

# Caracterización de Materiales lignocelulósicos residuales de palma de aceite y palma de coco para la fabricación de pellets

## Characterization of residuals lignocellulosic materials from oil palm and coconut palm for pellets manufacturing

Yuri Alexandra González Castillo<sup>1</sup>, Sahra Nathalie Rincón Rincón<sup>2</sup>, Gabriel de Jesús Camargo Vargas<sup>3,\*</sup>, German Eduardo Dévora Isiordia<sup>4</sup>, Fabio Emiro Sierra Vargas<sup>5</sup>

<sup>1</sup> *Ingeniera Ambiental, Universidad Libre. Bogotá, Colombia, yuria.gonzalez@unilibrebog.edu.co*

<sup>2</sup> *Ingeniera Ambiental, Universidad Libre. Bogotá, Colombia, sahran.rinconr@unilibrebog.edu.co*

<sup>3</sup> *Mstr Ing. Química., Universidad Libre (Sede Bogotá), gabriel.camargov@unilibrebog.edu.co*

<sup>4</sup> *Ph.D. en Biotecnología, Mstr en Ingeniería (Administración de Recursos Hidráulicos, acentuación en tratamientos de aguas), Ingeniería de Procesos, Depto. de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora, Cd. Obregón, México, german.devora@itson.edu.mx*

<sup>5</sup> *PhD en Ingeniería Mecánica, Doctor en Ingeniería, Magister en Automatización Industrial, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, fsierrav@unal.edu.co*

*Fecha de recepción: 18/03/2014 Fecha de aceptación del artículo: 30/06/2014*

### Resumen

En este proyecto se investigó el proceso de densificación de residuos de palma de aceite y de palma de coco en la elaboración de pellets, los cuales se evaluaron como combustibles alternativos. Para el estudio se utilizaron dos tamaños de partícula y unas proporciones de mezcla entre el tamaño de partícula y el tipo de biomasa (fibra o cuesco). La investigación reportó que las dos biomásas son adecuadas como fuentes energéticas, no obstante, los pellets de palma de coco no presentaron una buena compactación, es decir, que se presentarán problemas a la hora de su almacenamiento y transporte. Además, su poder calorífico es inferior frente al obtenido con los pellet de biomasa de palma de aceite (alrededor de 17,186.81 kJ/kg). De igual forma se encuentra una solución al exceso de residuos y a la contaminación atmosférica producida por los gases de efecto invernadero.

### Palabras clave

Energías alternativas, Biocombustible, Pellets.

### Abstract

In this project was investigated the densification process waste palm oil and coconut in the preparation of pellets, which were evaluated as alternative fuels. For this study, were used two particle sizes and proportions of mixture between the particle size and the type of biomass (fiber or stone). The research reported that the two biomass are suitable as energy sources, however, coconut pellets showed no good compaction, that is to say, that problems will arise at the moment of your storage and transportation. In addition, its calorific value is lower compared to that obtained with the pellet of biomass oil palm (about 17,186.81 kJ/kg). Of equal form one finds solution to excess waste and air pollution caused by greenhouse gases.

### Keywords

Alternative energies, Biofuel, Pellets.

## 1. Introducción

Hoy en día, el mundo afronta una crisis energética, entre otras cosas por la explosión demográfica, el aumento de los estándares de vida y el alto costo de combustibles tradicionales no renovables. Esta situación afecta a todos los seres vivos de manera negativa; creando un círculo vicioso, el cual, sólo desea satisfacer necesidades energéticas y buscar alternativas a los problemas ambientales que la crisis de combustibles ocasiona.

Es por esto, que el interés en investigar sobre energías alternativas ha aumentado de manera significativa. En este proyecto se evalúa la biomasa residual, sabiendo que es un recurso abundante que garantiza su sustentabilidad. Al mismo tiempo esta investigación es el resultado de la colaboración interinstitucional e internacional entre la Universidad Libre de Bogotá (Sede Bosque Popular), la Universidad Nacional (Sede Bogotá) y el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) en Cd. Obregón, Sonora, México.

La investigación se centra en evaluar la factibilidad de dos biomásas en la fabricación de pellets, una mexicana y una colombiana; en el caso de México se toman residuos de palma de coco, conociendo que México tiene cerca de 24,945 km de línea costera (Hernández et al., 2008) y ocupa el noveno lugar a nivel mundial en la producción de palma de coco, (Fundación Produce de Guerrero A.C., 2012). Por otro lado, Colombia tiene más de 360.000 hectáreas sembradas de palma de aceite, catalogándolo como el primer país productor en América Latina y el sexto en el mundo (Ahmed et al., 2011).

Al ser unos de los principales productores de estos cultivos, la generación de residuos orgánicos se incrementa. El problema recae en el uso de estos, ya que se utiliza de manera incipiente, principalmente como abono o no tienen un uso en particular; causando una problemática ambiental debido al manejo de residuos sólidos, que pueden provocar problemas higiénicos, desembocando en enfermedades. Por tal razón, es necesario buscar un uso alternativo a estos residuos, sabiendo que son la principal materia prima para un óptimo bio-combustible.



Figura 1. Fibra y cuesco de palma de aceite (pasa 50-16)



Figura 2. Fibra y cuesco de palma de coco (pasa 50-16)

## 2. Materiales y Métodos

Se recolectó biomasa residual de palma de coco y palma de aceite, se lavó, separó (cuesco de la fibra) y secó. Posteriormente el cuesco y la fibra se molió y tamizó por medio de los tamices No. 16 (1.18 mm) y No. 50 (0.30 mm) (Figura 1 y 2) y se procedió a realizar combinaciones entre estas por medio de una prueba de ensayo y error, que llevó a un diseño de experimentos. Finalmente, los pellets fueron analizados por medio de pruebas cuyos procedimientos se basaron en diversas normas internacionales y se muestran a continuación:

### 2.1 Contenido de lignina de la biomasa

Se realizó según los parámetros de la norma TAPPI T 222 os-74 (Tappi T Test Methods., 1999) y se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ lignina} = \frac{(\text{Peso de lignina} \times 100)}{\text{Peso anhidrido de la muestra}} \quad (1)$$

### 2.2 Elaboración de pellets

Para la fabricación de los pellets se llevaron a cabo diferentes combinaciones de porcentajes de cuesco, fibra y una mezcla de cuesco-fibra, las cuales se presentan en las tablas 1 para palma de aceite y 2 para palma de coco. El proceso de elaboración de los pellets consistió en densificar la biomasa (previamente molida y tamizada) en una prensa hidráulica,

siguiendo partes de la metodología reportada por (Husain et al., 2002).

## 2.3 Propiedades físico-químicas de los pellets

### 2.3.1 Densidad

La masa (kg) se calculó con una balanza, el volumen ( $\text{dm}^3$ ) midiendo la altura (dm) y el diámetro del pellet (dm) en forma de cilindro por medio de un calibrador. Para su cálculo se tomaron 3 pellets de cada composición y se promedió la información. Se determinó la densidad de los pellets recién elaborados y 24 horas después de haberlos hecho, con el fin de establecer si la densidad de estos se mantenía constante. El volumen y la densidad se calcularon por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = m/v \quad (2)$$

$$v = \pi \times r^2 \times h \quad (3)$$

Dónde:

$\rho$  = Densidad del pellet ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )

$m$  = Masa del pellet (kg)

$v$  = Volumen del pellet ( $\text{dm}^3$ )

$r$  = Radio del pellet (dm)

$h$  = Altura del pellet (dm)

### 2.3.2 Contenido de humedad

Se realizó siguiendo el procedimiento de la norma Austriaca ÖNORM M 7135 (Austrian Standard, 2000). El porcentaje de humedad se midió de la siguiente manera:

$$\% \text{ humedad} = (m_i - m_f) / m_i \times 100 \quad (4)$$

Dónde:

$m_i$  = Masa inicial (g)

$m_f$  = Masa final (g)

### 2.3.3 Material volátil

Se tomó un pellet de cada composición, se pesaron y se introdujeron en una mufla durante una hora a una temperatura de 550 °C. Posterior a su enfriamiento, se determinó su masa (ASTM Inter-

national, 2002). El porcentaje de material volátil que contienen las muestras se calculó de acuerdo a la expresión:

$$\% m_p = (m_i - m_f) / m_i \times 100 \quad (5)$$

Dónde:

$m_p$  = Masa perdida (%)

$m_i$  = Masa inicial (g)

$m_f$  = Masa final (g)

$$\% \text{ volatilidad} = \% m_p - \% \text{ humedad} \quad (6)$$

### 2.3.4 Resistencia al impacto (porcentaje de durabilidad)

Para la realización de este experimento se tomaron tres pellets de cada composición y se dejaron caer desde una altura de 1.85 m sobre una superficie lisa cuatro veces, tomando en cada caída el trozo de mayor tamaño, lo anterior basado en el procedimiento de Sah et al., Khankari et al., Shrivastava et al., y Al-Widyan, citadas por (Kaliyan & Morey, 2009) y se calculó:

$$\% \text{ Durabilidad} = m_f / m_i \times 100 \quad (7)$$

Dónde:

$m_i$  = Masa inicial (g)

$m_f$  = Masa final (g)

### 2.3.5 Esfuerzo de compresión

Para determinar el esfuerzo de compresión (máxima carga que puede soportar el pellet antes de su agrietamiento y su ruptura) se colocó el pellet entre dos placas, donde la placa superior aplicaba una fuerza de forma constante sobre este hasta generar una falla que conduce a una grieta. Para este experimento se tomaron dos pellets de cada tratamiento y se promediaron los datos.

### 2.3.6 Módulo de elasticidad

Inicialmente, se tomaron las dimensiones del pellet (diámetro y altura) por medio de un deformímetro, después se colocó en la prensa hidráulica y se empezó a aplicar una fuerza axial, a medida que esta se aplicaba se tomó la medida de su deformación a

un intervalo de tiempo determinado hasta llegar a su punto de ruptura. Lo anterior genera la gráfica de esfuerzo Vs deformación, donde el Módulo de elasticidad se determina como la pendiente de la recta. El esfuerzo y la deformación se calcularon de la siguiente manera:

$$D=(l_o-l_f)/l_o \quad (8)$$

Donde,

D=Deformación unitaria (Adimensional)

$l_o$ =Longitud inicial (mm)

$l_f$ =Longitud final (mm)

$$E=F/A \quad (9)$$

Donde,

E=Esfuerzo (MPa)

F=Fuerza (N)

A=Área del pellet (mm<sup>2</sup>)

### 2.3.7 Poder calorífico

Este se realizó de forma diferente en las dos investigaciones (palma de aceite y palma de coco), lo anterior debido a los equipos que se utilizaron.

Para los pellets de biomasa de palma de aceite se analizó el poder calorífico por medio de la bomba calorimétrica modelo 1341 marca Parr y se siguió el procedimiento que indica su manual (Operating Instruction Manual) y se halló con la siguiente ecuación:

$$H_g=(t \times W - e_1 - e_2 - e_3)/m \quad (10)$$

En donde:

t=Incremento neto de temperatura

W=Energía equivalente del calorímetro, determinado bajo estandarización

$e_1$ =Corrección en calorías para el calor de formación del ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>)

$e_2$ =Corrección en calorías para el calor de formación del ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

$e_3$ =Corrección en calorías para el calor de combustión del alambre fusible

m=Masa de la muestra en gramos

En el caso de los pellets de biomasa de coco se utilizó un calorímetro y una bomba de aire. Inicialmente el pellet fue pesado y puesto en el calorímetro, este se situó dentro de la bomba la cual contenía 75 mL de agua, finalmente la bomba de aire se conectó al calorímetro por medio de una manguera. El poder calorífico se tomó como un diferencial de temperatura, entre la temperatura inicial y final del agua y se calculó de la siguiente manera:

$$Q_{mc}=mc \times C_p \times (T_f - T_o) \quad (11)$$

$$Q_{H_2O}=m \times C_{p_{H_2O}} \times (T_f - T_o) \quad (12)$$

$$Q_T=Q_{mc}+Q_{H_2O} \quad (13)$$

Donde,

$Q_{mc}$ =Calor del calorímetro (kJ)

mc=masa del calorímetro (kg)

$C_p$ =Calor específico (kJ/kg °C)

$T_f - T_o$ =Diferencial de temperatura (°C)

$Q_{H_2O}$ = Calor del agua (kJ)

$Q_T$ = Poder calorífico (kJ/kg)

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Contenido de lignina de la biomasa

La lignina es un polímero ramificado el cual realiza múltiples funciones vitales para la vida de las plantas, una de estas es unir las células adyacentes, actuando como puente de unión entre partículas, por lo que tiene la propiedad de ser un agente aglutinante.

La biomasa de palma de aceite obtuvo un contenido de lignina de 81.8%; más la biomasa de palma de coco en el que se avaluó cuesco y fibra el contenido de lignina fue de 64.6% y 59.4% respectivamente. Aunque este no es tan alto, tiene la propiedad de ser agente aglutinante, además es considerablemente mejor al obtenido por Maheswari et al. (2012), en dónde se caracterizó el Cocos nucifera y el contenido de lignina fue de 32.2%.



### 3.2 Elaboración de pellets

Como resultado del proceso experimental, en el caso de la biomasa de palma de aceite se llegó a cinco combinaciones de biomasa (Figura 3) de 10g c/u realizados a una presión de 40 Bar, los cuales se muestran en la tabla dada en la tabla 1. :



Figura 3. Pellets con biomasa de palma de aceite

Tabla 1. Combinación pellets con biomasa de palma de aceite

No. pellet	Porcentaje de materia prima	Tamaño de partícula
1	100% cuesco	Entre 0,30 mm y 1,18 mm
2	100% fibra	Entre 0,30 mm y 1,18 mm.
3	100% fibra	≤0,30 mm.
4	50% cuesco 50%fibra	Entre 0,300 mm y 1,18 mm.
5	50% cuesco 50%fibra	≤ 0,30 mm.

Con la biomasa de palma de coco se realizaron siete combinaciones; cada pellet con una masa de 6g y se densificó a una presión de 127 Bar, estos se muestran en la Figura 4 y sus características se listan en la Tabla 2.

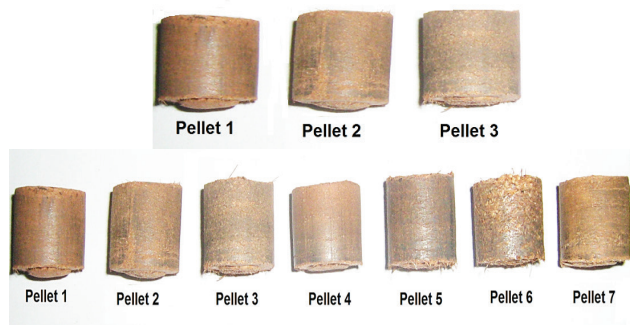


Figura 4. Pellets con biomasa de palma de coco

### 3.3 Propiedades físico-químicas de los pellets

En las Tablas 3 y 4 se presentan los resultados de las pruebas realizadas.

Tabla 2. Combinación pellets con biomasa de palma de coco

No. pellet	Porcentaje de materia prima	Tamaño de partícula
1	100% fibra	≤0.30 mm
2	50% fibra 50% cuesco	≤0.30 mm
3	50% fibra 50% cuesco	Entre 0.30 mm - 1.18 mm ≤0.30 mm
4	70% fibra 30% cuesco	≤ 0.30 mm.
5	100% fibra	Entre 0.30 mm y 1.18 mm
6	50% fibra 50% cuesco	Entre 0.30 mm y 1.18 mm
7	70%fibra 30% cuesco	≤0.300 mm Entre 0.30 mm - 1.18 mm

#### 3.3.1 Densidad

Según la norma Austriaca ÖNORM M 7135 (Austrian Standard, 2000), la densidad de los pellets debe ser  $\geq 1,12 \text{ kg/dm}^3$ . En la tabla 3 se puede observar que los pellets 3 y 5 con biomasa de palma de aceite cumplieron con este parámetro, lo que indica que entre menor sea el tamaño de partícula de la materia prima mejor será su densidad.

Los pellets de la tabla 4 (biomasa de palma de coco) no cumplen con lo establecido en la norma, aunque el pellet 4 fue el que mostró un mejor comportamiento con  $0.902 \text{ kg/dm}^3$ . De otro lado, los pellets con mayor contenido de fibra (pellets 4, 5, 7) obtuvieron una mayor densidad que aquellos que contenían cuesco, debido a que la fibra al ser un pequeño filamento tiene la capacidad de adherirse mejor que el cuesco. Además, según lo estudiado por Carvajal et al., la densidad de los pellets elaborados con 100% fibra de coco (pellet 1) es baja ( $< 1\text{kg/dm}^3$ ), lo que fortalece el resultado obtenido.

Por lo anterior, al no cumplir en general con este parámetro, se debe tener un manejo, almacenamiento y transporte óptimo, ya que una menor densidad implica un mayor volumen.

**Tabla 3.** Resultados pellets con biomasa de palma de aceite

No. Pellet	Densidad (kg/dm <sup>3</sup> )		Humedad (%)	Material volátil (%)	Durabilidad (%)	Módulo de elasticidad (Mpa)	Esfuerzo de compresión (MPa)
	Después de prensado	24 h después					
1	1.06	1.07	8.56	57.82	2.20	23.53	1.19
2	1.06	1.07	8.72	68.28	31.11	215.34	17.23
3	1.28	1.28	6.70	73.56	69.15	169.59	11.57
4	1.05	1.09	8.98	70.22	32.46	131.41	7.02
5	1.15	1.15	6.89	74.00	40.65	117.29	4.75

Finalmente, se comparó la variación de la densidad de los biocombustibles 24 horas después de su elaboración, demostrando que no hubo un cambio significativo.

### 3.3.2 Contenido de humedad

Este desempeña un papel importante en todo biocombustible, debido a que determina la facilidad de compactación de la materia prima, la estabilidad y durabilidad de los pellets. Se observó, que la biomasa se pudo densificar fácilmente, ya que, en los dos casos (tabla 3 y 4) el porcentaje de humedad fue óptimo, debido a que en la investigación de (Tripathi et al., 1998) sugiere un 10-15% de contenido de humedad de la biomasa para la fabricación de pellets.

Por otro lado, según la norma ÖNORM M 7135. (Austrian Standard, 2000), el porcentaje de humedad debe ser  $\leq 18.0\%$ , por lo tanto, como se observa en las tablas 3 y 4 todos los pellets cumplen con este parámetro, indicando que su combustión será más rápida y arderán de manera más fácil, ya que no se desperdiciará tanta energía evaporando el agua existente.

Además, se encuentra una amplia relación entre el contenido de humedad y la composición de cada pellet; en el caso de los pellets con biomasa de palma de aceite se obtuvo un mejor resultado cuando el tamaño de partícula es más bajo y en el caso de los pellets de alma de coco se presentó un mejor comportamiento cuando existe una combinación 50 - 50 entre fibra y cuesco. Por otra parte, el contenido de humedad de los pellets en este último caso, es menor comparado con lo obtenido por

(Forero et al., 2012), en donde elaboraron pellets a partir de coco, cuyo contenido de humedad fue del 12%.

### 3.3.3 Material volátil

Representa una gran importancia en la velocidad de combustión, ya que depende si estos (los volátiles) se desprenden más rápido produciendo una disminución en su masa y formando gases que arden rápidamente, generando una menor producción de inquemados (hollín, monóxido de carbono e hidrocarburos).

En los dos tipos de pellets se obtuvo un buen resultado, demostrando, además de lo anterior, que la llama en el proceso de combustión será de mayor longitud. Al mismo tiempo, se compararon los resultados con algunas investigaciones, en el caso de los pellets de palma de aceite se logró un mejor porcentaje al expuesto en la investigación de (Gallipoliti et al., 2012) en donde registraron un 60.9% de materia volátil; y respecto a los pellets de palma de coco el resultado es acorde con algunas investigaciones realizadas, como la reportada (Carvajal et al.), cuyo porcentaje se encuentra entre 80 y 85%.

### 3.3.4 Resistencia al impacto (porcentaje de durabilidad)

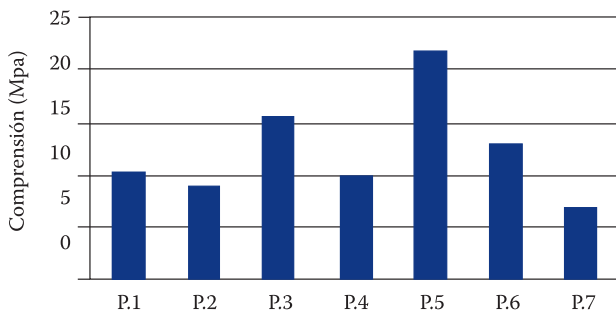
Las Tablas 3 y 4 muestra el buen comportamiento que tiene los pellets al ser sometidos a una fuerte manipulación, indicando que la biomasa tiene una extensa capacidad para absorber golpes sin romperse, ya que este material contiene celulosa (fibras) que actúa como barrera para distribuir la energía

**Tabla 4.** Resultados pellets con biomasa de palma de coco

No. Pellet	Densidad (kg/dm <sup>3</sup> )		Humedad (%)	Material volátil (%)	Durabilidad (%)	Módulo de elasticidad (Mpa)	Poder calorífico (kJ/kg)
	Después de prensado	24 h después					
1	0.788	0.788	8.38	84.49	98.71	79.96	8,276.01
2	0.871	0.871	6.89	87.57	80.24	122.77	3,912.02
3	0.858	0.819	6.52	88.47	79.40	177.28	6,731.70
4	0.902	0.877	7.50	86.90	95.79	119.62	4,426.70
5	0.828	0.773	8.14	86.45	99.16	176.91	2,469.29
6	0.788	0.771	6.37	89.28	43.02	137.63	1,842.11
7	0.838	0.838	7.26	86.55	64.04	50.93	4,205.39

provocada al momento de impactar los biocombustibles.

Solo se encuentra que el pellet 1 con biomasa de palma de aceite (Tabla 3) no presenta un comportamiento óptimo debido a las condiciones del material, indicando que no es factible elaborar un pellet con 100% cuesco de palma de aceite, puesto que no existen los suficientes ligamentos para unir las partículas y soportar un golpe.



**Figura 5.** Compresión de pellets con biomasa de palma de coco

### 3.3.5 Esfuerzo de compresión

Se tomó como la máxima presión que soportan los pellets ante la acción de una fuerza, donde los resultados dados en la Tabla 3 muestran la dependencia del pellet con la biomasa (cuesco y fibra), ya que se obtuvo mejores resultados cuando se tiene un mayor porcentaje de fibra.

Igualmente los pellets realizados con biomasa de palma de coco, muestran un resultado ligado con

la biomasa (Figura 5), ya que la fibra soporta movimientos violentos de una mejor forma.

También se comparó el esfuerzo de compresión de los pellets frente a la investigación realizada por (Husain et al., 2002), donde la resistencia a la compresión promedio de  $2.56 \times 10^{-3}$  MPa, por lo tanto los pellets elaborados en esta investigación, son mucho más resistentes a la acción de una fuerza.

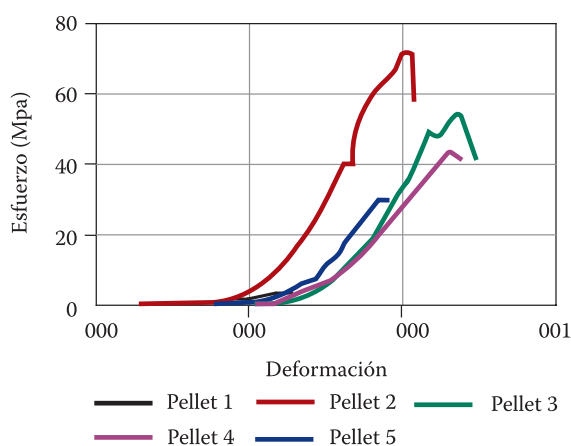
### 3.3.6 Módulo de elasticidad

Teniendo en cuenta los resultados expuestos en las Tablas 3 y 4 se encuentra una similitud entre los pellets de biomasa de palma de aceite y palma de coco, igualmente al observar las Figuras 6 y 7, donde al aumentar el esfuerzo de los pellets, la deformación unitaria también se incrementó, pero al reducir el esfuerzo los materiales no recobraron su estado original; esto indica que la biomasa tiene un comportamiento plástico puesto que adquirieron una deformación permanente. Al mismo tiempo son materiales frágiles, ya que la ruptura de los pellets ocurrió poco después del límite elástico.

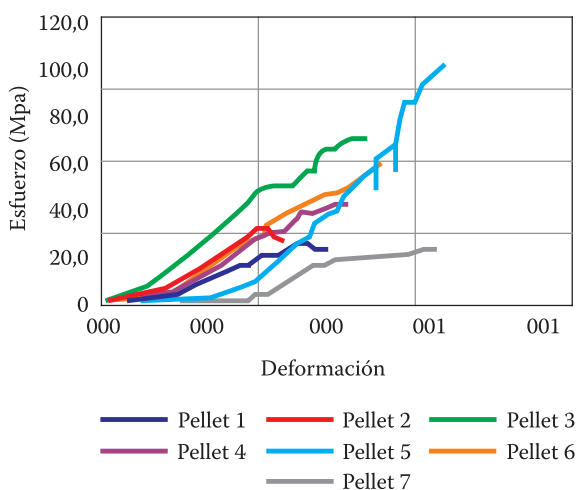
### 3.3.7 Poder calorífico

Es denominado el parámetro más importante de un pellet, ya que determina la cantidad de energía que este desprende al hacer combustión de forma completa.

Los pellets elaborados con biomasa de palma de aceite presentaron un poder calorífico que se



**Figura 6.** Esfuerzo vs deformación pellets con biomasa de palma de aceite



**Figura 7.** Esfuerzo vs deformación pellets con biomasa de palma de coco

encuentra alrededor de 17,186.81 kJ/kg, siendo el pellet 2 el que presentó un mejor comportamiento con 18,421.92 kJ/kg, lo que demuestra la amplia energía que este posee. Gran diferencia se presenta con los pellets de biomasa de palma de coco (tabla 4) donde el poder calorífico fue muy bajo al reportado en diversas investigaciones como la de Forero et al., (2012) de 18,810.75 kJ/kg esto pudo haber sido por que el procedimiento llevado a cabo no fue el más adecuado, puesto a que existían fugas entre la bomba calorimétrica y la bomba de aire, generando un pérdida de calor.

Por otra parte, los pellets de palma de aceite presentan un mayor poder calorífico con respecto a muchos otros residuos agrícolas, como la cáscara

de café, los tallos de algodón, la cáscara de cacao, la cáscara de arroz, el aserrín, entre otros, los cuales registran valores de 11,000 a 16,000 kJ/kg frente a los 19,000 kJ/kg (aproximadamente) de los pellets, indicando que estos son una fuente potencial de energía.

## 4. Conclusiones

Las biomásas utilizadas presentan las características adecuadas de fuentes energéticas. Los pellets de palma de aceite muestran un alto porcentaje de lignina y un alto poder calorífico, lo que se debe en gran parte a su adecuada densidad y a su bajo contenido de humedad, ya que, entre mayor sea la densidad, mayor será la energía que el pellet pueda entregar por volumen ocupado, características óptimas de un pellet.

En el caso de los pellets con biomasa de palma de coco se presenta una baja densidad y un deficiente poder calorífico, debido a que en el momento de hacer la prueba no se contaba con el equipo especializado, demostrando que esta biomasa no es la adecuada para elaborar pellets; lo anterior no significa que no sea una importante fuente energética, por el contrario, existen otros procesos como pirolisis, gasificación, termólisis en las que se puede utilizar este residuo para generar energía.

La investigación dejó como resultado una visible relación entre el comportamiento del pellet y su composición, debido a que los mejores resultados se obtuvieron cuando el pellet tenía como mínimo 50% de fibra, lo ideal de esta, se encuentra en la molienda, ya que da un tamaño de partícula adecuado, el cual tiene las características para actuar como puente y genera una cadena de moléculas y así hacer resistente y denso al pellet; esto se ve reflejado en el alto módulo de elasticidad que presentan los pellets, debido a que es la fibra la que ayuda a recibir gran parte de la presión, soportándola mejor que el cuesco.

Por último, al ser viable la producción de pellets, se encuentra una solución al exceso de residuos generados y a la contaminación atmosférica producida por los gases de efecto invernadero. Además, se



considera viable la sustitución de combustibles tradicionales por pellets, ya que aunque 1 kg de carbón genera un poder calorífico de aproximadamente 29,000 kJ/kg, con 1.57 kg de pellets de biomasa de palma de aceite, se puede entregar el mismo calor, evitando así los impactos que se causan al ambiente desde la exploración hasta el consumo de este combustible fósil.

## Agradecimientos

Se agradece al Instituto Tecnológico de Sonora en Cd. Obregón Sonora – México, en especial al departamento de Agua y Medio Ambiente, liderado por el Doctor Germán Eduardo Dévora, por el apoyo dado a la investigación; de igual forma al grupo de investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, liderada por el Doctor Fabio Sierra y por último al departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad Libre y a su cuerpo maestro, especialmente al Ing. Gabriel Camargo.

## Referencias

- Hernández, J., Ortis, M., Mendez, A., Campillo, L. (2008). *Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente*. Investigaciones geográficas, 65.
- Fundación Produce de Guerrero, A.C. (2012). *Agenda de Innovación- Guerrero*. Coco, 305.
- Ahmed, A., Zahedi, G., Hashim, H. (2011). *Progress and challenges in utilization of palm oil biomass as fuel for decentralized electricity generation*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 547 – 583.
- TAPPI TEST METHODS. *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*. TAPPI T 222 os-74. TAPPI Press. (1999), Atlanta.
- Husain, Z., Zainac, Z., Abdullah, Z. (2002). *Briquetting of palm fibre and shell from the processing of palm nuts to palm oil*. *Biomass and Bioenergy*, 22, 505 – 509.
- Austrian Standard. Technical Committee 241. *Energy from solid biofuels. Compressed wood and compressed bark in natural state – Pellets and briquettes*. (2000). ÖNORM M 7135. Edition: 2000-11-01. Austria. 2000. 10.
- ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke*. (2002). D 3175 – 02. Estados Unidos. 4.
- Kaliyan, N., Morey, R. (2009). *Factors affecting strength and durability of densified biomass products*. *Biomass and Bioenergy*, 33, 337-359.
- Operating Instruction Manual. Oxygen Bomb Calorimeter. Marca Parr 1341. 16 p.
- Maheswari C., Reddy O., Muzenda E., Guduri B., Rajulu A. (2012). *Extraction and characterization of cellulose microfibrils from agricultural residue e Cocos nucifera*. *Biomass and bioenergy*, 44, 555-563.
- Carvajal, C., Espitia, L., Gordillo, J., y Martínez, C. *Densificación de biomasa mediante el uso de pellet con contenido de cáscara de coco y aserrín*. Universidad Nacional de Colombia.
- Tripathi, A., Iyer, P., Kandpal, T. (1998). *A techno-economic evaluation of biomass briquetting in India*. *Biomass and Bioenergy*, 14, 479–88.
- Forero, C., Jochum, J., Sierra, F. (2012). *Characterization and feasibility of biomass fuel pellets made of Colombian timber, coconut and oil palm residues regarding European standards*. *Environmental Biotechnology*, 8, 67-76.
- Gallipolliti, V. Martina, P., Corace, J., Aeberhardt, E., García, E. (2012). *Fabricación de briquetas con aserrín blanco de pino. Análisis inmediato y obtención de su poder calorífico*. Argentina, 6, 35-40.