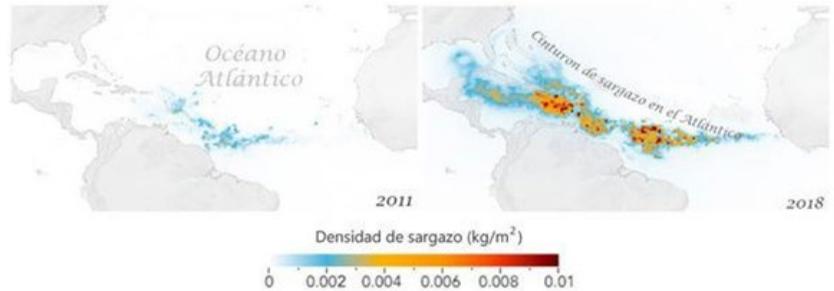


Figura 5. Densidad de sargazo para los años 2011 y 2018, imagen extraída del observatorio de la tierra de la NASA, (2023, <https://earthobservatory.nasa.gov/images/151188/a-massive-seaweed-bloom-in-the-atlantic>).

Al inicio de la primavera del año 2023 se alcanzó aproximadamente un arribo de casi 13 millones de toneladas, lo que se consideró un récord para la temporada. El desplazamiento del cinturón de sargazo para dicho año se puede observar en la Figura 6, donde los puntos rojos son la mayor densidad de sargazo concentrada en las corrientes canarias y ecuatoriales (flecha verde y negra respectivamente), llevándolas hacia las corrientes caribeñas (flecha morada) (NASA Earth Observatory, 2023).



Figura 6. Densidad del sargazo para marzo 2023, imagen extraída del observatorio de la tierra de la NASA (2023, <https://earthobservatory.nasa.gov/images/151188/a-massive-seaweed-bloom-in-the-atlantic>).

Las algas son arrojadas a la playa por las olas y el viento lo que hace que después de un determinado tiempo mueran, creando una masa en descomposición, así cantidades masivas del sargazo acumuladas en zonas costeras producen sulfuro de hidrógeno (H₂S), amoníaco y otros compuestos orgánicos creando un olor fétido a huevo podrido, provocando graves complicaciones de salud para las personas como; dolores de cabeza, náuseas y problemas respiratorios (Trinanes et al 2021; Rodríguez-Martínez et al., 2016). Para evitar la problemática ambiental y de salud los gobiernos han implementado operativos de limpieza, inicialmente el sargazo se removía de la playa manualmente pero cuando su volumen aumentó se comenzó a utilizar maquinaria, el inconveniente del uso de esta es que resultó en la compactación de arena, la destrucción de nidos y crías de tortugas marinas además de la erosión de playas, ya que cerca de 60% del volumen removido por las máquinas era arena y esta tarda años para recuperarse. Por otro lado, el costo aproximado por limpiar cada kilómetro de esta macroalga es de 1.5 millones de dólares al año, por lo que el impacto socioeconómico es alto tanto para la limpieza de playas como para el ambiente turístico, viéndose reducido este último (Rodríguez-Martínez et. al., 2016; Infobae, 2022).

La acumulación y descomposición de algas en el arribo del 2018 provocó una mortandad de al menos 78 especies de fauna, donde casi el 60% fue de peces, afectando el área de la pesca y esta es la segunda actividad económica de importancia para la Riviera Maya. Además, los arribazones provocan asfixia de organismos costeros asociados con pastos marinos y arrecifes de coral, esto se da en aguas poco profundas tornándolas de color café lo que pone en peligro a sus ecosistemas, en tierra la inutilización de las playas para la anidación de tortugas marinas. Por lo anterior, dicho fenómeno ha causado estragos ecológicos y socioeconómicos no solo para México, sino para todos los países del caribe (Trinanes et al 2021; Rodríguez-Martínez et. al., 2019).

Aplicaciones

Considerando las problemáticas presentadas es importante encontrar algún uso al sargazo, ya que los arribos suelen ser cada vez más frecuentes. Por lo que, una de las aplicaciones que están en estudio es el biogás (metano) como un tipo de energía limpia, debido a que actualmente se tiene un abuso en el consumo de combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural, desencadenando una crisis energética, por tanto, se buscan alternativas hacia las energías limpias y renovables.

Para la elaboración de un biogás, es imperativo mantener una temperatura estable que evite la putrefacción de la materia, dado que se encuentra almacenada por aproximadamente 21 días en un biodigestor. En relación con esto, uno de los parámetros fundamentales que deben mantenerse estables es la acidez de la mezcla, que se encuentra almacenada por aproximadamente 21 días en un biodigestor. En relación con esto, uno de los parámetros fundamentales que deben mantenerse estables es la acidez

de la mezcla, que generalmente se encuentra a un pH neutro de alrededor de 6 a 7 grados.. Otro parámetro que se monitorea es un ambiente libre de oxígeno, siendo que la biomasa se debe encontrar en un ambiente inerte para que los microorganismos logren descomponer la materia generando el biogás; a este proceso se le conoce como digestión anaeróbica (Figura 7). Se ha reportado que en la obtención del metano ha dado un mayor rendimiento al tener tamaño de partículas de la materia prima de hasta 1 mm además de realizar un pretratamiento al sargazo, ya sea químico con algún ácido diluido (HCl), en medio básico KOH) o térmico (140 °C por 30 min), seguido por una mezcla con materia orgánica (desechos alimenticios de hasta 2 mm) en una concentración de alrededor 1:3 respectivamente, ya que por sí solo no puede generar el suficiente metano (Thompson et. al., 2021; Orozco-González et al., 2022). Por otra parte, los trabajos de investigación continúan con el sargazo para producir otro tipo de gas como; el bioetanol y biodiésel, actualmente aún no hay ninguna empresa que se dedique al procesamiento de esta alga para aplicaciones en biogás (Orozco-González et al., 2022).

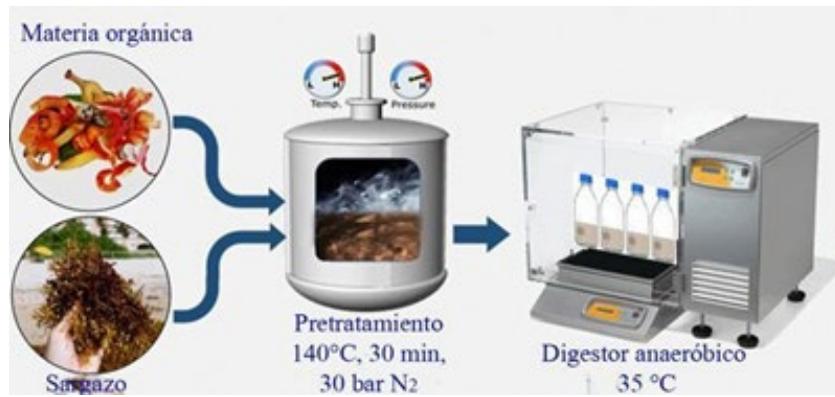


Figura 7. Esquema del proceso de obtención del biogás, reportado por Thompson, et. al., (2021, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130035>).

Otra investigación para la aplicación del sargazo es, la remoción de metales pesados (a través de la biosorción por medio de sus grupos funcionales), siendo la contaminación del agua uno de los tantos problemas que se tienen a nivel mundial, donde los metales pesados (MP) persisten en el medio ambiente al no degradarse y se acumulan a lo largo de la cadena alimentaria, provocando severos problemas de salud, además de la contaminación ambiental. Las últimas investigaciones revelan que el *S. fluitans* es capaz de absorber el cobre (Cu), Cadmio (Cd) y Níquel (Ni), el *S. natans* absorbe Plomo (Pb) y Ni, esto es posible en algunas algas hay polisacáridos y proteínas en las paredes celulares, lo que sirve como sitios de unión para la captación de iones metálicos. Para mejorar este proceso en el sargazo, se realizan tratamientos físicos o químicos modificando la

estructura celular, haciendo que los iones de metales pesados se adhieran a la superficie como se muestra en la Figura 8, esto es posible debido a: los grupos de unión para iones metálicos, las constantes de afinidad del metal con el grupo funcional, el estado químico de estos sitios, el número de grupos funcionales en la matriz de las algas, el número de coordinación del ion metálico que se va a absorber u otros procesos de intercambio iónico. En los tratamientos físicos es posible realizar métodos de congelamiento, trituración, tamizado y térmicos modificando la composición de la pared celular de las algas y, por tanto, las características de biosorción. Los pretratamientos químicos más usuales que se aplican son; cloruro de calcio (CaCl_2) mejora el intercambio iónico, hidróxido de sodio (NaOH) favorece las interacciones electrostáticas de los cationes de iones metálicos y el ácido clorhídrico (HCl) que aumenta los sitios de unión en la biosorción. De acuerdo a lo mencionado, se tiene que el uso de algas marinas ofrece una solución más confiable, barata y efectiva para eliminar metales pesados en soluciones a base de agua, por lo cual es una investigación con un alto potencial que se encuentra en desarrollo (Foday et. al., 2021; Fernández et. al., 2023; Mehta et al., 2005).



Figura 8. Mecanismo de interacción de iones metálicos con algas, reportado por Foday et. al., (2021, <https://doi.org/10.3390/su132112311>).

Por otra parte, en el área de almacenamiento de energía las investigaciones apuntan al sargazo como material viable para la fabricación de electrodos en los supercapacitores (SC), donde un dispositivo del tipo SC electroquímico está compuesto por una membrana separadora de iones, un electrolito que ayuda en la migración de iones entre electrodos y dos electrodos encargados del almacenamiento de carga. Estos últimos pueden ser de algún carbón activado (CA) poroso capaz de almacenar una densidad de energía, tener una alta superficie, no toxicidad, conductividad eléctrica y de ser posible una porosidad controlable. Para lograr dichas características los materiales de inicio son llevados por procesos físicos y químicos. En el caso específico de la materia

orgánica del sargazo se realiza una limpieza con agua desionizada, carbonización en un rango de temperaturas de 600 a 1000 °C, triturado para obtener tamaños de partículas del orden de μm , activación térmica con temperaturas que pueden variar de 350 a 750°C, decapado químico con KOH o HCl comúnmente y secado de 12 h con temperaturas que varían de 60 a 120 °C. Una vez obtenida la activación del carbón se procede con la fabricación del electrodo, para ello se hace una mezcla del carbón con algún grafito conductor, emulsión de politetrafluoroetileno (PTFE) y etanol, en una relación de 8:1:1 o 7:2:1 dependiendo de la conductividad del CA, después para sostener la mezcla se coloca en una esponja de níquel y alguna base de metal conductor, posteriormente es sometida a un secado con temperatura de aproximadamente 90 °C por 12 h. Por otra parte, los electrolitos más comunes para este tipo de estructura son a base de; H_2SO_4 , Na_2SO_4 o KOH, una vez elegido el electrolito y fabricado los electrodos, se forma la estructura del supercapacitor. En la Figura 9 se muestra un esquema general del proceso antes mencionado para la fabricación de un supercapacitor a base de sargazo (Elaiyappillai et. al., 2022; Roche et. al., 2023; Song et. al., 2014).

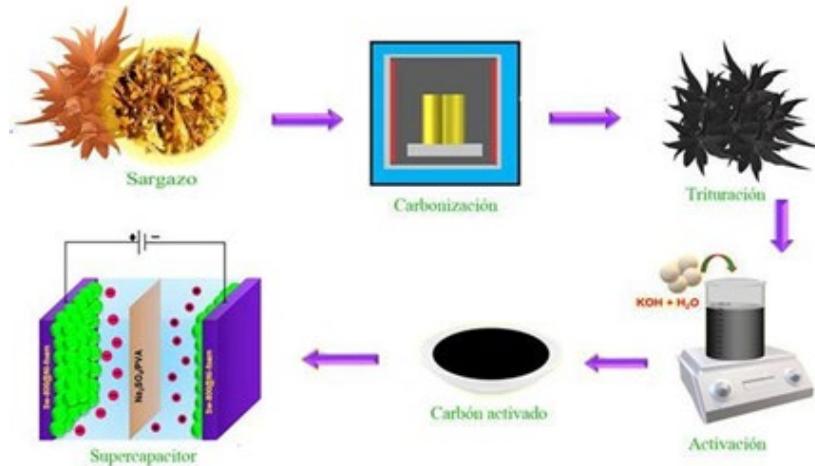


Figura 9. Esquema del proceso de fabricación de un supercapacitor, reportado por Elaiyappillai, (2022, <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116994>).

Actualmente una de las investigaciones que se desarrollan en el posgrado de dispositivos semiconductores perteneciente al instituto de ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) en colaboración con la universidad de Quintana Roo, el Colegio de la Frontera Sur, Herbario, Chetumal, y la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), es la aplicación del sargazo natans y fluitans en el área de almacenamiento de energía, el estudio se encuentra en la primera etapa la cual es, el análisis del sargazo. Para ello el alga fue

recolectada en aguas poco profundas, en la playa Xahuaxol, Quintana Roo, evitando su contaminación con otro material de la playa, se lavó con agua desionizada y se secó en un horno a 80° C por 2 h (Figura 11a), la temperatura de carbonización fue de 500 y 800 °C. Se realizaron mediciones de difracción de rayos X (XRD por sus siglas en inglés) del cual se puede saber la composición química y la orientación cristalina del material en los polvos carbonizados, al obtener los resultados o bien los patrones de difracción, se realizó la comparación con los patrones de las bases de datos de referencia, utilizando el software libre de X Pert HighScore Plus y se obtuvo lo siguiente; para la muestra de 500°C (Figura 10a) presenta cristales de Halita (NaCl) conocida generalmente como sal común en un 47% presentando sus picos de difracción característicos en 27.4°, 31.7°, 45.4°, 53.7°, 56.4°, 66.2° y 57.3°. Otro mineral que se encuentra presente es la Calcita de Magnesio (Mg_{0.64}Ca_{0.936}CO₃) en un 26% ubicando sus picos de difracción con mayor intensidad en 23.165°, 29.555°, 36.136°, 39.601°, 43.365°, 47.784°, 48.765°, finalmente se tiene Anhidrita (Ca₁O₄S₁) en un 27% con picos de difracción con mayor intensidad en 25.502°, 25.539°, 31.380°, 40.885°. Para la muestra carbonizada a 800° C (Figura 10b) se tiene Halita en un 72%, Calcita de Magnesio en un 19% y Cerato de Bario (Ba₁Ce₁O₃) en una menor proporción (9%), los picos de difracción de mayor intensidad para el último compuesto se encuentran en 28.487°, 28.536°, 40.761° y 50.479°.

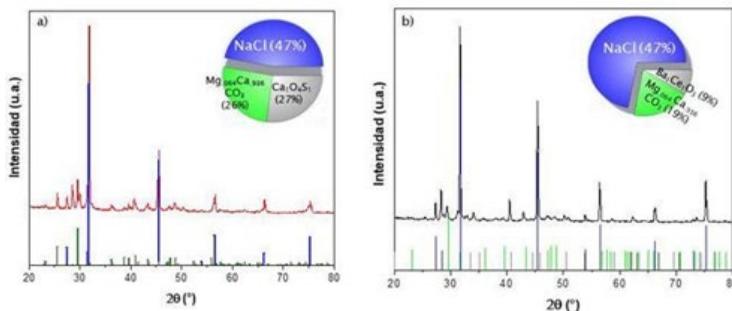


Figura 10. Patrón de difracción de rayos-X del sargazo carbonizado a: a) 500 °C y b) 800°C. Elaboración propia.

El material carbonizado tiene tamaños de hasta centímetros por lo que es necesario realizar la molienda, esta fue llevada a cabo en un molino de doble giro donde cada ciclo fue de 30 min por sentido con un tiempo total de 180 min obteniendo polvos con dimensiones de partículas en el rango de mm hasta μ m. Para 500°C se obtuvo un polvo gris oscuro (Figura 11b) mientras que para 800°C el polvo fue de color gris claro (Figura 11c) debido a que no se utilizó ningún gas de arrastre y a 800°C tiende a calcinarse.

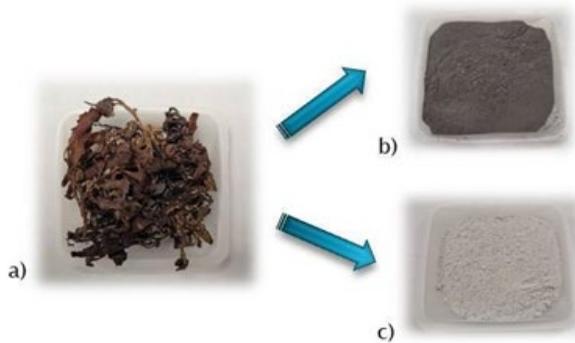


Figura 11. Sargazo; a) Seco, b) carbonizado a 500°C y molido, c) carbonizado a 800°C y molido. Elaboración propia.

El trabajo a futuro es procesarlo por algún método químico (a base de HCl o método Hummers) para activar el carbón y mejorar el área superficial con la finalidad de obtener una mayor área para la acumulación de carga. Se realizarán caracterizaciones; estructurales utilizando la técnica de espectroscopia RAMAN para conocer la cantidad de grafito que se tiene en los polvos de CA y carbón amorfo, morfológica por medio de Microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) dando una vista de la superficie física de las muestras ayudando a identificar si el material es poroso a una escala nanométrica. La mediciones eléctricas se llevarán a cabo por medio de la técnica de 4 puntas dando como resultado la resistividad del material y así calcular el nivel de conductividad, posteriormente se fabricará el electrodo para realizar las pruebas de voltametría cíclica identificando la capacidad que tendrá para almacenar energía y aplicarlo al diseño de supercapacitores.

CONCLUSIÓN

La contaminación de los ecosistemas acuáticos es un problema ambiental que requiere de estrategias inmediatas para el tratamiento eficiente de efluentes residuales y la disminución de su contenido de sustancias tóxicas. Además de la urgente legislación que gestione las descargas domésticas y las características de las aguas residuales que generan los hospitales; los desafíos más apremiantes que deben atenderse en el tratamiento de los contaminantes emergentes son su alta solubilidad, alta estabilidad química, baja biodegradabilidad y las transformaciones químicas que pueden experimentar para evaluar los efectos reales que generan en el ecosistema. En el caso particular de la contaminación del agua por ACBGs, el desarrollo de un procedimiento que permita separar, remover y recuperar gadolinio de la orina de pacientes que han estado expuestos a GBCA es urgente. De esta forma, se evitaría el incremento de gadolinio antropogénico en cuerpos de agua. La investigación que conduzca al desarrollo de materiales específicos adecuados para la implementación de un dispositivo capaz de remover y recuperar Gd³⁺ es

una idea innovadora, pues además de evitar la presencia del ion de tierras raras en efluentes urbanos, el elemento recuperado podría aprovecharse en diversas aplicaciones; como en la preparación de aleaciones metálicas resistentes o materiales electrónicos, por ejemplo.

DECLARACIÓN DE PRIVACIDAD

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

DECLARACIÓN DE NO CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen el financiamiento recibido para realizar las investigaciones expuestas mediante los proyectos: CONACyT INFRA-01-252847-2015 (México), BMBF-267630-2016 (Alemania) y VIEP-100043144-2019 (México). Edith Alvarez agradece la beca recibida por CONAHCyT (732898) para realizar sus estudios de doctorado.

REFERENCIAS

- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2014). *Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology*, Second Edition. <https://openlibrary.org/books/OL28468687M/Algae>
- Declaración de Hamilton sobre la colaboración para la conservación del mar de los sargazos, 11 de Marzo de 2014, disponible en: <https://www.sargassoseacommission.org>
- De Redacción, E. (2022, 27 diciembre). Mar de los Sargazos. *geoenciclopedia.com*. Recuperado 20 de julio de 2023, de <https://www.geoenciclopedia.com/mar-de-los-sargazos-148.html>
- Elaiyappillai, E., Jennifer, S. J., & Wang, S. (2022). Sustainable development of porous activated carbon from sargassum wightii seaweed for electrode material in symmetric supercapacitors. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 927, 116994. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116994>
- Feigl, J. P. (2016). Las algas y los antiguos navegantes españoles (1492-1792). *IEO: Revista del Instituto Español de Oceanografía*, 24, 62-75. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5576318>
- Fernández, L. A. G., Frómeta, A. E. N., Álvarez, C. C., Ramírez, R. F., Flores, P., Ramos, V. C., Sánchez Polo, M., Carrasco-Marín, F., & Castillo, N. A. M. (2023). Valorization of sargassum biomass as potential material for the remediation of Heavy-Metals-Contaminated waters. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2559. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032559>
- Foday, E. H., Bai, B., & Xu, X. (2021). Removal of toxic heavy metals from contaminated aqueous solutions using seaweeds: a review. *Sustainability*, 13(21), 12311. <https://doi.org/10.3390/su132112311>
- Godínez-Ortega, J. L., Cuatlán-Cortés, J. V., Lopez-Bautista, J., & Van Tussenbroek, B. J. (2021). A Natural History of Floating Sargassum Species (Sargasso) from Mexico. En *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97230>
- Infobae. (2022, 1 junio). Marina reconoció que arribo de sargazo en 2022 ha sido superior que otros años: “Nos ha rebasado”. *Infobae*. <https://www.infobae.com/america/mexico/2022/06/01/marina-reconocio-que-arribo-de-sargazo-en-2022-ha-sido-superior-que-otros-anos-nos-ha-rebasado/>
- Laffoley, D.d'A., Roe, H.S.J., Angel, M.V., Ardron, J., Bates, N.R., Boyd, I.L., Brooke, S., Buck, K.N., Carlson, C.A., Causey, B., Conte, M.H., Christiansen, S., Cleary, J., Donnelly, J., Earle, S.A., Edwards, R., Gjerde, K.M., Giovannoni, S.J., Gulick, S., Gollock, M., Hallett, J., ... V. Vats1 (2011). The protection and management of the Sargasso Sea: The golden floating rainforest of the Atlantic Ocean. *Summary Science and Supporting Evidence Case. Sargasso Sea Alliance*, 44 pp. <https://eprints.soton.ac.uk/358065/>
- Mansfield, K., Wynneken, J., & Luo, J. (2021). First Atlantic satellite tracks of 'lost years' green turtles support the importance of the Sargasso Sea as a sea turtle nursery. *Proceedings Of The Royal Society B: Biological Sciences*, 288(1950). <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.0057>
- Mehta, S. K., & Gaur, J. P. (2005). Use of Algae for Removing Heavy Metal Ions From Wastewater: Progress and Prospects. *Critical Reviews In Biotechnology*, 25(3), 113-152. <https://doi.org/10.1080/07388550500248571>
- NASA Earth Observatory. (2023). A massive seaweed bloom in the Atlantic. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/151188/a-massive-seaweed-bloom-in-the-atlantic>

- 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. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.791054>
- Ortegón-Aznar I, Ávila-Mosqueda V. 2020. Arribazón de sargazo en la península de Yucatán: ¿Problema local, regional o mundial?. *Bioagrocencias* 13(2): 28-37. DOI: <http://dx.doi.org/10.56369/BAC.3535>
- Roche, S., Yacou, C., Marius, C., Ranguin, R., Francoeur, M., Taberna, P., Passé-Coutrin, N., & Gaspard, S. (2023). Carbon materials prepared from invading pelagic sargassum for supercapacitors' electrodes. *Molecules*, 28(15), 5882. <https://doi.org/10.3390/molecules28155882>
- Rodríguez-Martínez, R. E., Medina-Valmaseda, A. E., Blanchon, P., Monroy-Velázquez, L. V., Almazán-Becerril, A., Delgado-Pech, B., Vásquez-Yeomans, L., Francisco, V., & García-Rivas, M. (2019). Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic sargassum. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 201-205. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.015>
- Rodríguez-Martínez, Rosa & Tussenbroek, Brigitta & Jordán-Dahlgren, Eric. (2016). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe mexicano (2014-2015).
- Rodríguez-Martínez, R. E., Roy, P. D., Torrescano-Valle, N., Cabañillas-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, e8667. <https://doi.org/10.7717/peerj.8667>
- Ruiz López H. (1798) De vera fuci natantis fructificatione. *Commentarius. Matriti: apud viduam e filium Petri Marin;* 38 p. <https://bibdigital.rjb.csic.es/idurl/1/12722>
- Schell, J.M., D.S. Goodwin, and A.N.S. Siuda. 2015. Recent Sargassum inundation events in the Caribbean: Shipboard observations reveal dominance of a previously rare form. *Oceanography* 28(3):8-10, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2015.70>.
- Song, M. Y., Park, H. Y., Yang, D. S., Bhattacharjya, D., & Yu, J. (2014). Seaweed-Derived Heteroatom-Doped highly porous carbon as an electrocatalyst for the oxygen reduction reaction. *ChemSusChem*, 7(6), 1755-1763. <https://doi.org/10.1002/cssc.201400049>
- Thompson, T. M., Young, B. R., & Baroutian, S. (2021). Enhancing biogas production from Caribbean pelagic sargassum utilising hydrothermal pretreatment and anaerobic co-digestion with food waste. *Chemosphere*, 275, 130035. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130035>
- Trinanes, J., Putman, N.F., Goni, G., Hu, C. and Wang, M. (2021) Monitoring pelagic Sargassum inundation potential for coastal communities. *J Oper Oceanogr* 1:1-12. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2021.1902682>
- Vicente de Lardizábal Dubois. (s. f.). *Real Academia de la Historia*. <https://dbe.rah.es/biografias/19534/vicente-de-lardizabal-dubois>
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G. T., Lapointe, B. E., & Montoya, J. P. (2019). The Great Atlantic Sargassum belt. *Science*, 365(6448), 83-87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>