

TRANSESTERIFICACIÓN ALCALÍ-CATALIZADA DEL ACEITE DE HIGUERILLA

J. Ricardo Lozada G. * y Jorge Alberto Velásquez J. *†

*Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 #70-01, of. 11-259, Medellín, Colombia,

Recibido 01 Agosto 2009; aceptado 04 Diciembre 2009
Disponible en línea: 27 Diciembre 2009

Resumen: El aceite de higuierilla tiene un alto rendimiento por hectárea y se adapta fácilmente a diversas condiciones climáticas de tal manera que tiene un gran potencial como materia prima en la producción de biocombustibles. Se estudia en este trabajo la transesterificación del aceite mencionado con metanol y NaOH como catalizador. Se desea evaluar el efecto de tres factores: la relación molar alcohol/aceite, la concentración de catalizador y la temperatura de reacción sobre dos variables de respuesta: la cinética y el rendimiento global de la reacción. Se utiliza la metodología de la superficie de respuesta con un diseño factorial 3^3 . Las condiciones óptimas encontradas son las siguientes: concentración de NaOH de 0.23%w/w, temperatura de reacción de 55°C y una relación volumétrica alcohol/aceite de 1.35. El biodiesel producido posee una densidad de 0.895 g/ml, una viscosidad cinemática de 7.019 cSt, un poder calorífico de 34,704 kJ/kg y un índice de cetano de 37.87. La viscosidad cinemática y el índice de cetano no cumplen con la norma técnica colombiana por esta razón se deberían emplear mezclas con diesel en diversas proporciones para su uso como combustible. Copyright © 2009 UPB.

Abstract: The castor oil has a high yield per hectare and has good adaptability to various climatic conditions therefore has great potential as raw material in the biofuel production. This work studies the castor oil transesterification using methanol and NaOH as catalyst. The effect of three factors: the molar ratio alcohol / oil, catalyst concentration and reaction temperature on two response variables: kinetic and global yield of reaction is evaluated. The response surface methodology with a 3^3 factorial design is used. The optimal conditions found are: NaOH concentration 0.23%w/w, reaction temperature 55°C and a volumetric ratio alcohol / oil 1.35. The biodiesel produced has a density of 0.895 g/ml, a kinematic viscosity of 7.019 cSt, a heating value of 34.704 kJ / kg and a cetane index of 37.87. Kinematic viscosity and cetane index don't meet the Colombian standard requirements, therefore is mandatory employ blends with diesel in varying proportions for use as fuel.

Keywords: Castor oil, Alkaline-catalyzed transesterification, Biodiesel, methyl esters, ethyl esters.

† Autor correspondiente: Tel. (+574) 415 9020 ext. 9582.
E-mail: jorge.velasquezj@upb.edu.co (J. A. Velásquez).

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la mayor parte de la energía consumida en el mundo proviene de recursos no renovables como el gas natural, petróleo y carbón (Naik et al., 2006). Los problemas ambientales asociados al consumo de los combustibles fósiles, especialmente en el sector transporte han incrementado el interés general hacia el desarrollo de fuentes de energía limpias y renovables (Briceño et al., 2002).

Los biocombustibles como el etanol y el biodiesel se consideran como una alternativa viable para sustituir el consumo del diesel en el futuro cercano (Demirbas, 2007).

El biodiesel es un álquil ester de ácidos grasos, se produce de fuentes biológicas renovables como grasas animales o aceites vegetales (Lang et al., 2001). En años recientes se han identificado aproximadamente 350 tipos de plantas oleaginosas con potencial para ser utilizados en la producción de biodiesel (Demirbas, 2005).

Los aceites vegetales generalmente tienen una viscosidad de 10 a 20 veces mayor al diesel convencional, por esta razón no es recomendable emplearlo directamente en motores diesel como lo han demostrado varios estudios (Lang et al., 2001; Demirbas, 2005).

Existen varios procedimientos para reducir la viscosidad del aceite vegetal, de esta forma puede emplearse como un combustible apto para motores diesel, los métodos empleados generalmente son: dilución con diesel, micro emulsión con alcoholes, descomposición térmica, craking catalítico y transesterificación (Demirbas, 2006).

Entre los métodos mencionados la transesterificación se destaca como el proceso de modificación de aceite más viable, siendo la transesterificación álcali catalizada el proceso comúnmente empleado para la producción de biodiesel a nivel comercial (Demirbas, 2006).

La transesterificación se refiere a la reacción entre un aceite o grasa y un alcohol, para producir ésteres alquílicos de ácidos grasos (biodiesel) y glicerol. La reacción es una reacción de equilibrio en la cual se transforman las moléculas de triglicéridos, grandes y ramificadas, en moléculas de ésteres alquílicos, lineales, no ramificadas, de menor tamaño similares a las del diesel. En la

Fig. 1 y 2 puede observarse la reacción de transesterificación global y su mecanismo de reacción respectivamente (Henao et al., 2007; Marchetti et al., 2007).

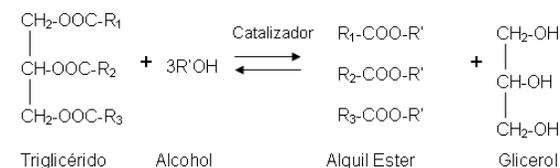


Fig. 1. Reacción de Transesterificación

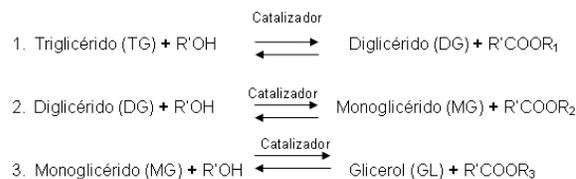


Fig. 2. Mecanismo Reacción de Transesterificación

La reacción se puede realizar con cualquier alcohol (metanol, etanol, propanol, butanol, entre otros), generalmente se emplea etanol o metanol debido a que son técnica y económicamente más convenientes (Demirbas, 2006). La reacción estequiométrica requiere 1 mol de triglicérido y 3 mol de alcohol, en la práctica se utiliza un exceso de alcohol con el fin de desplazar el equilibrio hacia el producto deseado (Henao et al., 2007; Marchetti et al., 2007).

La transesterificación se efectúa con o sin la presencia de catalizador, el catalizador es utilizado para mejorar el rendimiento de la reacción (Demirbas, 2003). Se cree que el tercer paso de la reacción, la conversión de monoglicérido en ésteres alquílicos de monoglicérido es el paso que controla la eficiencia de reacción (Demirbas, 2005).

Las principales variables que afectan el rendimiento de la reacción de transesterificación son: la temperatura, la concentración del catalizador, la relación molar alcohol/aceite, la intensidad de mezclado y el tiempo de reacción (Marchetti et al., 2007; Demirbas, 2005).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Para el desarrollo del presente trabajo se consideran previamente varios factores, entre ellos la viabilidad económica de un proyecto productivo para la producción de biodiesel, por esta razón se plantea realizar el estudio de transesterificación empleando materia prima local, de fácil adquisición y bajo costo. Se emplea metanol grado industrial al 99%, el catalizador seleccionado es el hidróxido de sodio al 98% de pureza.

El aceite de higuera se elige por las siguientes razones:

El rendimiento por hectárea de la higuera es aproximadamente de 2600 lt/ha/año, superior al rendimiento por hectárea de los cultivos de jatropha, colza y soja ([Arias, 2007](#)).

La planta de higuera (*ricinos communis*) se cultiva en regiones tropicales y subtropicales, se caracteriza por ser adaptable a las condiciones de clima variables, para obtener el máximo rendimiento del cultivo se recomienda sembrarlo en suelos con fertilidad mediana o alta, pH entre 6-7, temperatura entre 16-30 °C y requiere en su etapa de crecimiento de 600 a 800 mm de agua ([Ogunniyi, 2006](#); [MAG, 2007](#)).

En Antioquia se han identificado más de 20 municipios con las condiciones aptas recomendadas para el cultivo de la higuera, el área total cultivable alcanza las 52000HA ([Gobernación de Antioquia, 2007](#)).

Por las razones anteriores se considera el aceite de higuera como una materia prima local con el potencial de ser empleada en proyectos productivos para producir biodiesel.

2.2. Caracterización fisicoquímica del aceite de higuera

El aceite se caracteriza mediante métodos fisicoquímicos siguiendo los procedimientos descritos en las normas ICONTEC. Se determinan las siguientes propiedades: densidad a 25°C (NTC 336), viscosidad Absoluta a 25°C, índice de acidez (NTC 218), índice de saponificación (NTC 335).

2.3. Metodología

Con el propósito de estudiar el efecto de la relación molar alcohol/aceite, la concentración de catalizador y la temperatura en el rendimiento y la velocidad de reacción se realizó un diseño factorial (3^3) sin replicas, el cual consiste de un arreglo de tres factores con tres niveles cada uno. La combinación de factores y niveles da un total de 27 pruebas para cada uno de los alcoholes empleados (metanol y etanol).

Se considera pertinente seleccionar dos variables de respuesta: el rendimiento de reacción y una estimación de velocidad inicial de reacción como un parámetro cinético. Los resultados se analizan empleando el paquete de software StatGraphics Centurión XV.

En la tabla 1 se encuentran los factores y niveles seleccionados para el estudio.

Los niveles de concentración de catalizador seleccionados para el estudio varían de 0.2 a 0.4% w/w en relación a la masa total de reacción.

Para propósitos prácticos, la relación molar alcohol aceite se considera como una relación volumétrica, las relaciones volumétricas de alcohol/aceite seleccionados para el estudio varían de 1:1 a 3:1.

El estudio se realiza con metanol, las relaciones molares equivalentes se presentan en la tabla 2.

Tabla 1. Factores y niveles seleccionados

FACTOR	Nivel Inferior	Nivel Medio	Nivel Superior
Relación Alcohol/Aceite (v/v)	1:1	2:1	3:1
%w/w NaOH	0.2	0.3	0.4
Temperatura (°C)	30	50	70

Tabla 2. Relaciones molares metanol/aceite

Relación Volumétrica	Relación molar
1:1	22.42:1
2:1	44.84:1
3:1	67.26:1

La relación molar alcohol/aceite típica reportada en la literatura esta en el rango de 6:1 a 9:1 ([Ramadhas et al., 2005](#); [Marchetti et al., 2007](#)), no obstante en el presente estudio se considera emplear relaciones molares mas altas debido a las propiedades fisicoquímicas particulares del aceite de ricino, especialmente su viscosidad.

La mayoría de aceites vegetales tienen una viscosidad del orden de 10 a 20 veces superior al diesel ([Lang et al., 2001](#); [Demirbas, 2005](#)), el aceite de ricino es un caso particular, su viscosidad es más de 100 veces superior al diesel ([Demirbas, 2005](#)). Por este motivo se planteó utilizar relaciones molares altas con el fin de garantizar un alto exceso de alcohol en todo momento, de esta manera el aceite de ricino presenta una mayor solubilidad en el alcohol permitiendo que las moléculas de triglicéridos entren en contacto más fácil con las moléculas de alcohol favoreciendo la velocidad de reacción y la conversión al desplazar el equilibrio hacia los productos deseados biodiesel y glicerina. Algunas fuentes bibliográficas reportan relaciones molares alcohol aceite de 30:1, 40:1 e incluso de 250:1 ([Zheng et al., 2006](#); [Demirbas, 2005](#); [Fukuda, 2001](#)).

2.4. Procedimiento transesterificación

Para la realización de las pruebas se emplea un equipo de agitación magnética con control de temperatura. El procedimiento empleado es similar al típico reportado en la literatura con algunas modificaciones ([Demirbas, 2007](#)).

Inicialmente se carga el reactor con una cantidad conocida de aceite de higuera y se calienta hasta alcanzar la temperatura de reacción establecida. En un segundo reactor el catalizador con la concentración indicada, se disuelve en la cantidad de alcohol requerida (calculado de la relación molar alcohol/aceite), la mezcla se calienta y agita hasta alcanzar la temperatura de reacción establecida. Posteriormente el aceite de ricino previamente calentado se adiciona sobre la mezcla alcohol/catalizador. La mezcla se mantiene en agitación y temperatura constante durante el periodo de reacción establecido. En la tabla 3 se encuentra el tiempo de reacción establecido para las pruebas.

Tabla 3. Tiempos de reacción

Temperatura (°C)	Tiempo de Reacción (minutos)	
	min	max
30	180	240
50	150	180
70	120	150

El tiempo se cronometra a partir del momento en el cual el aceite se adiciona a la mezcla alcohol/catalizador. Se toma una muestra de 10ml cada 30 minutos durante un periodo de reacción establecido, las muestras se sometieron a un cambio de temperatura para detener la reacción al sumergirlas en agua helada por un periodo de 1 hora y fueron almacenadas para cuantificar posteriormente el glicerol formado.

En una reacción de transesterificación exitosa el producto obtenido forma dos fases, glicerol y alquil ester de ácidos grasos (biodiesel), las cuales pueden ser separadas fácilmente por decantación. La formación de fases comienza a observarse en los primeros 10 minutos, no obstante las muestras se almacenaron 24 h para permitir una separación completa antes de ser cuantificadas.

Finalmente el biodiesel obtenido se somete a un proceso de lavado y secado. El procedimiento empleado se basa en los procedimientos típicos reportados en la literatura con algunas modificaciones ([Demirbas, 2007](#)).

El lavado consiste en adicionar agua entre 2-5% en volumen al reactor y agitar la mezcla a bajas revoluciones durante un periodo de 5-10 min, posteriormente la mezcla se deja en reposo para permitir la separación de las fases. Nuevamente la fase liviana se compone del biodiesel y la fase pesada contiene residuos de catalizador, productos saponificados en el proceso, residuos de glicerina, agua y alcohol. El proceso puede repetirse varias veces si se considera necesario.

Posteriormente el remanente de catalizador se neutraliza empleando una solución ácida, en el presente caso se utiliza una solución de ácido sulfúrico al 10% v/v.

El proceso de secado se realiza calentando el biodiesel en una plancha de calentamiento a una temperatura de 70-80°C por un periodo de 20 minutos.

2.5. Modelo de cálculo

Para cada una de las pruebas realizadas se toma una muestra aproximadamente de 10 ml durante el periodo de reacción, el envase de cada muestra se pesa previamente limpio y seco. Para cada muestra que forma dos fases, se registra el peso total de la muestra (glicerina + biodiesel) y el peso de la glicerina obtenida al separar las fases por decantación. El rendimiento de reacción se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Glicerina real (gr)}}{\text{Glicerina teórica (gr)}} \quad (1)$$

La glicerina real es la glicerina total obtenida en cada prueba.

La glicerina teórica es la glicerina calculada de la relación estequiométrica de la transesterificación, empleando el peso molecular promedio del aceite de ricino calculado a través del índice de saponificación.

Para el cálculo de la velocidad inicial se grafica la fracción másica de glicerina vs el tiempo (min), a partir de la grafica se calculo la pendiente desde $t=0$ min hasta $t=t'$ min, donde t' es el tiempo en el cual comienza a formarse la glicerina.

La diferencia de pendientes entre las pruebas se relaciona directamente con la cinética de la reacción, no obstante debe aclararse que el valor de la pendiente difiere de la velocidad de reacción real si se realiza un cálculo riguroso, se emplea la estimación de la velocidad inicial como un parámetro de la cinética de reacción de transesterificación, el cual permite cuantificar el efecto de la temperatura, la concentración de catalizador y la relación molar alcohol/aceite sobre la cinética de reacción.

2.6. Caracterización fisicoquímica del biodiesel

El biodiesel obtenido como producto final se caracteriza cuantificando las siguientes propiedades fisicoquímicas: densidad a 25°C (NTC 336), viscosidad absoluta a 25°C, viscosidad cinemática 40°C (ASTM D445), índice de cetanos (ASTM D976) y poder calorífico (ASTM D240)

La viscosidad cinemática, el poder calorífico y el índice de cetanos se caracterizan de acuerdo a las

normas ASTM correspondientes en el laboratorio de Crudos y Derivados de la facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Resultados caracterización fisicoquímica del aceite de higuierilla

En la tabla 4 se reportan los resultados obtenidos de la caracterización del aceite de higuierilla.

Tabla 4. Resultados propiedades fisicoquímicas del aceite de higuierilla

Propiedad	Unidades	Resultados
Índice de acidez	mg _{KOH} /g _{Aceite}	3.874
Índice de saponificación	mg _{KOH} /g _{Aceite}	192.854
Densidad (25°C)	g/ml	0.957
Viscosidad (25°C)	cP	621

Las propiedades del aceite de higuierilla se encuentran en el intervalo típico reportado en la literatura ([Benavides et al., 2007](#); [Ogunniyi, 2006](#); [Bailey, 1984](#)). El índice de acidez se emplea para establecer los niveles de concentración de NaOH necesarios para catalizar la transesterificación. El índice de saponificación se emplea para calcular el peso molecular promedio del aceite de higuierilla, con base en el resultado obtenido el peso molecular promedio del aceite de ricino es 872.681 g/mol. La viscosidad cinemática del aceite de ricino medida en el laboratorio es 648.9 mm/s², el intervalo típico de viscosidad cinemática para la mayoría de aceites vegetales se encuentra entre 40 y 60 mm/s² ([Demirbas, 2005](#)), la viscosidad inusualmente alta del aceite de ricino se atribuye a la presencia del grupo hidroxilo en las moléculas del triglicéridos ([Ogunniyi, 2006](#)). Este dato fue empleado para la selección de los niveles de la relación molar alcohol/aceite como se menciona previamente.

3.2. Resultados transesterificación con metanol

Se emplea el paquete de software StatGraphics Centurión XV para el análisis estadístico de resultados. En la tabla 5 se muestran los resultados del diseño de experimentos.

En las tablas 6 y 7 se presenta el análisis de varianza ANOVA para el rendimiento y la velocidad inicial de reacción.

En ambas tablas el factor A representa la concentración de NaOH (% w/w), el factor B la temperatura de reacción y el factor C la relación volumétrica alcohol/aceite.

Tabla 5. Resultados del diseño de experimentos

Prueba	%W/W _{NaOH}	T (°C)	Relación Alcohol/Aceite (v/v)	$\left(\frac{d(C_{Glicerina})}{d(t)}\right)_{t=0}$	Conversión (%)
1	0,2	30	1	0,0304	84,661
2	0,3	30	1	0,0538	89,920
3	0,4	30	1	0,0834	95,739
4	0,2	50	1	0,0873	97,011
5	0,3	50	1	0,1525	99,278
6	0,4	50	1	0,1301	99,997
7	0,2	70	1	0,1332	85,763
8	0,3	70	1	0,0000	0,000
9	0,4	70	1	0,0000	0,000
10	0,2	30	2	0,0564	67,399
11	0,3	30	2	0,0496	89,427
12	0,4	30	2	0,0509	93,961
13	0,2	50	2	0,1526	95,735
14	0,3	50	2	0,0000	0,000
15	0,4	50	2	0,0000	0,000
16	0,2	70	2	0,0809	97,132
17	0,3	70	2	0,0750	97,300
18	0,4	70	2	0,0000	0,000
19	0,2	30	3	0,0000	0,000
20	0,3	30	3	0,0000	0,000
21	0,4	30	3	0,0000	0,000
22	0,2	50	3	0,0000	0,000
23	0,3	50	3	0,0000	0,000
24	0,4	50	3	0,0000	0,000
25	0,2	70	3	0,0000	0,000
26	0,3	70	3	0,0000	0,000
27	0,4	70	3	0,0000	0,000

Tabla 6. Tabla ANOVA Rendimiento de reacción

	Razón-F	Valor-P
A	4,25	0,0600
B	7,47	0,0171
C	77,53	0,0000
AA	0,12	0,7388
AB	12,47	0,0037
AC	1,32	0,2717
BB	3,78	0,0739
BC	4,04	0,0656
CC	15,21	0,0018
R-cuadrada	91,3371	

Tabla 7. Tabla ANOVA Velocidad inicial de reacción

	Razón-F	Valor-P
A	4,84	0,0451
B	0,11	0,7441
C	41,64	0,0000
AA	1,52	0,2383
AB	11,40	0,0045
AC	0,32	0,5781
BB	13,84	0,0023
BC	1,83	0,1974
CC	8,76	0,0103
R-cuadrada	83,4124	

El modelo se ha subdividido en varios componentes, de esta forma, los componentes (A - AA), (B - BB) y (C -CC) representan los efectos lineal y cuadrático del modelo para cada efecto individual. Los efectos AB, AC y BC representan las interacciones de los efectos. Con base en el análisis de varianza de las tablas 6 y 7, los efectos estadísticamente significativos (a un nivel de confianza del 95%) para el rendimiento de la transesterificación son: B, C, AB, y CC. Los efectos estadísticamente significativos para la velocidad inicial de reacción son: A, C, AB, BB y CC. Al existir una interacción significativa (AB) para ambos modelos, la influencia del factor A y el factor B no pueden analizarse de manera individual, por tal motivo para ambos modelos los factores más significativos son:

- FACTOR C: Relación volumétrica alcohol/aceite
- FACTOR AB: Interacción entre la temperatura de reacción y la concentración de catalizador.

En las Fig. 3 y 4 se presentan las graficas de los efectos principales para las respuestas analizadas.

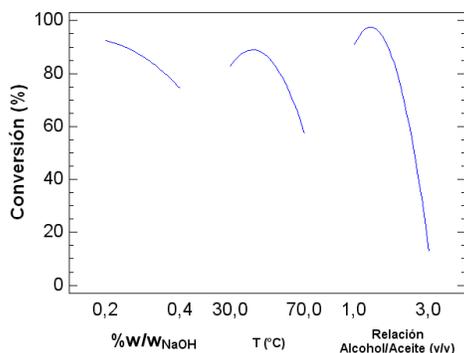


Fig. 3. Gráfica efectos principales conversión

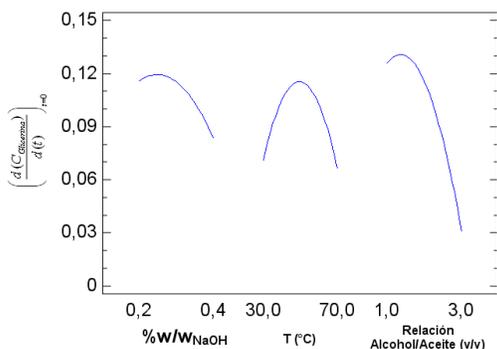


Fig. 4. Gráfica efectos principales velocidad inicial.

3.2.1. Influencia de la relación alcohol/aceite (v/v)

En las gráficas de los efectos principales [Fig. 3](#) y [4](#) puede apreciarse que a medida que se incrementa la relación alcohol/aceite la conversión y velocidad de reacción aumentan hasta un punto en el cual el rendimiento comienza a decrecer con el aumento en la relación molar. Las graficas de los efectos sugieren que el rendimiento y velocidad de reacción se favorecen a relaciones volumétricas bajas de alcohol/aceite.

El exceso de metanol pudo aumentar la solubilidad del metanol con la glicerina y de esta manera impedir la decantación por gravedad de la glicerina de forma total o parcial afectando en rendimiento de la transesterificación. Con base en los resultados obtenidos se considera la relación volumétrica 1:1 como la mejor opción para realizar la transesterificación del aceite de higuera.

La relación volumétrica 1:1 es equivalente a la relación molar de 22.42:1. En numerosos estudios la relación molar alcohol/aceite óptima para realizar la transesterificación de aceites vegetales

diferentes al aceite de ricino generalmente varia 6:1 a 9:1 ([Briceño et al., 2002](#); [Naik et al., 2006](#); [Rashid y Anwar, 2007](#)), no obstante como se explica previamente, la viscosidad del aceite de ricino es significativamente superior a la viscosidad de los aceites vegetales empleados comúnmente para realizar la transesterificación (aceite de colza, soja, maíz, girasol, entre otros), por esta razón en el presente estudio se considera emplear relaciones molares más altas.

3.2.2. Influencia de la temperatura y la concentración de catalizador

Al existir una interacción significativa de la temperatura con la concentración de catalizador es difícil predecir de manera individual las condiciones de temperatura y concentración de catalizador que favorecen el rendimiento y la velocidad de reacción, ya que ambas son dependientes entre si, especialmente en el caso de la temperatura. No obstante las [Fig. 3](#) y [4](#) sugieren que emplear concentraciones bajas de NaOH favorece el rendimiento y la cinética de reacción.

Con el objetivo de ilustrar con mayor claridad la interacción AB, en las [Fig. 5](#) y [6](#) se ilustra la variación del efecto del factor A con los niveles del factor B, el entrecruzamiento de las líneas indica la presencia de la interacción de los dos factores.

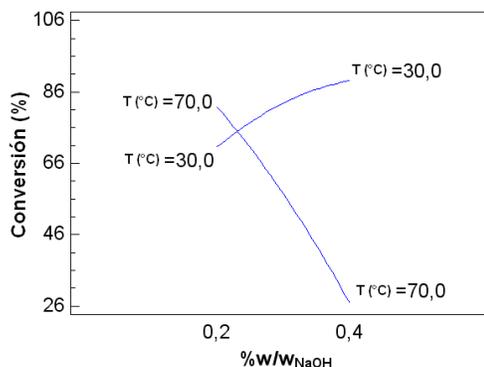


Fig. 5. Grafica de Interacción AB Conversión

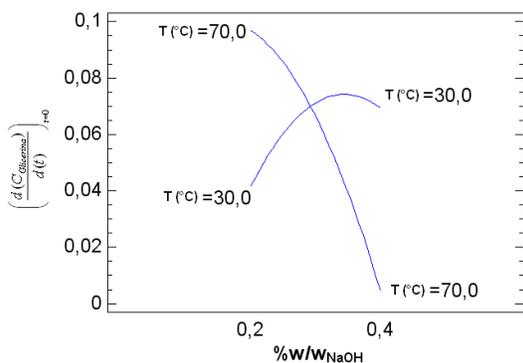


Fig. 6. Grafica de interacción AB velocidad inicial

El comportamiento de la interacción entre la temperatura y la concentración de catalizador esta influenciado por la interferencia ocasionada por la reacción lateral de saponificación entre el catalizador alcalino y los ácidos grasos del aceite

El efecto conjunto de ambos factores genera efectos adversos sobre el rendimiento de la transesterificación, generalmente bajo condiciones de temperatura en el nivel alto y concentración de NaOH en los niveles medio y alto, se promovió la formación de emulsiones y geles indeseables impidiendo llevar a cabo una reacción de transesterificación exitosa

Durante el estudio se observa que el nivel bajo del factor A (0.2%w/w NaOH) y el nivel bajo del factor B (30°C), son condiciones que minimizan la posibilidad formación de emulsiones durante la transesterificación, independiente del nivel de los demás factores.

3.3. Optimización del modelo

Empleando el modelo de superficie de respuesta se estima la combinación de niveles de los factores A, B y C que maximizan el rendimiento y la velocidad de reacción. En la Fig. 7 se presenta el gráfico de superficie de respuesta para el estudio de rendimiento.

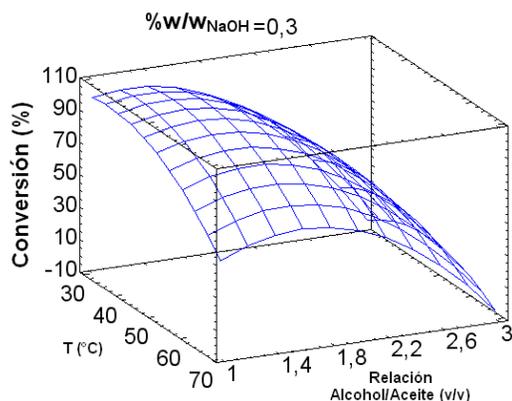


Fig. 7. Superficie de respuesta estimada rendimiento transesterificación

En la tabla 8 se encuentran las condiciones en la región del punto óptimo de la Fig. 7.

Tabla 8. Condiciones óptimas para maximizar el rendimiento de reacción

FACTOR	BAJO	ALTO	ÓPTIMO
A	0.2	0.4	0.2
B	30	70	48.89
C	1	3	1.33

En la Fig. 8 se presenta el gráfico de superficie de respuesta para el estudio de velocidad inicial

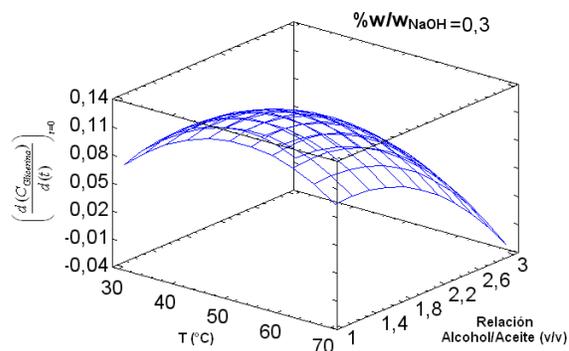


Fig. 8. Superficie de respuesta estimada velocidad inicial transesterificación

En la tabla 9 se encuentran las condiciones en la región del punto óptimo de la Fig. 8.

Tabla 9. Condiciones óptimas para maximizar la velocidad inicial de reacción

FACTOR	BAJO	ALTO	ÓPTIMO
A	0.2	0.4	0.23
B	30	70	55.6
C	1	3	1.35

Con el objetivo de confirmar los resultados obtenidos, se repitieron algunas pruebas, empleando condiciones de reacción semejantes a las reportadas en las tablas 8 y 9.

Empleando las condiciones de la tabla 8 se obtuvo un rendimiento del 71.64% en 120 min. Con las condiciones de la tabla 9 se obtuvo un rendimiento del 98.88% en 120 min.

3.4. Resultados caracterización fisicoquímica del aceite de higuera

En las tablas 10 se reportan los resultados obtenidos de la caracterización del biodiesel de aceite de higuera obtenido de las pruebas con metanol. La densidad y la viscosidad concuerdan con los resultados reportados por [Demirbas, \(2006\)](#).

El índice de cetano y el poder calorífico reportados en las tablas 10 concuerdan con los resultados reportados por otros autores ([Benavides et al., 2007](#)).

De acuerdo con las especificaciones de la norma técnica colombiana para combustibles diesel corriente y diesel extra (NTC 1438), la viscosidad cinemática y el índice de cetano no cumplen con las especificaciones requeridas para emplearse puro (B100) en un motor diesel, por esta razón se recomienda emplearlo en mezclas con el diesel, la relación de mezcla de biodiesel/diesel puede establecerse empíricamente o emplear las mezclas comúnmente utilizadas (B20, B10 y B5).

Tabla 10. Propiedades fisicoquímicas Biodiesel (pruebas metanol)

PROPIEDAD	UNIDADES	RESULTADOS
Densidad (25°C)	g/ml	0,895
Viscosidad (25°C)	cP	14,571
Viscosidad Cinemática (40°C)	cSt	7,019
Poder Calorífico	kJ/kg	34703,92
Índice de cetano	N/A	37,87

4. CONCLUSIONES

Las propiedades físico químicas del aceite de ricino son apropiadas para realizar con éxito la transesterificación álcali catalizada.

Los resultados obtenidos durante el estudio de análisis de varianza de los factores, indican que el rendimiento y la cinética de la transesterificación catalizada por NaOH son influenciados directamente por la relación molar alcohol/aceite y la interacción entre la concentración del catalizador y la temperatura de reacción.

Mediante el análisis de optimización se encuentra la combinación de factores y niveles más apropiada para realizar la transesterificación del aceite de ricino empleando metanol, las condiciones óptimas son: concentración de NaOH de 0.23% w/w, temperatura de reacción de 55°C y una relación volumétrica alcohol/aceite de 1.35. Empleando las condiciones de reacción en el punto óptimo puede obtenerse una conversión de 98-99% en 120min.

REFERENCIAS

Arias, Andrés Felipe (2007). Los biocombustibles en Colombia. Ministerio de agricultura y desarrollo rural. En línea: [http://www.minagricultura.gov.co/archivos/biocombustibles_septiembre.pdf], consultado en 2007-10-24.

- Bailey, Alton (1984). Aceites y grasas industriales. 2. ed. Reverte S.A, España.
- Benavides, Alirio; Pedro Benjumea y Veselina Pashova (2007). El biodiesel de aceite de higuerilla como combustible alternativo para motores diesel. *Dyna*, 153, 141-150.
- Briceño, Y. et al. (2002). Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification. *Bioresource Technology*, 83, 111-114.
- Demirbas, Ayhan (2003). Biodiesel fuels from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical alcohol transesterifications and other methods: a survey. *Energy Conversion and Management*, 44, 2093-2109.
- Demirbas, Ayhan (2005). Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31, 466-487.
- Demirbas, Ayhan (2006). Biodiesel production via non-catalytic SCF method and biodiesel fuel characteristics. *Energy Conversion and Management*, 47, 2271-2282.
- Demirbas, Ayhan (2007). Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy Policy*, 35, 4661-4670.
- Fukuda, H., A. Kondo y H. Noda (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of Oils. *Journal of bioscience and bioengineering*, 92, 405-416.
- GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA. Departamento de Antioquia HIGUERILLA. En línea:[http://www.gobant.gov.co/organismos/sa-gricultura/atlas/tab_%E1reas_higuerilla.pdf], consultado en 2007-08-24.
- Henaó, Carlos et. al. (2007). Producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma: 1. Diseño y simulación de dos procesos continuos. *DYNA*, 151, 71-82.
- Lang, X. et al. (2001). Preparation and characterization of bio-diesels from various bio-oils. *Bioresource Technology*, 80, 53-62.
- Leung, D.Y.C. y Y. Guo (2006). Transesterification of neat and used frying oil: Optimization for biodiesel production. *Fuel Processing Technology*, 87, 883-890.
- MAG. HIGUERILLA. En línea: [http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec-higuerilla.pdf], consultado en 2007-08-24.
- Marchetti, J.M., V.U. Miguel y A.F. Errazu (2007). Possible methods for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1300-1311.
- Naik, S.N., L.C. Meher y Vidya S.S. Dharmagadda (2006). Optimization of alkali-catalyzed transesterification of pongamia pinnata oil for production of biodiesel. *Bioresource Technology*, 97, 1392-1397.
- Ogunniyi, D.S. (2006). Castor oil: A vital industrial raw material. *Bioresource Technology*, 97, 1086-1091.
- Ramadhas, A.S., S. Jayaraj y C. Muraleedharan (2005). Biodiesel production from high FFA rubber seed oil, *Fue*, 84, 335-340.
- Rashid, Umer y Farooq Anwar (2007). Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil. *Fuel*, 1-9.
- Zheng, S. et al. (2006). Acid-catalyzed production of biodiesel from waste frying oil. *Biomass and Bioenergy*, 30, 267-272.

SOBRE LOS AUTORES

J. Ricardo Lozada G.

Estudiante de ingeniería química Universidad Pontificia Bolivariana, perteneciente al grupo de investigación Pulpa y Papel.

Jorge Alberto Velásquez Jiménez

Docente Investigador e Ingeniero Químico de la Universidad Pontificia Bolivariana. Magister en Productos Forestales de la Universidad de Guadalajara, México. Doctor en Ingeniería Química de la Universidad Rovira i Virgili, de España. Desde 1993 está vinculado a la UPB. Desde 1997 está al frente del Grupo Pulpa y Papel.