

Biocombustibles: tipos y estrategias de producción.

Maria Dolores Cortés-Sánchez, Esperanza Macarena Gata-Montero, Andrea Pipió-Ternero, Álvaro Rodríguez-Rivas y Juan Manuel Sánchez-Santos.

Resumen— Los biocombustibles son una fuente renovable de combustibles orgánicos cada vez más investigada y demandada. En el presente artículo se revisan diferentes estrategias para la producción de biocombustibles. Se describe principalmente la producción de bioetanol y de biodiésel a partir de diversas materias primas, así como su obtención mediante el uso de fluidos supercríticos. Las técnicas más usadas en la generación secundaria de biocombustibles son la torrefacción, licuación, pirólisis y gasificación. Además, se presentan resultados experimentales propios donde se puede observar la producción de biodiésel mediante transesterificación a partir de aceite de cocina usado.

Palabras Claves—biocombustibles, generación, segunda-generación, bioetanol, biodiésel.



1. INTRODUCCIÓN

El agotamiento de los combustibles fósiles y su impacto ambiental motiva la búsqueda de nuevas alternativas para generar biocombustibles a partir de diversas materias primas renovables. Los principales biocombustibles se clasifican en dos tipos: de primera y segunda generación, aunque también existen de tercera y cuarta generación. Los de primera generación son los producidos a partir de aceites o azúcares comestibles que provienen de plantas como el maíz, girasol o caña de azúcar. Los biocombustibles de segunda generación se obtienen con materias primas no aprovechables para alimentación humana, como son los residuos agrícolas, forestales, los lodos de depuradora o el aceite usado de cocina. Los métodos se centran en la producción de bioetanol o biodiésel, y son los que explicaremos a continuación.

Producción de bioetanol

La producción de bioetanol se ha desarrollado históricamente conforme a la búsqueda de la materia prima adecuada para su producción, lo que ha llevado a la aparición de tres generaciones diferentes atendiendo al tipo de materia prima usada:

Primera generación: el maíz y la caña de azúcar se utilizan como materia prima para el bioetanol principalmente en los Estados Unidos y Brasil, mientras que el trigo y la remolacha azucarera se utilizan comúnmente en Europa. La desventaja principal del etanol de primera generación es que la utilización de recursos alimenticios como combustible puede amenazar el suministro de alimentos a gran parte de la población, mientras que, por otro lado, también podrían aumentar los precios de los alimentos. [1]

Segunda generación: se produce a partir de biomasa lignocelulósica, que incluye residuos forestales, residuos

agrícolas y desechos urbanos, como pueden ser los lodos de depuradoras, que explicaremos con más detenimiento más adelante. El componente principal de estos residuos es la celulosa, aunque también aparecen otros compuestos como la lignina y la hemicelulosa. La compleja estructura de la hemicelulosa determina que su hidrólisis requiera múltiples hemicelulasas que cooperen entre sí [1], [2].

Para la producción del bioetanol a partir de material lignocelulósico es necesario realizar, por tanto, un pretratamiento, cuyo objetivo es el de degradar las largas cadenas de polisacáridos en cadenas más cortas y sencillas para su posterior hidrólisis enzimática. Estos pretratamientos pueden ser:

- Mecánicos o físicos: trituración mecánica y ultrasonido.
- Térmico: explosión de vapor y agua líquida a alta temperatura (LHW).
- Fisicoquímicos: proceso de explosión de fibra con amoníaco (AFEX) y explosión con CO₂.
- Químicos: hidrólisis ácida, oxidación húmeda y tratamientos con ozono.
- Biológicos: tratamiento con hongos y tratamiento con bio-solventes orgánicos.

A estos pretratamientos le sigue la hidrólisis enzimática, que es un proceso catalizado por celulasas. Esta hidrólisis es llevada a cabo por diversos tipos de bacterias y hongos. Entre los organismos conocidos con mayor capacidad de hidrólisis de celulosa se encuentran *Caldicellulosiruptor bescii* y *Trichoderma reesei* [1], [2].

Tras la hidrólisis comienza el proceso de fermentación, el cual puede presentar dos problemas principales: la producción de diversas moléculas inhibitorias del crecimiento de los organismos fermentadores durante el pretratamiento y la liberación de xilosa, subproducto poco asimilable de la degradación de la hemicelulosa. *Saccharomyces cerevisiae* es el microorganismo que se suele utilizar para esta fase debido a su alta tolerancia a los inhibidores, su alta tasa de crecimiento y su capacidad para utilizar pentosas como la xilosa en la fermentación [1], [3].

Tercera generación: para superar las desventajas de las dos generaciones anteriores se planteó el uso de algas tanto micro como macroscópicas para la producción del bioetanol. Esto se debe a que las algas suponen una fuente renovable que posee diversas ventajas, entre las que destacan la rápida generación de biomasa en tiempos cortos y que su cultivo puede realizarse en tierras no destinadas al cultivo de vegetales comestibles. El proceso de obtención de bioetanol a partir de algas es similar al que se sigue en el caso de los residuos lignocelulósicos. Sin embargo, aquí el pretratamiento no es necesario, ya que su estructura es degradable directamente mediante una hidrólisis ácida para posteriormente realizar el proceso de fermentación mediante *Saccharomyces cerevisiae* [1], [4].

Biocombustibles de segunda generación

La segunda generación es actualmente la más estudiada. La ventaja de este proceso es que presenta una huella nula, incluso negativa, de CO₂. La materia prima más utilizada y en la que nos vamos a centrar es el residuo lignocelulósico procedente de la industria maderera y de la agricultura. Este residuo representa una de las fuentes biológicas más infrutilizadas e infravaloradas, y se ve como una fuente prometedora de biocombustibles.

El 75% de la biomasa vegetal se compone de polisacáridos. Hay un depósito de azúcares enorme que no se aprovecha dentro de la agricultura, ya que la fracción de azúcares que se aprovecha para la alimentación es ínfima en comparación con los polisacáridos que se presentan en la pared celular del resto de la planta, es decir, de las partes no comestibles. Desde el punto de vista más simple, esta materia puede quemarse para generar calor y electricidad.

Hay dos rutas principales para la obtención de biocombustibles líquidos a partir de biomasa: la primera involucra procesos termoquímicos, que presenta la ventaja de convertir prácticamente toda la materia en bioetanol. La segunda es la bioquímica. Como desventaja de esta última, hay que mencionar que solo puede convertir una fracción de los polisacáridos, siendo así el rendimiento muy bajo. Por tanto, vamos a centrarnos en los principales procesos termoquímicos [5].

Torrefacción

El concepto de torrefacción normalmente se interpreta como un asado o pirólisis leve. En este proceso se somete a la lignocelulosa a unas temperaturas de entre 230 y 300°C. Esto tiene como resultado una evaporación de agua y de compuestos volátiles, que permite un mejor aprovechamiento de la energía en los procesos posteriores; por esto también recibe el nombre de pretratamiento. Este proceso por sí solo obtiene un rendimiento muy bajo en la producción de biocombustibles [6].

Licucción

En este proceso se aplican temperaturas de entre 280°C y 370°C a altas presiones (4-22 MPa) en presencia de agua. No se conocen del todo los mecanismos responsables, pero se cree principalmente que los procesos de hidrólisis y descomposición de las moléculas son los que favorecen la producción de biocombustibles. En la hidrólisis las mo-

léculas se rompen en monómeros de azúcares sencillos gracias a las altas temperaturas, presión y presencia de agua. En la descomposición se pierden las moléculas de agua, provocando deshidratación, descarboxilaciones y la volatilización del grupo amino de algunas proteínas.

El problema principal de esta técnica es el ambiente oxidante que se genera. Así, se crean radicales libres que acaban polimerizando entre sí, creando una red extensa continua de carbono, que deriva en la formación de carbón. Para evitarlo, se emplean agentes reductores (donadores de hidrógeno), siendo los más usados son compuestos orgánicos. Se llegan a conseguir concentraciones aproximadamente del 50% de biocombustibles líquidos [6].

Pirólisis

La característica principal de este proceso es la ausencia de oxígeno. Normalmente se emplea a presión atmosférica y muy altas temperaturas (de 400°C a 700°C). Se subdivide en dos procesos: pirólisis rápida y pirólisis lenta. La lenta está enfocada a la producción de carbón a temperaturas un poco más bajas, por lo que no nos interesa. La rápida se centra en la producción de biocombustibles a más altas temperaturas y es de la que hablaremos a continuación.

El mecanismo de acción responsable es la descomposición radical, generando compuestos altamente reactivos ricos en oxígeno. Es por esta razón que los biocombustibles de primera línea producidos en esta técnica no puedan usarse como tal, ya que su poder calorífico es bajo. Primero deben sufrir un tratamiento con catalizadores oxidoreductores, como zeolitas o algunos basados en metales, que eliminen el oxígeno de los biocombustibles. Normalmente, estos procesos requieren de una fuente adicional de hidrógeno para su reducción. Lo más usual es el uso de compuestos orgánicos reductores [6].

Gasificación

Como su nombre indica, la gasificación convierte directamente la biomasa, pretratada o no, en syngas (término inglés proveniente de las siglas 'Synthesis gas', «Gas de síntesis»), que es un gas con unas concentraciones relativamente constantes de metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrógeno. Hay varios tipos de gasificación, pero el más usado es el que emplea agua supercrítica. Normalmente ocurre a temperaturas de entre 700°C y 900°C a muy altas presiones.

La gasificación es una prolongación de los procesos anteriormente descritos, en el cual el carbón y el biocombustible generado se siguen degradando a moléculas más pequeñas, generando el syngas. La razón de obtener syngas es la utilización de éste para, posteriormente, sintetizar metanol mediante la reacción de síntesis de Fischer-Tropsch [6].

Producción de bioetanol a partir de lodos de depuradoras.

Debido a que el proceso de obtención a partir de materiales lignocelulósicos tiene un coste elevado por la necesidad de pretratar la materia prima, como hemos visto en los dos puntos anteriores, se plantea la búsqueda de nue-

vas materias primas. Éstas deben ser residuos abundantes, pero que no genere competencia con otros sectores. Es por ello que en algunos estudios se centran en la obtención de bioetanol a partir de lodos de depuradoras, que es un residuo continuo, con idea de proponer una bioeconomía circular. En concreto, los estudios se centran en determinar cuáles son las condiciones óptimas para la producción de bioetanol a partir de lodos de depuradora. Para el estudio de las condiciones óptimas, primero realizan un pretratamiento de los lodos, donde son secados, troceados en partículas de menos de 3 mm y posteriormente pasadas por un tamiz para asegurar la uniformidad del tamaño de las partículas. A continuación, los lodos son humedecidos con agua destilada hasta alcanzar un 40% en humedad y a un proceso de autoclave para eliminar cualquier microorganismo presente. Posteriormente, se inoculan 3 ml de *Bacillus flexus*. La incubación con dicho microorganismo durará 48h a 30°C. Esto es así para que se produzca la sacarificación, algo totalmente necesario para la posterior fermentación con *S. cerevisiae*. Al hidrolizado que se obtiene después de la incubación con *B. flexus* se le tiene que añadir una serie de nutrientes que ayudarán al proceso de fermentación, además de la levadura, que es la responsable de la producción del bioetanol.

Los factores más importantes que afectan a la producción son: el periodo de incubación, la temperatura, el pH, la concentración de glucosa y la concentración de levadura (inóculo). Por esto, que hay que prestar gran atención a los parámetros mencionados y estudiar qué ocurre si existen variaciones. Los autores estudiaron estas condiciones por separado, incubando a distintas temperaturas (15-45°C), a diferentes concentraciones de la levadura (2-10% v/v) y glucosa, pH y durante diferentes tiempos (10-70h), para luego centrifugar el medio y determinar la concentración de bioetanol y los azúcares reductores [7].

Se comprobó que el tiempo de incubación óptimo fue el de 10 horas (tiempo medio), debido a que tiempos demasiado largos dan concentraciones altas de bioetanol que acaban siendo tóxicas para *S. cerevisiae* y que además disminuye la concentración de nutrientes. Respecto a la temperatura, a altas temperatura el microorganismo comienza a estresarse e incluso se da la desnaturalización de proteínas, perdiendo así la capacidad enzimática, mientras que a bajas temperaturas la actividad enzimática no se efectúa. Por ello, determinan que la temperatura es un factor crítico que debe mantenerse a 30°C. Del mismo modo, con relación al pH, la fermentación es sensible a los cambios de pH porque los iones H⁺ pueden cambiar la carga de la membrana plasmática, produciendo una bajada de la permeabilidad de los nutrientes en la levadura. El pH óptimo es de 6.5.

Por otro lado, la concentración de la glucosa también es importante, ya que es un metabolito esencial para la fermentación. A mayor concentración más bioetanol se producirá, pero llegados a cierto punto la producción disminuye drásticamente debido a efectos inhibidores de la glucosa a altas concentraciones. La concentración óptima de glucosa es del 80%. Por último, la concentración óptima de la levadura se determinó en un 6%.

En condiciones óptimas los investigadores obtuvieron un rendimiento de hasta 60ml/l. Los autores declaran que con estos resultados se puede considerar a los lodos como una buena materia prima para la producción de bioetanol y que es una alternativa al uso de combustibles fósiles. Además, el bioetanol producido tenía unas características comparables con un biocombustible estándar [7].

Producción de biodiésel a partir de aceite de girasol.

El girasol (*Helianthus annuus* L.) es una de las principales plantas con semillas oleaginosas. Su composición de ácidos linoléico, oléico y linolénico afectan a la estabilidad oxidativa, siendo altamente susceptible a la oxidación. Esto lo hace un buen candidato para llevar a cabo la producción de biodiésel. Sin embargo, esta producción presenta limitaciones.

La producción anual de aceite de girasol es de 25'1 millones de toneladas. Si esta cantidad se dividiera para la producción de biodiésel y para alimentación, nos encontraríamos con dos grandes inconvenientes. Por un lado, el aumento del precio del aceite de girasol y su suministro en la industria alimentaria. Por otro lado, la cantidad destinada a producción de biodiésel no sería suficiente para satisfacer las necesidades. Debido a estas limitaciones, hoy en día sigue siendo tema de estudio el intentar llevar a cabo una producción industrial de biodiésel a partir de aceite de girasol [8].

Mecanismos de producción de biodiésel:

- Craqueo térmico (pirólisis), ya mencionada anteriormente [9]. El equipamiento de este mecanismo es caro para los rendimientos obtenidos.

- Microemulsiones: consiste en una dispersión coloidal de equilibrio de microestructuras fluidas ópticamente isotrópicas con dimensiones de entre 1-150 nm formadas de manera espontánea a partir de dos líquidos inmiscibles. Las microemulsiones con butanol, hexanol y octanol cumplen el requisito máximo de viscosidad para el N°2 diesel [10].

- Uso directo y de mezclas: el uso directo o mezclas de aceites vegetales se considera poco satisfactorio y poco práctico, tanto para los motores diésel directos como motores indirectos. Este método presenta una gran variedad de problemas como son: alta viscosidad, contenido en ácidos grasos libres, formación de goma debido a la oxidación, polimerización durante el almacenamiento y combustión y el espesamiento del aceite, entre otros [9].

- Transesterificación (alcoholisis): es la reacción de una grasa o aceite (aceite de girasol) con un alcohol (metanol) para formar ésteres (biodiésel) y glicerol. Actualmente, la transesterificación es el proceso más utilizado para la producción de biodiésel a partir de aceite de girasol. Se utilizan catalizadores para mejorar la reacción, como puede ser KOH, consiguiendo una mejora en la velocidad y en el rendimiento. Debido a que la reacción es reversi-

ble, un exceso de etanol hace que se desplace el equilibrio hacia los productos (biodiésel y glicerol). El co-producto, glicerol, es recuperado debido a su valor como producto químico industrial [8].

Respecto a las condiciones necesarias para que se lleve a cabo de manera óptima la transesterificación, el catalizador debe estar a 0.28% p/p, la temperatura debe ser de 70°C y deben presentarse dos lavados, uno con agua ligeramente ácida gracias a la presencia de ácido fosfórico y el otro con agua pura [11].

Aún no se puede llevar a cabo la producción industrial de biodiésel a partir de aceite de girasol, ya que aún no se han superado las limitaciones que se presentan. Hay equipos de investigación que optan por la mezcla de aceites de avellana junto con el de girasol para obtener una mayor cantidad de materia prima [8].

Producción de biodiésel utilizando los fluidos supercríticos como solventes

Un fluido supercrítico (SCF) es un compuesto o mezcla de elementos por encima de su presión crítica (P_c) y temperatura crítica (T_c). Éstos pueden emplearse en la producción de biocombustibles sin la necesidad de emplear catalizadores. La separación del producto y la recuperación del catalizador son unos de los procedimientos más desfavorables en la producción de biodiésel ya que supone una gran pérdida económica, por ello gracias a estos SCF podría solucionarse dicho problema. Además, estos fluidos utilizados como solventes pueden inducir la formación de una sola fase entre los reactivos y los triglicéridos, favoreciendo dicha reacción.

A continuación, se citan los procesos de SCF de un solo paso para la síntesis no catalítica de biodiésel:

Alcohol supercrítico.

El metanol supercrítico (scMeOH) fue uno de los primeros SCF propuestos para la producción de biodiésel y sus parámetros críticos son $T_c = 239.4$ °C, $P_c = 8.1$ MPa y $\rho_c = 0.276$ g/cm³ [12]. Cuando se somete a un cambio de temperatura, 25 a 260 °C, y a una presión de 20 MPa, la constante dieléctrica (ϵ) disminuye pasando de 34 a 5, provocando que la red de enlaces de hidrógeno que existe en el metanol líquido se rompa, convirtiéndolo en un fluido en el que solo existen oligómeros pequeños y además facilita que se produzca un ataque nucleófilo directo mucho más fuerte. Una constante dieléctrica reducida permite también que se produzca una única fase de aceite aumentando así la velocidad de reacción [13].

Carbonato de dimetilo supercrítico (scDMC)

Por otra parte, se ha demostrado que el biodiésel se puede producir a partir de triglicéridos y dimetilcarbonato en las siguientes condiciones: $T_c = 274.9$ °C, $p_c = 4.6$ MPa. Con el scDMC, los triglicéridos y los ácidos grasos se convierten en ésteres metílicos de ácidos grasos, obteniéndose además otro compuesto secundario, el carbonato de glicerol, que tiene más valor comercial e industrial que el glicerol que se obtiene normalmente en la producción de biodiésel [12].

Acetato de metilo (scMeOAc)

Mediante el uso de scMeOAc se convierten los triglicéridos en ésteres metílicos de ácidos grasos y triacetina, en lugar de glicerol. Además, la triacetina aumenta el punto de fluidez (definida como la temperatura más baja a la cual un producto combustible comenzará a fluir) haciendo que el rendimiento sea del 105% [13].

Síntesis biocatalítica del biodiésel en fluidos supercríticos.

Otra forma de llevar a cabo la síntesis de biodiésel mediante fluidos supercríticos es utilizando lipasas fúngicas como biocatalizadores de la reacción, en sustitución de catalizadores químicos empleados normalmente en la reacción de biodiésel, como el ácido sulfúrico. Un ejemplo de ello es el uso de reactores discontinuos donde se llevó a cabo la síntesis de biodiésel con dióxido de carbono supercrítico (scCO₂), utilizando una mezcla de aceite vegetal y metanol y una mezcla de lipasas inmovilizadas de *Candida rugosa* y *Rhizopus oryzae* como biocatalizadores en las siguientes condiciones: 13.0 MPa de presión, 45 °C de temperatura, una velocidad de agitación de 250 rpm y las enzimas inmovilizadas al 20% (p/p), obteniendo como resultado un rendimiento del 100% en 2 h. Así, el uso de lipasas fúngicas es un camino prometedor en la producción de biodiésel [14].

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITES DE COCINA USADOS.

Nuestro grupo realizó una práctica sobre la síntesis de biocombustibles. El experimento realizado en el laboratorio de química física de la Universidad Pablo de Olavide consistió en producir biodiésel mediante la reacción de esterificación de Fischer, a partir de aceite vegetal de cocina usado. Se ha organizado el experimento en tres grupos, dos para analizar el procedimiento de producción a partir de aceite usado de girasol de procedencia distinta y otro para el aceite usado de oliva.

Materiales y reactivos.

Reactivos: 1-propanol, ácido sulfúrico al 96%, hidróxido sódico y aceite vegetal usado.

Material: matraz de reacción (125 ml), sistema de calentamiento a reflujo, varilla magnética, baño de aceite, pHmetro, Erlenmeyer, embudo de decantación, viscosímetro, cronómetro, mecha, papel de plata y vasos de precipitado pequeños.

Metodología.

El proceso consiste una reacción de transesterificación en medio ácido, la cual tendrá lugar en la campana de gases. En un matraz se añaden 8 ml de 1-propanol, 0,15 ml de ácido sulfúrico al 96% y, por último, 20 ml de aceite vegetal (mismo procedimiento realizado para cada tipo de aceite). A continuación, se ajusta el matraz a un condensador de reflujo y se comienza la reacción, que debe darse durante 1h al menos a 100°C. Una vez terminada la reacción se espera a que se enfríe y se pasa a un embudo de decantación, donde se espera a que se separen las dos

fases correctamente, que serán la glicerina y el biodiésel producidos (Figura 1).

Además, se mide la viscosidad del aceite usado, para luego compararla con la viscosidad del biodiésel. Teóricamente, la viscosidad del biodiésel es menor y, por tanto, debe disminuir si la reacción se ha producido adecuadamente.

Resultados y discusión.

En el caso del aceite de oliva usado la separación de fases fue totalmente perfecta y rápida. Para el aceite de girasol, en uno de los casos acabó dándose la separación de fases al cabo de unos minutos y en el otro grupo no se observó separación de fases, por lo que se descartó esta muestra. Creemos que la ausencia de separación de fases es debido a que la reacción no se completó, ya que, como hemos mencionado en la revisión anterior, la reacción de producción de biodiésel a partir de aceite de girasol es más lenta y necesita catalizadores potentes, siendo posible que nuestro catalizador no fuese el más adecuado.

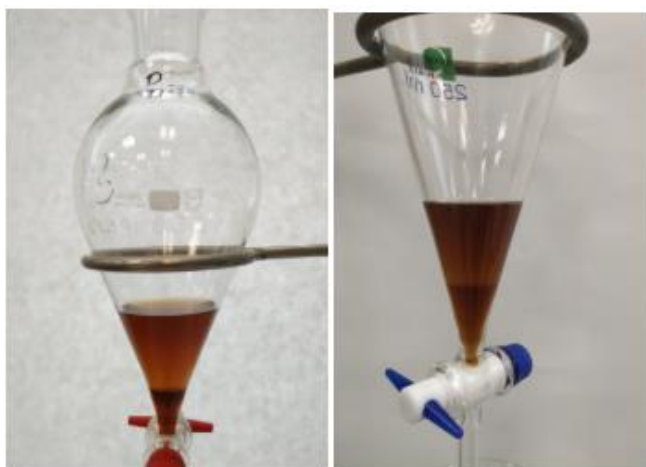


Figura 1. Separación de fases obtenida después de la reacción de Fischer a partir de aceite de oliva (izquierda) y a partir de aceite de girasol (derecha).

En la tabla 1 se ven los cambios de viscosidad entre ambos productos y es lo que nos confirma que la reacción se ha producido.

Tipo de aceite	Viscosidad aceite (cp)	Viscosidad biocombustible (cp)
Girasol	2,8	0,81
Oliva	4,3	1,5

Tabla 1. Viscosidad del aceite de oliva y aceite de girasol y sus respectivos biodiésel producidos a temperatura ambiente.

3. CONCLUSIONES

Los biocombustibles son una fuente renovable de combustibles orgánicos cada vez más investigada y demandada. El principal método de obtención de biodiésel a partir de aceite de girasol es la transesterificación, que se apoya en el uso de catalizadores y temperaturas relativamente altas. Los lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas son una buena matriz orgánica productora de bioetanol, aunque ciertas condiciones deben medirse minuciosamente para que la reacción ocurra óptimamente. Las técnicas más usadas en la generación secundaria de biocombustibles son la torrefacción, licuación, pirólisis y gasificación, cada una con sus ventajas e inconvenientes. También se describen los principales compuestos utilizados como fluidos supercríticos para la generación de biocombustibles y de sus condiciones.

REFERENCIAS

- [1] C. Liu, K. Li, Y. Wen, B. Geng, and Q. Liu, *Bioethanol: New opportunities for an ancient product*, 1st ed. Elsevier Inc., 2019.
- [2] C. A. Sánchez Riaño, A. M.; Gutiérrez Morales, A.; Muñoz Hernández, J. A. y Rivera Barrero, "Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos," *Rev. Tumbaga*, vol. 5, pp. 61-91, 2010.
- [3] R. Kumar, S. Chatterjee, and P. Behari, "Bioethanol production from waste lignocelluloses: A review on microbial degradation potential," *Chemosphere*, vol. 231, pp. 588-606, 2019.
- [4] V. Alfonsín, R. Maceiras, and C. Gutiérrez, "Bioethanol production from industrial algae waste," vol. 87, pp. 791-797, 2019.
- [5] Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578-597.
- [6] Zhang, J., & Zhang, X. (2019). The thermochemical conversion of biomass into biofuels. In *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy* (pp. 327-368).
- [7] Manyuchi, M., Chiutsi, P., Mbohwa, C., Muzenda, E., & Mutusva, T. (2018). Bio ethanol from sewage sludge: A bio fuel alternative. *South African Journal Of Chemical Engineering*, 25, 123-127. doi: 10.1016/j.sajce.2018.04.003
- [8] Saydut, A., Erdogan, S., Kafadar, A., Kaya, C., Aydin, F., & Hamamci, C. (2016). Process optimization for production of biodiesel from hazelnut oil, sunflower oil and their hybrid feedstock. *Fuel*, 183, 512-517. doi: 10.1016/j.fuel.2016.06.114
- [9] Sonntag (1979). *Reacciones de grasas y ácidos grasos. Los productos industriales de grasa y aceite de Bailey*, vol. 1, 4ª edición, ed. Swern, D., John Wiley & Sons, Nueva York, p. 99
- [10] Preparación y propiedades de los combustibles diesel a partir de aceites vegetales. *Fuel*, 66 (1987), pp. 1372 - 1378.
- [11] Antolán, G. (2002). Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification. *Bioresource Technology*, 83(2), 111-114.
- [12] Ilham, Z., & Saka, S. (2009). Dimethyl carbonate as potential reactant in non-catalytic biodiesel production by supercritical method. *Bioresource Technology*, 100(5), 1793-1796.
- [13] Hiejima, Y., Kajihara, Y., Kohno, H., & Yao, M. (2001). Dielectric relaxation measurements on methanol up to the supercritical region. *Journal Of Physics: Condensed Matter*, 13(46), 10307-10320.

- [14] Lee, J., Kim, S., Kang, S., Song, Y., Park, C., Han, S., & Kim, S. (2011). Biodiesel production by a mixture of *Candida rugosa* and *Rhizopus oryzae* lipases using a supercritical carbon dioxide process. *Bioresource Technology*, 102(2), 2105-2108. doi: 10.1016/j.biortech.2010.08.034E.E.



María Dolores Cortés-Sánchez, recibió el grado en Biología por la Universidad de Sevilla en 2017. Actualmente estudia en la Universidad Pablo de Olavide el primer curso del máster de biotecnología ambiental, industrial y alimentaria.



Esperanza Macarena Gata-Montero, recibió el grado en Biología por la Universidad de Sevilla en 2017. Actualmente estudia en la Universidad Pablo de Olavide el primer curso del máster de biotecnología ambiental, industrial y alimentaria.



Andrea Pipió-Ternero, recibió el grado en Biología por la Universidad de Sevilla en 2017. Actualmente estudia en la Universidad Pablo de Olavide el primer curso del máster de biotecnología ambiental, industrial y alimentaria.



Álvaro Rodríguez-Rivas, recibió el grado en Nutrición Humana y Dietética por la Universidad de Granada en 2018. Actualmente estudia en la Universidad Pablo de Olavide el primer curso del máster de biotecnología ambiental, industrial y alimentaria.



Juan Manuel Sánchez-Santos, recibió el grado en Biología por la Universidad de Sevilla en 2017. Actualmente estudia en la Universidad Pablo de Olavide el primer curso del máster de biotecnología ambiental, industrial y alimentaria.