

Uniando la ciudad y el mar: Co-valorización sinérgica de residuos sólidos urbanos y microalgas mediante tecnologías novedosas de tratamiento hidrotermal asistidas por microondas e impulsadas por agua de mar

Juan Navarro-Machín¹, Alicia Callejas¹, María Benita Murillo¹, Alberto Gonzalo¹, Javier Remón¹

¹Grupo de Procesos Termoquímicos (GPT), Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)
Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.
Tel. +34-976762707, e-mail: juan.navarro@unizar.es

Resumen

Como parte del proyecto SYNAPP-FUELS (Synergistic and integrated approaches to convert terrestrial and marine waste into biofuels), se produjeron precursores de biocombustibles a partir de microalgas y RSU, mediante tratamiento hidrotermal asistido por microondas. Además, la inclusión de agua de mar en el proceso resultó positiva, con resultados similares a los observados con agua desionizada, lo que la posiciona como una posible alternativa para reducir el consumo de agua dulce en la industria.

Contexto del estudio

Los resultados que se presentan en esta comunicación forman parte de las etapas iniciales del proyecto SYNAPP-FUELS. Esta iniciativa se fundamenta en la necesidad de transitar hacia un modelo de biorrefinería más flexible y menos dependiente del tipo de materia prima de partida, lo que permite el coprocesado de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (RSU) y de microalgas capaces de producir floraciones algales nocivas (FAN).

Técnicamente, este trabajo se encuadra en el desarrollo de procesos de tratamiento hidrotermal asistidos por microondas (MA-HTT), explorando el uso de agua de mar como medio de reacción autocatalítico. Esta aproximación no solo tiene como objetivo reducir el consumo de agua dulce, sino que también busca aprovechar la matriz electrolítica del agua marina para favorecer la despolimerización de la biomasa mediante mecanismos de catálisis homogénea y conducción iónica, la cual genera puntos calientes (*hotspots*) térmicos que mejoran la eficacia global del proceso^[1].

El objetivo final de esta fase del proyecto es validar la producción de precursores de alto poder calorífico que, en etapas posteriores, serán refinados mediante procesos de hidrodesoxigenación y reformado con vapor, utilizando subproductos generados en el propio proceso, como el *hidrochar*, como donantes de hidrógeno para consolidar un modelo de economía circular de residuo cero.

Metodología experimental

Los experimentos seleccionados forman parte de un diseño de experimentos más extenso, con el objetivo de realizar un análisis de la varianza (ANOVA) de los resultados obtenidos. Con el objetivo de estudiar las influencias de la alimentación (relación algas/RSU) y del medio de reacción (relación agua de mar/agua desionizada) sobre los resultados observados en el rendimiento del proceso hacia la producción de biocrudo y su PCS, se han seleccionado 5 experimentos realizados a 215 °C y durante una hora. De manera análoga, todos los experimentos se han realizado con una relación constante entre la alimentación sólida y el medio acuoso de 15% en masa, utilizando 30 g de materia sólida y 200 g de agua.

Respecto a las materias primas utilizadas, los RSU utilizados fueron proporcionados por Urbaser, mientras que, como ejemplo representativo de microalga capaz de producir FAN, se ha seleccionado la microalga *Chlorella Vulgaris*, suministrada por la empresa Biotiva. Respecto a sus propiedades energéticas, se han determinado de manera experimental mediante bomba calorimétrica, obteniéndose un PCI de 8,75 MJ/kg para los RSU y 20,76 MJ/kg para la *Chlorella Vulgaris*. Por último, el reactor utilizado es el SynthWave, desarrollado por la empresa italiana Milestone Srl. Como

características principales, cabe señalar que tiene un volumen de 1 L, presenta un microondas con una capacidad máxima de 1500 W que permite calentar hasta 300 °C en menos de 15 minutos y tiene integrado un control PID de temperatura y presión, además de elementos de seguridad claves como válvulas de alivio o discos de ruptura.

Resultados

Todos los experimentos se han realizado a una temperatura de 215 °C durante 1 h de reacción, con variaciones en la alimentación y en el medio de reacción. Estos pueden ser apreciados en la **Tabla 1 al final de este documento**. El PCS se ha calculado teóricamente siguiendo la ecuación de Channiwala y Parikh^[2], que permite aproximar el PCS de un biocrudo a partir de su composición elemental; esta se ha determinado experimentalmente mediante análisis elemental.

En primer lugar, para estudiar **el efecto de la alimentación** se han de observar los experimentos 1, 2 y 3, los cuales se han realizado empleando un medio de reacción compuesto por mezclas equimásicas de agua de mar y agua desionizada, variando únicamente la composición de la mezcla de alimentación. Los resultados muestran como el rendimiento a biocrudo está intrínsecamente ligado a la presencia de microalgas en la alimentación, pasando de un escaso 4,5% de rendimiento en el experimento 2 (alimentación formada únicamente por RSU) a un 19,2% en el experimento 3 (alimentación compuesta enteramente por *Chlorella Vulgaris*). Esta diferencia se atribuye a que las microalgas, a diferencia los RSU, poseen una mayor reactividad en medios acuosos debido a su mayor contenido en lípidos y proteínas^[3]. Respecto al PCS, la presencia de microalgas en la alimentación (experimentos 1 y 3) permite estabilizar los valores de PCS en torno a 31 MJ/kg (30,6 MJ/kg con un 50% de algas en la alimentación y 32,0 MJ/kg con microalgas únicamente). Estos valores determinan que la co-valorización de ambos residuos permite integrar RSU de bajo poder calorífico en el proceso sin comprometer significativamente la calidad del combustible resultante.

En segundo lugar, para estudiar **el efecto del medio de reacción**, se deben observar los resultados de los experimentos 4 y 5, ambos realizados con la misma mezcla de alimentación (50% en masa de algas y 50% de RSU), variando únicamente la presencia de agua de mar en el medio de reacción

(0% en el experimento 4 y 100% en el experimento 5). Los resultados observados reflejan tendencias hacia la formación de biocrudo similares en ambos casos, obteniéndose rendimientos a biocrudo cercanos a 11% (10,7% y 10,3% en los experimentos 4 y 5 respectivamente). Además, los PCS calculados son muy similares en ambos casos, con valores en torno a 32 MJ/kg. Estos resultados demuestran cómo la inclusión del agua de mar en estas condiciones de reacción (215 °C y 1 h), permite obtener un biocrudo con propiedades energéticas que le permiten posicionarse como un precursor muy interesante para la producción de biocombustibles líquidos de alta densidad energética, además de eliminar el agua dulce en procesos de esta índole. Adicionalmente, la combinación de una matriz con una presencia de iones alta junto con las microondas generadas, puede ser una vía interesante para reducir los costes energéticos del proceso debido a los mecanismos de conducción iónica y una mayor eficiencia energética respecto a procesos de calentamiento conductivo convencionales

Conclusiones

Este estudio valida empíricamente la co-valorización de residuos urbanos y la microalga *Chlorella Vulgaris* mediante tratamiento hidrotermal asistido por microondas. La biomasa algal compensa la baja reactividad de los RSU puros, cuyo rendimiento es de solo 4,5%, duplicando el poder calorífico del biocrudo hasta ~31 MJ/kg. Además, se demuestra la viabilidad de eliminar el consumo de agua dulce, puesto que el agua de mar actúa como un medio autocatalítico eficiente, manteniendo rendimientos (~10,3%) y propiedades energéticas (~31,5 MJ/kg) prácticamente idénticos a los del agua desionizada. Esta ruta iónica-electromagnética optimiza el proceso y sienta las bases integrales del proyecto SYNAPP-FUELS.

REFERENCIAS

- [1] GAO, Y., REMÓN, J. y MATHARU, A.S. Microwave-assisted hydrothermal treatments for biomass valorisation: a critical review. *Green Chemistry*. 2021, vol. 23, no. 10, pp. 3502-3525. DOI: 10.1039/d1gc00623a.
- [2] CHANNIWALA, S.A. y PARIKH, P.P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*. 2002, vol. 81, no. 8, pp. 1051-1063. ISSN 0016-2361. Disponible en: DOI 10.1016/S0016-2361(01)00131-4.
- [3] BILLER, P. y ROSS, A.B. Potential yields and properties of bio-crude from the hydrothermal liquefaction of microalgae, macroalgae and model compounds. *Bioresource Technology*. 2011, vol. 102, no. 1, pp. 215-225. ISSN 0960-8524. Disponible en: DOI 10.1016/j.biortech.2010.06.028.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Gobierno de Aragón (Grupo de Investigación de Referencia T22_23R) por proporcionar apoyo marco, y al MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER/UE (Proyecto PID2023-149750OA-I00) por el proyecto de investigación concedido. Además, Javier Remón agradece al MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y a la Unión Europea «NextGenerationEU»/PRTR» por su contrato Ramón y Cajal (RYC2021-033368-I).

Tabla 1. Condiciones y resultados experimentales

Número de experimento	% de algas en la alimentación	% de agua de mar en el medio acuoso	Rendimiento a Biocrudo (% masa)	PCS Biocrudo (MJ/kg)
1	50	50	9,3	30,6
2	0	50	4,5	15,0
3	100	50	19,2	32,0
4	50	0	10,7	32,4
5	50	100	10,3	31,5