

Evaluación de la producción de biodiésel utilizando ultrasonido

Gamaliel Zambrano Ruano¹, Cristián Rossi Sosa¹, José Andrés Hernández Gaitán¹ & Luis Guillermo Chico Chocano²

zambrano@uvg.edu.gt, crossi@uvg.edu.gt, jahernandez@uvg.edu.gt, elguichiwf@hotmail.com

¹Centro de Procesos Industriales, Instituto de Investigaciones, Universidad del Valle de Guatemala

²Egresado del Departamento de Ingeniería Química, Universidad del Valle de Guatemala

RESUMEN: Se evaluaron los parámetros siguientes temperatura (25°C y 60°C), agitación mecánica (0 rpm y 400 rpm) y amplitud de onda del ultrasonido (50% y 90%), para determinar el impacto sobre el rendimiento de masa producida de biodiésel a partir de aceite usado en procesos de fritura. El alcohol utilizado fue etanol y se utilizaron ondas ultrasónicas para promover la ruptura de los diferentes grupos alquilos en la molécula de aceite. Se pudo observar una alta correlación entre la agitación y la variable respuesta. Al incrementar la temperatura se obtiene una merma en la producción de biodiésel por la competencia de mecanismos de reacción. El límite superior de la variable respuesta fue de 59.70 ± 5.45 g de biodiésel y se obtuvo empleando una amplitud de ultrasonido de 90%, agitación mecánica a 400 rpm y a una temperatura de 23°C. Para las pruebas en las que se empleó una amplitud de ultrasonido de 50% y sin agitación se obtuvo una gelatinización de la mezcla aceite-etanol y no se obtuvo biodiésel.

PALABRAS CLAVE: biodiésel, energía alternativa, ultrasonido, temperatura, agitación mecánica, amplitud de onda, etanol, aceite reciclado usado en proceso de fritura.

By increasing the temperature, a yield mass reduction was found due to parallel reaction mechanisms. The upper limit of the response variable was 59.70 ± 5.45 g of biodiesel with ultrasonic amplitude of 90%, 400 rpm and a temperature of 23 °C. For the experiments where no agitation and ultrasonic amplitude of 50% were used, a gel solution of oil-ethanol was obtained.

KEYWORDS: biodiesel, alternative energy, ultrasound, temperature, mechanical agitation, wave amplitude, ethanol, waste cooking oil.

Introducción

El biodiésel es un biocombustible líquido en condiciones ambientales (25°C y 1 atm), que se produce a partir de los triacilglicérols provenientes de aceites vegetales y grasas animales, usando una reacción de transesterificación. El biodiésel es utilizado como combustible renovable alternativo del diésel derivado del petróleo por la destilación fraccionada del crudo y usado en los motores de este tipo. El aspecto más importante del biodiésel es su producción a partir de fuentes naturales y renovables, tales como los aceites vegetales y grasas animales (Knoethe, Van Gerpen, 2005).

La producción del biodiésel se inicia con una reacción de transesterificación de sustitución de un grupo alcóxido de una molécula de éster por otro grupo alcóxido diferente. Existen dos mecanismos posibles para la ocurrencia de la reacción de transesterificación dependiendo si la reacción es catalizada por una base o catalizada por un ácido. Si el número ácido resultante en el aceite o grasa es mayor al 5%, se debería utilizar catálisis ácida como tratamiento previo a

Biodiesel production employing ultrasound

ABSTRACT: The following parameters temperature (25 ° C and 60 ° C), mechanical agitation (400 rpm and 0 rpm) and ultrasound wave amplitude (50% and 90%) were studied in order to determine the impact on the biodiesel mass produced from waste cooking oil. Ethanol and ultrasonic waves were used for the transesterification. The experiments showed a strong correlation between agitation and the response variable.

los ácidos grasos libres y evitar la formación de jabones, ya que dificultan la separación de las fases de glicerina y biodiésel, y se forman emulsiones en el lavado con agua. (Wade, 2004; Knoethe, Van Gerpen, 2005).

La búsqueda de reducción de costos de producción de biodiésel ha llevado a los productores a explorar fuentes más baratas de aceite, llegando a utilizar aceite descartado de fritura para la producción del combustible. Los aceites descartados de fritura han experimentado una reacción de hidrólisis debido a las altas temperaturas a las que fueron expuestos durante el proceso de fritura. Como producto de estas reacciones se presentan altas cantidades de ácidos grasos libres, que pueden llegar a perjudicar el rendimiento de la reacción de transesterificación para producir biodiésel (Gude, Grant, 2013).

Los alcoholes más comunes para realizar la transesterificación son el metanol y etanol, aunque también se pueden usar alcoholes con cadenas mayores pero bajo peso molecular, como el propanol. El metanol se utiliza comúnmente para la producción de biodiésel debido a su bajo costo y solamente en Brasil se utiliza etanol pues es más barato. Sin embargo, el metanol es más tóxico que el etanol y normalmente proviene de procesos industriales de la transformación de CO, CO₂ y H₂ (Knoethe, Van Gerpen, 2005).

La combustión del biodiésel produce una menor cantidad de gases nocivos de combustión y de efecto invernadero. En estudios realizados en la Universidad del Valle de Guatemala, se observó una disminución del monóxido de carbono (CO) de hasta el 71.58 % y un incremento de óxidos de nitrógeno totales (NO_x) al utilizar biodiesel en un motor diésel.

Para aumentar la velocidad de una reacción es necesario utilizar un catalizador. El hidróxido de sodio funciona como un catalizador homogéneo en la reacción de transesterificación de aceite para la producción de biodiésel. El hidróxido de sodio reacciona con el alcohol utilizado para formar el alcóxido (alcohol desprotonado) debido a que los alcoholes se comportan como ácidos débiles. El alcóxido formado es una base más fuerte que tiene mayor eficiencia que el alcohol para reaccionar con el aceite, permitiendo que la reacción ocurra de manera más rápida (Chang, 2010; McMurry, 2012).

La aplicación de energía acústica a procesos químicos se ha desarrollado en los últimos años, campo que recibe el nombre de sonoquímica. La sonoquímica se ha vuelto un área de importancia en la investigación y se enfoca en el rango de potencia de 20 a 50 kHz, que provee la energía suficiente para influir en la reactividad de los procesos químicos. La cavitación generada permite romper enlaces químicos. La energía de activación necesaria para comenzar la reacción y la energía mecánica para mezclar las fases puede ser producida por un sistema de ultrasonido. Se ha demostrado que la aplicación de ultrasonido de baja frecuencia permite mejorar la transesterificación catalizada por base y se obtienen ventajas económicas, como reducción de tiempo de reacción y menor consumo de energía (Chen et al. 2012).

Como explica Chen et al. (2012) *“Entre los resultados obtenidos a escala laboratorio están la reducción de una cuarta parte del tiempo de reacción utilizando una relación molar 6:1 alcohol/aceite. La cantidad de catalizador fue reducida de dos a tres veces con ultrasonido a una frecuencia de 28 a 40 kHz a temperatura ambiente”*. Como la producción industrial de biodiésel se realiza a 60°C, la posibilidad de llevar a cabo la síntesis a temperatura ambiente puede identificarse como una ventaja principal del procedimiento utilizando ultrasonido en términos de consumo de energía. Los aceites estudiados en transesterificaciones a escala laboratorio incluyen el uso de aceite de soya, aceite de fritura, de pescado y trioleína teniendo rendimiento superior al 88% cuando se aplicó ultrasonido, con baños o sondas, a 25 o 60°C, por un período de 10 a 60 min (Chen et al. 2012).

El ultrasonido se define como el sonido producido a una frecuencia mayor a la que los humanos pueden escuchar (16 Hz a 18 kHz), estando entre los 20 kHz hasta 100 MHz. Este se propaga a través de una serie de compresiones y ondas de rarefacción, inducidas en las moléculas del medio en el que se transporta. A una potencia suficientemente alta, el ciclo de rarefacción es mayor que las fuerzas de atracción molecular del líquido y forma burbujas de cavitación. Algunas burbujas se expanden hasta un tamaño inestable y colapsan, formando cavidades que cuando colapsan genera energía para efectos químicos y mecánicos (Mason, Lorimer, 2012).

El Cuadro 1 contiene un resumen de varias referencias con resultados de experimentos empleando ultrasonido.

Con fundamento en lo anteriormente explicado, la investigación realizada tuvo como objetivo general determinar la producción de biodiésel a partir de aceite reciclado usado en proceso de fritura y etanol, empleando el método de ultrasonido, variando temperatura, agitación mecánica y amplitud de ultrasonido.

Metodología

Materia prima

El aceite usado para el estudio fue colectado por un hotel de la ciudad de Guatemala, en porciones resultantes de cuatro ciclos de fritura de vegetales y pollo (15 min c/u), a la temperatura de ebullición del mismo. Se usó etanol absoluto sin desnaturalizar y con pureza de 100%G.L., hidróxido de sodio con una pureza de 99 % e hidróxido de potasio con una pureza de 85%, ambos en escamas.

Análisis de materia prima

Se determinó la densidad del aceite usando un picnómetro de 25.2098 ± 0.0100 cm³ y el índice de acidez, en términos de porcentaje de ácido oléico en la muestra, disolviendo 0.19 g de aceite en 50 mL de una solución etanol-éter (1:1 v/v) y se

Cuadro 1. Ejemplos de estudios previos de la aplicación de ultrasonido en la producción de biodiesel a partir de diferentes aceites

Referencia	Ultrasonido kHz (W)	Aceite	Alcohol	Relación molar alcohol: aceite	Catalizador	Relación catalizador: aceite (p/p)	Temperatura	Agitación	Tiempo (min)	Rendimiento (%)
Paiva et al (2011)	20 (600)	Babassu	Etanol	6:1	NaOH, KOH	1.0 %	30	si	10	99
Gude, Grant (2013)	n/d	Jatropha	Etanol	6:1	NaOH	1.0 %	30	no	30	93
Fernández et al (2013)	40 (100)	Maíz	Etanol	4.5:1	NaOH	1.0 %	28	no	30	62.9
Rodríguez et al (2009)	40	Soya	Etanol	10.2:1	NaOH	0.35 %	29	no	30	92
Vyas et al (2011)	30	Jatropha	Metanol	9:1	NaOH	1.0 %	50	no	30	93
Babajide et al (2009)	20 (400)	Fritura usada	Metanol	6:1	KOH	1.0 %	30	si	30	96
Gude, Grant (2013)	20 (500)	Fritura usada	Metanol	4.5:1, 9:1, 13.5:1	NaOH	1.25 % y 2.0 %	sin controlar	no	2	88-90
Teixeira et al (2009)	24 (500)	Grasa vacuna	Metanol	6:1	KOH	0.5 %	60	no	1.2	46-89
Hingu et al (2010)	20 (150, 200, 250)	Fritura usada	Metanol	4:1, 5:1, 6:1	KOH	0.5, 0.75, 1.0 y 1.25 %	35, 45 y 55	no	40	87-96
Fernández et al (2013)	20 (2200)	Soya	Metanol	5:1	NaOH	1.0 %	40	no	2.5	82-92
Colucci et al (2005)	20 (14.5)	Soya	Metanol	3:1, 4.5:1, 6:1, 9:1	KOH	1.5 y 2.2 %	25, 40 y 60	n/d	3	82-92
Ji et al (2006)	(100, 150, 200)	Soya	Metanol	6:1, 5.5:1, 6:1	NaOH	n/d	25, 35 y 45	no	30	69-100
Stavarache et al (2005)	(720)	Vegetal	Metanol	6:1	NaOH, KOH	0.5, 1.0 y 1.5 %	36	no	10 y 40	75-98

tituló con una solución de KOH en etanol 0.2 M, usando fenoltaleína como indicador. Se realizó una derivatización de aceite usando 20 gotas del mismo, en un balón de 25 mL, se agregó 5 mL de NaOH 0.5 M en metanol, calentando a 70°C por 10 min hasta que saponificó totalmente. Luego se agregó 3 mL de BF₃ en metanol al 20%, 5 mL de heptano y se aforó con una solución saturada de NaCl. La capa superior se colocó en un vial de 4 mL con 0.5 g de Na₂SO₄ anhidro y posteriormente, se inyectó en un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrofotómetro de masas. Se usó una columna SPB-5 (30 m x 0.53 mm x 1 micron) y helio como gas acarreador a una condición de split de 94:1 a 2.4 mL/min y 2 psi (en la columna). El inyector trabajó a 245°C con un detector FID de ionización de llama a 260°C (usando H₂ a 13 psi y aire a 36 psi). El horno se adecuó a 100°C, con una rampa de temperatura de 10°C/min hasta 250°C y mantenido por 10 min. El sistema cromatográfico utilizado fue el HP 5890II / ChemStation.

Equipo utilizado para reacciones

Para la agitación mecánica y el calentamiento se utilizó una estufa Cimarec™ Stirring Hot plate. Para calibrar la agitación mecánica se utilizó un estroboscopio marca Monarch modelo Nova-Strobe BB con rango de 100 a 8,000 destellos por minuto (FPM). La calibración de la agitación se hizo con una muestra del aceite. Para medir la temperatura se utilizó un termómetro graduado de 0-110°C con variaciones de 0.1°C.

Se usó un equipo de ultrasonido marca Dr. Hielscher, modelo UP100 H, con una potencia de salida de 100 W, trabajando a 30 kHz, con amplitud de onda variable entre 20 y 100%, pulso de irradiación acústica variable entre 10 y 100% y eficiencia mayor al 90%. Se utilizó la aguja de ultrasonido (Sonotrode) MS3 de 3 mm de diámetro, amplitud máxima de 180 μm y densidad de potencia acústica de 460 W/cm².

Solución de etóxido de sodio

Antes de iniciar, se preparó para todas las pruebas una solución de etóxido de sodio, disolviendo 20.53 g de NaOH en 558.47 g de etanol y se agitó con agitador magnético hasta disolución completa. Esta solución se almacenó en un balón de vidrio, sellado con un tapón de hule y cubierto con papel aluminio dentro de un refrigerador a 4°C. Pevio a su utilización en los experimentos se extrajo de la refrigeradora, se llevó a temperatura ambiente y se agitó hasta homogenizar.

Producción de biodiésel con ultrasonido

Los experimentos se realizaron empleando 85 g de aceite en un matraz de 125 mL y 26.18 g de la solución de etóxido de sodio, vertida lentamente por las paredes del recipiente. La punta del generador ultrasonido se ubicó 5 mm debajo del nivel superior del etóxido y se ajustaron las condiciones del ultrasonido a las requeridas. Se mantuvo la irradiación de ultrasonido por 30 min. Posteriormente, se permitió la separación de las fases de glicerina y biodiésel en una ampolla de decantación. Se decantó la fase de glicerina y se determinó su masa. La fase de biodiésel se lavó con cinco alícuotas separadas de 20 mL de agua, cada una, agitando cinco veces después de la adición y decantando el agua cinco minutos después. Posteriormente, se virtió el biodiésel producido a un beaker donde se calentó a ebullición durante una hora para eliminar el agua y por último, se determinó la masa del biodiésel limpio y seco.

Análisis del biodiésel

Se determinó la densidad usando un picnómetro de 25.2098 \pm 0.0100cm³ y por último, se determinó la composición química del mismo usando cromatografía.

Diseño de experimental

Se realizó un diseño factorial de dos niveles y tres factores 2³. Las muestras se realizaron en duplicado a excepción de la prueba A, la cual se realizó en triplicado.

Cuadro 2. Factores y niveles utilizados en el diseño factorial.

Parámetro	Nivel inferior	Nivel superior
Temperatura (°C)	23.0	60.0
Agitación (rpm)	0	400
Amplitud de onda (%)	50	90

Cuadro 3. Propiedades de las materias primas empleadas.

Materia prima	Propiedad	Promedio	Desviación
Aceite de fritura usado	Densidad a 26°C (g/mL)	0.925	0.0007
	Viscosidad a 40°C (cSt/s)	63.4432	0.3793
	Acidez (% ácido oléico p/p)	6.473	0.83
Etanol	Densidad a 26°C (g/mL)	0.789	0.0012

Resultados experimentales

El objetivo principal del estudio fue producir biodiésel a partir de aceite reciclado usado en proceso de fritura y etanol, utilizando el método de ultrasonido, para evaluar la producción de ésteres. Para cumplir el objetivo general se realizó una serie de pruebas en las que se hizo reaccionar aceite de canola usado en fritura, con etanol anhidro en un matraz, que actuó como reactor. Los niveles establecidos para el estudio de cada variable se detallan en el Cuadro 2.

Se seleccionaron estas condiciones ya que la agitación es una operación que requiere consumo de energía, normalmente eléctrica. Además, se requería comprobar si la agitación era un factor determinante en la producción de biodiésel por el método de ultrasonido.

Por su parte, la temperatura es una fuente de energía de activación y para la reacción de transesterificación del ácido graso (aceite), la temperatura óptima es de 60°C, razón por la que se seleccionó como nivel superior para el experimento y el inferior, temperatura ambiente ya que no se necesita energía eléctrica (o vapor, en caso de una planta industrial) como fuente de energía para la reacción y se deseaba determinar si la energía que provee la onda de ultrasonido generada, era suficiente para que la reacción ocurra. Por último, la amplitud de la onda de ultrasonido se seleccionó para analizar el efecto de la densidad energética que se provee al aplicar la misma al medio de reacción. Estos últimos niveles se determinaron de manera arbitraria.

En el Cuadro 3 se presentan algunas propiedades determinadas experimentalmente de las materias primas. Las cantidades de aceite (85.00 g) y etóxido (mezcla de etanol con NaOH, 26.00g) no se variaron para estudiar el efecto de tres variables (agitación, temperatura de reacción y amplitud de onda de ultrasonido) para determinar el efecto de cada una sobre el rendimiento de biodiésel producido.

Los resultados experimentales se listan en el Cuadro 4. Los mismos muestran que la amplitud de onda de ultrasonido fue una variable importante debido a que al utilizar el nivel más bajo, que correspondía a 50%, en dos corridas no se logró obtener una reacción adecuada y por tanto no se obtuvo biodiesel (pruebas B y F). El principal factor que afectó fue la fuerza con la que la onda de ultrasonido llegó a la interface alcohol-aceite.

Este fenómeno se debió a que la fuerza con la que el ultrasonido se propagaba a través del medio de reacción, dos fases inmiscibles de etóxido (fase menos densa) y aceite (fase más densa), no era suficiente para romper la interfase y esto se observó con el movimiento de la capa de etanol, ya que al aplicar ultrasonido se generaba una microcorriente del etanol que traspasaba sin romper la interfase y parte de la fase de aceite. De esta manera, la agitación que proporcionaba el ultrasonido no era suficiente para propiciar la reacción. Por otra parte, como resultado de estas pruebas se obtuvo una masa gelatinosa soluble en agua



Figura 1. Prueba gelatinizada a la izquierda y separación de fases en prueba correcta

(solución turbia) y que al agitar formaba espuma, por lo que confirmó presencia de jabones. Ver Figura 1.

Al analizar las pruebas sin agitación, a 60°C, se observa que hubo un aumento de rendimiento considerable ya que para la prueba con el 90% de la amplitud (prueba E) se obtuvo una producción de biodiésel de 53.65 ± 0.39 g, comparado con el resultado de la prueba F con el 50% de la amplitud (0 g - gelatinizó). Estos resultados muestran que la agitación natural promovida por el colapso de burbujas generadas por la aplicación de la onda de ultrasonido dentro del medio de reacción fue suficiente para romper la interfase etanol-aceite y permitió que ocurrieran choques intermoleculares con la suficiente energía para que la reacción se llevara a cabo.

Para las pruebas en las que se utilizó el nivel bajo de ultrasonido (50% de la amplitud de la onda), combinado con la agitación mecánica a 400 rpm, se obtuvieron resultados positivos. Estos resultados consistieron en la producción de biodiésel (59.03 ± 2.77 g para la prueba D y 53.15 ± 2.20 g para la prueba H) frente a un producto gelatinizado sin biodiésel de las pruebas B y F. Esto sugiere que la agitación fue el factor más importante.

Para los resultados relacionados con agitación, al variar la misma de 0 rpm a 400 rpm, se obtuvo un incremento en la producción de biodiésel para todas las pruebas realizadas, tal y como se muestra en la Figura 2.

Se pudo observar que la agitación permitió que la reacción se completara cuando se utilizaba una amplitud de ultrasonido de 50%. Esto propició suficiente turbulencia para que se lograra romper la interfase etanol-aceite y se lograra que las moléculas del alcohol y de aceite tuvieran mayor contacto entre sí.

Analizando los rendimientos obtenidos en función de la

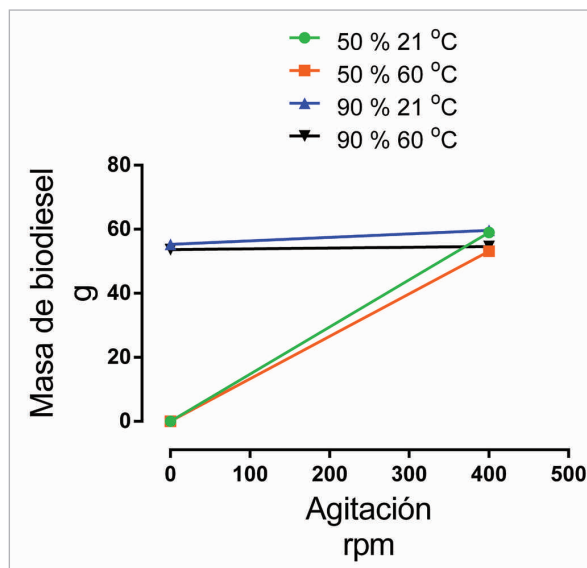


Figura 2. Producción de biodiésel usando ultrasonido en función de la agitación

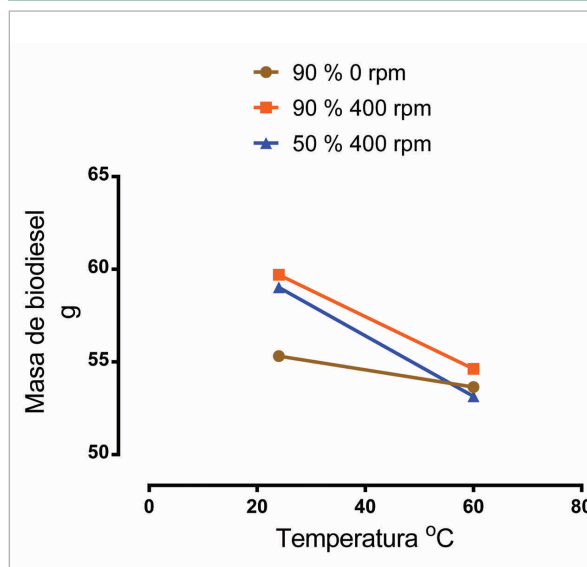


Figura 3. Producción de biodiésel usando ultrasonido en función de la temperatura

temperatura, se puede observar en la Figura 3 que a mayor temperatura se obtuvo una menor producción de biodiesel. Según sugiere la teoría, para una reacción de transesterificación (reacción de sustitución nucleofílica bimolecular) para formar un etil éster, se debe dar un choque entre una molécula de etóxido (etanol desprotonado utilizando el hidróxido de sodio) y una molécula de aceite específicamente en un grupo carbonilo. Para que se lleve a cabo la reacción requiere que la molécula de etóxido ataque al carbonilo y forme un intermediario tetraédrico a partir del cual, por resonancia de electrones y por probabilidad, se elimina el grupo éster y se forma el etil éster o biodiesel deseado. Para las reacciones de sustitución nucleofílica bimolecular el factor temperatura afecta el mecanismo de la

Cuadro 4. Resultados obtenidos de la síntesis de biodiésel utilizando ultrasonido

Prueba	Amplitud de onda (%)	Temperatura (°C)	Agitación (rpm)	Masa biodiésel (g)	Desviación (g)
A	90	23.0	0	54.3	2.28
B	50	23.0	0	Gelatinizó	
C	90	23.0	400	59.70	5.45
D	50	23.0	400	59.03	2.77
E	90	60.0	0	53.65	0.39
F	5	60.0	0	Gelatinizó	
G	90	60.0	400	54.63	1.98
H	50	60.0	400	53.1	2.20

Cuadro 5. Composición del aceite utilizado

Compuesto	Área (%)
Ácido tridecanóico, metil éster	0.13
Ácido tetradecanóico, 12-metil-, metil éster	0.26
Metil palmitato	15.61
Metil estearato	4.94
Metil oleato	28.53
Metil linoleato	45.59
Ácido (Z,Z,Z)-9,12,15-octadecatrienóico, metil éster	4.38

Cuadro 6. Composición del biodiésel producido

Compuesto	Área (%)
Etil palmitato	18.05
Etil oleato	38.21
Etil linoleato	35.05
(Z,Z,Z)-9,12,15-ácido octadecatrienóico, etil éster	7.37

reacción de sustitución nucleofílica unimolecular o incluso un mecanismo de eliminación, lo que produciría productos diferentes al etil éster o biodiésel deseado. Esto se ve reflejado en la disminución del biodiésel producido para las pruebas de condiciones de agitación y ultrasonido similares en donde se varía la temperatura. Por ejemplo, para la reacción D y H en las que se trabajó a 21 y 60 °C respectivamente, se obtuvo una producción de 59.03 ± 2.77 g frente a 53.15 ± 2.20 g de biodiésel, respectivamente. De igual manera ocurrió para las pruebas C y G en las que se trabajó a 23 y 52°C respectivamente, se obtuvo una producción de 59.70 ± 5.45 g frente a 54.63 ± 1.98 g de biodiésel respectivamente. De esta manera se constató que el aumento a la temperatura disminuyó la producción de biodiésel.

La composición del aceite y del biodiésel producido se puede observar en los Cuadros 5 y 6.

Es difícil comparar aceites reciclados usados en proceso de fritura, ya que estos suelen mezclarse con otros, dificultando el poder asociar los diferentes grupos de ácidos grasos, a sus respectivos aceites. En su mayoría, el aceite reciclado utilizado, fue de canola, y como se puede observar en el Cuadro 5., los principales componentes fueron el ácido oleico y el ácido linoleico tal y como lo sugieren el estudio realizado por Hernandez et al. (1999) en donde el ácido oleico y linoleico se encuentran en mayor cantidad.

Conclusiones

Se realizó un estudio experimental para determinar la importancia de los parámetros siguientes, agitación mecánica, temperatura y amplitud de la onda de ultrasonido, en la producción de biodiésel a partir de aceite reciclado usado en proceso de fritura. Se empleó el método de ultrasonido para mejorar la eficiencia de conversión. La masa de aceite desechado y de etóxido de sodio usados, fueron constantes para todos los experimentos. El estudio sugiere que el factor más importante fue la agitación, pues produjo biodiésel a pesar de utilizar 50% de amplitud de la onda de ultrasonido y porque incrementó la producción de masa de biodiésel cuando esta se comparó con los valores de los experimentos sin agitación. La amplitud de onda de ultrasonido empleada al 90% produjo biodiésel en todas sus variantes mientras que la amplitud de 50% solamente lo logró al utilizar agitación. Por su parte, al incrementar la temperatura se redujo la producción de biodiésel debido al incremento en la competencia de mecanismos de reacción.

El límite superior de la variable respuesta fue de 59.70 ± 5.45 g de biodiésel y se obtuvo empleando una amplitud de ultrasonido de 90%, agitación mecánica a 400 rpm y a una temperatura de 23°C. Para las pruebas a las que se empleó una amplitud de ultrasonido de 50% y sin agitación se obtuvo una gelatinización de la mezcla aceite-etanol y no se obtuvo biodiésel.

Bibliografía

- Babajide O, Petrik L, Amigun B, Ameer F (2009) Low-cost feedstock conversión to biodiesel via ultrasound technology *Energies* **3**: 1691-1703
- Chand P, Chintareddy VR, Verkade JG, Grewell D (2010) Enhancing biodiesel production from soybean oil using ultrasonics *Energy Fuels* **24**: 2010-2015
- Chang R (2010) *Química* 10ª ed, México: McGraw-Hill
- Chen D, Sharma S, Mudhoo A (2012) *Handbook on applications of ultrasound sonochemistry for sustainability* Taylor & Francis Group, LLC. USA: CRC Press
- Colucci J, Borrero E, Alape F (2005) Biodiesel from an alkaline transesterification reaction of soybean oil using ultrasonic mixing *J Am Oil Chem Soc* **82**: 525-530
- Fernandes FAN, Mazzone LCA, Matos LJB, Cartaxo SJM, Rodriguez S (2012) Ultrasound assisted transesterification of corn oil with ethanol *Latin Amer Appl Res*, **42**: 193-196
- Franc J-P, Michel J-M (2005) *Fundamentals of cavitation* USA: Kluwer Academic Publishers.
- Gude VG, Grant GE (2013) Biodiesel from waste cooking oils via direct sonication *Appl Energy* **109**: 135-144
- Hanh HD, Dong NT, Okitsu K, Nishimura R, Maeda Y (2010) *Biodiesel production from Jatropha curcas oil under ultrasonic irradiation condition* In: 7th Biomass Asia Workshop, **1** pp 1-6
- He B, Van Gerpen J (2012) Application of ultrasonication in transesterification process for biodiesel production *Biofuels* **3**: 479-488
- Hernández E, Quispe C, Alencastre MA (1999) *Composición de Ácidos Grasos en Aceites de Mayor Consumo en el Perú* Instituto de Investigación de Bioquímica. Facultad de Farmacia y Bioquímica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos
- Hingu S, Gogate P, Rathod V (2010) Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using sonochemical reactors *Ultrason Sonochem* **17**: 827-832
- Ji J, Wang J, Li Y, Yu Y, Xu Z (2006) Preparation of biodiesel with the help of ultrasonic and hydronymic cavitation *Ultrasonics* **44**: 411-414
- Kiefer K. (1997) *Derivatization of corn oil for analysis by GC* Sigma Aldrich, USA https://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/docs/Supelco/The_Reporter/t297053.pdf
- Knoethe G, Van Gerpen J (2005) *Biodiesel Handbook* 2a ed USA: AOCS Press
- Kumar D, Kumar G, Poonam, Singh CP (2010) Ultrasonic-assisted transesterification of Jatropha curcas oil using catalyst, Na/SiO₂ *Ultrason Sonochem* **17**: 839-44
- Mason T; Lorimer J (2002) *Applied sonochemistry, the uses of power ultrasound in chemistry and processing* USA: Wiley-VCH
- McMurry J (2012) *Organic Chemistry* 8a ed Brooks/Cole Canadá: Cengage Learning
- Paiva EJM, Silva MLCP, Castro HF, Barboza JCS, Giordani DS (2011) *Evaluation of biodiesel production from babassu oil and etanol applying alkaline transesterification under ultrasonic technology* World Renewable Energy Congress **1**, pp 303-310
- Rodrigues S, Mazzone LCA, Santos FFP, Cruz MGA, Fernandes FAN (2009) Optimization of the production of ethyl esters by ultrasound assisted reaction of soybean oil and ethanol *Brazilian J Chem Eng* **26**: 361-366
- Stavarache C, Vinatoru M, Nishimura R, Maeda Y (2005) Fatty acids methyl esters from vegetable oil by means of ultrasonic energy *Ultrason Sonochem* **12**: 367-372
- Teixeira LSG, Assis JCR, Mendonca DR, Santos ITV, Guimaraes PRB, Pontes LAM, Teixeira JSR (2009) Comparison between conventional and ultrasonic preparation of beef tallow biodiesel *Fuel Process Technol* **90**: 1164-66
- Vyas AP, Verma JL, Subrahmanyam N (2011) Effects of molar ratio, alkali catalyst concentration and temperatura on transesterification of jatropha oil with metanol under ultrasonic irradiation *Adv Chem Eng Sci* **1**: 45-50
- Wade L (2004) *Química orgánica* 5ª ed. Madrid: Pearson Educación SA