

---

# *Caracterización de las propiedades físicas de aceites vegetales para ser utilizados como carburante en motores diesel*

**Jordi-Roger Riba, Bernat Esteban, Grau Baquero, Rita Puig, Antoni Rius**  
Escola d'Enginyeria d'Igualada. Universitat Politècnica de Catalunya, España.  
Plaça del Rei, 15. 08700 Igualada (Barcelona), SPAIN

---

*Characterization of physical properties of vegetable oils to be used as fuel in diesel engines*

*Caracterització de les propietats físiques d'olis vegetals per ser utilitzats com a carburant en motors diesel*

*Recibido: 21 de enero de 2010; revisado: 9 de julio de 2010; Aceptado: 6 de septiembre de 2010*

## **RESUMEN**

La densidad y la viscosidad de los aceites vegetales tienen valores más elevados que los del gasóleo de automoción para una misma temperatura. Ya que dichos parámetros dependen mucho de la temperatura, con un precalentamiento apropiado pueden alcanzar valores similares a los del gasóleo de automoción a temperatura ambiente. Por lo tanto es posible usar de modo eficiente aceites vegetales puros en motores diesel.

Este estudio está enfocado a analizar sistemáticamente la dependencia con la temperatura de la densidad y la viscosidad de diversos aceites vegetales para así determinar la temperatura óptima de precalentamiento para poder usarlos como combustible en motores diesel.

Los datos obtenidos en este estudio también son importantes para otros sectores industriales, incluyendo el transporte, alimentación o las industrias de jabones, cosméticos y farmacéutica. En estos sectores industriales la estimación de la densidad y la viscosidad de los aceites vegetales puros es esencial para el cálculo y diseño de unidades de proceso como la columna de destilación, intercambiadores de calor, conducciones, unidades de bombeo y reactores.

**Palabras clave:** viscosidad, densidad, aceite vegetal puro.

## **SUMMARY**

Density and viscosity of vegetable oils are higher than those of automotive diesel fuel when compared at the same temperature. As these physical parameters are highly temperature dependent, by applying an appropriate heating they can reach values close to that of automotive diesel fuel when operating at room temperature. Consequently, it is possible to use efficiently straight vegetable oils as fuel in diesel engines.

This study is focused mainly in studying density and viscosity temperature dependencies and set the optimal heating temperature of the diverse types of vegetable oils analyzed when used as fuel in diesel engines.

Additionally, data provided in this study is valuable for diverse industrial sectors, including transportation, foods, soaps, cosmetics and pharmaceuticals. In these industries the estimation of the density and viscosity of vegetable oils is essential for designing unit processes such as distillation column, heat exchangers, piping, pumping and reactors.

**Key words:** viscosity, density, pure vegetable oil.

## **RESUM**

La densitat i la viscositat dels olis vegetals tenen valors més elevats que els del gasoli d'automoció per una mateixa temperatura. Ja que aquests paràmetres depenen molt de la temperatura, amb un preescalfament apropiat poden assolir valors similars als del gasoli d'automoció a temperatura ambient. Per tant és possible utilitzar de mode eficient els olis vegetals puros en motors diesel.

Aquest estudi està enfocat a analitzar sistemàticament la dependència amb la temperatura de la densitat i la viscositat de diversos olis vegetals para així determinar la temperatura òptima de preescalfament per poder-lo utilitzar como a combustible en motors diesel.

Les dades obtingudes en aquest estudi també són importants per altres sectors industrials, incloent-hi el transport, alimentació o les indústries de sabons, cosmètics i farmacèutica. En aquests sectors industrials l'estimació de la densitat i la viscositat dels olis vegetals purs és essencial pel càlcul i disseny d'unitats de procés como la destil·lació, bescanviadors de calor, conduccions, unitats de bombeig i reactores.

**Paraules clau:** viscositat, densitat, oli vegetal pur.

## INTRODUCCIÓN

Debido a la paulatina reducción de las reservas de petróleo y a la inestabilidad mundial de su cotización en bolsa, al aumento mantenido de demanda energética, la creciente concienciación ciudadana y política sobre el calentamiento global. En la actualidad cada vez hay más interés en fuentes de energía renovables y en los biocarburantes más respetuosos con el medio ambiente en particular <sup>1)</sup>.

El uso de biocombustibles en motores de combustión puede contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero <sup>2)</sup>. Los aceites vegetales son considerados combustibles renovables y son atractivos debido a sus beneficios ambientales, pudiendo sustituir una porción de los destilados del petróleo <sup>3)</sup>. En la actualidad, los aceites más comúnmente utilizados para la producción de biocombustibles –en su mayor parte para biodiesel– son en orden decreciente aceite de palma, soja, colza y girasol entre otros <sup>4)</sup>.

Es importante caracterizar bien estos aceites y sus propiedades físicas, tal como se hace con otras sustancias<sup>5-7)</sup>, para su correcta aplicación. Hay ciertas similitudes entre muchos de los aceites vegetales y el gasóleo de automoción, haciéndolos aptos para su uso en un motor diesel. Por ejemplo, el poder calorífico inferior (PCI) de los aceites vegetales es muy similar al del gasóleo <sup>8)</sup>. De todos modos hay ciertas diferencias físicas y químicas. Por lo tanto, al utilizar un aceite vegetal puro como carburante en un motor diesel se deben adoptar ciertas precauciones. Se sabe que los triglicéridos que contienen los aceites vegetales están formados por moléculas muy largas, resultando en viscosidades elevadas y baja volatilidad en comparación con el gasóleo de automoción. Ello causa una insuficiente atomización del carburante debido a que al ser inyectado en el cilindro produce una pulverización incorrecta. Una atomización inadecuada produce una combustión incompleta en un motor diesel de inyección directa, teniendo un impacto importante en las emisiones y la eficiencia del motor <sup>9)</sup>. Una viscosidad elevada produce que el chorro sea sólido en vez de un spray formado por una infinidad de diminutas gotitas <sup>10)</sup>, resultando en una combustión incompleta, generando humo negro y fomentando el desarrollo de depósitos en la cámara de combustión así como una dilución del aceite vegetal en el aceite lubricante del motor debido a la mezcla con aceite vegetal no quemado que fluye por las paredes del cilindro hacia el cárter <sup>11)</sup>.

Los posibles efectos debidos al uso de aceites vegetales en motores diesel no modificados dependen en gran medida del tipo de motor y de las características de dichos aceites <sup>12,13)</sup>. Los motores diesel actuales tienen sistemas de inyección bastante sensibles a cambios en la viscosidad del carburante <sup>3)</sup>. Mientras que pruebas realizadas a corto plazo en motores diesel no modificados demuestran un buen comportamiento de los aceites vegetales, pruebas a largo plazo revelan un incremento de las emisiones de partículas, obstrucción de los inyector, un incremento en los depósitos en los cilindros así como mezcla de aceite vegetal no quemado con el aceite lubricante del motor <sup>14)</sup>. Por lo tanto es muy importante reducir los valores de la densidad y de la viscosidad de los aceites vegetales hasta valores cercanos a los del gasóleo de automoción para garantizar una combustión adecuada y un rendimiento apropiado del motor. Se han estudiado diferentes métodos para reducir el valor de estos dos parámetros físicos, incluyendo mezclas en diferentes proporciones, la transesterificación de los aceites vegetales o su

precalentamiento <sup>11)</sup>. Este último sistema es el estudiado en este trabajo debido a su simplicidad.

El uso de aceites vegetales es muy atractivo porque son un producto renovable que requiere de un procesado muy simple, constituido por una etapa de prensado en frío de las semillas y de un refinado posterior. Este procesado no utiliza productos químicos o procesos complejos, los cuales se requieren para la producción de biodiesel. Por lo tanto el uso de aceites vegetales puros en motores diesel evita la transesterificación requerida para la producción de biodiesel. De este modo se disminuye notablemente el consumo de energía durante el procesado del combustible y se reducen considerablemente los impactos ambientales asociados a la utilización de productos químicos y a una reducción en las emisiones de contaminantes. Por lo tanto, para asegurar una apropiada combustión en el caso de usar aceites vegetales puros como carburante se deben realizar unas mínimas modificaciones en el motor<sup>6)</sup>. El método propuesto en este trabajo para obtener una densidad y una viscosidad apropiadas para asegurar una inyección y consecuentemente una combustión adecuada consiste en precalentar el aceite vegetal antes de su entrada en el sistema de inyección mediante un calentador eléctrico. Una vez calentado, tanto la densidad como la viscosidad del aceite vegetal deberían ser muy similares a las del gasóleo de automoción. De este modo, mediante estos sencillos y mínimos cambios realizados al motor diesel, se pueden utilizar aceites vegetales puros directamente como carburante.

El rango de viscosidades adecuado para motores diesel se sitúa entre 1.6 y 7 mm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> a 40°C <sup>9)</sup>. Se impone un límite inferior para garantizar una lubricación adecuada de los componentes del sistema de inyección y para evitar pérdidas de carburante.

El propósito de este trabajo es determinar experimentalmente la dependencia de la densidad y la viscosidad de los aceites vegetales con la temperatura. De este modo se puede optimizar la temperatura de precalentamiento del aceite vegetal empleado como carburante para así optimizar su combustión en un motor diesel actual.

Asimismo, en los últimos años Asia y América del sur se han convertido en los proveedores más importantes de aceites vegetales. Por lo tanto estos deben ser transportados a grandes distancias con lo que están expuestos a variaciones importantes de temperatura, debiendo ser bombeados y transvasados diversas veces de un depósito a otro durante el transporte <sup>15)</sup>. Además los aceites vegetales tienen gran importancia en industrias del ramo de la alimentación, jabones y cosméticos o farmacéutica entre otros. En estas industrias el conocimiento de la dependencia de la densidad y la viscosidad con la temperatura es muy importante para el cálculo y diseño de unidades de proceso como la destilación, intercambiadores de calor, conducciones, unidades de bombeo y reactores entre otras <sup>16)</sup>.

## DEPENDENCIA CON LA TEMPERATURA DE LA DENSIDAD Y LA VISCOSIDAD

La densidad y la viscosidad tienen un papel decisivo en la atomización del carburante realizada por el sistema de inyección, determinando si se realiza o no una combustión completa del carburante en un motor diesel de inyección directa. Ello tiene influencia tanto en el nivel de emisiones de partículas como en el comportamiento y la eficiencia

del motor. Los valores de ambos parámetros –densidad y viscosidad– dependen de la temperatura. En esta sección se analizan en profundidad estas dependencias y se aportan un conjunto de ecuaciones matemáticas para caracterizarlas.

### Densidad

En el caso de aceites vegetales es conocido que la densidad de dichos aceites decrece linealmente al aumentar su temperatura. Esta relación se puede formular como <sup>17)</sup>,

$$\rho = a + b \cdot T \quad (1)$$

siendo  $\rho$  la densidad expresada en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $T$  la temperatura expresada en  $^{\circ}\text{C}$ ,  $a$  es la ordenada en el origen y  $b$  es la pendiente cuyo valor es negativo.

### Viscosidad

La viscosidad se puede entender como una medida de la resistencia que ofrece un fluido a fluir. Al aumentar la temperatura de un fluido, sus moléculas en conjunto pueden deslizarse más fácilmente, de modo que el fluido se vuelve menos viscoso.

La dependencia con la temperatura de la viscosidad cinemática de un líquido se suele describir por la ecuación de Arrhenius,

$$\eta = A_1 \cdot \exp \frac{E_a}{RT} \quad (2)$$

siendo  $\eta$  la viscosidad cinemática,  $E_a$  la energía de activación,  $R$  la constante universal de los gases y  $T$  la temperatura absoluta. Además  $A_1 = N_A h / V$ , siendo respectivamente  $N_A$ ,  $V$  y  $h$ , el número de Avogadro, el volumen molecular y la constante de Plank.

En el caso de aceites vegetales la ecuación (2) se puede reescribir como en (3) siendo conocida como ecuación de Andrade <sup>16,17)</sup>,

$$\eta = A \cdot \exp^{B/T} \quad (3)$$

donde  $T$  es la temperatura absoluta y  $A$  y  $B$  son constantes específicas de cada aceite. Aplicando logaritmos a ambos lados de la ecuación (3) resulta,

$$\ln(\eta) = A + B/T \quad (4)$$

La ecuación (4) permite linealizar la ecuación (3). De este modo, tomando como variable independiente  $1/T$  y mediante una sencilla regresión lineal a partir del método de los mínimos cuadrados se puede determinar la relación matemática entre la viscosidad y la temperatura.

En el sistema internacional la viscosidad cinemática se expresa en  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , mientras que en el sistema cgs se expresa en stokes (St), donde 1 stoke =  $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

### Interdependencia entre la viscosidad y la densidad

Es posible establecer una relación de dependencia matemática entre la densidad y la viscosidad de un aceite vegetal. Por lo tanto, si se puede establecer una relación fiable entre la densidad y la viscosidad, a partir de la medida sencilla de la densidad de un aceite vegetal se puede obtener la viscosidad para una determinada temperatura. De acuerdo con Rodenbush et al. <sup>17)</sup>, esta dependencia se puede establecer como,

$$\rho = C + D/\eta^{1/2} \quad (5)$$

La ecuación (5) es atrayente porque se puede ajustar experimentalmente mediante una regresión lineal tomando como variable independiente  $1/\eta^{1/2}$ .

### Medida de la bondad de ajuste

Una vez ajustados los datos experimentales mediante un modelo teórico es altamente recomendable establecer algún criterio para cuantificar la bondad del ajuste entre el modelo teórico y las observaciones experimentales <sup>18)</sup>. El test F es un método utilizado frecuentemente para cuantificar el grado de significancia estadística de los modelos de regresión <sup>19)</sup>. Dicho test establece que un modelo de regresión es estadísticamente significativo para un nivel de confianza predeterminado –generalmente se ajusta al 95%– cuando se cumple la relación siguiente,

$$F_{\text{calc}} > F_{\text{tab}}(\alpha=0.05; v_1 = p; v_2 = n-p-1) \quad (6)$$

donde,

$$F_{\text{calc}} = \frac{MSR}{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / p}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n-p-1)} \quad (7)$$

siendo  $F_{\text{tab}}(a; v_1, v_2)$  el valor tabulado de la distribución de Fisher-Snedecor con  $v_1$  y  $v_2$  grados de libertad para un nivel de confianza  $1-a$ ,  $MSR$  es la suma de cuadrados de la regresión dividido por sus correspondientes grados de libertad  $p$ ,  $MSE$  es la suma de los cuadrados de los residuos dividido por sus correspondientes grados de libertad  $n-p-1$ ,  $n$  es el número de muestras contenidas en el modelo,  $p$  es el número de variables independientes ( $p = 1$  en el caso que nos concierne), y la respuesta experimental para la muestra  $i$ -ésima del conjunto de muestras usadas para construir el modelo,  $\hat{y}_i$  la respuesta a la muestra  $i$ -ésima predicha por el modelo y  $\bar{y}$  es la respuesta experimental promediada para todas las muestras usadas para construir el modelo estadístico.

Si el conjunto de muestras utilizadas para construir el modelo no cumple la ecuación (6), ello significa que el modelo de regresión obtenido no es estadísticamente significativo para el nivel de confianza fijado.

Además, el estadístico  $r^2$ , llamado coeficiente de correlación, que mide el grado de fidelidad entre los datos estimados por el modelo de regresión y los observados, es muy usado para medir la bondad del modelo de regresión.

## MONTAJE EXPERIMENTAL

En este estudio se analizan diferentes muestras de aceites vegetales puros, incluyendo aceite de colza, aceite de girasol, aceite de soja, aceite de palma, aceite de maíz, aceite de pepitas de uva y además se analizan muestras de biodiesel puro (B100) y de gasóleo de automoción. Mientras que las muestras de aceites vegetales puros fueron adquiridas a través de diferentes suministradores locales, la de gasóleo de automoción diesel fue adquirida en una estación de servicio local y la de biodiesel puro en una estación de servicio con surtidor de B100 exclusivo para taxistas en Barcelona.

Para la medida de la densidad se usó un conjunto de densímetros con intervalos de medida 0.7-0.8, 0.8-0.9 y 0.85-0.95  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , calibrados mediante fluido patrón a cada temperatura. Además, para la medida de la viscosidad se usaron dos viscosímetros tipo Cannon-Fenske de las

series 100 y 150, respectivamente. Dichos viscosímetros permiten medir la viscosidad tanto de los aceites vegetales como del biodiesel y del gasóleo de automoción dentro de los tiempos de flujo recomendados por el fabricante. Dichos viscosímetros fueron calibrados por el fabricante y las constantes de calibración vienen certificadas con el instrumento (ver Tabla I). Los valores de las constantes a temperaturas intermedias se calculan mediante interpolación lineal. La viscosidad cinemática se obtiene de la expresión siguiente,

$$\eta = t \cdot C_0(T) \quad (8)$$

donde  $t$  es el tiempo de flujo de expresado en segundos y  $C_0(T)$  es la constante de calibración del viscosímetro para la temperatura de trabajo.

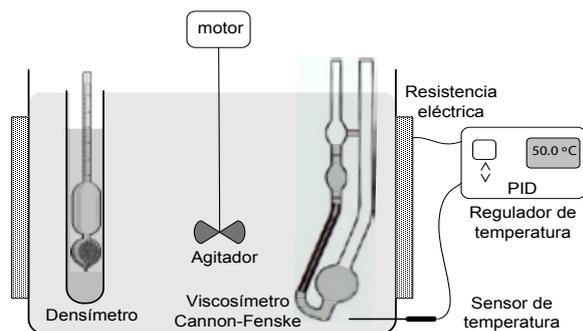
**Tabla I.** Constantes de calibración de los viscosímetros proporcionados por el fabricante.

Viscosímetro Serie 100		Viscosímetro Serie 150	
Temperatura (°C)	C0 (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> )	Temperatura (°C)	C0 (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> )
37.78	0.015188	40,00	0.038669
50	0.015177	100	0.038516
98.89	0.015127	-	-

Para asegurar durante los experimentos un control estable y preciso de la temperatura, se utilizó un sensor RTD de temperatura conectado a un regulador PID digital. Dicho regulador permite regular la temperatura del baño térmico de agua que contiene el densímetro y el viscosímetro mediante un calentador eléctrico.

Se realizaron tres medidas experimentales de cada una de las muestras y a partir de ellas se calcularon las densidades y las viscosidades medias.

La Fig.1 muestra el dispositivo experimental usado para determinar la dependencia de la densidad y la viscosidad con la temperatura de las muestras analizadas.



**Fig. 1.** Dispositivo experimental

## EXPERIMENTAL

En esta sección se analizan los resultados de las pruebas experimentales realizadas a las muestras descritas en la sección anterior.

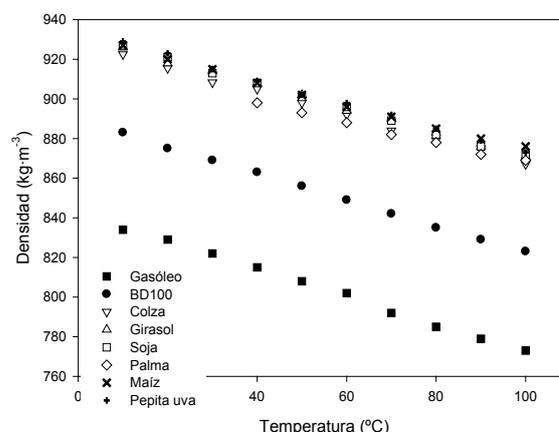
La temperatura del baño se ajustó desde 10°C hasta 100°C y se midieron los valores de la densidad y de la viscosidad de todas las muestras dentro de este intervalo de temperaturas.

## Valores experimentales de la densidad

Como se ha explicado anteriormente, la densidad del carburante tiene una gran influencia en el proceso de atomización producido en el sistema de inyección del motor. Por lo tanto es muy importante conocer la dependencia con la temperatura de dicha variable para asegurar una óptima combustión del carburante<sup>9</sup>.

La densidad de los diferentes aceites vegetales estudiados así como de muestras de biodiesel puro (BD100) y de gasóleo de automoción se midió de acuerdo a lo explicado en la sección II.

La Fig. 2 muestra los valores promedio de la densidad de las muestras analizadas obtenidos experimentalmente dentro del rango de temperaturas comprendido entre 10°C y 100°C.



**Fig. 2.** Dependencia de la densidad con la temperatura para todas las muestras analizadas

De la Fig. 2 se deduce que la densidad del gasóleo de automoción es muy inferior, para una temperatura dada, a la de los aceites vegetales y en menor medida a la del biodiesel puro.

La Tabla II muestra un resumen de los parámetros más relevantes obtenidos de la regresión lineal realizada aplicando la ecuación (1) al conjunto de muestras analizadas. Tabla II. Parámetros importantes resultantes del ajuste por mínimos cuadrados de la relación densidad-temperatura.

Muestra	a kg·m <sup>-3</sup>	b kg·m <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>	r <sup>2</sup>	Fcalc	Ftab
Gasóleo autom.	842.53	-0.7024	0.9975	3145.6	5.318
Biodiesel100	932.73	-0.6224	0.9980	12329	5.318
Aceite colza	927.91	-0.6052	0.9968	2466.1	5.318
Aceite girasol	934.40	-0.6164	0.9980	3595.2	5.318
Aceite soja	931.53	-0.5733	0.9970	4025.3	5.318
Aceite palma*	917.61	-0.4964	0.9959	1222.6	6.608
Aceite maíz	931.53	-0.5733	0.9970	2667.1	5.318
Aceite pepita uva	927.91	-0.6052	0.9968	3986.1	5.318

\*para  $T \geq 40^\circ\text{C}$ , debido a que el aceite de palma es sólido para temperaturas inferiores a  $40^\circ\text{C}$

Los resultados del test F mostrados en la Tabla II indican claramente que la densidad de todas las muestras estudiadas sigue fielmente una dependencia lineal con la temperatura, siendo la regresión lineal estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 95% en todos los casos. Además se han obtenido coeficientes de correlación elevados para todas las muestras analizadas.

De los resultados anteriores se deduce que el gasóleo de automoción es el carburante cuya dependencia de la densidad con la temperatura es más pronunciada –pendiente  $b$  de la recta de regresión mayor-, mientras que para los aceites vegetales analizados dicha dependencia es similar para todos ellos, excepto para el aceite de palma, cuya pendiente es más suave.

De los resultados de los modelos de regresión de la Tabla II se deduce que calentando cualesquiera de los aceites vegetales estudiados hasta una temperatura de 120°C, su densidad se asemeja a la del biodiesel puro cuando trabaja entre 40-50°C, valor para el cual los sistemas de inyección de los motores diesel actuales funcionan perfectamente.

#### Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática es un parámetro clave para obtener una atomización adecuada del carburante en el sistema de inyección.

La Fig. 3 muestra la viscosidad cinemática de las diferentes muestras de aceites vegetales analizadas, biodiesel puro y gasóleo de automoción medidas de acuerdo al método expuesto en la sección II, para el rango de temperaturas comprendido entre 10°C y 100°C.

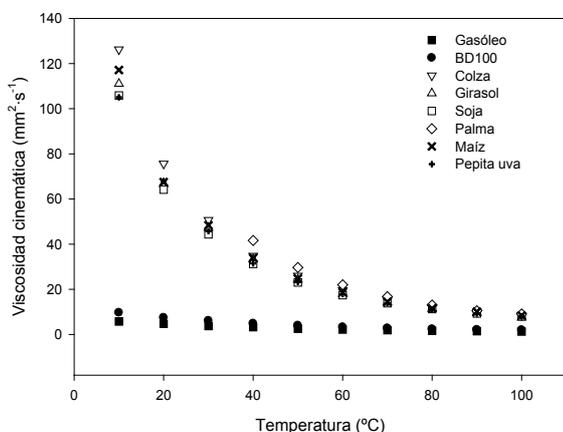


Fig. 3. Dependencia de la viscosidad cinemática con la temperatura para todas las muestras analizadas

De los resultados mostrados en la Fig. 3 se deduce que la viscosidad cinemática del gasóleo de automoción es muy inferior a la de los aceites vegetales puros para una temperatura determinada, pero calentando debidamente estos últimos se puede llegar a viscosidades similares a las del gasóleo de automoción cuando éste se encuentra a temperatura ambiente.

A partir de los datos experimentales mostrados en la Fig. 4 y utilizando la ecuación (4), mediante un ajuste aplicando mínimos cuadrados se puede caracterizar la dependencia de la viscosidad cinemática con la temperatura. La Tabla III muestra un resumen de los parámetros obtenidos del

ajuste por mínimos aplicando la regresión lineal sugerida por la ecuación (4).

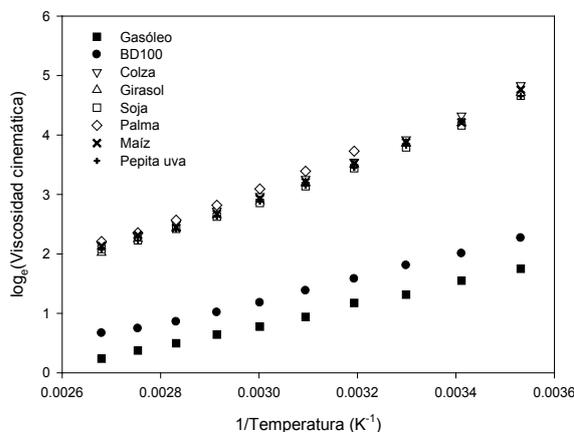


Fig. 4. Dependencia de  $\log_{10}$ (viscosidad cinemática) con  $temperatura^{-1}$  para todas las muestras analizadas

Tabla III. Parámetros importantes resultantes del ajuste mínimos cuadrados de la relación  $\log_{10}$ (viscosidad cinemática) respecto a  $temperatura^{-1}$ .

Muestra	A	B	$r^2$	$F_{calc}$	$F_{tab}$
Gasóleo autom.	-4.557	1785.49	0.9985	5471.9	5.318
Biodiesel100	-4.575	1929.75	0.9964	2217.4	5.318
Aceite colza	-6.353	3128.56	0.9924	1042.8	5.318
Aceite girasol	-6.331	3093.84	0.9955	1777.4	5.318
Aceite soja	-6.077	3001.82	0.9922	1014.8	5.318
Aceite palma*	-5.895	3000.91	0.9956	1120.4	6.608
Aceite maíz	-6.330	3102.21	0.9943	879.93	5.318
Aceite pepita uva	-6.182	3039.33	0.9938	1274.9	5.318

\*para  $T \geq 40^\circ\text{C}$ , debido a que el aceite de palma es sólido para temperaturas inferiores a  $40^\circ\text{C}$

De los resultados mostrados en la Tabla III se deduce que la expresión indicada por la ecuación (4) se cumple para las muestras analizadas, obteniendo en todos los casos un coeficiente de correlación elevado. Además, para todas las muestras analizadas los resultados son estadísticamente significativos para un nivel de confianza del 95%, según se desprende del test F.

De los resultados de los modelos de regresión de la Tabla III se deduce que calentando cualquiera de los aceites vegetales estudiados hasta una temperatura de 120°C, su viscosidad disminuye hasta alrededor de  $5 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , valor para el cual los sistemas de inyección de los motores diesel actuales funcionan perfectamente <sup>9)</sup>.

#### Relación entre la viscosidad cinemática y la densidad

En la sección II.C se explicó que puede ser interesante disponer de una relación matemática entre la densidad y la viscosidad de un determinado aceite vegetal. De este modo, midiendo la densidad de una muestra determinada –cuya medida es sencilla y rápida– se puede estimar su viscosidad, más lenta y difícil de medir, requiriendo además de un instrumental más específico y costoso.

De acuerdo con la ecuación (5) se puede establecer una relación entre la viscosidad cinemática y la densidad, cuyos valores experimentales para las muestras analizadas se muestran en la Fig. 5.

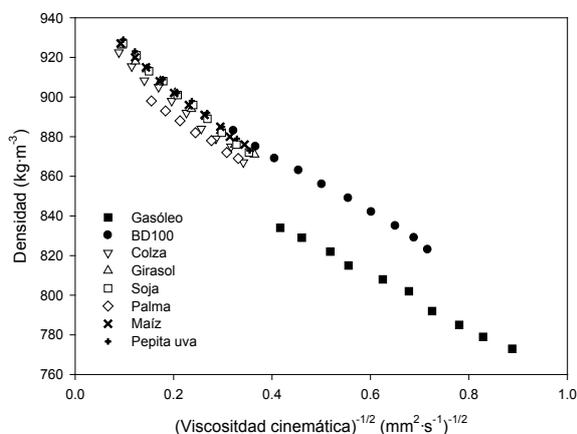


Fig. 5. Dependencia de la densidad con  $\eta^{-1/2}$  para todas las muestras analizadas

De la Fig. 5 se comprueba que existe una relación de linealidad entre la densidad y la inversa de la raíz cuadrada de la viscosidad, corroborándose la predicción de la ecuación (5).

La Tabla IV muestra un resumen de los parámetros más relevantes obtenidos del ajuste por mínimos aplicando la regresión lineal sugerida por la ecuación (5).

Tabla IV. Parámetros importantes resultantes del ajuste mínimos cuadrados de la relación densidad respecto a viscosidad<sup>1/2</sup>.

Muestra	C	D	r <sup>2</sup>	F <sub>calc</sub>	F <sub>tab</sub>
Gasóleo autom.	890.14	-133.18	0.9965	2287.3	5.318
Biodiesel100	929.24	-146.10	0.9982	4498.7	5.318
Aceite colza	939.93	-212.01	0.9952	1670.7	5.318
Aceite girasol	943.78	-204.80	0.9965	2250.1	5.318
Aceite soja	946.90	-215.44	0.9974	3112.1	5.318
Aceite palma*	923.25	-165.13	0.9978	2284.4	6.608
Aceite maíz	944.02	-202.13	0.9957	1973.1	5.318
Aceite pepita uva	947.70	-210.80	0.9959	1919.6	5.318

\*para  $T \geq 40^{\circ}\text{C}$ , debido a que el aceite de palma es sólido para temperaturas inferiores a  $40^{\circ}\text{C}$

Los resultados mostrados en la Tabla IV indican que la ecuación (5) se cumple para las muestras analizadas de aceites vegetales, biodiesel puro y gasóleo de automoción, obteniendo en todos los casos un coeficiente de correlación elevado. Además, para todos los casos analizados los resultados son estadísticamente significativos para un nivel de confianza del 95%. Por lo tanto, a partir de la medida de la densidad se puede realizar una buena estimación de la viscosidad cinemática para las muestras analizadas y el rango de temperaturas de trabajo.

## CONCLUSIONES

Los aceites vegetales puros pueden ser utilizados como carburante en un motor diesel si previamente se precalentan a una temperatura apropiada. En este trabajo se ha realizado un estudio experimental a partir del cual se ha determinado la temperatura óptima de precalentamiento, estableciéndose alrededor de los  $120^{\circ}\text{C}$  para todos los aceites vegetales puros analizados.

Para ello se ha realizado un estudio experimental de la dependencia con la temperatura de la viscosidad cinemática de diversos aceites vegetales, biodiesel puro y diesel de automoción. Se han establecido unas relaciones matemáticas que relacionan la temperatura con dichos parámetros físicos, cuyos valores se han ajustado matemáticamente mediante modelos de regresión. Estos parámetros físicos –densidad y viscosidad– son muy importantes para obtener una atomización adecuada del carburante en el sistema de inyección de un motor diesel de inyección directa. Además se ha establecido una relación matemática de dependencia entre la densidad y la viscosidad de un aceite vegetal. De este modo se puede obtener una buena estimación de la viscosidad a partir de la medida de la densidad de una muestra, la cual es simple y rápida.

Se ha mostrado que calentando adecuadamente el aceite vegetal puro justo antes de entrar en el sistema de inyección puede bajarse tanto su densidad como su viscosidad a valores muy parecidos a los del biodiesel puro y a los del gasóleo de automoción. De este modo se puede garantizar una combustión adecuada de los aceites vegetales puros analizados cuando se usan como carburante. Los datos obtenidos en este trabajo pueden ser muy valiosos para otros campos de la ingeniería, como por ejemplo en el diseño de sistemas de bombeo y de transvase, de unidades de destilación, de intercambiadores de calor o de reactores para aceites vegetales.

## BIBLIOGRAFIA

- Morrone, M., Stuart, B. J., McHenry, I. and Buckley, G. L. The challenges of biofuels from the perspective of small-scale producers in Ohio. *Energy Policy* 37(2), 522-530, 2009.
- Russi, D., 2008. An integrated assessment of a large-scale biodiesel production in Italy: Killing several birds with one stone? *Energy Policy* 36(3), 1169-1180, 2008.
- Balat, M. Modeling Vegetable Oil Viscosity. *Energy Sources, Part A*, 30:1856-1869, 2008.
- Soystats, <http://www.soystats.com/2009/Default-frames.htm>
- Pereira G, Vazquez MJ, Moreira R, Chenlo F. Prediction of kinematic viscosity of aqueous solutions of sodium or potassium carbonate and bicarbonate. *Afinidad* 56(483), 299-302, 1999.
- Vazquez G, Varela R, Cancela A, Alvarez E, Navaza JM. Physical properties of aqueous solutions of  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  and  $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-NaHCO}_3$  in the presence of sucrose and glucose. *Afinidad* 5 (461), 11-20, 1996.
- Planes L, Montero C, Rodríguez A, Lilia M, Uberuaga L. Extraction of the oil from Musk Rose seed *Rosa aff. rubiginosa* L. by Sodium dodecylbenzenesulphonate and its characterization. *Afinidad* 60(508), 534-537, 2003.

- 
8. Baquero, G., Esteban, B., Rius, A., Riba-Ruiz, JR. and Puig, R. Small-scale production of straight vegetable oil from rapeseed and its use as biofuel in the Spanish territory. *Energy Policy* 38, 189-196, 2010.
  9. Mohamed Y. and Selim E. Reducing the viscosity of Jojoba Methyl Ester diesel fuel and effects on diesel engine performance and roughness. *Energy Conversion and Management* 50, 1781-1788, 2009.
  10. George E. Totten, Steven R. Westbrook, Rajesh J. Shah. Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing. ASTM Manual Series, ASTM International, West Conshohocken, PA, pg. 121, 2003.
  11. Nwafor, OMI. The effect of elevated fuel inlet temperature on performance of diesel engine running on neat vegetable oil at constant speed conditions. *Renewable Energy* 28, 171-181, 2003.
  12. Ryan TW, Callahan TJ, Dodge LG. Characterization of vegetable oils for use as fuels in Diesel Engines. ASAE, 49085, p. 71, 1982.
  13. Strayer RC, Craig WK, Zoerb GC. Engine deposit and pour point studies using canola oil as a Diesel fuel. ASAE, 49085, p. 349, 1982.
  14. Agarwal D. and Agarwal, AK. Performance and emissions characteristics of Jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine. *Applied Thermal Engineering* 27, 2314-2323, 2007.
  15. Fasina, OO., Hallman, H., Craig-Schmidt, M. and Clements, C. Predicting Temperature-Dependence Viscosity of Vegetable Oils from Fatty Acid Composition. *Journal of the American Oil Chemist's Society* 83(10), 899-903, 2006.
  16. Krisnangkura, K., Yimsuwan, T. and Pairintra, R. An empirical approach in predicting biodiesel viscosity at various temperatures. *Fuel* 85, 107-113, 2006.
  17. Rodenbush C.M., Hsieh, F.H. and Viswanath, D.S. Density and Viscosity of Vegetable Oils. *Journal of the American Oil Chemist's Society* 76 (12), 1415-1419, 1999.
  18. Marengo, E., Longo, V., Bobba, M., Robotta, E., Zerbini, O. and Di Martinob, S. Butene concentration prediction in ethylene/propylene/1-butene terpolymers by FT-IR spectroscopy through multivariate statistical analysis and artificial neural networks. *Talanta* 77(3), 1111-1119, 2009.
  19. Montgomery, DC., Peck, EA. and Geoffrey, C. Vining Introduction to linear regression analysis. New York [etc.]: John Wiley & Sons, cop. 2006.