

**Evaluación de rendimiento de biodiesel  
elaborado a partir de aceite de palma  
africana (*Elaeis guineensis*) y  
etanol anhidro de caña de  
azúcar (*Saccharum officinarum*)**

**José Rodrigo Baccaro Díaz**

**Zamorano, Honduras**

Diciembre, 2007

ZAMORANO CARRERA DE  
AGROINDUSTRIA

**Evaluación de rendimiento de biodiesel  
elaborado a partir de aceite de palma  
africana (*Elaeis guineensis*) y  
etanol anhidro de caña de  
azúcar (*Saccharum officinarum*)**

Proyecto de graduación presentado como requisito parcial para optar  
al título de Ingeniero en Agroindustria Alimentaria en el Grado  
Académico de Licenciatura

Presentado por:

**José Rodrigo Baccaro Díaz**

**Zamorano, Honduras**

Diciembre, 2007

El autor concede a Zamorano permiso  
para reproducir y distribuir copias de este  
trabajo para fines educativos. Para otras personas  
físicas o jurídicas se reservan los derechos de autor

---

José Rodrigo Baccaro Díaz

Zamorano, Honduras  
Diciembre, 2007

**Evaluación de rendimiento de biodiesel  
elaborado a partir de aceite de palma  
africana (*Elaeis guineensis*) y  
etanol anhidro de caña de  
azúcar (*Saccharum officinarum*)**

Presentado por:

**José Rodrigo Baccaro Díaz**

Aprobado:

---

Francisco Javier Bueso, Ph.D.  
Asesor Principal

---

Luis Fernando Osorio, Ph.D.  
Director  
Carrera Agroindustria Alimentaria

---

Edward Moncada, M.A.E.  
Asesor

---

Raúl Espinal, Ph.D.  
Decano Académico

---

Kenneth L. Hoadley, D.B.A.  
Rector

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme el rumbo, la iluminación y la seguridad de mis convicciones.

A mis padres por sus oraciones, consejos, sabiduría, esfuerzo, trabajo, amor y la vida entera en alma y corazón por sus hijos.

A mis hermanos, sobrinos y la familia por ser el corazón de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Zamorano y todo el personal por darme un espacio en el valle donde el trabajo vence cualquier obstáculo.

A mis amigos con quienes he compartido los buenos y los mejores momentos y darme siempre el apoyo cuando más lo necesité.

Al Dr. Bueso y al Dr. Osorio por su ayuda y amistad.

## **AGRADECIMIENTO A PATROCINADORES**

A mis padres.

A Central Azucarera Tempisque S.A. en Costa Rica por el apoyo brindado en la pasantía y la donación de los materiales.

## RESUMEN

Baccaro, J. 2007. Evaluación de rendimiento de biodiesel elaborado a partir de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) y etanol anhidro de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Proyecto de Graduación del Programa de Ingeniería en Agroindustria Alimentaria. Zamorano. 21p.

El biodiesel se fabrica con aceite, un catalizador y alcohol siendo el metanol el más utilizado por el costo y su alta reactividad, mediante la reacción de transesterificación. El objetivo de este estudio fue evaluar el rendimiento en biodiesel con etanol anhidro como sustituto de metanol en presencia de aceite de palma. Se utilizó un diseño experimental DCA con tres bloques de cuatro tratamientos cada uno con tres proporciones molares etanol/aceite de 6:1, 9:1 y 12:1 y un control de metanol/aceite de 6:1. Los resultados fueron analizados con un ANDEVA y una separación de medias DUNCAN, con el programa "Statistical Analysis System" SAS® evaluándose tiempo de separación de fases, cantidad de biodiesel, glicerina, gases evaporados, y rendimiento. El tiempo de reacción en cada tratamiento fue 60 min a una temperatura de 60°C. Los rendimientos fueron de 97.54% para el control 6:1 y 96.21% para el tratamiento 9:1. No se encontraron diferencias significativas en los tiempos de separación de fases de glicerina y biodiesel entre etanol y metanol. Existió mayor cantidad de gases evaporados y glicerina en los tratamientos 6:1 y 12:1 etanol/aceite respectivamente. No se encontraron diferencias significativas entre separación de fases, cantidad de glicerina y rendimiento de biodiesel entre el control 6:1 metanol/aceite y el tratamiento 9:1 etanol/aceite. La producción de biodiesel por ruta etílica es de 5.01 US\$/L y 4.49 US\$/L por la ruta metílica. El uso de etanol anhidro presenta rendimientos similares al metanol en la producción de biodiesel, asimismo, Honduras en un futuro producirá este alcohol dando la oportunidad de una nueva alternativa para los biocombustibles en Zamorano.

**Palabras clave:** Esteres etílicos, glicerina, metanol, tiempo de separación, transesterificación.

---

Francisco Javier Bueso, Ph.D.

## CONTENIDO

Portadilla.....	i
Autoría.....	ii
Página de firmas.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Agradecimiento a patrocinadores.....	vi
Resumen.....	vii
Contenido.....	viii
Índice de cuadros.....	x
Índice de figuras.....	xi
Índice de anexos.....	xii
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	2
1.4 LÍMITES DEL ESTUDIO.....	2
1.5 OBJETIVOS.....	2
1.5.1 Objetivo general.....	2
1.5.2 Objetivos específicos.....	2
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1 BIODIESEL.....	3
2.2 ETANOL ANHIDRO.....	3
2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE BIODIESEL.....	4
2.4 BIODIESEL A NIVEL MUNDIAL.....	4
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>6</b>
3.1 LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO.....	6
3.2 MATERIALES Y EQUIPO UTILIZADO.....	6
3.2.1 Materia prima.....	6
3.2.2 Equipo.....	6
3.3 MÉTODOS.....	7
3.3.1 Diseño experimental.....	7
3.3.2 Fórmulas.....	7
3.3.3 Método de elaboración de biodiesel.....	7
3.4 ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA.....	8
3.4.1 Acidez del aceite de palma africana.....	8
3.4.2 Humedad del aceite de palma africana.....	8
3.4.3 Peso molecular del aceite de palma africana.....	8
3.4.4 Análisis del etanol anhidro.....	8
3.5 ANÁLISIS DE RENDIMIENTOS DE BIODIESEL.....	9

3.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	9
3.6.1	Análisis estadístico del rendimiento de biodiesel.....	9
4	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	10
4.1	ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA MATERIA PRIMA.....	10
4.1.1	Peso molecular del aceite de palma africana.....	10
4.1.2	Acidez del aceite de palma africana.....	10
4.1.3	Humedad del aceite de palma africana.....	11
4.2	TIEMPOS DE SEPARACIÓN DE FASES DE BIODIESEL Y GLICERINA.....	11
4.3	RENDIMIENTOS DE BIODIESEL.....	11
4.4	ANÁLISIS DE COSTOS.....	12
4.4.1	Costos de producción de biodiesel por ruta metílica y etílica.....	12
4.4.2	Costos de producción de biodiesel en proporción molar 9:1 con metanol y etanol.....	13
5.	<b>CONCLUSIONES.....</b>	14
6.	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	15
7.	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	16
8.	<b>ANEXOS.....</b>	18

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Diseño experimental DCA de los tratamientos.....	7
2. Fórmulas para la producción del biodiesel.....	7
3. Perfil de ácidos grasos del aceite de palma africana.....	10
4. Tiempo de separación de fases por tratamiento .....	11
5. Cantidades (g) y porcentajes de biodiesel, glicerina y gases evaporados.....	11
6. Análisis de costos de producción de biodiesel por ruta metólica y etólica.....	12
7. Costos entre etanol y metanol al igualar proporciones molares.....	13

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura	Página
1. Fórmula para el cálculo del rendimiento de biodiesel.....	9

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
1. Diagrama de flujo de producción de biodiesel.....	19
2. Diagrama de producción de alcohol de caña de azúcar.....	20
3. Análisis de alcoholes del etanol anhidro (CATSA, Costa Rica).....	21

## 1. INTRODUCCIÓN

La investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías energéticas crean alternativas al uso de combustibles derivados de petróleo. El incremento en la demanda energética de combustibles fósiles y la disminución de las reservas de petróleo a nivel mundial son oportunidades para la implementación de nuevos combustibles alternativos, siendo el biodiesel y el etanol productos agrícolas que actualmente se usan como sustitutos.

La Presidencia de la República de Honduras propuso al inicio del 2006 un proyecto para cultivar 200.000 hectáreas de palma africana, materia prima para producir alrededor de 200 millones de galones de biodiesel.

El biodiesel puede comercializarse en Honduras y Centroamérica sin ninguna modificación al motor de vehículos fabricados después de 1992. Rodríguez (2006) evaluó la producción y los rendimientos de biodiesel utilizando aceite usado y aceite RBD de girasol sin encontrar diferencias significativas en términos de eficiencia en un motor de bomba para riego en campos de cultivo.

La American Society for Testing and Materials ASTM (2007), define biodiesel como ésteres mono alquílicos de cadena larga derivados de aceites vegetales y/o grasas animales para su uso en motores de compresión-ignición de Diesel. El Departamento de Energía de los Estados Unidos (2006) indica que varias investigaciones han sido realizadas para la producción de etil ésteres, sin embargo, los altos precios del etanol con respecto al metanol y la dificultad de reciclar el exceso de etanol en el proceso obstaculizan la producción comercial.

La CEPAL (2007), indica que para países que producen etanol, la ruta ética es la que ofrece mayores beneficios ambientales ya que la producción de metanol es proveniente de procesamiento de petróleo, gas natural o madera, por lo que su origen se convierte en un punto negativo.

Según CEPAL (2006), corporación DINANT produce biodiesel con un costo de producción 0,61 US\$/L de biodiesel. Esto permite que su mezcla en 5% con diesel fósil se entregue a 0,704 US\$/L y se deje de pagar 0,778 US\$/L de diesel convencional. Asimismo, estima en 0.311 US\$/L e indica que la Central Azucarera Tres Valles en Honduras es la más próxima a instalar una unidad de producción de etanol anhidro a partir de melazas.

## **1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Zamorano tiene una planta para producir biodiesel con capacidad de 120 gal/día. Se debe tomar en cuenta el aceite y el alcohol con el que dicha planta podría funcionar continuamente y poder suplir parte de la demanda de combustibles de la universidad. Actualmente Honduras es uno de los mayores productores de palma africana en Centroamérica y a futuro según Melara (2007) para el 2010 se estima producir 900 millones L/año de etanol.

## **1.2 ANTECEDENTES**

Martínez *et al.* (2006) investigó la producción de ésteres etílicos a partir de aceite de palma RBD y logró un rendimiento cercano al 93,2%, con respecto a la cantidad de aceite empleado.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO**

Es necesario encontrar la mejor alternativa para producir biodiesel en Zamorano. En un futuro los ingenios azucareros de Honduras estarán produciendo etanol, así mismo, la ventaja de disponer de palma africana en varias zonas del país, permite que Zamorano obtenga materia prima para la investigación y también la producción continua de biodiesel.

## **1.4 LÍMITES DEL ESTUDIO**

- El estudio se limitó a la medición de rendimientos de ésteres etílicos y metílicos.
- Se evaluaron solo dos tipos de alcohol (etanol y metanol) para producir biodiesel
- Se utilizaron solo dos tipos de catalizador (NaOH y KOH)
- No se realizó ninguna prueba mecánica

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 Objetivo general**

- Comparar la eficiencia de producción de biodiesel a partir de aceite de palma africana por la ruta etílica y metílica.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Determinar los rendimientos de biodiesel obtenidos con tres proporciones de alcohol (etanol y metanol)
- Medir la cantidad de biodiesel, glicerina, gases evaporados, rendimientos y tiempo de separación entre tratamientos
- Comparar los costos variables de producir biodiesel a partir de palma y etanol anhidro en Zamorano vs. metanol.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 BIODIESEL

Según Knothe *et al.* (2006) el biodiesel puede elaborarse con aceites vegetales y grasas animales por medio de transesterificación en presencia de un catalizador y un alcohol para producir alquil ésteres. Peterson *et al.* (1995), encontró que los porcentajes de conversión a etil ésteres fueron de 97.5 % con metanol y 94.3 % con etanol con respecto a la cantidad aceite, evaluando aceites residuales de fritura.

Según Maia (2005), la transesterificación de los aceites vegetales se ve favorecida cuando un exceso de alcohol es utilizado en la reacción con el triglicérido. Sin embargo, altas cantidades de alcohol en la proporción etanol / aceite puede interferir en la separación del glicerol debido a un aumento de la solubilidad con el etanol.

Encinar *et al.* (2002), citado por Maia (2005), menciona que los mejores resultados en la reacción de aceite de *Cynara cardunculus* con etanol fueron de la proporción molar 9:1, asimismo, indica que a una menor concentración de alcohol la reacción es incompleta, mientras que para proporciones de hasta 15:1 hay dificultades en la separación del glicerol de la mezcla de ésteres formados.

Maia (2005), establece que las propiedades de cada biodiesel son determinadas por el porcentaje de cada éster presente en la mezcla. Si una muestra de biodiesel de soya posee la siguiente composición de ácidos grasos: 11,3% de metil palmitato (C16:0), 3,5% de metil estearato (C18:0), 22,5% de metil oleato (C18:1), 54,6% de metil linoleato (C18:2) y 8,1% de metil linolenato (C18:3), las propiedades de este biodiesel son la combinación de cada uno de sus ésteres componentes.

El párrafo anterior es confirmado por Knothe (2006), quien afirma que el biodiesel producido con materias primas saturadas tienen Números de Cetano mas elevados que aquellos producidos con materias primas menos saturadas y cita el ejemplo del aceite de soya con un NC entre 49 y 52, mientras que los ésteres de grasas animales están normalmente entre 60 y 65.

### 2.2 ETANOL ANHIDRO

Dedini (2005) indica que un alcohol a 96° GL es imposible removerle el agua utilizando un proceso de destilación simple a presión normal. Para ello es necesario utilizar una mezcla azeotrópica de alcohol con tricloroetileno, ciclohexano, acetato de etilo, monoetilenglicol, n-hexano o n-heptano en la destilación y de esta manera lograr etanol a 99.6° GL.

Maia (2005), indica que el etanol por tener un carbono más que el metanol le confiere un mayor índice de cetano al biodiesel lo cual optimiza la combustión en los motores diesel. En ese mismo estudio Maia (2005) afirma que el etanol por ser una cadena de carbonos más larga es más miscible en la glicerina lo cual perjudica la separación de fases y si éste contiene agua formará emulsiones.

### **2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL BIODIESEL**

La CEPAL (2007) establece las siguientes ventajas y desventajas en el uso del biodiesel:

#### **Ventajas**

- Recurso renovable, biodegradable y produce menos emisiones de monóxido de carbono, de hidrocarburos no quemados y de partículas de humo.
- Requiere pocas o ninguna alteración en el motor.
- El manejo es más seguro, su punto de inflamación es muy alto.
- Puede contribuir a reducir la dependencia de combustible fósil del país.

#### **Desventajas**

- Entre 2.5 y 8% menos energía por galón que el diesel, siendo 35 MJ/Kg para el biodiesel en la norma Europea 14213 y 42.6 MJ/Kg para el diesel no. 2 según la ASTM D975-06.
- Es un buen solvente por lo que puede disolver sedimentos del sistema y obstruir los filtros en su primer uso de motores que operan con diesel.
- Se oxida con más rapidez que el diesel, disminuyendo su capacidad de almacenamiento.
- A bajas temperaturas, el biodiesel empieza a solidificar a una tasa que depende de su perfil de ácidos grasos, como es el caso del biodiesel de soya a 0°C y entre 13 y 15°C el punto de enturbamiento para biodiesel de grasas animales. Esto puede obstruir los filtros, parando el motor o sin encender la ignición de partida.
- El biodiesel no es compatible con algunos tipos de materiales plásticos, con el cobre y sus aleaciones de zinc y plomo, es por eso que la Norma ASTM D 130 usa una lámina de cobre pulida para caracterizar la tendencia de corrosión de los metales en una de sus pruebas de calidad.

### **2.4 BIODIESEL A NIVEL MUNDIAL**

Según el EBB (2007), se espera para el 2007 llegar a producir 10.2 millones de toneladas métricas de biodiesel con la producción de 25 países del continente y un total de 185 plantas procesadoras. En Estados Unidos según la NBB (2007), para el 2007 se estima llegar a producir alrededor de 1.85 miles de millones de galones de biodiesel con 165 plantas en todo el país.

Knothe et. al. (2006), indica que, Argentina cuenta con siete unidades de producción de biodiesel con capacidades entre 10-15 t/día, Canadá para el año 2004 llegó a tener una capacidad instalada de 480 mil t/año y Nicaragua a inicios de los años 90 tuvo un fuerte apoyo austriaco cuando se instaló una planta con capacidad de 3 mil t/año para producir biodiesel con aceite de *Jatropha curcas*. Por otro lado, la ANP de Brasil (2007) reportó para el mes de julio del presente año 147.8 millones de litros de biodiesel acumulados.

## **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1 LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO**

El estudio se realizó en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano, a 30 km de la ciudad de Tegucigalpa, Valle del Yeguaré, departamento de Francisco Morazán, Honduras.

### **3.2 MATERIALES Y EQUIPO UTILIZADO**

#### **3.2.1 Materia prima**

- Aceite RBD de palma africana
- Etanol anhidro 99.9°GL, CATSA
- Metanol anhidro 99.9°GL, Sigma Aldrich
- Hidróxido de sodio en hojuelas (97% de pureza), Sigma Aldrich
- Hidróxido de potasio en hojuelas (99% de pureza), Sigma Aldrich
- Agua destilada

#### **3.2.2 Equipo**

- Agitadores magnéticos
- Balanza analítica Modelo AE 200 Metler®
- Beakers de 1000 mL Kymax®
- Cromatógrafo de gases Modelo 6890 Agilent® Columna SP 2560 Supelco® (100m × 0.25mm × 0.20 μm)
- Cromatógrafo de gases Modelo 6890 Agilent® Columna Elite-624 Perkin Elmer® (60m × 0.25mm × 0.20 μm)
- Decantadores de 250, 500 y 1000 mL Kymax®
- Horno Fischer Isotemp Scientific®
- Hornillas Modelo PC-620 D Corning®
- Termómetro

### 3.3 MÉTODOS

#### 3.3.1 Diseño experimental

Cuadro 1. Diseño experimental DCA de los tratamientos

Tratamiento	Día 1	Día 2	Día 3
<b>TRT1 = 6:1 etanol/palma</b>	R1	R1	R1
<b>TRT2 = 9:1 etanol/ palma</b>	R2	R2	R2
<b>TRT3 = 12:1 etanol/palma</b>	R3	R3	R3
<b>TRT4 = 6:1 metanol/palma</b>	R4	R4	R4

El Cuadro 1 presenta los tratamientos que fueron utilizados en el estudio. Se puede observar tres tratamientos de etanol y un tratamiento control con metanol. Es necesario resaltar que existen varias investigaciones sobre la producción de ésteres etílicos y metílicos por lo que se determinó el uso de las cantidades del Cuadro 1, basándose en las cantidades molares que cita Knothe et. al. (2006) y Maia (2005).

#### 3.3.2 Fórmulas

Cuadro 2. Fórmulas para la producción del biodiesel

Proporción	Aceite (g)	Etanol (g)	Metanol (g)	KOH (g)	NaOH (g)	Temp (°C)	Tiempo (min)
<b>6:1</b>	300	97.15		3		60	60
<b>9:1</b>	300	145.73		3		60	60
<b>12:1</b>	300	194.31		3		60	60
<b>6:1</b>	300		65.44		3	60	60

En el Cuadro 2 se observa las cantidades de aceite, etanol, metanol, KOH, NaOH, tiempos de reacción y la temperatura que alcanzó la reacción en cada tratamiento.

#### 3.3.3 Método de elaboración de biodiesel

1. Se pesó 300 g de aceite de palma en beakers de 1000 ml.
2. El aceite de cada tratamiento se calentó hasta llegar a 55°C
3. Por separado se mezcló el etanol y el catalizador (1% del peso del aceite) (KOH o NaOH) para tener preparado el metóxido o etóxido según el tratamiento.
4. Una vez alcanzada la temperatura en el aceite en un rango entre los 50 y 60°C y que el catalizador estuviera disuelto se procedió a mezclar ambas materias primas para dar inicio a la transesterificación.
5. El tiempo de reacción fue de 60 minutos para todos los tratamientos.
6. Al completarse el tiempo de reacción se procedió a agregarle agua a 80°C manteniendo agitación constante.
7. El agua se calculó como 1/3 del peso del aceite y a esa temperatura se mejora el lavado y consecuentemente la separación de fases de glicerina y biodiesel.
8. Se procedió a colocar la matriz del beaker (que contiene biodiesel y los demás subproductos) en los decantadores hasta lograr una completa separación de las

- fases. Inmediatamente se observó la separación de la glicerina quedando esta en el fondo y el biodiesel en la parte superior del decantador.
9. Se midieron los tiempos de separación en cada tratamiento.
  10. Se extrajo primero la glicerina (color ámbar) que se encontraba en el fondo del decantador y se colocó en un beaker de 100 ml.
  11. Se extrajo el biodiesel (por lo general de color amarillo) que resta en el decantador y se colocó en un beaker de 500 ml.
  12. El biodiesel y la glicerina se secaron durante 12 horas en el horno a 105 °C asegurándose de evaporar el agua y el etanol en exceso.
  13. Se pesaron los beakers que contenían glicerina y biodiesel para calcular los rendimientos de biodiesel.

### **3.4 ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA**

#### **3.4.1 Acidez del aceite de palma africana**

Se determinó la acidez en % de AGL por el método 14.3.10 de Nielsen (2003). Se realizó un duplicado por cada día del estudio para observar algún cambio en la acidez y no se encontró ninguna evolución de la misma.

#### **3.4.2 Humedad del aceite de palma africana**

Se determinó la humedad del aceite en % por el método Ca 2b-38 AOCS (1997). Se realizó un duplicado por cada día del estudio para observar algún cambio en la humedad y no se encontró ninguna evolución de la misma.

#### **3.4.3 Peso molecular del aceite de palma africana**

El peso determinó en g/mol por medio de cromatografía gaseosa mediante el método AOAC 996.06 (2005) para perfil de los ácidos grasos.

#### **3.4.4 Análisis de etanol anhidro**

Por medio de cromatografía gaseosa en la Central Azucarera Tempisque, Costa Rica, con el método ASTM D 5501, se determinaron las cantidades de otros tipos de alcoholes presentes en el etanol y por hidrometría se determinó el grado alcohólico en 99.9°GL

### 3.5. ANÁLISIS DE RENDIMIENTOS DE BIODIESEL

Una vez secadas las muestras de biodiesel y glicerina se procedió a pesar por separado cada uno de los beakers. El cálculo se realizó con la fórmula de la Figura 1:

$$R = \frac{m_F \times 100}{m_{FB100}} \quad \text{Donde;}$$

$$m_{FB100} = \frac{m_{IO} \times (MMO + 4)}{MMO}$$

Figura 1. Fórmula para el cálculo del rendimiento de biodiesel

Fuente: Guarieiro (2006)

Donde:

R = rendimiento final

mF = masa final

mFB100 = masa final del biodiesel asumiendo 100% de transesterificación.

mIO = masa inicial de aceite

MMO = masa molecular del aceite.

### 3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

#### 3.6.1 Análisis estadístico del rendimiento de biodiesel

Según los resultados obtenidos de los tratamientos y la fórmula1, se procedió a analizar estos datos con la ayuda del programa SAS<sup>®</sup>. Se hizo un ANDEVA con una separación de medias DUNCAN para evaluar el efecto de la cantidad de etanol en los rendimientos finales de biodiesel.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA MATERIA PRIMA

#### 4.1.1 Peso molecular del aceite de palma africana

Cuadro 3. Perfil de ácidos grasos del aceite de palma africana

Ácido graso	Área	% Área	Masa Molar	MM-1* %AG
Caproico	0.347	0.022	116.213	2.592
Caprílico	0.390	0.025	144.213	3.636
Caprico	0.290	0.018	172.268	3.233
Undecanoico	0.995	0.064	186.322	11.994
Láurico	3.336	0.216	200.322	43.213
Mirístico	14.619	0.950	228.376	216.028
Pentadecanoico	0.726	0.047	242.376	11.390
Palmítico	618.279	40.180	256.430	10263.330
Palmitoleico	2.764	0.179	254.412	45.512
Heptadecanoico	1.684	0.109	270.430	29.475
Cis-10-Heptadecenoico	0.479	0.031	268.430	8.317
Esteárico	63.414	4.121	284.484	1168.265
Oleico	653.200	42.450	282.468	11948.316
Vaccenico	11.780	0.765	282.468	215.463
Linoleico	160.836	10.452	280.452	2920.944
Eicosanoico	2.995	0.194	239.222	46.358
Cis9,Cis12,Cis15	2.607	0.169	278.453	47.000
Linolénico				
<b>Total</b>	<b>1538.75</b>	<b>100</b>		<b>26985.070</b>

$$\text{Masa Molar} = \text{MM Glicerina} - (3 \cdot 17) + \frac{3 \cdot \sum (\text{MM Ac.graso} - 1) \cdot \% \text{ Ac.Graso}}{100}$$

$$= 95 - 51 + (3 \cdot (26985.07) / 100) = 853.55 \text{ g / mol}$$

En el cuadro 3 se observa el perfil de ácidos grasos del aceite de palma africana. Tomando cada uno de sus pesos moleculares, la sumatoria y el porcentaje que representa cada ácido graso, se procedió a calcular el peso molecular del mismo.

#### 4.1.2 Acidez del aceite de palma africana

Se encontró un valor de acidez del aceite RBD de palma africana *Elaeis guineensis* de 0.04% AGL.

### 4.1.3 Humedad del aceite de palma africana

Se determinó un valor de 0.1% de humedad para el aceite de palma africana lo que permite una transesterificación libre de agua y evita la hidrólisis de los ácidos grasos.

## 4.2 TIEMPOS DE SEPARACIÓN DE FASES DE BIODIESEL Y GLICERINA

Cuadro 4. Tiempo de separación de fases por tratamiento

Tratamiento	Tiempo (min)
6:1 etanol aceite	32.67 <sup>a</sup>
12:1 etanol aceite	32.00 <sup>a</sup>
9:1 etanol aceite	22.33 <sup>b</sup>
6:1 metanol aceite	20.00 <sup>b</sup>

\*Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (P>0.05)

En el Cuadro 4 se puede apreciar que los tratamientos 6:1 metanol/aceite y 9:1 etanol aceite fueron significativamente más eficientes en la separación de fases de glicerina y biodiesel. Se comprobó también que el tratamiento 6:1 etanol/aceite por tener menos alcohol y que la reacción es incompleta, el tiempo de separación fue mayor; en el caso del tratamiento 12:1 etanol/aceite debido a que el etanol sirvió como solvente hubo también una lenta separación con respecto a los demás tratamientos.

## 4.3 RENDIMIENTOS DE BIODIESEL

Cuadro 5. Cantidades (g) y porcentajes de biodiesel, glicerina y gases evaporados

Descripción	Biodiesel	%	Glicerina	%	Evaporados	%
<b>6:1 metanol aceite</b>	294.00 <sup>a</sup>	97.54 <sup>a</sup>	43.83 <sup>b</sup>	14.61	88.57 <sup>c</sup>	18.91
<b>9:1 etanol aceite</b>	290.00 <sup>a</sup>	96.21 <sup>a</sup>	68.17 <sup>ab</sup>	22.72	148.53 <sup>b</sup>	27.07
<b>12:1 etanol aceite</b>	282.83 <sup>ab</sup>	93.83 <sup>ab</sup>	88.83 <sup>a</sup>	29.61	190.28 <sup>a</sup>	31.86
<b>6:1 etanol aceite</b>	271.00 <sup>b</sup>	89.91 <sup>b</sup>	92.00 <sup>a</sup>	30.66	95.12 <sup>c</sup>	19.02

\*Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (P>0.05)

En el Cuadro 5 se observa que los rendimientos del tratamiento 6:1 metanol/aceite y 9:1 etanol/aceite fueron significativamente superiores al resto. Esto concuerda con la CEPAL (2007), quien indica que por la ruta metílica se utiliza menos alcohol y su rendimiento es mayor. Asimismo, menciona que por la ruta etílica se pueden obtener el mismo rendimiento, pero con un exceso de etanol en este caso una proporción 9:1 etanol/aceite.

Los residuos de glicerina fueron superiores en el tratamiento 6:1 etanol/aceite por la poca cantidad de etanol, lo que provocó una reacción incompleta y una menor formación de ésteres. En el tratamiento 12:1 etanol/aceite se observó que un exceso de alcohol presentó problemas en la separación de fases del glicerol, aumentando su contenido y disminuyendo el rendimiento de biodiesel final.

Los gases evaporados de los tratamientos 6:1 etanol/aceite y 6:1 metanol/aceite fueron significativamente diferentes a los tratamientos 12:1 etanol/aceite y 9:1 etanol/aceite, siendo el tratamiento 12:1 etanol/aceite el que presentó la mayor cantidad de evaporación debido al exceso de etanol presente en la reacción. En el caso del tratamiento control con metanol 6:1 es evidente que esa proporción molar permite una reacción óptima, asimismo, el tratamiento con etanol 6:1 por tener la menor cantidad de alcohol y la menor reactividad en la reacción presenta menos gases evaporados.

#### 4.4 ANÁLISIS DE COSTOS

##### 4.4.1 Costos de producción de biodiesel por ruta metílica y etílica

Cuadro 6. Análisis de costos de producción de biodiesel por ruta metílica y etílica

<b>Materia prima</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>6:1 Metanol</b>	<b>9:1 Etanol</b>
Aceite de palma (Kg)	0.30	0.80	0.24	0.24
Etanol (L)	0.18	0.79		0.15
Metanol (L)	0.08	9.06	0.75	
KOH (Kg)	0.003	284.50		0.85
NaOH (Kg)	0.003	22.34	0.07	
<b>Gastos</b>				
M.Obra (hora)	8.00	3.68	0.46	0.46
Energía(KW/h)	18.63	0.0005	0.01	0.01
<b>Costo TRT (US\$/L)</b>			1.53	1.71
<b>Costo litro (US\$/L)</b>			4.49	5.02

Según el Banco Central de Honduras (2007), con una tasa de cambio de 19.03 US\$/L en el Cuadro 6 se puede apreciar un costo de 5.02 US\$/L cuando se produce el biodiesel por la ruta etílica y un costo de 4.49 US\$/L por la ruta metílica. Debido a que Honduras no cuenta con la producción de etanol anhidro el alcohol fue importado desde Costa Rica lo cual eleva los costos por los gastos en el transporte. Sin embargo, a un costo de producción de US\$ 0.47/L de etanol anhidro como es el caso de Costa Rica, Brasil y Estados Unidos según CEPAL (2007) el costo real del biodiesel (a escala de laboratorio) es de 4.23 US\$/L. En un futuro el precio de este alcohol puede ser más bajo si se llega a producir en este país.

Con estos resultados se comprueba que los costos de producir biodiesel por la ruta metflica fueron más bajos que por la ruta etflica. Es necesario resaltar que los análisis de ambas rutas se calcularon tomando en cuenta los costos de las materias primas a escala de laboratorio, asimismo, como lo indica Knothe et. al. (2006), el uso a nivel industrial de metanol es únicamente por cuestiones de costos en países donde no se produce etanol anhidro, no obstante, en Brasil donde los costos de producción son más bajos por el volumen de producción del etanol carburante su uso es lo más recomendable.

#### 4.4.2 Costos de biodiesel en proporción molar 9:1 con metanol y etanol

Cuadro 7. Costos entre etanol y metanol al igualar proporciones molares

<b>Materia prima</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>9:1 Metanol</b>	<b>9:1 Etanol</b>
Aceite de palma (Kg)	0.30	0.80	0.24	0.24
Etanol (L)	0.18	0.79		0.15
Metanol (L)	0.12	9.06	1.12	
KOH (Kg)	0.003	284.50		0.85
NaOH (Kg)	0.003	22.34	0.07	
<b>Gastos</b>				
M.Obra (hora)	8.00	3.68	0.46	0.46
Energía(KW/h)	18.63	0.0005	0.01	0.01
<b>Costo TRT (US\$/L)</b>			1.90	1.71
<b>Costo litro (US\$/L)</b>			5.57	5.02

El Cuadro 7 muestra que al igualar las concentraciones molares en 9:1 de etanol y metanol para producir biodiesel se dio un incremento de 0.55 US\$/L por la ruta metflica en comparación de ruta etflica. Como se indicó anteriormente, los costos de ambas materias primas difirieron por su origen y cantidad a escala de laboratorio ya que el metanol es de origen norteamericano así como los reactivos (NaOH y KOH) a diferencia del etanol que proviene de Costa Rica.

## 5. CONCLUSIONES

- El rendimiento de biodiesel por ruta etílica fue similar al de la ruta metílica (>96%).
- La reacción de transesterificación fue afectada cuando se disminuyó o aumentó la cantidad de etanol. La proporción 9:1 etanol/aceite la que presentó los mejores resultados en rendimientos, glicerina y tiempos de separación de fases.
- Los tratamientos 6:1 metanol/aceite y 9:1 etanol/aceite, presentaron el menor de tiempo en la separación de fases entre biodiesel y glicerina.
- Actualmente es más barato producir biodiesel por la ruta metílica a escala de laboratorio en Zamorano debido a que no se produce etanol anhidro en Honduras.
- El costo de producción de un litro de biodiesel en Zamorano por la ruta etílica fue de 5.01 US\$/L mientras que por la ruta metílica es de 4.49 US\$/L, obteniendo en ambos casos los mejores rendimientos.

## **6. RECOMENDACIONES**

- Elaborar un estudio técnico que mida la capacidad de producción de biodiesel que pueda llegar a suplir la demanda interna de Zamorano.
- Construir el laboratorio de energías renovables en Zamorano y comprar el equipo faltante que la ASTM indica para cada medición de los parámetros de calidad en biodiesel.
- Lograr un acuerdo con la Compañía Azucarera Tres Valles para que el pago por arrendamiento de las tierras de Zamorano pueda ser en un futuro con el equivalente de alcohol producido por las melazas y/o jugo de caña.
- Continuar las investigaciones de biodiesel por la ruta etílica ya que la mayor parte de la información disponible se refiere a la ruta metílica, además, Honduras es un país con potencial de producción de etanol anhidro.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

ANP. 2007. Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles. Producción Nacional de Biodiesel Puro (en línea). Consultado 26 de septiembre de 2007. Disponible en: [http://www.anp.gov.br/doc/dados\\_estaticos/Producao\\_de\\_biodiesel\\_m3.xls](http://www.anp.gov.br/doc/dados_estaticos/Producao_de_biodiesel_m3.xls)

AOCS. 2007. Methods of analysis for Reference Samples 2007-2007 (en línea). Consultado 2 de julio de 2007. Disponible en: [http://www.aocs.org/tech/AOCS\\_reference\\_sample\\_method\\_list.pdf](http://www.aocs.org/tech/AOCS_reference_sample_method_list.pdf)

ASTM. 2007. American Society for Testing and Materials. Standar Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels (en línea). Consultado 22 de Julio de 2007. Disponible en: <http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/DATABASE.CART/HISTORICAL/D675107.htm?L+mystore+geqf9386>

Banco Central de Honduras. Tipo de cambio, precio promedio diario del dólar (en línea). Consultado 2 de noviembre de 2007. Disponible en: <http://www.bch.hn/esteco/ianalisis/tcdint.pdf>

CEPAL. 2007. Perspectivas para el biodiesel en Centroamérica: Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Honduras (en línea). Consultado 1 septiembre de 2007. Disponible en: <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/3/29423/L791-1.pdf>

CEPAL. 2006. Costos y precios para etanol combustible en América Central (en línea). Consultado 10 de septiembre de 2007. Disponible en: <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/9/24459/L716.pdf>

Dedini (Industrias de base). 2005. Etanol. Brasil, Piracicaba, s.e. 14 p.

EBB. 2007. Estadísticas sobre la producción industrial en la Unión Europea (en línea). Consultado 25 de septiembre de 2007. Disponible en: <http://www.ebb-eu.org/stats.php>

Guarieiro, L. 2006. Metodología analítica para cuantificar el valor del biodiesel en una mezcla de biodiesel : diesel utilizando espectroscopia de región en infrarrojo (en línea). Consultado 5 de septiembre de 2007. Disponible en: [http://servicos.capes.gov.br/arquivos/avaliacao/estudos/dados1/2006/31001017/004/2006\\_004\\_31001017006P6\\_Teses.pdf](http://servicos.capes.gov.br/arquivos/avaliacao/estudos/dados1/2006/31001017/004/2006_004_31001017006P6_Teses.pdf)

Knothe, G; Gerpen, JV; Krahl, J; Ramos, LP. 2006. Manual de Biodiesel. 1 ed. São Paulo, BR. 340 p.

Maía, C. 2005. Obtención de ésteres etílicos a partir de transesterificación de aceite de andiroba con etanol (en línea). Consultado 5 de agosto de 2007. Disponible en: <http://pubs.acs.org/cgi-bin/abstract.cgi/iecred/1999/38/i08/abs/ie990012x.html>

Melara, C. 2007. Conferencia Perspectiva de la Industria Azucarera en Honduras (2007, Zamorano, Honduras). Asociación de productores de azúcar. Honduras.

Martínez, O; Sánchez, F; Suárez, O. 2006. Producción de ésteres etílicos a partir de aceite de palma RBD (en línea). Consultado 15 de septiembre de 2007. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v27n2/v27n2a05.pdf>

NBB. 2007. Producción. Capacidad de producción de Biodiesel en Estados Unidos (en línea). Consultado 17 de julio de 2007. Disponible en: [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/Production\\_Capacity.pdf](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/Production_Capacity.pdf)

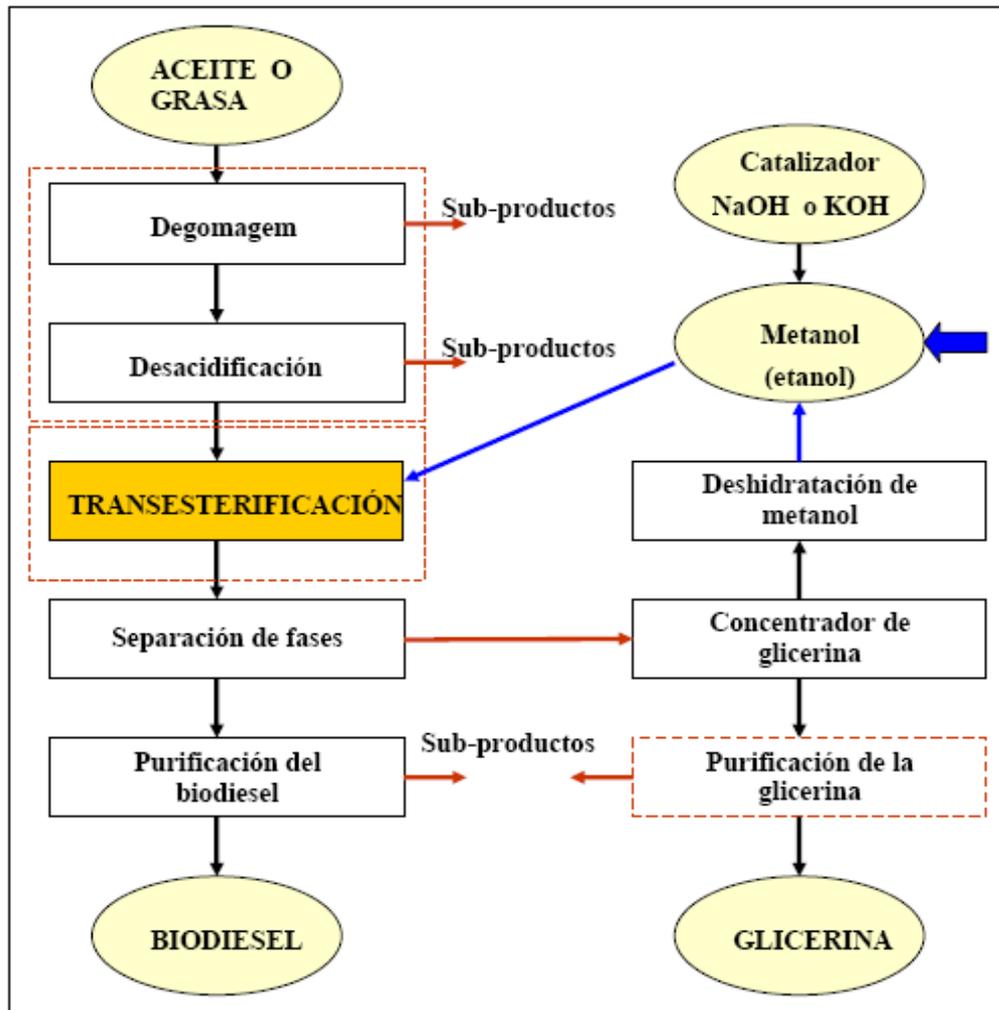
Nielsen, S. 2003. Food Analysis: Free Fatty Acids (FFAs) and Acid Value. 3 ed. US. Springer Science. 536 p

Peterson, C; Reece, D; Hammond, B; Thompson, J; Bech, S. 1995. Preparación y prueba de biodiesel de etanol y aceite de fritura (en línea). Consultado 14 de septiembre de 2007. Disponible en: <http://www.permaculture.com/site/files/EthylWVO.pdf>

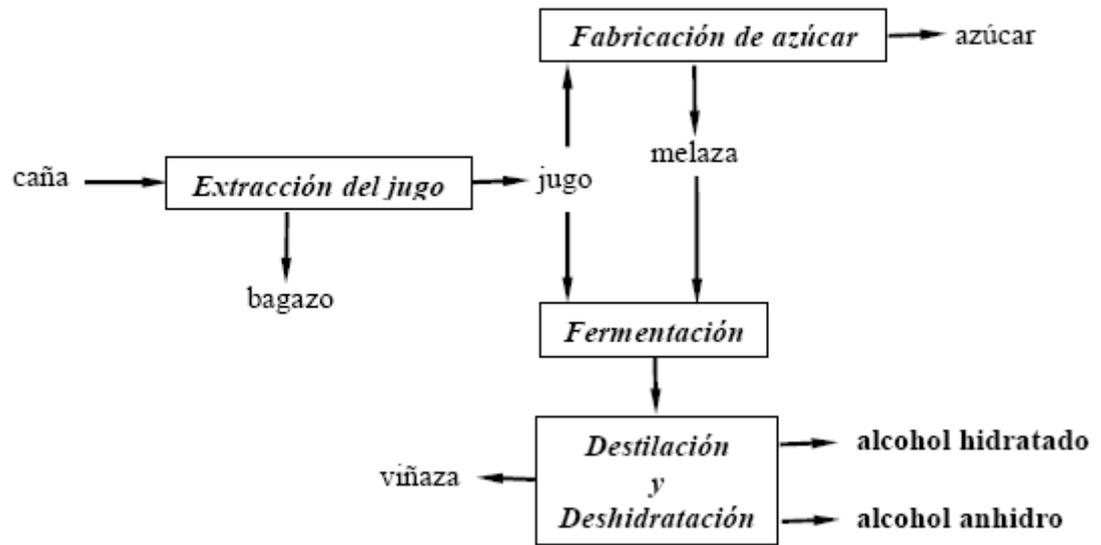
Rodríguez, J. 2006. Producción y evaluación de biodiesel a partir de aceite de Girasol (*Heliantus annuus*) de desecho del comedor estudiantil de Zamorano. 23p.

## **8. ANEXOS**

Anexo1. Diagrama de flujo de producción de biodiesel



Fuente: CEPAL, 2007

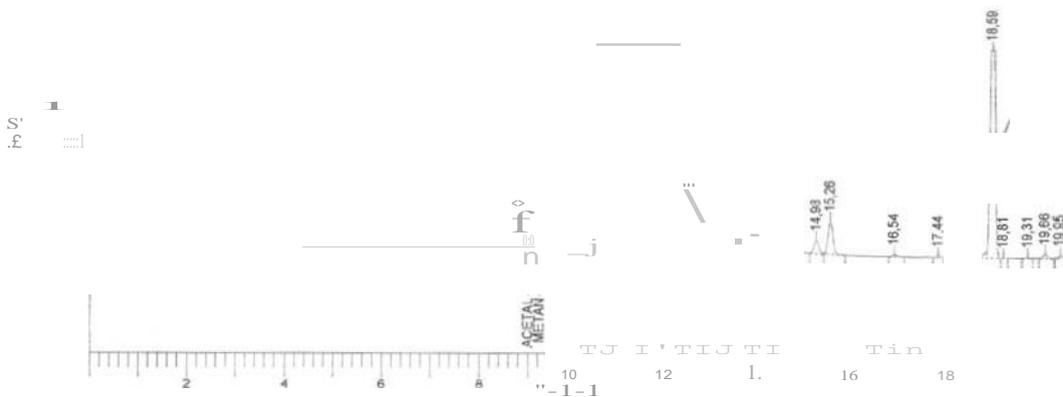
**Anexo 2.** Diagrama de producción de alcohol de caña de azúcar

**Fuente:** CEPAL, 2006

Anexo 3. Analisis de alcoholes del etanol anhidro (CATSA, Costa Rica)

Software Version : 6.3.1.0504  
 Sample Name : ANHIDRO PROCESO 00:00, 16032007  
 Instrument Name : Autosystem XL  
 Rack Nial : 0/24  
 Sample Amount : 1,000000  
 Cycle : 1  
 Date : 17/03/2007 1:24.41  
 Data AcquiSitiOn Time : 17/03/2007 0:03:28  
 Channel : A  
 Operator : tcprocess  
 Dilution Factor : 1,000000

Result File :  
 S,-.lence File : C:\SECUENCIAS\alcoholes 06022007.seq



**ANALISIS DE ALCOHOLES**

DEPARTAMENTO DE ASEGURAMIENTO DE CAUDAD

17/03/2007 1:24:41 Result:

Componente Nombre	Tiempo [min]	Area [%]	Concentraci6n ppm	Concentraci6n g/hl
1 Acetaldehido	9,012	0,10	43,2773	4,3277
2 metanol	9,245	0,01	50,7775	5,0778
3 ETANOL	10,755	99,74		
ISOPROPRANOY	13,037	0,00	0,0000	0,0000
1-PROPANOL.	14,633	0,00	0,0000	0,0000
5 ACETATO DEYILO	15,263	0,14	57,9996	5,8000
- 2-BUTANOL	5,744	0,00	0,0000	0,0000
- 2-METIL-2-BUTANOL	16,893	0,00	0,0000	0,0000
ISOBUTANOL	17,834	0,00	0,0000	0,0000
DIOXANO	18,931	0,00	0,0000	0,0000
13 3-METIL-1-BU OL	20,242	0,00	1,2929	0,1293
"> 1-PENTANOL	20,989	0,01	2,0906	0,2091
		100,00	155,4379	15,5438

Warning -- Signallevelout-of-range in peak

Analista: Jete Aseg. Calidad: