

Aprovechamiento del sargazo a través de la incorporación de carbonización hidrotermal y digestión anaerobia: una solución sustentable para la gestión de biomasa marina

Israel de Jesús Balderas-Caballero, Norma A. Vallejo-Cantú *, Juan Manuel Méndez-Contreras, Erik Samuel Rosas-Mendoza y Alejandro Alvarado-Lassman

Laboratorio de Ambiental I, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia: norma.vc@orizaba.tecnm.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 17 de noviembre de 2024

Aceptado: 15 de diciembre de 2024

Publicado: 31 de diciembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.392>

Resumen: Este estudio trata sobre la apreciación del sargazo a través de la incorporación de la carbonización hidrotermal (HTC) y la digestión anaerobia (DA). La biomasa obtenida en Playa del Carmen, México, se sometió a HTC en un reactor automatizado, empleando temperaturas de 180 °C, 200 °C, periodos de reacción de 60 y 120 minutos y relación sólido/ agua de 1:1 y 1:3 (p/p) respectivamente. La HTC produjo hidrochar, agua de proceso y gas de síntesis. El hidrochar evidenció una potencia calorífica superior (HHV) de 13.75 a 18.92 MJ/kg, en cambio, el agua de proceso mostró un HHV de 12.36 a 15.80 MJ/kg y un potencial de producción de metano de hasta 723.56 mL CH₄/g SV. La combinación de HTC-DA mejora la utilización energética del sargazo, empleando el hidrochar como biocombustible sólido y el agua de proceso como medio para la generación de biogás. Esta perspectiva proporciona una alternativa factible para atenuar los problemas ecológicos y económicos provocados por las grandes llegadas de sargazo, fomentando la sostenibilidad en zonas costeras. Además, la investigación resalta la relevancia de continuar explorando tecnologías híbridas que incrementen la eficacia y el beneficio ambiental en la gestión de biomasa marina. Estos hallazgos favorecen la creación de soluciones innovadoras ante un reto mundial en aumento.

Palabras clave: *Sargassum*; carbonización hidrotermal; digestión anaerobia, energía

Introducción

Hoy en día, dos fenómenos naturales cobran gran importancia en el estado de Quintana Roo: 1) sucesos naturales como tempestades y ciclones, y 2) los arribazones masivos de *Sargassum spp.* (biomasa), las cuales se han producido anualmente desde 2015, con la llegada de grandes volúmenes durante primavera y verano. Estas enormes cantidades de biomasa generan serios desafíos ecológicos, económicos y de salud pública. Además, los lixiviados y la materia orgánica derivados de la degradación del sargazo afectan la calidad del agua marina, disminuyen el oxígeno y el pH, y provocan un aumento en las concentraciones de azufre y amoníaco (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2023).

A partir de 2014, el litoral cercano al Caribe Mexicano comenzó a sufrir el arribo masivo de biomasa de sargazo. El volumen acumulado en el mes de mayor incidencia aumentó de 5,760 toneladas en 2011 a 439,118 toneladas en 2015. Aunque entre 2016 y 2017 se registró una disminución, en 2018 se reportaron nuevamente 885,276 toneladas acumuladas en el mes más alto. La acumulación y degradación descontrolada de millones de toneladas de sargazo a lo largo de miles de kilómetros de playa cada año, ha generado graves problemas ambientales, como la muerte de praderas marinas y fauna, incluyendo especies de importancia económica como langostas y peces. Además, esta biomasa tiene la capacidad de absorber elementos tóxicos como As, Cd, Pb y Hg, los cuales pueden dispersarse en el medio ambiente (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2023).

Por otro lado, las repercusiones económicas de este fenómeno incluyen una disminución de visitantes a las playas y pérdidas en el comercio local. En 2014, la industria turística del Caribe generó 29.2 millones de dólares, representando más del 80 % del Producto Interno Bruto (PIB) de la región (Milledge y Harvey, 2016). Aunque se calcula que este sector alcanzó 57 millones de dólares en 2017 y podría incrementarse a 83 mil millones de dólares para 2027, el manejo del sargazo implica un gasto económico significativo (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2023).

Ante este panorama, el sargazo representa una posible fuente de biocombustible. Sin embargo, su elevado contenido de humedad plantea uno de los principales retos debido al gran consumo de energía requerido para su secado. Como alternativa, la Carbonización Hidrotérmica (HTC) se presenta como una tecnología viable para procesar biomásas con alto contenido de humedad, como el sargazo (Rustamaji *et al.*, 2022). La HTC tiene la ventaja de operar a temperaturas

relativamente bajas, reducir la emisión de gases tóxicos y eliminar la necesidad de un secado previo, utilizando agua como disolvente y catalizador (Sajjad *et al.*, 2021). El principal producto de la HTC es el hidrochar, un material sólido carbonoso orgánico similar a la turba o lignito (carbones de bajo rango) (Kantakanit *et al.*, 2018). Este material puede emplearse como combustible y como fuente de bioaceite. Actualmente, las investigaciones sobre el uso del hidrochar en procesos como la Digestión Anaerobia (DA) son limitadas.

Por tanto, la transformación de la biomasa de sargazo en productos de valor agregado resulta crucial tanto desde una perspectiva económica como ambiental.

Desarrollo

Recolección, tratamiento y carbonización de Biomasa

En esta investigación se tomaron en cuenta las algas del género *Sargassum* (Figura 1a) que se encontraban encalladas en Solidaridad, Playa del Carmen, México. La biomasa fue recolectada de forma manual. La biomasa fue triturada en una maquinaria comercial. Dado que el tamaño de las partículas no era relevante para este estudio, no se realizó una medición del mismo. Finalmente, la biomasa molida (Figura 1b) se conservó en un recipiente de plástico sellado y se conservó en un frigorífico comercial a menos de 5 °C hasta su tratamiento con HTC. Se utilizó un diseño factorial con dos réplicas, en el que los factores independientes son la temperatura, el periodo de reacción y la relación entre biomasa y agua. En todos los experimentos se mantuvo una relación sólida/agua de 1:1 y 1:3 (p/p), la mezcla se agitaba de manera manual para asegurar la total humectación de las algas antes de cerrar la tapa del recipiente del reactor.

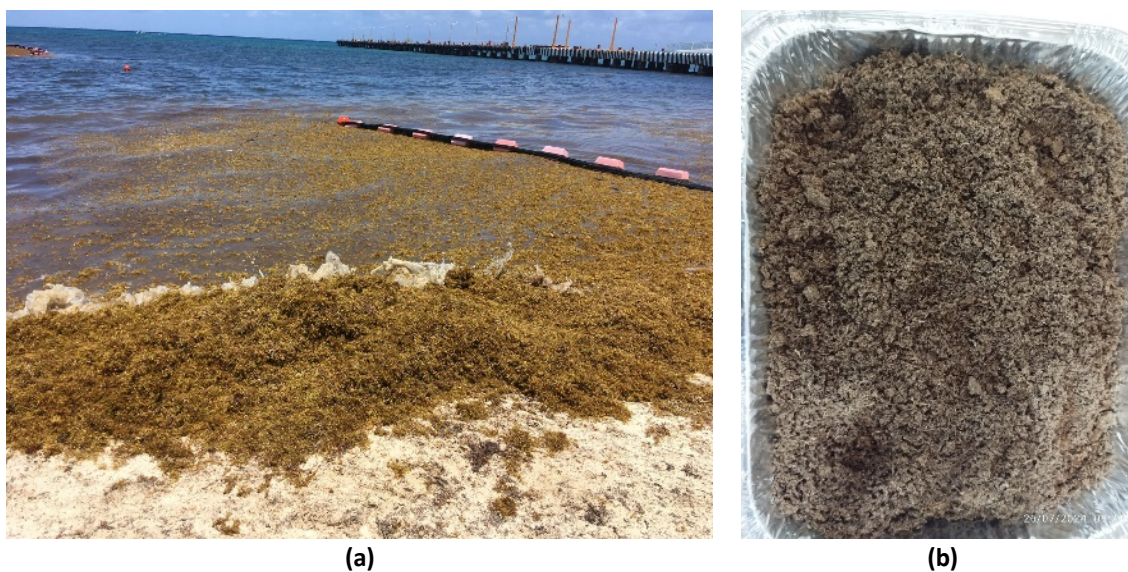


Figura 1. Biomasa acumulada en playa (a) y biomasa triturada (b).

El procedimiento de carbonización hidrotermal (HTC) se llevó a cabo en un reactor automatizado que posee su propio sistema de calefacción, Marca: Toption Instruments (TaiBai Road, Distrito YanTa, Xi'an, China), Modelo: CF-1. El reactor se compone de un cilindro de acero inoxidable con una capacidad para 1 L y 0.7 L de volumen de trabajo, y está recubierto con una camisa calefactora para gestionar una temperatura máxima de 400 °C, lo que posibilita que la temperatura interna del reactor llegue a 220 °C. El sistema dispone de un manómetro y un termopar para controlar la presión y la temperatura en el reactor, además de un termopar para controlar la temperatura en la camisa de calentamiento. Adicionalmente, hay un panel de control, que se puede utilizar para ajustar las temperaturas y los tiempos de trabajo durante el procedimiento de HTC. Los experimentos se llevaron a cabo a dos temperaturas de reacción distintas (180 °C y 200 °C) y dos periodos de reacción distintos (60 min y 120 min) con el objetivo de analizar el impacto en las características del hidrochar y del agua procesada. Se determinó el tiempo de respuesta del proceso HTC cuando la temperatura dentro del reactor llegó a los valores preestablecidos para el experimento.

Una vez alcanzado el tiempo de reacción deseado, se apagó el calentador. La temperatura interna del reactor tardó aproximadamente 3 horas en descender hasta la temperatura ambiente, aunque en solo 10 a 15 minutos ya había disminuido por debajo de 150 °C. Cuando el reactor alcanzó la temperatura ambiente, se desbloqueó la válvula de gas para liberar los gases generados. Posteriormente, se desenroscaron los pernos de compresión y se retiró el cabezal móvil.

A continuación, la mezcla bifásica de productos sólidos y líquidos resultante del proceso HTC, también conocida como suspensión húmeda, se transfirió a un vaso de precipitados de vidrio, y su peso fue registrado.

Separación de los productos

Se realizó un proceso de filtración al vacío para separar los productos sólidos y líquidos de la HTC. Para este proceso se utilizó papel filtro comercial para café. La Figura 2a muestra el producto líquido, o sea, el agua de proceso, en la Figura 2b muestra el producto sólido, o sea, el hidrochar húmedo que se obtiene tras la filtración. El peso del hidrochar húmedo fue registrado. Todas las muestras de hidrochar fueron secadas en una estufa de secado marca Riossa a 105 ± 2 °C durante 24 horas para eliminar el exceso de agua. A continuación, se examinaron las muestras de hidrochar para establecer sus propiedades como posible biocombustible a través de una caracterización fisicoquímica, análisis elemental y a través de la determinación de su poder calorífico superior. Adicionalmente, se registró el volumen del agua de proceso de cada muestra, así mismo se empleó en el proceso de digestión anaerobia (DA) el agua de proceso para examinar su capacidad como sustrato para la producción de biogás, como combustible gaseoso.

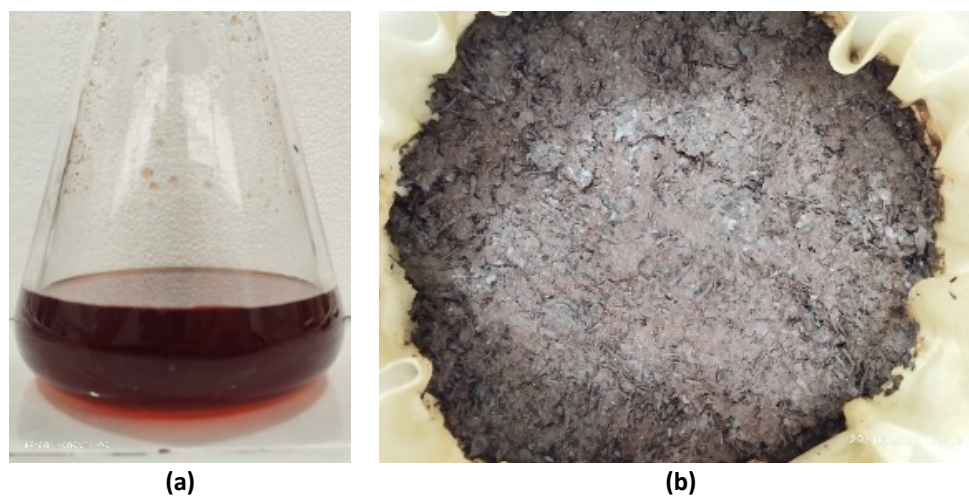


Figura 2. Agua de proceso (a) e hidrochar húmedo (b).

Análisis de los productos

Las muestras de hidrochar y del agua de proceso fueron analizadas para conocer su contenido de cenizas, humedad, rendimientos del sólido, líquido, gas y masa del hidrochar. Los resultados que obtuvieron fueron de una energía de entrada entre 8.54 y 18.1 MJ/Kg para llevar a cabo el proceso de HTC y producir hidrochar, agua de proceso y gas de síntesis. Los biocarbones producidos poseen una energía entre 13.75 – 16.24 MJ/Kg al ser combustionados. El incremento energético a partir de la biomasa original fue de 14 a 35 %. El rendimiento energético fue hasta del 93.8 %

Integración de la carbonización hidrotermal y digestión anaerobia

La digestión anaeróbica del agua de proceso se llevó a cabo en un Reactor Anaerobio Híbrido (RAH), un sistema de biopelícula diseñado para optimizar el proceso.

La configuración del RAH, que combina un **lecho fijo** y un **lecho fluidizado inverso**, permite el tratamiento de altas cargas orgánicas. Además, la presencia de biopelícula anaerobia contribuye a mitigar los efectos negativos asociados con la presencia de furanos y compuestos fenólicos en el agua de proceso, optimizando así la producción de metano. Por lo tanto, es probable que el RAH contribuya a reducir la influencia de estos inhibidores.

El agua de proceso presentó un poder calorífico de 12.36 a 15.80 MJ/kg, mientras que los hidrochar obtenidos a 180 °C lograron una producción de metano de 535.57 a 702.13 mL CH₄/g SV. En contraste, los hidrochar generados a 200 °C alcanzaron un poder calorífico de 17.45 a 18.92 MJ/kg y una producción de metano de 607.28 a 723.56 mL CH₄/g SV.

Tendencias en la carbonización hidrotermal y la digestión anaerobia

Cada vez existe más interés en la integración de la carbonización hidrotermal (HTC) y la digestión anaerobia (AD) con el objetivo de optimizar el potencial energético de la biomasa. Hay diversas tácticas de unificación HTC-AD, tales como la combustión del hidrochar y la adicción del agua de proceso, la adicción de hidrochar o la adicción de lodos (combinación de hidrochar y agua de proceso) después de un pretratamiento hidrotérmico. La separación de los hidrochar destinados a la combustión y las aguas de proceso para su digestión representa el método de conversión más viable desde el punto de vista energético.

Conclusiones

El estudio evidencia que la combinación de la carbonización hidrotermal (HTC) y la digestión anaerobia (DA) representa una opción prometedora para convertir el sargazo en productos de valor añadido, tales como hidrochar y biogás. Estos procedimientos posibilitan optimizar el uso energético de esta biomasa marina, reduciendo su efecto en el medio ambiente y proporcionando soluciones sustentables y rentables para zonas impactadas por arribazones de biomasa.

Bibliografía

- Kantakanit, P., Tippayawong, N., Koonaphapdeelert, S., & Pattiya, A. (2018). Hydrochar generation from hydrothermal carbonization of organic wastes. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 159(1), 012001. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/159/1/012001>.
- Milledge, J. J., & Harvey, P. J. (2016). Golden tides: problem or golden opportunity? The valorisation of Sargassum from beach inundations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(3), 60. <https://doi.org/10.3390/jmse4030060>.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Torres-Conde, E. G., & Jordán-Dahlgren, E. (2023). Pelagic Sargassum cleanup cost in Mexico. *Ocean & Coastal Management*, 237, 106542. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106542>.
- Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. I., Navarro-Guerrero, G., Amaro-Mauricio, E. J., Mora-Domínguez, G., & González-Rivera, L. I. (2023). *Estrategia Integral para el Manejo y Aprovechamiento del Sargazo (EIMAS) en Quintana Roo*. Secretaría de Ecología y Medio Ambiente de Quintana Roo y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. México. 137 p.
- Rustamaji, H., Prakoso, T., Devianto, H., Widiatmoko, P., Rizkiana, J., & 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(2), 403-412. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.42595>.
- Rasam, S., Talebkeikhah, F., Talebkeikhah, M., Salimi, A., & Moraveji, M. K. (2021). Physico-chemical properties prediction of hydrochar in macroalgae Sargassum horneri hydrothermal carbonisation. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 101(14), 2297-2318. <https://doi.org/10.1080/03067319.2019.1700973>.