

Producción sustentable de biodiesel empleando grasas residuales de la industria láctea

Nahum Andrés Medellín Castillo^{a*}, Bladir Salomón Rangel-Nava^a, Alejandro Rocha Uribe^b, Miguel Mauricio Aguilera Flores^c, Verónica Ávila Vázquez^c

^aCentro de Investigación y Estudios de Posgrado, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Dr. Manuel Nava 8, Zona Universitaria, C.P. 78290, San Luis Potosí, S.L.P., México.

^bFacultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Dr. Manuel Nava 6, Zona Universitaria C.P. 78210, San Luis Potosí, S.L.P., México.

^cIngeniería Ambiental, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas, Instituto Politécnico Nacional, B Ivd. del Bote 202 Cerro del Gato Ejido La Escondida, Ciudad Administrativa C.P. 98160, Zacatecas, Zac., México.

nahum.medellin@uaslp.mx

Recibido 17 diciembre 2021, Aceptado 24 enero 2022

Resumen

En este trabajo se evaluó la recuperación de grasas de una empresa pasteurizadora de leche para su uso en la producción de biodiesel con la finalidad de aprovechar los residuos lácteos y reducir los problemas relacionados con la generación de biosólidos en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de dicha empresa. La producción de biodiesel se realizó por transesterificación en fase homogénea y heterogénea utilizando como materia prima los residuos grasos. Para los dos procesos, se evaluó el rendimiento de producción de biodiesel y la calidad del biodiesel de acuerdo a la norma europea EN 14214. La reacción en fase homogénea se realizó empleando metanol y grasa residual en una proporción molar de 6:1 (metanol:grasa), NaOH como catalizador al 0.8 % p/p con respecto a la masa de la grasa, temperatura de 60 °C y un tiempo de reacción de 60 minutos. Para la reacción en fase heterogénea, se utilizó un hidróxido doble laminar (HDL) como catalizador heterogéneo al 3.5 % p/p, una relación metanol-grasa de 21:1, temperatura de 60 °C y tiempo de 60 min. Los rendimientos de la reacción fueron del 97.5 y 98.5 % p/p, con base en el peso de la grasa empleada, para la reacción homogénea y heterogénea, respectivamente. Además, se encontró que el biodiesel sintetizado en las dos reacciones cumple con los parámetros de calidad de la norma EN14214. Finalmente, la tecnología desarrollada en este estudio constituye una alternativa de producción de una fuente de energía con beneficios sustentables.

Abstract

In this work, the recovery of fats from a milk pasteurizing company was evaluated for their use in the production of biodiesel in order to take advantage of the dairy waste and reduce the problems related to the generation of biosolids in the wastewater treatment plant (WWTP) of that company. Biodiesel production was carried out by homogeneous and heterogeneous phase transesterification using fatty wastes as raw material. For both processes, biodiesel production yield and biodiesel quality were evaluated according to the European standard EN 14214. The homogeneous phase reaction was carried out using methanol and residual fat in a molar ratio of 6:1 (methanol:fat), NaOH as catalyst at 0.8 % w/w with respect to the fat mass, temperature of 60 °C and a reaction time of 60 min. For the heterogeneous phase reaction, double hydroxide laminar (HDL) was used as heterogeneous catalyst at 3.5 % w/w, a methanol:fat ratio of 21:1, temperature of 60 °C and time of 60 min. The reaction yields were 97.5 and 98.5 % w/w, based on the weight of fat used, for the homogeneous and heterogeneous reaction, respectively. In addition, it was found that the biodiesel synthesized in the two reactions complies with the quality parameters of standard EN14214. Finally, the technology developed in this study constitutes an alternative for the production of an energy source with sustainable benefits.

Palabras clave: Residuos Lácteos; Biodiesel; Transesterificación;

1. Introducción

En México, la industria de lácteos es la tercera actividad más importante del ramo alimenticio teniendo un consumo anual per cápita de 98 kg de leche y sus derivados [1]. Esta industria se caracteriza por tener fuertes descargas de agua residual con altos valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), en donde la lactosa y la grasa pueden considerarse como los constituyentes principales de estos parámetros [2,3]. Además, sus efluentes son muy ricos en nitrógeno y fósforo [2,4].

En la industria de procesamiento de lácteos, gran parte de la generación de agua residual es atribuible al lavado de equipos, pipas, tanques de leche y tuberías que transportan la leche y los productos lácteos [2,3]. Relaciones de volumen de agua residual

generada y masa de producto lácteo que se procesa se han empleado para comparar la generación de agua residual de la industria láctea [2-4]. El intervalo de valores de estos parámetros es muy variado y están determinados, en su mayoría, por las diferentes estrategias de gestión que se toman en cada planta [4]. El valor medio de estas relaciones es de 1.26 m³ de agua residual/tonelada de producto procesado. Sin embargo, los valores oscilan desde 0.31 a 2.29 m³/tonelada de producto [3,4].

A partir de información obtenida de la planta procesadora de lácteos de este estudio, se estimó que la empresa trata un promedio mensual de 2,215 m³ de agua residual y genera aproximadamente entre 7.0 y 8.2 toneladas de lodos al mes que contienen un alto contenido de grasa.

El término biocombustibles se usa para referirse a combustibles líquidos o gaseosos para su uso en el sector de transporte y que en su mayoría son producidos de la biomasa

[5,6]. Entre estos biocombustibles se encuentran el biometanol, bioetanol, biogás, biohidrógeno, aceite puro vegetal y el biodiesel el cual forma parte del objeto de interés de este estudio [7].

El biodiesel está definido por la “EuropeanParliament” en su directiva 2003/30/Ec como: “Metil-ésteres con la calidad del diesel producidos de aceites vegetales o animales usados como biocombustibles” [8]. Otros autores han definido al biodiesel como “Aceite vegetal transesterificado usado como combustible diesel” [9], o bien se ha definido como “Mezclas de monoalquilésteres de ácidos grasos obtenidos a partir de lípidos renovables, como aceites y grasas de origen vegetal o animal” [5,6].

El biodiesel se puede obtener a partir de tres principales procesos, los cuales se describen a continuación [7-13]:

- 1) *Pirolisis*. En este proceso se lleva a cabo una descomposición térmica de los triglicéridos en ausencia de oxígeno y generalmente se desarrolla a una temperatura cercana a los 400 °C en presencia de un catalizador sólido. Sin embargo, algunos de los inconvenientes de este proceso radican en que las características del combustible obtenido resultan inadecuadas. Principalmente la viscosidad que se obtiene es alta y las propiedades de flujo en frío son insatisfactorias.
- 2) *Micro-emulsificación*. Este proceso consiste en formar una dispersión de dos líquidos inmiscibles pero el uso de esta técnica genera una combustión incompleta, formando también depósitos de carbón alrededor de los inyectores de los motores.
- 3) *Transesterificación*. En este proceso se produce biodiesel mediante una reacción química reversible de tres etapas en la que los triglicéridos y el alcohol en presencia de un catalizador se convierten en ésteres y glicerol. Para esta reacción se usa principalmente el metanol por ser un reactivo de bajo costo y por los productos derivados de esta reacción los cuales son fáciles de separar. Además, es posible utilizar catalizadores homogéneos como el hidróxido de potasio, pero debido a la dificultad para “lavar” el biodiesel y al mayor consumo y contaminación de agua durante estos lavados actualmente se prefieren reacciones con catálisis heterogénea ya que no requieren de una etapa de lavado.

Actualmente y a escala comercial, el biodiesel se produce a partir de aceites vegetales comestibles de gran calidad, metanol y un catalizador alcalino [12]. Por esta razón, el precio del biodiesel es muy poco competitivo contra el precio del diésel fósil ya que en algunos casos el precio del aceite sobrepasa el del diésel aún sin procesar [10,14]. Además, la utilización de aceites comestibles como materia prima agudiza el debate de alimento contra combustible [5,7,10].

Es por estos motivos que se han desarrollado un sin número de estudios con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica y económica de utilizar residuos de la industria como materias primas [7,12,13]. Algunas de las principales fuentes de materias primas son aquellas grasas animales y aceites comestibles usados [5-7]. Se han propuesto como materia primas residuos de la industria de alimentos como: manteca de cerdo [7], el cebo de res, aceite de pescado [15], grasa de aves, y residuos de mayonesa [11,14,16].

Por otra parte, la catálisis homogénea que emplea hidróxido de sodio o potasio y alcóxido es la forma más empleada a nivel industrial debido la rapidez con la que se produce el biodiesel. Sin embargo, presenta algunas desventajas asociadas a la sensibilidad de la pureza de los reactivos, presencia de ácidos grasos libres en la materia prima a emplear, así como los procesos de purificación del biodiesel. Estos hallazgos

representan una ventaja para la catálisis de biodiesel vía heterogénea, ya que los catalizadores pueden ser recuperados y reutilizados, sin considerar que la purificación del biodiesel es mínima, reduciendo costos. El área de oportunidad de la catálisis heterogénea se centra en aumentar el rendimiento de la reacción con la búsqueda de materiales que favorezcan la producción de biodiesel. El hidróxido doble laminar (HDL) es una arcilla aniónica que ha sido evaluada como catalizador en la reacción de transesterificación. La hidrotalcita ($Mg_6Al_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$) es un HDL comúnmente utilizado y ha sido sintetizada con diferentes relaciones molares de cationes (Mg/Al) para evaluar el efecto de la basicidad del material y su actividad catalítica en la reacción, obteniendo rendimientos de reacción reportados entre 74.8-97 %. Lo que demuestra ser una alternativa viable para su uso en dicha reacción [17].

Por lo anterior, el objetivo de este estudio consistió en evaluar la recuperación de grasas de una empresa pasteurizadora de leche para su uso en la síntesis homogénea y heterogénea de biodiesel. El aprovechamiento de la grasa permitirá reducir los problemas relacionados con la generación de grandes cantidades de biosólidos en la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa seleccionada para este estudio. Además, de que se aprovechará un residuo como materia prima en la producción de un biocombustible.

2. Parte experimental

En la Figura 1 se muestra el esquema general de la metodología empleada para la presente investigación y se describe a continuación.

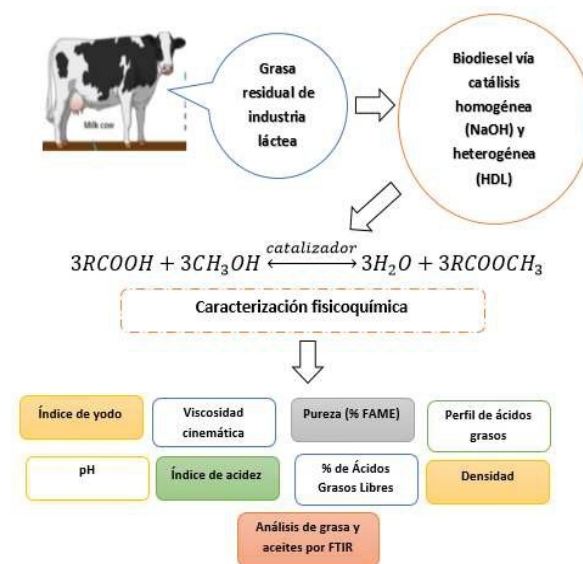


Figura 1. Esquema descriptivo de la metodología empleada.

Muestreo

Las muestras de grasa residual fueron obtenidas de una empresa pasteurizadora de leche ubicada en la capital de San Luis Potosí, México que por cuestiones de confidencialidad no se menciona en el estudio. Estas muestras fueron colectadas del registro de agua a la salida de la planta que conduce el agua residual a la PTAR. Las muestras fueron colectadas en recipientes de vidrio color ámbar con la finalidad de preservar las muestras evitando la generación de ácidos grasos libres por efecto de la oxidación de

los ácidos grasos y fueron identificadas como Registro, Trampa 2, Trampa 3, T1 y T2.

Para conocer el porcentaje de grasa de las muestras y seleccionar la muestra con mayor potencial para la producción de biodiesel se cuantificó el contenido de grasa butírica mediante el método de prueba establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-155-SCFI-2012, "Leche Denominaciones, especificaciones físico-químicas, información comercial y métodos de prueba" [18]. Para las muestras líquidas en las que se esperaba obtener un % de grasa muy bajo (0.04-0.16 %) se llevó a cabo un método alternativo de cuantificación por medio de un analizador automatizado de leche "Ekomilk- Milkana- KAM98- 2A".

Preparación de las muestras

Las muestras seleccionadas, T1 y T2, fueron tratadas para recuperar la grasa contenida en ellas de acuerdo a la siguiente metodología: Primeramente, se calentaron las muestras en una parrilla de calentamiento hasta alcanzar los 60 °C durante un tiempo de aproximadamente 45 minutos. Los macro-sólidos se separaron empleando un colador y posteriormente se centrifugaron a 2,000 rpm durante 15 minutos en una centrífuga Sigma, modelo 3-18K (el tiempo y la velocidad de centrifugado se determinaron en pruebas previas) y a 40 °C. Así, se logró una separación de fases bien definidas y fue posible recuperar las grasas por simple decantación. Como resultado de este pretratamiento, se obtuvo una grasa de color amarillo de aspecto homogéneo la cual se calentó en una parrilla eléctrica a 100 °C durante 15 min para retirar la posible humedad presente. Posteriormente, esta grasa fue caracterizada con base en las pruebas descritas más adelante y sirvió de materia prima para los experimentos de transesterificación homogénea y heterogénea de biodiesel.

Materiales y equipos

La reacción de transesterificación homogénea del biodiesel se llevó a cabo utilizando las grasas obtenidas por centrifugación, metanol al 99.97 % (grado analítico, marca CTR Scientific) y como catalizador hidróxido de sodio (NaOH, 98.5%, grado analítico, Fermont). En la etapa de ajuste de pH y en la purificación del biodiesel se utilizó ácido clorhídrico (HCl) 36.5 a 38 % (grado analítico, CTR Scientific). En la reacción heterogénea se utilizó como catalizador un HDL, el cual se sintetizó por un método de co-precipitación empleando magnesio y aluminio en una relación molar $x=0.59$ a 450 °C y 2 h empleando Na_2CO_3 como agente precipitante. Los detalles de la síntesis del catalizador se encuentran en [17].

Síntesis homogénea de biodiesel

Las condiciones para esta síntesis se establecieron con base en estudios previos realizados por los autores y reportados en [7]. La síntesis se realizó empleando metanol y las muestras de grasa en una relación molar de 6:1 metanol:grasa con un 0.8 % (p/p) de NaOH como catalizador, a 60 °C durante 60 min en agitación constante. La síntesis se realizó de acuerdo a lo siguiente: En un baño térmico con recirculación de agua, se colocó un matraz de 500 mL de tres bocas. En la boca central se colocó un condensador para recuperar el metanol que se evapora constantemente, en otra un tapón de corcho con un termómetro para así monitorear la temperatura de la reacción y en la boca restante un tapón para mantener el reactor sellado. Debajo del reactor y del baño, se colocó una parrilla de agitación para mantener una fase homogénea mediante agitación constante y vigorosa. Al inicio, se calentó la grasa a una temperatura cercana a la de reacción (60 °C) y se mantuvo en constante agitación. Después se pesaron 100 g de grasa y se añadieron al reactor. En

otro recipiente se calentaron ligeramente 31.2 mL de metanol (30 °C) con 0.8 g de NaOH y se agitó la solución hasta disolver el catalizador por completo, cuidando que el metanol no evaporara. Cuando la grasa en estado líquido alcanzó la temperatura de reacción, se agregó la solución de metanol y catalizador manteniendo la mezcla en agitación constante, en este momento se dio por iniciada la reacción.

Después de transcurrido el tiempo de reacción, la mezcla contenida en el matraz se colocó en un embudo de separación y se dejó en reposo por una hora para garantizar la separación de fases. La fase inferior y oscura correspondió a la glicerina formada en la reacción y la superior es una mezcla de metil-ésteres o biodiesel.

Una vez separadas las fases, se registró la masa de cada una para calcular el rendimiento de la reacción y ambas fases se llevaron al rotavapor con el cual se recuperó el exceso de metanol presente en cada fase. El rotavapor se mantuvo en funcionamiento a una temperatura de 60 °C y presión reducida durante aproximadamente 30 min hasta no observar más recuperación de metanol. El biodiesel purificado se lavó con la finalidad de remover el hidróxido de sodio presente y conseguir un biodiesel neutro. El primer lavado fue con una solución ácida de 0.2 % (p/p) de ácido clorhídrico en una cantidad correspondiente al 50 % del volumen del biodiesel y se dejó reposar por 5 min. en un embudo de separación para retirar el agua. En seguida, se realizaron lavados con agua destilada hasta conseguir que el pH del agua con la que se realizó el lavado fuera igual al pH del agua destilada sin usar. Después de los lavados, el biodiesel se llevó nuevamente al rotavapor a una temperatura de 90 °C durante 90 min a presión reducida para retirar el agua que pudo quedar presente y la cual puede afectar la calidad del biodiesel producido. Después de ello, el biodiesel fue almacenado en un frasco de vidrio ámbar para su posterior caracterización.

Síntesis heterogénea de biodiesel empleando un hidróxido doble laminar (HDL)

La síntesis se realizó utilizando metanol y las grasas residuales como reactivos en una relación 23:1 metanol:grasa y con un 3.5% (p/p) de HDL como catalizador. Las condiciones de reacción se establecieron tomando como referencia algunos estudios preliminares empleando HDL como catalizador. La reacción de transesterificación se realizó con base en la siguiente metodología: Se adicionaron al matraz de tres bocas 34.6 mL de metanol y 1.015 g de catalizador. Esta mezcla se mantuvo en agitación constante hasta alcanzar la temperatura de 65 °C. Mientras tanto en otro recipiente, se calentó la grasa a una temperatura cercana a la temperatura de reacción (65 °C) y se mantuvo en constante agitación, después se pesaron 29 g de grasa y se añadieron al reactor, en este instante dio comienzo la reacción. La mezcla estuvo en agitación constante durante el tiempo de la reacción, el cual se estableció en 1 h. Al transcurrir el tiempo de reacción, la mezcla se filtró a vacío para recuperar el catalizador y volverlo a utilizar. Después de su filtrado, la mezcla se colocó en un embudo de separación y se dejó en reposo únicamente para observar la separación de fases. Enseguida ambas fases se llevaron al rotavapor para recuperar el exceso de metanol presente en cada fase. El rotavapor se mantuvo en funcionamiento a una temperatura de 60 °C y presión reducida durante aproximadamente 30 min hasta no observar más recuperación de metanol. Posterior a ello, el biodiesel se almacenó en un frasco de vidrio ámbar para su posterior caracterización.

Caracterización de la materia prima y productos (biodiesel)

Con la finalidad de conocer los parámetros de calidad del biodiesel producido y compararlos con los establecidos por la norma europea EN 14214 para la calidad estándar de biodiesel, se realizaron las siguientes pruebas al biodiesel producido y a la grasa residual empleada como materia prima.

Índice de acidez

Este índice representa la cantidad de miligramos de KOH necesarios para neutralizar los ácidos libres de 1 g de muestra. La determinación de este índice se realizó con base en el método AOCS –Cd3d-63 el cual consistió en pesar 5 g de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, se le añadieron 25 mL de alcohol neutralizado, se adicionaron 10 gotas de fenolftaleína y se tituló con una solución 0.1 N de NaOH.

Índice de Yodo

Este parámetro indica el grado de insaturación, entre mayor sea el índice mayor será la insaturación, por lo tanto, la grasa o biodiesel será más líquida y fácil de oxidar. El análisis se realizó siguiendo el método AOCS-Cd1d-92.

Pureza (% de FAME's)

La pureza del biodiesel se mide en términos de contenido de metil-ésteres (FAME's) y es un parámetro clave para asegurar la calidad del biodiesel de acuerdo a la norma EN14214 la cual establece un valor mínimo de 96.5 % en peso. Para determinar este contenido, se realizó a través del método de prueba AOCS CE1-62. Los componentes individuales fueron identificados por comparación con los tiempos de retención de los FAME's de una mezcla patrón. Las muestras de biodiesel se inyectaron de manera directa a un cromatógrafo. Para reportar los resultados, se tomó como referencia la norma española UNE-EN 14103. De esta forma se sumaron los % en peso de cada uno de los metil-ésteres desde C₁₄ (ácido mirístico) hasta el C₂₁ (ácido araquidónico) siendo el total de esta suma el valor de % peso de FAME's.

% de ácidos grasos libres- AGL's (AOCS Ca-5a40)

Se define como la cantidad en miligramos de NaOH que se requieren para neutralizar los AGL's en un gramo de muestra y se puede expresar como acidez libre porque están relacionados directamente. Ambos parámetros son indicadores del grado de rancidez de los materiales y se usan como indicador general de la condición de los aceites [* ERA LA 6].

Densidad a 15 y 45 °C

La densidad puede servir como indicador de que la reacción se completó. Además, influye en la eficiencia de los inyectores de combustible en los motores. Las variaciones en la densidad del combustible resultan en diversificaciones en la potencia del motor, consecuentemente en las emisiones y el consumo [7]. La determinación se realizó con base en las mediciones de masa y volumen de cada muestra por duplicado a las temperaturas establecidas.

Viscosidad cinemática

La viscosidad permite evaluar la resistencia al flujo de los materiales líquidos y ha sido correlacionada con el contenido de metil-ésteres. En los combustibles resulta importante conocer la viscosidad ya que controla el desempeño de los inyectores. Valores altos de viscosidad tiene impactos negativos en el desempeño de la inyección de combustible. Además, es importante una baja viscosidad para el transporte del combustible a través de las tuberías. La viscosidad dinámica (η) se midió en un rango de temperatura de 39.5-40.5 °C utilizando un reómetro

“Brookfield modelo DV-III” y a partir de estos valores se obtuvo un valor promedio el cual se dividió entre la densidad a la misma temperatura y así se determinó el valor de viscosidad cinemática (γ) el cual se puede comparar con las normativas.

pH

La medición de pH se realizó empleando un electrodo de pH colocado a un potenciómetro marca Thermo Scientific modelo Orion Star A211.

Perfil de ácidos grasos (AOCS-tentative method CE1-62)

La identificación y la cuantificación de los metil-ésteres de ácidos grasos (FAME's) de las muestras fue realizada por cromatografía de gases siguiendo el método de prueba AOCS CE1-62. Los componentes individuales de los ácidos grasos fueron identificados por comparación con los tiempos de retención de los FAME's de una mezcla patrón. Para la muestra correspondiente a la materia prima fue necesario aplicar un proceso de metilación descrito por el mismo método AOCS CE1-62. En el caso de las muestras de biodiesel se inyectaron de manera directa al cromatógrafo.

Análisis de biodiesel y grasa por espectroscopia al infrarrojo (FTIR)

Las muestras de biodiesel y grasa residual fueron caracterizadas por espectroscopia al infrarrojo (FTIR) usando la técnica de reflectancia total atenuada (ATR) empleando un espectrómetro Thermo Scientific Nicolet iS10.

3. Resultados y discusión

Caracterización de las muestras residuales de grasa

Los valores de porcentaje de grasa (% p/p) para cada una de las muestras colectadas se muestran en la Tabla 1. A partir de esta información, se seleccionaron las muestras T1 y T2 como los más indicados para la producción de biodiesel por su alto contenido de grasa. Los valores de porcentaje de grasa se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje de grasa en las muestras colectadas.

Muestra	Fase	Grasa (% p/p)	Método de análisis
Registro	Líquido	0.16	Ecomilk
Trampa 2	Líquido	0.04	Ecomilk
Trampa 3	Líquido	0.08	Ecomilk
T1	Sólido	>70	NOM-155-SCFI-2012
T2	Sólido	61	NOM-155-SCFI-2013

Recuperación de grasa

Por su abundancia dentro de las trampas de grasa de la PTAR estudiada y considerando los análisis que se muestran en la Tabla 1, se decidió utilizar como materia prima del biodiesel, los residuos sólidos provenientes de las trampas T1 y T2. Estos residuos son semisólidos de color grisáceo o blanquecino, contienen un porcentaje de grasa entre el 60 y 70% y presentan una apariencia, color y olor adecuados.

Por otro lado, en la Tabla 2 se muestran los % de recuperación de grasa de las muestras T1 y T2 obtenidos por el sistema combinado de calentamiento a T= 60 °C por 45 min y centrifugación a 2000 rpm y t= 15 min. Los datos revelaron que los valores de recuperación para ambas muestras fueron muy similares. El % de muestra no recuperado corresponde a agua contenida en las muestras y otros sólidos e impurezas.

Tabla 2. Porcentaje de recuperación de grasa con respecto a la masa inicial de los residuos.

Muestra	Masa inicial (g)	Masa final (g)	% de recuperación Total
T1	661	160	24.2
T2	2118	532	25.1

Rendimiento de las síntesis homogénea y heterogénea de biodiesel

El rendimiento de las síntesis homogénea y heterogénea se estimó a partir de la ecuación (1):

$$\% \text{ de rendimiento} = \frac{\text{masa del biodiesel producido}}{\text{masa de la grasa residual}} \times 100 \quad (1)$$

Los resultados obtenidos para ambas síntesis se presentan en la Tabla 3, los cuales muestran que se obtuvieron rendimientos satisfactorios y considerablemente altos en comparación con los valores reportados para este tipo de síntesis empleando aceite vegetal y grasa animal [7]. Para el caso de la síntesis, empleando HDL, se obtuvieron rendimientos similares a la síntesis homogénea y reportados por [17]. En el caso del biodiesel sintetizado por vía heterogénea no fue necesario darle algún tratamiento de lavado o acondicionamiento.

Tabla 3. % de rendimiento obtenidos para la síntesis de biodiesel homogénea y heterogénea

Valor	Síntesis homogénea	Síntesis heterogénea
Grasa residual, g	100	29.0
Glicerina, g	13.6	3.0
Metanol, g	3.7	5.2
Biodiesel, g	97.5	23.9
% de rendimiento	97.5	98.5

Caracterización de la materia prima y biodiesel

Los resultados obtenidos para los diferentes parámetros de calidad establecidos en la norma europea EN 14214 se resumen en la Tabla 4. Se puede observar que para el biodiesel producido por síntesis homogénea todos los parámetros de calidad del biodiesel cumplen con la norma EN2014. En el caso del biodiesel producido empleando HDL como catalizador, la calidad del biodiesel con respecto al contenido de FAME's es

muy cercana al mínimo establecido por la normativa. Por ello se puede considerar que el biodiesel por ambas síntesis tiene una calidad adecuada para su uso. También, se analizó la grasa obtenida que se empleó como materia prima en la producción de biodiesel en las dos síntesis y se observa como los valores de los parámetros analizados cambian con respecto de las muestras de biodiesel. Por ejemplo, la pureza de FAME'S en la grasa, de ser un valor no determinado (ND) por estar por debajo del límite de detección, se incrementa hasta 96.5 o 97% en el biodiesel, y en el caso de la viscosidad a 40 °C, su valor disminuye considerablemente hasta 6.0 veces al comparar la de la grasa residual y el biodiesel. Lo anterior, confirma la producción de biodiesel, así como una calidad adecuada para su uso.

Tabla 4. Parámetros de calidad del biodiesel y grasa de acuerdo a la norma EN 14214.

Parámetro	Unidades	Norma	Grasa	Biodiesel Homog.	Biodiesel Heterog.
Índice de acidez	mg KOH/g	máx 0.50	1.23	0.336	0.112
Índice de Yodo	g I ₂ /100 g	máx 120	60.4	59.2	56.6
Pureza (FAME's)	% p/p	mín. 96.5	ND	96.5	97.0
% AGL	% ac. Oleico	NA	0.62	0.169	0.056
Densidad 15°C	kg/m ³	860-900	878.4	877.6	879.1
Densidad 40°C	NA	NA	925.8	848.8	880.3
Viscosidad 40°C	mm ² /s	3.5-5.00	20.80	3.487	4.175
pH			NA	7.0	7.0

Perfil de ácidos grasos

Los resultados obtenidos del perfil de ácidos grasos para las tres muestras (grasa, biodiesel homogéneo y biodiesel heterogéneo) indican que el proceso de transesterificación no modifica el perfil de ácidos grasos, ya que los perfiles de ácidos grasos de la materia prima y de las muestras de biodiesel son muy similares entre sí (Tabla 5).

Tabla 5. Perfil de ácidos grasos en muestras de biodiesel y grasa.

Ácido graso, % p/p	Grasa	Biodiesel Homog.	Biodiesel Heterog.
Caproico	0.84		
Caprilico	0.56	0.53	0.63
Caprico	1.33	1.31	1.52
Laurico	1.65	1.66	1.86
Mirístico	6.19	6.05	6.85
Pentadecanoico	0.61	1.30	1.02
Palmitico	29.1	28.4	27.9
Palmitoleico	0.97	1.27	1.65
Oleico-linoleidato		50.6	49.4
Estearico	10.9	Nd	Nd
Pleico	39.4	Nd	Nd
Linoleico	8.03	7.96	8.18
n.i.		0.41	0.46
Araquidico	0.49	0.59	0.57

Análisis de las muestras por FTIR

De acuerdo con el estudio realizado por [19], en los espectros de biodiesel se detectaron dos picos de transmitancia, el correspondiente a la flexión asimétrica del enlace O-CH₃ que se encuentra en 1436 cm⁻¹ y el de los esteres metílicos en 1196 cm⁻¹ correspondiente a la distensión del enlace CH₃-O-C; y en la grasa residual existen dos picos correspondiente al enlace OC-H₂ de los mono, di y triglicéridos que se encuentran en 1377 cm⁻¹ y el segundo en 1097 cm⁻¹ que corresponde a la distensión del enlace CH₂-O-C. Estos resultados confirman la producción del biodiesel y la reacción de transesterificación de la grasa residual.

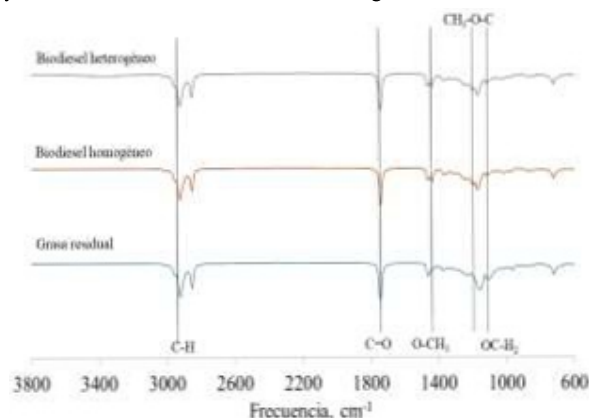


Figura 1. Espectros al infrarrojo del biodiesel y grasa residual.

4. Conclusiones

Los resultados permitieron concluir que es posible llevar a cabo la síntesis de biodiesel utilizando como materia prima la grasa residual de una planta procesadora de lácteos. Los % de rendimiento obtenidos mediante la utilización de este residuo bajo dos reacciones diferentes fueron de 97.5 y 98.5 % para la reacción homogénea y heterogénea, respectivamente. El biodiesel obtenido por ambas vías cumple con los principales parámetros de calidad establecidos por la norma EN 14214.

5. Referencias

- Secretaría de Economía. Análisis del sector lácteo en México. Marzo 2012. https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/analisis_sector_lacteo.pdf (accesado el 04 de enero de 2022).
- Demirel, B.; Yenigun, O.; Onay, T. T. *Process Biochem.* **2005**, *40*, 2583-2595.
- Carvalho, F.; Prazeres, A. R.; Rivas, J. *Sci. Total Environ.* **2013**, *445-446*, 385-396.
- Danalewich, J. R.; Papagiannis, T. G.; Belyea, R. L.; Tumbleson, M. E.; Raskin, L. *Water Res.* **1998**, *32*, 3555-3568.
- Atabani, A. E.; Silitonga, A. S.; Badruddin, I. A.; Mahlia, T. M. I.; Masjuki, H. H.; Mekhilef, S. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2012**, *16*, 2070-2093.
- Mishra, V. K.; Goswami, R. *Biofuels* **2017**, *9*, 273-289.
- Dias, J. M. M. *Biodiesel production from Wastes: Process Development and Quality Control*, Tesis de grado, Universidad de Porto, Porto, 2010.
- MacLeod, C. S.; Harvey, A. P.; Lee, A. F.; Wilson, K. *Chem. Eng. J.* **2008**, *135*, 63-70.
- Demirbas, A. *Biodiesel: a realistic fuel alternative for diesel engines*; Springer: London, 2008; pp. 208.
- Canakci, M.; Sanli, H. J. *Ind. Microbiol. Biotechnol.* **2008**, *35*, 431-441.
- Singh, S. P.; Singh, D. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2010**, *14*, 200-216.
- Aransiola, E. F.; Ojumu, T. V.; Oyekola, O. O.; Madzimbamuto, T. F.; Ikhu-Omoregbe, D. I. O. *Biomass Bioenergy* **2013**, *61*, 276-297.
- Basha, S. A.; Gopal, K. R.; Jebraj, S. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2009**, *13*, 1628-1634.
- Atadashi, I. M.; Aroua, M. K.; Abdul Aziz, A. R.; Sulaiman, N. M. N. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2012**, *16*, 3275-3285.
- Costa, J. F.; Almeida, M. F.; Alvim-Ferraz, M. C. M.; Dias, J. M. *Energy Convers. Manage.* **2013**, *74*, 17-23.
- Rizwanul Fattah, I. M.; Masjuki, H. H.; Kalam, M. A.; Hazrat, M. A.; Masum, B. M.; Imtenan, S.; Ashraful, A. M. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2014**, *30*, 356-370.
- Reyna-Villanueva, L. R. M.; Dias, J.; Medellín-Castillo, N. A.; Ocampo-Pérez, R.; Martínez-Rosales, J. M.; Peñaflor-Galindo, T.; Alvarez Fuentes, G. *Fuel* **2019**, *251*, 285-292.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. NORMA Oficial Mexicana NOM-155-SCFI-2012, Leche-Denominaciones, especificaciones físicoquímicas, información comercial y métodos de prueba. <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4692/seeco/seeco.htm> (accesado el 04 de enero de 2022).
- Lourenco B.I.S. Tesis Avaliacao de proceso produtivo e controlo da qualidade do biodiesel através de espectroscopia de infravermelho con transformada de Fourier (FT-IR) Universidade de Porto, Portugal, **2014**.