

## PRUEBAS CORTAS EN RUTA EN UN VEHÍCULO TIPO MICROBUS CON BIODIESEL DE ACEITE DE PALMA COLOMBIANO

### RESUMEN

Se presentan los resultados de las mediciones realizadas en un vehículo operando con biodiesel de aceite de palma, diesel común, diesel bajo azufre y sus mezclas bajo un protocolo de conducción diseñado por los autores.

Al usar mezclas diesel-biodiesel se obtuvo un incremento entre 2% y 5% en la autonomía del vehículo. La opacidad de humos disminuyó entre 50% y 90% y las emisiones de CO<sub>2</sub> y CO disminuyeron entre 6% y 29% en función de la concentración. Los resultados obtenidos muestran al biodiesel como una excelente alternativa energética de origen renovable para mezclarlo con el combustible diesel convencional.

**PALABRAS CLAVES:** Biodiesel, Pruebas en ruta, Emisiones Contaminantes.

### ABSTRACT

*In this paper, an investigation to characterize the mechanical performance and emissions from a passenger car D.I. diesel engine, fuelled with Colombian palm oil biodiesel, Colombian diesel fuel, low sulfur diesel, and blends of biodiesel according to a protocol, is presented.*

*Experiments show an increase in vehicle autonomy between 5 and 10%. The smoke opacity diminishes between 50% and 90%, the mass of CO<sub>2</sub> and CO diminished between 6 and 29%, depending on biodiesel concentration. The results indicate that Colombian palm oil biodiesel is an attractive energy from renewable sources, to oxygenate Colombian diesel fuel.*

**KEY WORDS:** Biodiesel, On road testing, Emissions.

### 1. INTRODUCCIÓN

La posibilidad de agotamiento de las reservas de crudo, unido a las exigencias cada vez mayores en el control de las emisiones contaminantes producidas en su combustión, han llevado a buscar nuevas alternativas energéticas. El biodiesel, obtenido vía transesterificación de aceites vegetales o grasas animales, se convierte en una alternativa atractiva, entre otras razones por su carácter biodegradable, la posibilidad de autonomía energética regional, sus bajas emisiones contaminantes y su ausencia de azufre. Adicionalmente en Colombia, existen más razones que justificarían su implementación, entre otras, la posibilidad de reemplazar cultivos ilícitos, la disminución de material particulado asociado a la deficiencia de oxígeno con la altitud y la generación de empleo y desarrollo del agro [1].

En trabajos precedentes los autores han mostrado la viabilidad técnica de la producción y uso de biodiesel de aceite de palma colombiana como biocombustible en motores diesel [1-4]. En este artículo se presentan los resultados de pruebas cortas en ruta realizados en un vehículo para pasajeros tipo *Van* con motor diesel de inyección directa y aspiración natural operando con biodiesel de aceite de palma mezclado en diferentes concentraciones con diesel convencional (3400 ppm

### JOHN R. AGUDELO S.

Ingeniero Mecánico, PhD  
Profesor asistente  
Universidad de Antioquia  
Grupo GASURE  
jragude@udea.edu.co

### PEDRO N. BENJUMEA H.

Ingeniero de petróleos, MsC  
Profesor asistente  
Universidad Nacional de Colombia  
sede Medellín  
pbenjume@unalmed.edu.co

### JUAN F. PÉREZ BAYER

Ingeniero Mecánico  
Universidad Nacional de Colombia  
sede Medellín  
juanferbayer@geo.net.co

azufre) y diesel bajo azufre (Cupiagua con 410 ppm de azufre) siguiendo un protocolo de conducción.

### 2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Las características del motor evaluado se presentan en la tabla 1.

|                              |  |
|------------------------------|--|
| Vehículo marca               | NISSAN   |
| Motor                        | DIESEL NISSAN TD27                               |
| Tipo de motor                | 4 tiempos, inyección directa, aspiración natural |
| Disposición de los cilindros | 4 cilindros en línea                             |
| Diámetro x carrera (mm)      | 96 x 92  |
| Cilindrada (cc)              | 2663   |
| Ralentí (rpm)                | 700  |
| Potencia                     | 61 Hp a 2500 rpm                                 |
| Par máximo                   | 17,5 kg-m a 1600 rpm                             |

Tabla 1. Especificaciones técnicas del motor diesel del vehículo de prueba.

## 2.1 Equipos

Para el análisis de los gases de escape del vehículo parado se utilizó un equipo ULNOR 610 infrarrojo no dispersivo, con capacidad para medir oxígeno (O<sub>2</sub>) por celda electroquímica y bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y metano (CH<sub>4</sub>) por infrarrojo, todos en base seca.

La opacidad de humos se determinó con un opacímetro (diesel Gasteck) que opera bajo el principio de reducción de luz, con tecnología infrarrojo no dispersivo y no incandescente.

## 2.2 Combustibles evaluados

En esta investigación se evalúan tres combustibles sin mezclar, biodiesel (B100), diesel común (Dc), diesel bajo azufre (D<sub>b</sub>), y ocho mezclas en concentraciones incrementales del 20% de biodiesel en ambos combustibles convencionales.

En la tabla 2, se presenta la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los tres combustibles base, realizada en el Laboratorio de Crudos y Derivados de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

| PROPIEDAD                               | UNIDAD            | NORMA           | BIODIESEL | DIESEL COMÚN | DIESEL BAJO AZUFRE |
|---|-------------------|-----------------|-----------|--------------|--------------------|
| DENSIDAD a 15°C                         | Kg/m <sup>3</sup> | ASTM D 4052     | 872,9     | 864,9        | 841,8              |
| DESTILACIÓN                             | °C                | ASTM D 86       |           |              |                    |
| <i>Punto inicial de ebullición</i>      |                   |                 | 306,9     | 200,3        | 232,8              |
| 10% recobrado                           |                   |                 | 319,1     | 247,0        | 243,9              |
| 20% recobrado                           |                   |                 | 324,2     | 264,3        | 251,0              |
| 30% recobrado                           |                   |                 | 327,2     | 274,4        | 257,1              |
| 40% recobrado                           |                   |                 | 328,2     | 284,6        | 263,2              |
| 50% recobrado                           |                   |                 | 329,3     | 294,7        | 269,3              |
| 60% recobrado                           |                   |                 | 330,3     | 303,9        | 277,5              |
| 70% recobrado                           |                   |                 | 331,3     | 315,0        | 285,6              |
| 80% recobrado                           |                   |                 | 334,3     | 331,3        | 298,8              |
| 90% recobrado                           |                   |                 | 337,4     | 353,6        | 316,0              |
| <i>Punto Final de ebullición</i>        | 351,6             | 379,0           | 337,4     |              |                    |
| ÍNDICE DE CETANO                        | ---               | ASTM D 976      | 56,0      | 50,1         | 52,0               |
| ÍNDICE DE YODO                          | ---               |                 | 55,4      | 22,5         | 17,4               |
| PUNTO DE INFLAMACIÓN (PENSKY - MARTENS) | °C                | ASTM D 93       | 162,3     | 79,3         | 99,3               |
| PODER CALORÍFICO                        | BTU/Lb            | ASTM D 240      | 17279,0   | 19415,6      | 19721,5            |
| PODER CALORÍFICO POR VOLUMEN            | MJ/m <sup>3</sup> |                 | 35,1      | 39,0         | 38,6               |
| CONTENIDO DE AZUFRE                     | ppmM              | ASTM D 129/4294 | 0,0       | 3400         | 410                |
| VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 40°C            | cST               | ASTM D 445      | 5,4       | 4,5          | 3,8                |

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de los combustibles evaluados

El biodiesel se mezcló con el diesel común y con el diesel bajo azufre por separado, en porcentajes incrementales de concentración de biodiesel cada 20% en volumen, hasta alcanzar el B100, lo cual deriva ocho mezclas a ensayar según la Tabla 3.

| COMBUSTIBLE    | MEZCLAS  |
|----------------|--|
| Dc             | Bc 20, Bc 40, Bc 60, Bc 80, B 100  |
| D <sub>b</sub> | B <sub>b</sub> 20, B <sub>b</sub> 40, B <sub>b</sub> 60, B <sub>b</sub> 80, B100 |

Tabla 3 Combustibles y mezclas a investigar.

## 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 3.1 Prueba de consumo de combustible

El objetivo de esta prueba consiste en determinar la distancia que recorre el vehículo por unidad de volumen de combustible consumido (km/gal), y por unidad de energía liberada (km/kJ), al seguir un protocolo de conducción utilizando cada uno de los combustibles investigados.

La selección de un protocolo de conducción obedece a la confiabilidad estadística de los resultados, ya que ciñéndose a éste, se logra reproducir con buena

aproximación la misma pauta de conducción con cada combustible. El protocolo de conducción que se muestra en la figura 1, fue diseñado convenientemente por los autores [4] y abarca el intervalo de velocidades promedio en la ciudad de Medellín recomendado por la Secretaría de Transporte y Tránsito para zona urbana.

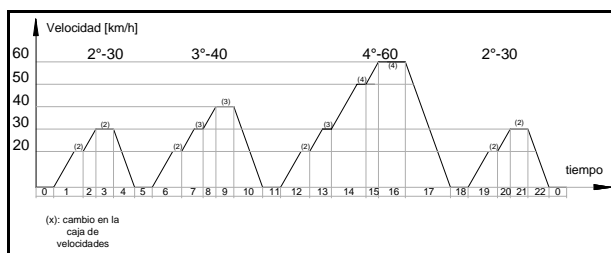


Figura 1. Ciclo de conducción para las pruebas de consumo de combustible.

El consumo de combustible se determina midiendo la masa de combustible antes y después del recorrido del vehículo mediante la siguiente expresión:

$$C_c [km/gal] = \frac{\rho \cdot L \cdot k}{w} \quad (1)$$

Donde:

- ρ [kg/m<sup>3</sup>]: densidad de cada combustible (Tabla 2).
- L [km]: 5,1 km. Distancia recorrida durante la prueba (tres veces el perímetro de la circunvalar de la Universidad de Antioquia).
- w [kg]: masa de combustible consumida.
- k : constante de conversión.

La prueba de consumo se realizó haciendo tres recorridos para cada combustible de la tabla 3. El análisis estadístico se realizó sobre las medias de cada valor, dado que la desviación estándar fue muy baja.

### 3.2 Emisiones contaminantes

Los gases de escape se midieron con motor al ralentí según la Resolución N.º 005 del 9 de enero de 1996 del Ministerio del Medio Ambiente de la República de Colombia. El porcentaje de opacidad del humo se mide de acuerdo a la misma directiva con el motor en condición de aceleración libre. Al igual que en el caso anterior, las mediciones se hicieron por triplicado para cada punto garantizando confianza estadística a los resultados.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Prueba de consumo de combustible

En la figura 2 se muestran los resultados de la prueba de consumo de combustible para el diesel común y sus mezclas. Tomando como base de comparación el diesel común, se aprecia una disminución en torno al 8% en la autonomía del vehículo (C<sub>c</sub>) al usar las mezclas Bc20 y Bc60,

disminuye un 3,5% para B100, sin embargo aumenta para Bc40 (5%) y Bc80 (0,8%).

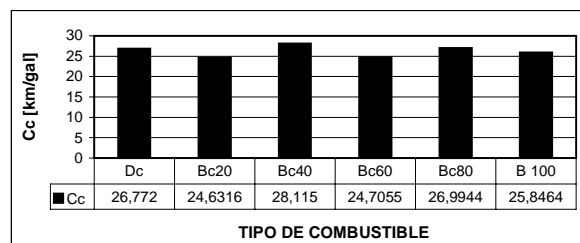


Figura 2. Consumo de combustible diesel común, biodiesel y sus mezclas

Como se observa en la Tabla 2, el biodiesel tiene menor poder calorífico inferior que el diesel, sin embargo esta diferencia es más baja en términos volumétricos que máscicos debido a la mayor densidad del biodiesel. Dado que el motor es una máquina volumétrica, el efecto sobre el consumo de combustible o la potencia del vehículo habrá que referirlo al poder calorífico inferior en base volumétrica [5].

Por lo anterior se esperaba que al usar biodiesel puro (B100), se diera una disminución en torno al 10% en la potencia del vehículo manteniendo constante la entrega de combustible, o un incremento del consumo específico de combustible en torno al 10% para mantener constante la potencia y que la disminución o incremento de una u otra, fuera directamente proporcional a la concentración de biodiesel en la mezcla. Las variaciones observadas en la figura 2 se explican entonces a partir de la entrega de la bomba de inyección hidráulica rotativa que lleva el motor. Esta misma variable se representa en la figura 3, para el diesel bajo azufre, el biodiesel y sus mezclas. Se observa una ligera tendencia a disminuir la eficiencia (incrementar el consumo específico de combustible), a medida que aumenta el porcentaje de biodiesel en la mezcla, sin embargo con la mezcla Bb80 se obtuvo una eficiencia mayor.

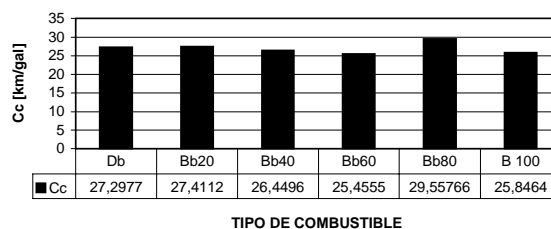


Figura 3 Consumo de combustible biodiesel - Db

Con las mezclas Bb20 y Bb80 se observó un incremento en la autonomía de 0,5% y 8% respectivamente, mientras que para las demás mezclas, la autonomía del vehículo disminuyó entre 3% y 7%.

Tomando los resultados experimentales de las figuras 2 y 3 y aplicándoles la ecuación (2), se obtienen los resultados de las figuras 4 y 5, en los que se compara la autonomía del vehículo en términos energéticos.

$$C_{CL} \left[ \frac{km}{kJ} \right] = \frac{C_c \left[ \frac{km}{gal} \right]}{P_{ci} \cdot \rho} \quad (2)$$

Donde:

. [kg/gal]: densidad de cada combustible.

P<sub>ci</sub> [kJ/kg]: Poder calorífico inferior másico.

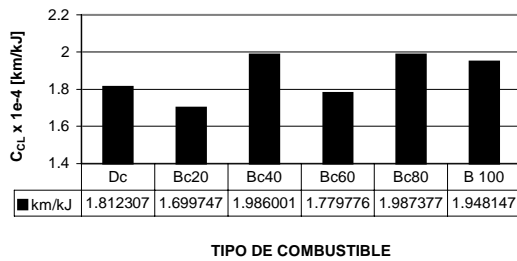


Figura 4. Recorrido del vehículo por unidad de energía liberada (C<sub>CL</sub>) diesel común, biodiesel y sus mezclas.

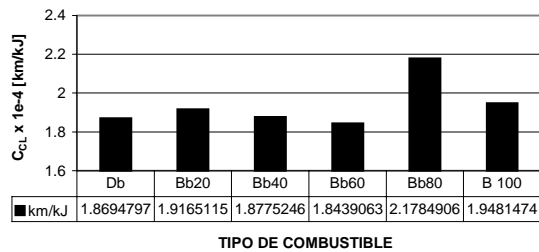


Figura 5. Recorrido del vehículo por unidad de energía liberada (C<sub>CL</sub>) diesel bajo azufre, biodiesel y sus mezclas

Las variaciones del rendimiento que se muestran en las figuras 4 y 5 varían en un rango muy estrecho, lo que puede ser explicado a raíz de la mayor densidad del biodiesel, lo cual compensa la energía suministrada al motor por unidad de volumen.

Con este análisis se pretende mostrar que un incremento en el consumo de combustible al usar biodiesel, para que el vehículo realice el mismo recorrido, se debe a su menor poder calorífico en base volumétrica, pero sin embargo, haciendo el análisis por unidad de energía, se observa una variación pequeña e incluso en algunos casos a favor del biodiesel. Lo anterior se explica con base a que el rendimiento de conversión energética se conserva independientemente del combustible usado en el motor, además, la molécula de biodiesel aporta en torno a un 11% de oxígeno en masa, lo que compensa en parte las pérdidas asociadas a la deficiencia de oxígeno por altura sobre el nivel del mar.

## 4.2 DESEMPEÑO AMBIENTAL

### 4.2.1 Opacidad de humos

La opacidad de los humos es una medida indirecta del contenido de hollín (*soot*) que tiene el material particulado generado durante la combustión y el escape. El biodiesel en su estructura química aporta oxígeno “extra” a la combustión, por lo que se espera que facilite la oxidación de las partículas y por tanto se de una disminución en la opacidad de humos a medida que aumenta su concentración en las mezclas [6-9].

En las figuras 7 y 8 se muestran los resultados de opacidad de humo al usar diesel común y diesel bajo azufre respectivamente.

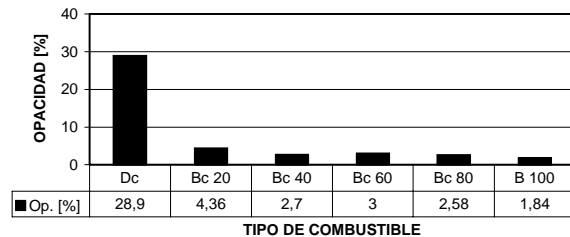


Figura 6. Opacidad de humo usando diesel común, biodiesel y sus mezclas

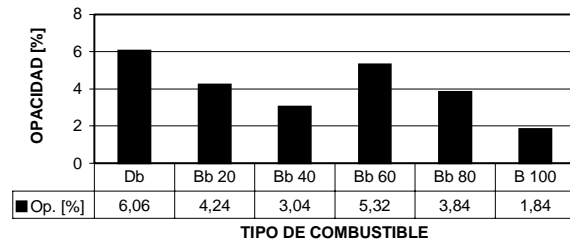


Figura 7. Opacidad de humo usando diesel bajo azufre, biodiesel y sus mezclas

Otro factor que influye en la disminución de la opacidad de humos al usar biodiesel es su ausencia de azufre, cuyos compuestos pasan a formar parte del hollín como sulfatos [6-9].

En la figura 6 se observa que la opacidad de humos para el diesel común es 28%, lo cual está dentro de la norma técnica colombiana que para este vehículo es de 50%. La opacidad se reduce en drásticamente (90% en promedio) al utilizar las mezclas biodiesel-diesel en cualquier proporción, esto es un aspecto muy positivo para el biocombustible, ya que la contaminación por material particulado es cada vez más notoria en las ciudades colombianas que están sufriendo el proceso de “dieselización” del parque automotor de transporte público.

Resultados similares se obtuvieron para el diesel bajo azufre (Figura 7). En este caso, nuevamente el biodiesel y sus mezclas, muestran una tendencia a disminuir proporcionalmente con el porcentaje de biodiesel en la

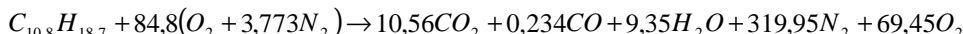
mezcla la opacidad de humos. Sin embargo las mezclas Bb60 y Bb80 no se comportan de esta manera, a pesar que la opacidad con estas dos mezclas también es menor que la del diesel de comparación.

La opacidad de humos se reduce alrededor de 80% al disminuir la cantidad de azufre en el diesel de 3400 ppm (diesel convencional) a 410 ppm (diesel Cupiagua). Esto obedece al aporte que hace el azufre en forma de sulfatos al material particulado [8].

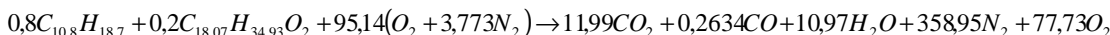
La opacidad del Db es del 6,06%, al usar mezclas se reducen en 30%, 50%, 12%, 37% y 70% con Bb20 hasta B100 respectivamente.

**4.2.2 Emisiones gaseosas**

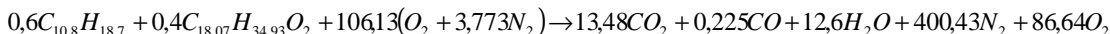
Diesel común



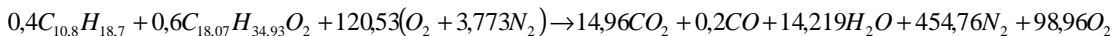
Mezcla Bc20



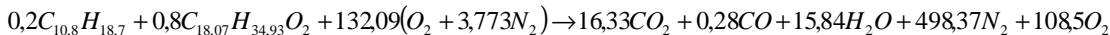
Mezcla Bc40



Mezcla Bc60



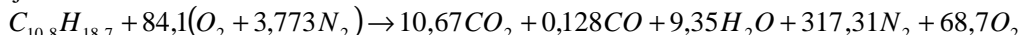
Mezcla Bc80.



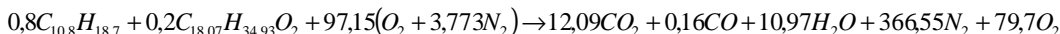
B100



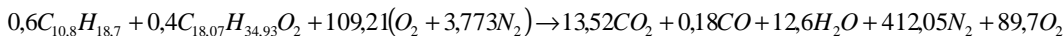
Diesel Bajo azufre



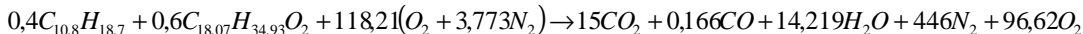
Mezcla Bb20



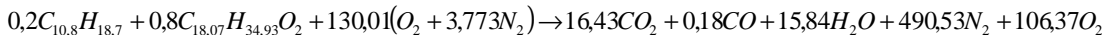
Mezcla Bb40



Mezcla Bb60



Mezcla Bb80



Con la densidad, el peso molecular de los combustibles y las ecuaciones de combustión, se calculan las emisiones en masa por galón de combustible.

Para las mezclas con diesel común y bajo azufre, la masa de CO<sub>2</sub> por galón de combustible consumido disminuye con la concentración de biodiesel.

Con respecto al diesel común, el CO<sub>2</sub> disminuye 4%, 6%, 8%, 9% y 11% con Bc20 a B100 respectivamente.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por las mezclas con el diesel bajo azufre, se reducen 3%, 5%, 7%, 8% y 10% desde Bb20 hasta B100, además se observa que las emisiones de CO<sub>2</sub> son ligeramente menores con el diesel bajo azufre que con el diesel común.

La emisión en masa de CO, disminuye con la concentración de biodiesel en las mezclas con diesel común (figuras 10), pero solo hasta Bc60, ya que para Bc80 y B100 estas emisiones incrementan. Estas

Dado que el analizador de gases empleado mide concentración de gases contaminantes (CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) y de O<sub>2</sub> en los gases de escape, se decidió llevar estos valores a unidades de masa con base en el análisis volumétrico seco de los gases de combustión. Para ello se calculan las ecuaciones de combustión “reales”. No se tienen en cuenta en el balance de masa los hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados (HC), los óxidos de nitrógeno (NOx) ni los óxidos de azufre (SOx). Por lo anterior los resultados que se presentan en las figuras 8 a 11 son aproximados.

La fórmula elemental promedio usada para diesel es C<sub>10,8</sub>H<sub>18,7</sub> y para biodiesel de aceite de palma es (C<sub>18,07</sub>H<sub>34,93</sub>O<sub>2</sub>).

disminuyen 4,5%, 29%, 44%, 30% y 32% utilizando Bc20 hasta B100 respectivamente.

En la Figura 11 se observa un incremento en las emisiones de CO respecto del diesel bajo azufre, además se observa que las emisiones de CO del diesel bajo azufre y sus mezclas, son menores que las del diesel común y sus mezclas.

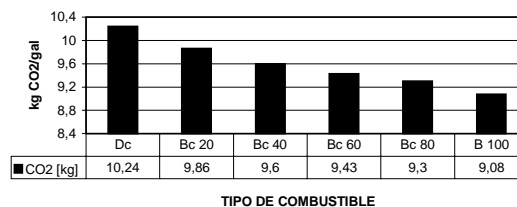


Figura 8. CO<sub>2</sub> para diesel común, biodiesel y sus mezclas.

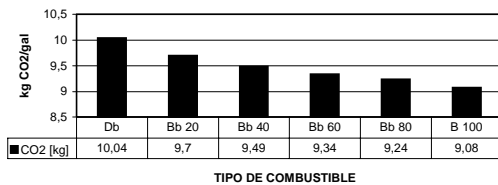
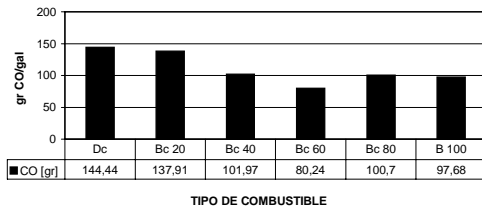
Figura 9. Emisiones en masa aproximadas de CO<sub>2</sub>

Figura 10. Emisión aproximada en masa de CO para Dc

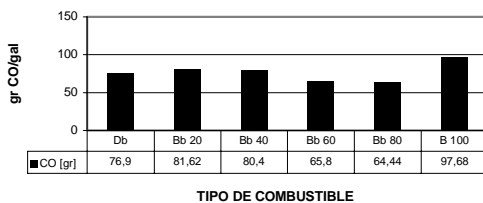


Figura 11. Emisiones aproximadas de CO para Db

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a COLCIENCIAS y a INTERQUIM S.A por su cofinanciación (proyecto 1115-06-12252). Al Instituto Colombiano de Petróleos (ICP), a Certigasas Medellín y a Lizeth Andrea Vahos Ceferino por su apoyo en la discusión de parámetros claves.

## 6. CONCLUSIONES

El biodiesel de aceite de palma ha mostrado ser una alternativa energética de origen renovable apto para oxigenar el combustible diesel que se distribuye en el país. Los resultados ambientales y mecánicos muestran un desempeño similar al diesel convencional al usarlo en vehículos en ruta bajo pruebas cortas de operación sin realizar modificación alguna sobre el motor.

No se apreciaron variaciones estadísticamente significativas en el consumo específico de combustible al usar biodiesel.

La autonomía por unidad de energía se mantiene constante respecto al diesel (común o bajo azufre) o mejora ligeramente.

La opacidad de humos se redujo drásticamente al usar biodiesel, la disminución fue mayor (90%) respecto al diesel común que al diesel bajo azufre (50%).

La presencia de oxígeno en la molécula del biodiesel disminuye las emisiones de CO y CO<sub>2</sub> respecto al diesel (común y bajo azufre).

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AGUDELO, John R., Benjumea, Pedro y Corredor, Lesmes, "Biodiesel de aceite de palma: una alternativa para el desarrollo del país y para la autosuficiencia energética nacional". *En Revista Facultad de Ingeniería*, No. 28. Universidad de Antioquia. Medellín, Abril de 2003. pp 50-61
- [2] BENJUMEA, Pedro N., Agudelo, J.R., Zapata, Paula y Mendoza, Raúl, "Biodiesel: Una revisión del proceso de obtención mediante la transesterificación de aceites vegetales". *En Revista Energética*. No. 29. Universidad Nacional de Colombia. Colombia. Julio 2003. pp 9-18
- [3] AGUDELO, J.R., Peña, Diego y Mejía, Ricardo, "El aceite de palma transesterificado por metanólisis como biocombustible para motores diesel". *En Revista Facultad de Ingeniería*. No. 24. Colombia. Diciembre de 2001.
- [4] AGUDELO, J.R. y Benjumea, Pedro, "Optimización del proceso de obtención de biodiesel de aceite de palma". *Informe final proyecto de investigación de Conciencias 1115-06-12252*. Bogotá, Diciembre de 2003.
- [5] LAPUERTA, Magín y Agudelo, John R., "Utilización de combustibles alternativos en motores térmicos. Módulo II". Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real. España. 2004.
- [6] LAPUERTA, M., Armas, O., Ballesteros, R., Diesel particulate emissions from biofuels derived from spanish vegetable oils. *SAE paper 2002-01-1657*. 2002.
- [7] SCHMIDT, K.; Van Gerpen, J. The effect of biodiesel fuel composition on diesel combustion and emissions. *SAE paper 961086*, 1996.
- [8] BALLESTEROS, R. Análisis experimental de las emisiones de partículas de un motor Diesel con combustibles convencionales y alternativos. *PhD thesis*. Universidad de Castilla-La Mancha. España. 2002.
- [9] CHOI, C.Y.; Bower, G.R., Reitz, R.D. Effects of biodiesel blended fuels and multiple injections on D.I. diesel engines. *SAE paper 970218*. 1997.