

## EFFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA DENSIDAD DEL BIODIESEL DE ACEITE DE PALMA Y SUS MEZCLAS CONDIESEL CONVENCIONAL

*Pedro N. Benjumea H., Germán Chaves N. & Claudia M. Vargas R.*

*Instituto de Energía, Grupo Combustibles Alternativos*

*Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.*

Recibido para evaluación: 30 de Octubre de 2006

Aceptación: 6 de Noviembre de 2006

Entrega de versión final: 10 de Diciembre de 2006

### Resumen

La densidad es una propiedad de fácil medición que se puede correlacionar con otras propiedades claves para evaluar el desempeño de los combustibles en los motores diesel, como el poder calorífico y el número de cetano. Adicionalmente, la densidad es uno de los parámetros más importantes en el almacenamiento, transporte y comercialización de los combustibles. En este artículo se presentan resultados experimentales que muestran la dependencia de la densidad con la temperatura para el biodiesel de aceite crudo de palma (BACP) y sus mezclas al 5% y 20% por volumen con el combustible diesel convencional derivado del petróleo (ACPM). Los resultados experimentales fueron ajustados adecuadamente mediante regresiones lineales obteniéndose coeficientes de regresión cercanos a 1. Para el cálculo de la densidad de las mezclas BACP-ACPM se propone una ley de mezclas simple (promedio ponderado másico) obteniéndose desviaciones absolutas máximas menores al 0.5% con respecto a los datos medidos. Los resultados experimentales de densidad para los diferentes combustibles probados fueron comparados con los arrojados por el método de corrección de volumen propuesto en el estándar ASTM D1250 para combustibles tipo hidrocarburo. Para el caso del BACP puro (B100) la desviación absoluta máxima fue del 0.32%, mostrando que el mencionado método de corrección también es adecuado para predecir los cambios volumétricos con temperatura para sustancias de naturaleza química diferente, como los metilesteros de ácidos grasos.

*Palabras Clave:* biodiesel de aceite de palma, densidad, dilatación térmica

### Abstract

The density is a property of easy measurement which can be correlated with other key properties for evaluating fuel performance in diesel engines, such as calorific value and cetane number. Additionally, the density is one of the most important parameters in connection with fuel storage, transportation and commercialization. In this paper, experimental results showing the temperature dependence of the density for palm oil biodiesel and its 5% and 20% blends with conventional petroleum derived diesel fuel are presented. The experimental results were adequate fixed by linear regressions resulting in regression coefficients close to 1. For calculating the density of the BACP-ACPM blends a simple mixing law (weighted mass average) was proposed leading to absolute maximum deviations lesser than 0.5% of measured data. The density experimental results for the different tested fuels were compared with the estimated values from the volume correction method proposed by the ASTM D1250 standard for hydrocarbon type fuels. For the neat BACP case (B100) the absolute maximum deviation was within 0.32% of measured data indicating that the mentioned correction method is also adequate for predicting the volumetric temperature behavior of substances having different chemical nature such as the methylesters of fatty acids.

*Keywords:* palm oil biodiesel, density, thermal dilatation coefficient.

## 1. INTRODUCCIÓN

El biodiesel es actualmente el combustible alternativo más ampliamente aceptado para sustituir parcial o totalmente al combustible diesel convencional derivado del petróleo. Ambos combustibles, a pesar de ser de naturaleza química diferente, son completamente miscibles al mezclarse en diferentes proporciones. Sin embargo, los diferentes tipos de biodiesel (mezclas de alquilésteres de ácidos de grasas de cadena larga saturados e insaturados) poseen generalmente una densidad mayor que los diferentes tipos de diesel convencional (mezclas de hidrocarburos parafínicos, nafténicos y aromáticos).

La densidad es una propiedad de fácil medición que se puede correlacionar con otras propiedades claves de los combustibles diesel de cara a su desempeño en el motor, como el poder calorífico y el número de cetano. Adicionalmente, la determinación de la densidad es fundamental en la comercialización de los combustibles, dado que dichas sustancias generalmente presentan variaciones considerables en su volumen debido a cambios en la temperatura a presión constante.

Una práctica común en la industria de los combustibles es la determinación de la densidad, o alguna de sus propiedades relacionadas como el volumen, la gravedad específica o la gravedad API, a la temperatura ambiente del lugar (campo, planta o laboratorio) y la posterior utilización de un método de corrección que permita predecir el valor de la propiedad a una temperatura de referencia, la cual normalmente se toma como la temperatura estándar del sistema inglés de unidades ( $60^{\circ}\text{F} = 15.56^{\circ}\text{C}$ ). Una vez conocido el valor de la propiedad a la temperatura de referencia, los métodos de corrección deben permitir la predicción de su valor a cualquier otra temperatura. Las transacciones comerciales de combustibles a mediana y gran escala se hacen con base en los volúmenes calculados a la temperatura de referencia.

Para el caso del petróleo crudo y sus principales derivados líquidos (combustibles y lubricantes) existe un método de corrección de volumen o densidad universalmente utilizado que fue desarrollado en conjunto por la ASTM (American society for testing and materials) y el IP (Institute of Petroleum of London). Dicho método denominado "Petroleum Measurement Tables" fue publicado en el año 1986 bajo la designación ASTM D1250.

A medida que la industria del biodiesel se ha venido desarrollando en diferentes países, varios investigadores han planteado la necesidad de evaluar la validez de aplicar el método propuesto en el estándar ASTM D1250 para llevar a cabo las correcciones de volumen o densidad con temperatura para diferentes tipos de biodiesel y sus mezclas con el combustible diesel convencional.

Tat y Van Gerpen (2000) determinaron experimentalmente la gravedad específica en función de temperatura para el biodiesel de aceite de soya y sus mezclas al 75%, 50% y 20% por masa con combustibles diesel No. 1 y No. 2. El intervalo de temperatura estudiado fue desde el punto en el cual se inicia la cristalización del combustible ( $0^{\circ}\text{C}$  para el biodiesel de soya estudiado) hasta  $100^{\circ}\text{C}$ . Los resultados obtenidos mostraron que la dependencia de la gravedad específica con temperatura para el biodiesel y las mezclas consideradas es cualitativamente similar a la del diesel convencional (tipo lineal). Adicionalmente, los investigadores concluyeron que el método de corrección contemplado en el estándar ASTM D1250 arroja resultados muy aproximados cuando se aplica al biodiesel y a sus mezclas con diesel convencional, obteniéndose una desviación máxima del 0.28% con respecto a los valores medidos.

Yuan, Hansen y Zhang (2004) realizaron un trabajo similar al de Tat y Van Gerpen teniendo en cuenta tres tipos de biodiesel (dos de aceite de soya y el otro de naturaleza química más saturada obtenido a partir de grasas vegetales recicladas) y sus mezclas al 75%, 50% y 25% por masa con combustible diesel No. 2. Como era de esperarse, los resultados experimentales mostraron una tendencia lineal en la relación gravedad específica-temperatura para todos los combustibles analizados. Con respecto al método de corrección ASTM D1250 los investigadores concluyeron que especialmente a altas temperaturas, dicho método tiende a sobreestimar ligeramente los valores de gravedad específica. En el rango de temperaturas entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $80^{\circ}\text{C}$  la desviación máxima fue del 0.43%.

En Colombia se vienen dando pasos importantes hacia la estructuración de una industria nacional de biodiesel basada fundamentalmente en el aceite de palma. La meta propuesta por parte del gobierno nacional es introducir el uso del biodiesel de aceite de palma en las principales ciudades del país con un esquema B5 (mezcla 5% biodiesel -95% diesel convencional) a

partir del 1º de enero de 2008 (Ministerio de Minas y Energía, 2005). Sin embargo, dependiendo de la capacidad de producción instalada, el contenido de biodiesel en las mezclas se puede ir incrementando hasta alcanzar el nivel que normalmente se utiliza en Norteamérica y Europa (20%).

En este artículo se presentan los resultados de una investigación cuyos objetivos están en la misma línea de los trabajos citados en los párrafos precedentes. Inicialmente, se presentan los resultados experimentales de la variación de la densidad con temperatura para el biodiesel de aceite de palma y sus mezclas al 5% y 20% por volumen con el combustible diesel corriente que se comercializa en Colombia. A partir de la base de datos obtenida se evalúa la capacidad de una ley de mezcla simple (promedio ponderado másico) para calcular la densidad de las mezclas en función de la densidad de sus componentes a la temperatura de interés. Adicionalmente se estima el valor del coeficiente de dilatación térmica (propiedad en la que se basan los métodos de corrección de volumen) en función de temperatura para los diferentes combustibles probados. Finalmente se evalúa la validez del método de corrección propuesto en el estándar ASTM 1250 para predecir el valor de la densidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diesel corriente a temperaturas diferentes a la de referencia.

## 2. MARCO TEÓRICO

La propiedad clave que permite predecir el cambio en el volumen de una sustancia debido al cambio en la temperatura a presión constante es el coeficiente de dilatación térmica, cuya definición termodinámica viene dada por la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \Big|_P \quad (1)$$

A partir de la ecuación (1) es posible obtener una expresión para calcular el denominado factor de corrección de volumen a una temperatura cualquiera  $T$ , ( $FCV_T$ ), el cual se define como la relación entre el volumen que ocupa la sustancia a la temperatura estándar ( $V_{TE}$ ), y el volumen que ocuparía a la temperatura  $T$ , ( $V_T$ ):

$$FCV_T = \frac{V_T}{V_{TE}} = \frac{\rho_T}{\rho_{TE}} = \frac{G_T}{G_{TE}} = e^{-k} \quad (2)$$

Donde  $\rho$  y  $G$  son la densidad y gravedad específica de la sustancia, respectivamente, y la variable  $k$  viene dada por la siguiente integral:

$$k = \int_{TE}^T \alpha \, dT \quad (3)$$

Si el coeficiente de dilatación térmica se supone constante en el intervalo de interés, la expresión para el factor de corrección de volumen se simplifica de la siguiente manera:

$$FCV_T = e^{-\alpha \Delta T} \equiv (1 - \alpha \Delta T) = [1 - \alpha(T - T_E)] \quad (4)$$

En la ecuación (4), el término exponencial se aproxima por una serie de potencias truncada en el término cuadrático, lo cual constituye una buena aproximación, dados los rangos de valores en los que se mueve el coeficiente de dilatación térmica de las sustancias de interés (del orden de  $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$ ).

El método de corrección en que se basa el estándar ASTM D1250 no utiliza la simplificación dada por la ecuación 4, sino que parte de una ecuación obtenida empíricamente para expresar el coeficiente de dilatación térmica en función de temperatura:

$$\alpha = \theta + 1.6 \theta^2 (T - T_E) \quad (5)$$

Al resolver la integral de la ecuación (3) se obtiene:

$$k = \theta \Delta T + 0.8 \theta^2 \Delta T^2 \quad (6)$$

Donde  $\theta$  (ver ecuación 7) es una variable con dimensiones de  $\text{T}^{-1}$  (unidades de  $^\circ\text{F}^{-1}$ ) que depende del tipo de producto derivado del petróleo y del valor de su densidad a la temperatura estándar expresada en  $\text{kg/m}^3$ .

$$\theta = \frac{k_0 + k_1 \rho_{TE}^2}{\rho_{TE}} \quad (7)$$

Los valores de las constantes  $k_0$  y  $k_1$  para el combustible diesel convencional son 103.8720 y 0.2701, respectivamente. De acuerdo con las ecuaciones (5) a (7), el método de corrección ASTM D1250 es directo, siempre y cuando se conozca el valor de la propiedad de la sustancia a la temperatura estándar, en caso contrario se convierte en un método iterativo.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Caracterización de los combustibles

El combustible diesel corriente o ACPM fue adquirido en una estación de servicio de la ciudad de Medellín. El biodiesel fue producido mediante la transesterificación de aceite crudo de palma con metanol e hidróxido de sodio (metanólisis básica) de acuerdo con las cantidades de reactivos y condiciones de reacción propuestas por Benjumea, Agudelo y Cano (2004).

Al biodiesel de aceite crudo de palma (BACP) se le determinó su composición química mediante la técnica del patrón externo usando un cromatógrafo Varian 3800 GC equipado con un detector de Ionización de llama y una columna DB-WAX de silice fundida con una fase estacionaria de polietilenglicol.

Tanto al ACPM como al BACP se les determinaron sus principales propiedades físicas como densidad, viscosidad, punto de nube y volatilidad (curva de destilación). El punto de nube reviste gran importancia pues corresponde a la temperatura a la cual se empiezan a formar cristales en el seno del líquido.

#### 3.2. Preparación de las mezclas

Las mezclas seleccionadas fueron B5 (5% biodiesel – 95% diesel corriente) y B20. El biodiesel y el diesel puros se denominan como B100 y B0, respectivamente. Tales mezclas se seleccionaron porque son las que tienen mayor probabilidad de comercializarse en Colombia y fueron preparadas en base volumétrica a la temperatura ambiente del laboratorio donde se realizaron las pruebas (25 °C). A pesar de que las mezclas preparadas en base mísica tienen la ventaja de que la masa no varía con la temperatura, la práctica común en la industria de los combustibles es realizar el mezclado por volumen a la temperatura del sitio de mezcla, normalmente una planta de distribución mayorista.

#### 3.3. Medición de la densidad

La densidad fue determinada de acuerdo con el estándar ASTM D1298, el cual contempla la medición de la gravedad API, la gravedad específica y la densidad por el método del hidrómetro de vidrio. Dicho método tiene la ventaja de ser rápido y sencillo, razones por las cuales es el más ampliamente utilizado en la industria. Se utilizó un termohidrómetro previamente calibrado y certificado por el fabricante, graduado en unidades de gravedad API con subdivisiones de 0.5 grados API. La gravedad API ( $G_{API}$ ) es una función hiperbólica de la gravedad específica cuya conveniencia radica en ampliar la escala de valores de la propiedad facilitando su medición (una cifra decimal en grados API equivale a 4 cifras decimales de la gravedad específica). La densidad se calcula a partir de la definición de gravedad específica utilizando un valor constante para la densidad del agua ( $\rho_w = 999.012 \text{ kg/m}^3$ ) recomendado en el estándar ASTM D1250, como lo indica la siguiente ecuación:

$$\rho = \rho_w G = 999.012 \left( \frac{141.5}{131.5 + G_{API}} \right) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (8)$$

Dado que los hidrómetros son calibrados por su fabricante a la temperatura estándar, cuando se mide el valor de la gravedad API a una temperatura diferente, el valor calculado para la densidad mediante la ecuación (8) se debe corregir por la expansión del vidrio del hidrómetro utilizando una expresión recomendada en el estándar ASTM D1250.

Para poder medir la densidad de los combustibles a diferentes temperaturas se utilizó un baño con control de temperatura, de tal modo que los cilindros graduados conteniendo las muestras quedaran sumergidos hasta el nivel apropiado. Como fluido de calentamiento para el baño se utilizó tersol. Para las mediciones por debajo de la temperatura ambiente se utilizó un baño con recirculación usando agua como refrigerante.

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. Características de los combustibles utilizados

Desde el punto de vista de su composición química el biodiesel es una mezcla de monoalquilésteres de ácidos grasos de cadena larga con número de átomos de

carbono par (normalmente entre 12 y 22). El grupo alquílico presente en la molécula (metil, etil, propil, etc.) depende del alcohol utilizado en la reacción de transesterificación. La proporción en que se encuentran los alquilésteres saturados e insaturados depende de la materia prima utilizada. Mientras que el biodiesel proveniente de aceites como el de soya, colza y girasol es predominantemente insaturado, el biodiesel de aceite de palma posee proporciones aproximadamente iguales de alquilésteres saturados e insaturados. En la Tabla 1 se muestra la composición molar del BACP analizado.

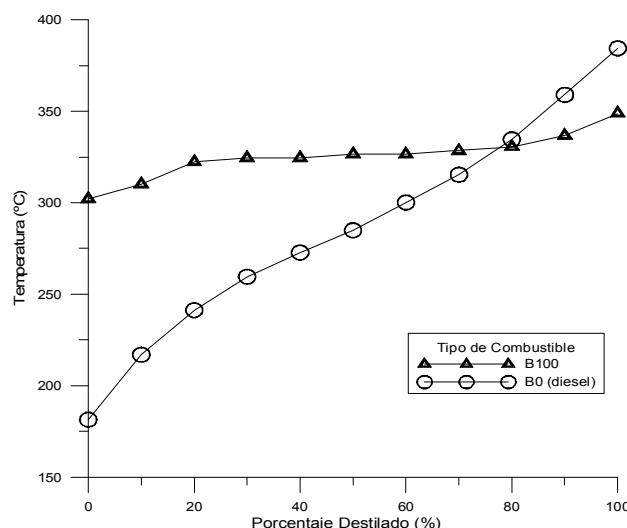
**Tabla 1.** Composición química del biodiesel de aceite de palma

Tipo de compuesto	Porcentaje molar
Metiléster de ácido laúrico	0.267
Metiléster de ácido mirístico	1.434
Metiléster de ácido palmitico	46.130
Metiléster de ácido esteárico	3.684
Metiléster de ácido oleico	37.470
Metiléster de ácido linoleico	11.020
Metilésteres saturados	51.515
Metilésteres insaturados	48.485

En la Tabla 2 se contrastan algunas propiedades físicas de los combustibles utilizados. Como puede verse el BACP posee mayor densidad y viscosidad que el ACPM. Una propiedad crítica para el BACP es su alto punto de nube asociado a su alto contenido de metilésteres saturados (ver tabla 1). A 16 °C el BACP empieza a formar cristales, los cuales a medida que la temperatura sigue bajando se van aglomerando llegando a impedir el flujo libre del combustible. La Figura 1 muestra las curvas de destilación para los dos combustibles analizados. Se observa que la curva del BACP es más plana y está por encima de la correspondiente al ACPM en la mayor parte del rango de temperaturas. Esto indica que los metilésteres de ácidos grasos que componen el BACP no tienen diferencias muy altas en sus puntos de ebullición. De otro lado, el ACPM posee una amplia variedad de hidrocarburos con volatilidades diferentes. A pesar de su mayor punto final de ebullición, el ACPM es menos denso que el BACP debido al efecto de los hidrocarburos de menor peso molecular que posee.

**Tabla 2.** Principales propiedades físicas de los combustibles utilizados

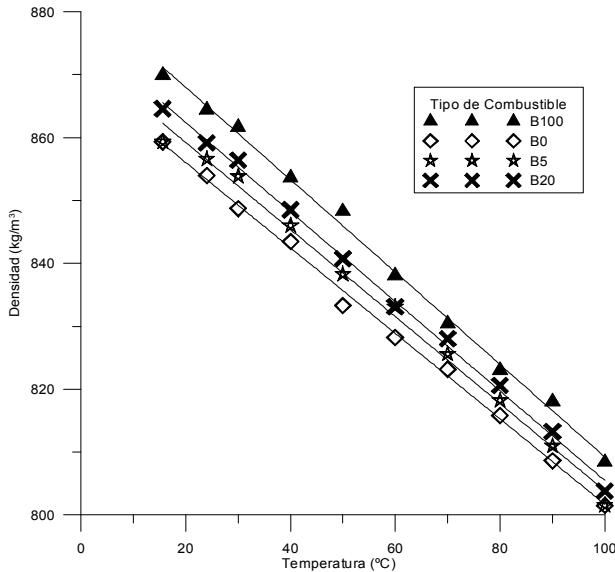
Propiedades	Unidades	Estándar ASTM	ACPM	BACP
Densidad a 25 °C	kg/m <sup>3</sup>	D1298	853.97	864.42
Punto de Nube	°C	D2500	1	16.0
Viscosidad cinemática a 40°C	cSt (mm <sup>2</sup> /s)	D445	4.33	4.71
Curva de Destilación				
Punto inicial de ebullición.	°C	D86	181.5	302.2
Temperatura 50% Recobrado	°C	D86	284.9	326.5
Punto final de ebullición	°C	D86	384.3	348.9



**Figura 1.** Curvas de destilación del BACP (B100) y el ACPM (B0)

## 4.2. Variación de la densidad con temperatura

La Figura 2 muestra el efecto de la temperatura sobre la densidad del B100, B0 y las mezclas B5 y B20. En dicha figura los puntos corresponden a los datos medidos (se tomaron 10 puntos de temperatura), mientras que los trazos continuos representan las líneas rectas obtenidas mediante regresiones lineales (ver Tabla 3).



**Figura 2.** Efecto de la temperatura sobre la densidad del BACP y sus mezclas con ACPM

**Tabla 3.** Regresiones lineales para la densidad en función de temperatura

Tipo de combustible	Regresión lineal $\rho = a + b(T)$		
	a	b	R <sup>2</sup>
B100	882.6689646	-0.7342772415	0.996686
B20	876.6406154	-0.7115968933	0.997702
B5	873.0569269	-0.6920565595	0.994305
B0	869.6231871	-0.6792453596	0.997307

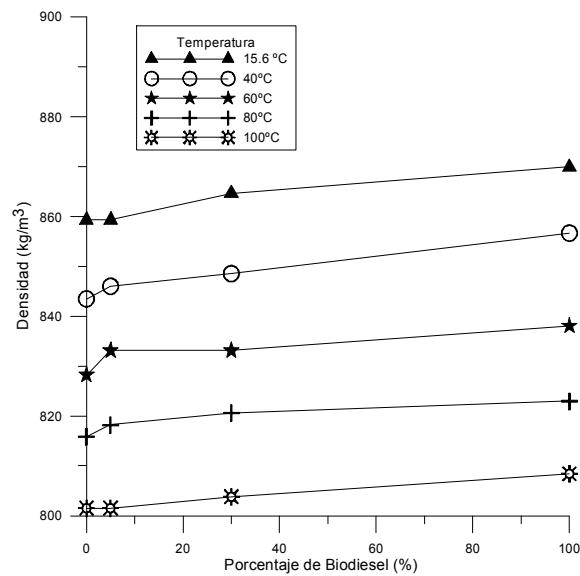
El rango de temperaturas estudiado comprende desde la temperatura estándar (15.56 °C) hasta 100 °C. Hay que tener en cuenta que la temperatura estándar corresponde a un valor muy cercano al punto de nube del BACP, lo cual puede afectar la medida de la densidad a dicha temperatura para el B100. Para el B0 y las demás mezclas con baja concentración de BACP no existe ninguna dificultad, pues su punto de nube es más bajo.

En la Tabla 3 puede observarse que el coeficiente de regresión ( $R^2$ ) menor es de 0.994305, lo cual indica que la regresión lineal representa con muy buena aproximación la relación entre la densidad y la temperatura para los combustibles estudiados.

## 4.3. Efecto de la concentración de biodiesel en la densidad

La Figura 3 muestra el efecto del porcentaje de biodiesel sobre la densidad de la mezcla para diferentes temperaturas. Como es lógico, para todas las temperaturas la densidad de la mezcla aumenta con el contenido de biodiesel. Dado que la densidad es una propiedad aditiva es de esperar que una ley de mezclas sencilla, como el promedio ponderado másico, logre predecir adecuadamente el valor de la propiedad de mezcla en función de la composición (fracciones másicas,  $Y_i$ ) y de los valores de la propiedad para los componentes individuales. De este modo, la densidad de la mezcla a una temperatura dada,  $\rho_{MP}$  puede calcularse como:

$$\rho_{MP} = Y_{BACP} \times \rho_{BACP} + Y_{ACPM} \times \rho_{ACPM} = \sum_i^n Y_i \times \rho_i \quad (9)$$



**Figura 3.** Efecto del porcentaje de biodiesel en la densidad de la mezcla

En la Tabla 4 se muestran las desviaciones absolutas que se obtienen al utilizar la ecuación (9) para calcular la densidad de las mezclas a las diferentes temperaturas consideradas en la Figura 3. Los bajos valores de dichas desviaciones confirman la idoneidad de la ley de mezcla utilizada para estimar la densidad de la mezcla.

**Tabla 4.** Desviaciones absolutas en el cálculo de la densidad de mezclas

T(°C)	Desviación absoluta (%)	
	B5	B20
15.56	0,0623	0,3617
40	0,1804	0,2981
60	0,4214	0,2432
80	0,0887	0,2474
100	0,2525	0,0971
Desviación promedia (%)	0,2011	0,2495
Desviación máxima (%)	0,4214	0,3617

Las fracciones másicas se calcularon a partir de las fracciones volumétricas y las densidades de las mezclas a 25°C, temperatura a la cual se realizó el proceso de mezclado.

#### 4.4. Estimación del coeficiente de dilatación térmica

El valor del coeficiente de dilatación térmica puede estimarse para los diferentes combustibles analizados a partir de su definición termodinámica. Suponiendo que dicho parámetro se puede considerar constante en el intervalo de temperatura de interés ( $T-T_E$ ) y transformando adecuadamente la ecuación (1) se obtiene la siguiente expresión para calcular un coeficiente de dilatación térmica válido para el intervalo de temperatura considerado:

$$\alpha = -\frac{\ln(\rho_T/\rho_{TE})}{(T-T_E)} \quad (10)$$

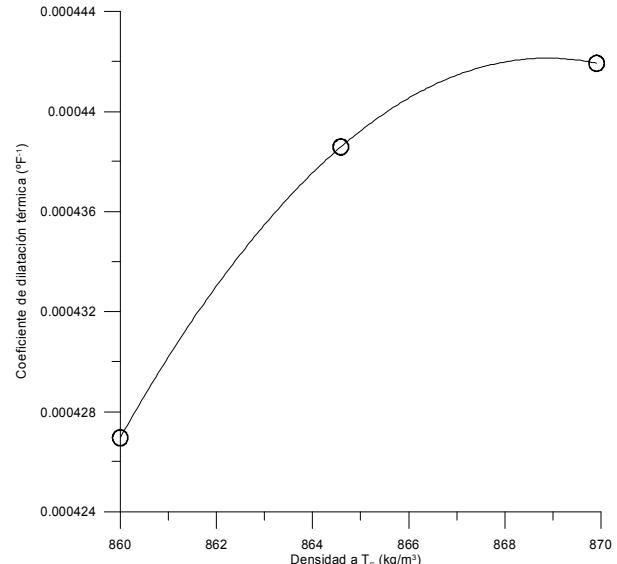
Utilizando la ecuación (10) y la base de datos experimental densidad vs temperatura, se determinó el coeficiente de dilatación térmica para los diferentes combustibles analizados en cada uno de los 10 puntos de temperatura tenidos en cuenta. Luego para el biodiesel puro y las mezclas B5 y B20 se calculó un coeficiente de dilatación promedio (ver Tabla 5), el cual se correlacionó con la densidad de dichos

combustibles a la temperatura estándar. Los tres puntos mostrados en la Figura 4 se ajustan perfectamente al siguiente polinomio de segundo grado ( $R^2=1$ ):

$$\alpha_{PROM} = -0.1448058768 + 0.0003343331929 \rho_{TE} \cdot 9239 - 2803 \times 10^{-72} \rho_{TE}^2 \quad (11)$$

**Tabla 5.** Coeficientes de dilatación térmica para el BACPy sus mezclas con ACPM

Tipo de combustible	Coeficiente de dilatación térmica promedio $\alpha_{PROM}$ ( $^{\circ}\text{F}^{-1}$ ) x 10 <sup>-4</sup>	Densidad a la temperatura estándar $\rho_{TE}$ (kg/m <sup>3</sup> )
B100	4.41926	869.909
B20	4.38582	864.588
B5	4.26952	859.333



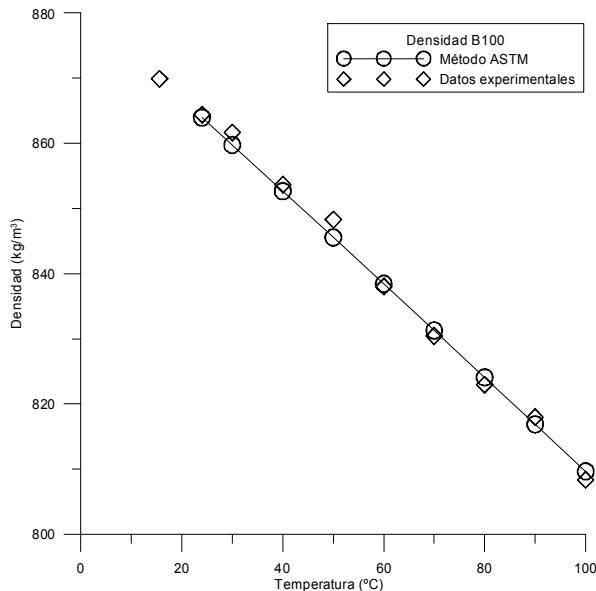
**Figura 4.** Coeficiente de dilatación térmica en función de densidad a la  $T_E$

#### 4.5. Comparación de los datos experimentales con el estándar ASTM D1250

El método de corrección de volumen planteado en el estándar ASTM D1250 se puede considerar como un método de predicción de un solo punto, pues conociendo el valor de la propiedad (densidad, gravedad específica o gravedad API) a una sola temperatura es posible predecir su valor a cualquier otra temperatura. En la Tabla 6 se presentan los valores del factor de corrección de volumen y la densidad en función de temperatura para el B100. Dichos valores se obtuvieron aplicando el método de corrección mencionado, tomando como punto de partida el valor de la densidad del combustible a la temperatura estándar.

**Tabla 6.** Valores de densidad para el B100 predichos por el método ASTM D1250

T (°C)	$\Delta T$ (°F)	$k$ (adimensional) Ecuación (6)	$FCV_T$ (adimensional) Ecuación (2)	$\rho_T = FCV_T \times \rho_{TE}$ (kg/m <sup>3</sup> )
24	15,2	0,006842924	0,99318	863,9765996
30	26	0,011750038	0,98832	859,7473529
40	44	0,020011707	0,98019	852,6736658
50	62	0,028377306	0,97202	845,5702929
60	80	0,036846836	0,96382	838,4389519
70	98	0,045420297	0,9556	831,2813545
80	116	0,05409769	0,94734	824,0992064
90	134	0,062879013	0,93906	816,894206
100	152	0,071764267	0,93075	809,6680441



**Figura 5.** Densidad del BACP medida y predicha por el método ASTM D1250

En la Figura 5 se contrastan los valores de densidad en función de temperatura para el B100 predichos y medidos. La desviación promedio obtenida fue del 0.14%, mientras que la máxima fue del 0.32%. En forma similar se obtuvieron desviaciones promedias del 0.5% y 0.14%, y desviaciones máximas del 0.64% y 0.25%, para el B5 y el B20, respectivamente. La magnitud de las desviaciones obtenidas indica que el método de corrección propuesto en el estándar ASTM D1250 para combustibles tipo hidrocarburo es válido para el BACP y sus mezclas con diesel convencional.

## 5. CONCLUSIONES

- En este estudio se midió la densidad del biodiesel de aceite crudo de palma y sus mezclas al 5% y 20% por volumen con el diesel corriente que se comercializa en Colombia en el intervalo de temperatura 15.56 °C – 100 °C. Los resultados experimentales para todos los combustibles probados fueron ajustados adecuadamente mediante regresiones lineales obteniéndose coeficientes de regresión cercanos a la unidad.
- La densidad de las mezclas biodiesel de aceite de palma – diesel corriente puede ser predicha mediante una regla de mezclas simple (promedio ponderado másico) en función de la composición de la mezcla (fracciones másicas) y de las densidades de los componentes individuales, obteniéndose una desviación absoluta máxima menor al 0.5% con respecto a los datos experimentales.
- Para el biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diesel corriente es posible estimar el valor de su coeficiente de dilatación térmica promedio en el intervalo de temperatura estudiado como una función polinómica de segundo grado de la densidad de los combustibles a la temperatura estándar.
- El método de corrección de volumen propuesto en el estándar ASTM D1250 para combustibles derivados del petróleo logra predecir adecuadamente la variación de la densidad con temperatura del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diesel corriente. Lo anterior indica que

los hidrocarburos constituyentes del ACPM y los metilésteres de ácidos grasos presentes en el BACP poseen coeficientes de dilatación térmica del mismo orden de magnitud y de variación similar con temperatura.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a COLCIENCIAS por la financiación del proyecto 1118-06-17327 y a los laboratorios de Crudos y Derivados y Yacimientos y Fluidos de Perforación de la Facultad de Minas por el apoyo en la realización de las pruebas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Testing and Materials, 1986. ASTM-IP Petroleum measurement tables. ASTM designation: D1250. Philadelphia.
- American Society for Testing and Materials, 2003. Standard test method for density, relative density (specific gravity) or API gravity of crude petroleum and liquid petroleum products by hydrometer method. ASTM designation: D1298. Philadelphia.
- Benjumea, P. N., Agudelo, J. y Cano, G. J., 2004. Estudio experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiesel. En: Scientia et Technica. Año X. No 24. pp. 169-175.
- Ministerio de Minas y Energía, 2005. Resolución No. 1289 de septiembre 7 de 2005. Bogotá D. C.
- Tat, M. E. y Van Gerpen, J. H., 2000. The specific gravity of biodiesel and its blends with diesel fuel. En: JAOCs. Vol. 77. No. 2. pp. 115-119.
- Yuan, W., Hansen, A. C. and Zhang Q., 2004. The specific gravity of biodiesel fuels and their blends with diesel fuel. En: Agricultural Engineering International: the CIGR journal of scientific research and development. Manuscrip EE 04 004. Vol. VI. pp. 1-11.

