

RENDIMIENTO DE LOS PRODUCTOS DE LA DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA DE LA MADERA DE *Eucalyptus saligna* Smith A DIFERENTES ALTURAS DEL FUSTE COMERCIAL

L. M. García-Rojas¹; F. Márquez-Montesino^{2*};
L. Aguiar-Trujillo¹; J. Arauso-Pérez³;
L. R. Carballo-Abreu², U. Orea Igarza²;
R. Zanzi⁴

¹Departamento de Mecánica, Universidad de Pinar del Río, Martí Núm. 270. Pinar del Río, C. P. 20100, Cuba.

²Departamento de Química, Universidad de Pinar del Río, Martí Núm. 270. Pinar del Río, C. P. 20100, Cuba. Teléfono: 779661 y 775452.

³Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente, Universidad de Zaragoza, España

⁴División de Ingeniería de las Reacciones Químicas. Departamento de Ingeniería y Tecnología Química. Royal Institute of Technology. Estocolmo, Suecia (*Autor para correspondencia)

RESUMEN

En este trabajo se exponen los resultados del estudio de la pirolisis de madera de (*Eucalyptus saligna* Smith). La madera del árbol estudiado corresponde al municipio de Pinar del Río, provincia de Pinar del Río, Cuba. Las necesidades de utilizar esta madera como fuente de energía en la región condujeron al inicio de la etapa de investigación a escala de laboratorio. Los árboles utilizados son entre 20 y 22 años de edad, tomándose discos de 20 a 25 cm; 55 y 85 % de la altura del fuste. A las muestras se les estudió su composición química, análisis previo y descomposición térmica en termobalanza. El comportamiento de los productos de la pirolisis se efectuó en un reactor de lecho fijo. Se determinó el valor calórico de la biomasa y sus carbones. Se estudió la influencia de la altura del fuste del árbol en los rendimientos de los productos de la pirolisis.

Se concluyó que existen diferencias significativas en cuanto a la composición química de la madera estudiada: celulosa, hemicelulosa y lignina lo cual justifica el ligero decrecimiento en el rendimiento del carbón en relación con la altura del árbol y la disminución del porcentaje de alquitranes. El mayor rendimiento de carbón así como de valor calórico, se logra en la parte más baja del árbol. La contribución a gases aumenta con la altura del árbol.

PALABRAS CLAVE: pirolisis, eucaliptos, carbón, alquitranes.

YIELD OF PRODUCTS OF THE THERMAL DECOMPOSITION OF THE *Eucalyptus saligna* Smith WOOD, TO DIFFERENT HEIGHTS OF THE TREE

SUMMARY

In this work the qualitative and quantitative results of the thermal pyrolysis of *Eucalyptus Saligna* Smith is presented, to different heights of the commercial wooden log. The wood was collected from Pinar del Río, Cuba. The need to use this wood like energy source in the region led to the research at laboratory scale. The used trees were 20 and 22 years old, from which 20 cm disks were cut at 25; 55 and 85 % height of the log, milled to chips and air dried. The chemical composition was determined and was carried out the previous analysis of the samples, as well as the thermal decomposition in micro scale. The study of products from the pyrolysis (coal and tar), it was made in a reactor of fixed channel. The caloric value of the biomass and its charcoal was determined. The influence of the height of the log in the product yields from the pyrolysis was studied.

As significant differences was observed as for the chemical composition of the studied wood: cellulose, hemicelulose and lignine,

being observed an apparent increase of the lignine percentage with the height of the tree. The previous analysis belongs together with the chemical composition of the studied biomass. A small decrease was observed in the yield of the coal and of the percentage of tars with the height of the tree, this belongs together with the variation of the chemical composition according to the height of the tree. The biggest yield of coal and caloric value was achieved at the lowest height of the tree. The contribution to gas goes increasing with the height.

KEY WORDS: pyrolysis, eucalyptus, carbon, tars.

INTRODUCCIÓN

Los procesos térmicos a partir de biomasa son objeto de investigación de gran parte del mundo científico, pero sobre todo, del mundo desarrollado, que tratan de adquirir esta tecnología amenazada por la crisis energética actual y por los problemas de contaminación ambiental.

La provincia de Pinar del Río cuenta con bosques comerciales de pino y eucaliptos, la madera de pino es procesada en los aserríos para ser destinadas a la construcción, mientras los eucaliptos se pueden destinar, entre otros usos, a la energía.

La energía procedente de la biomasa ocupa, junto con la procedente de centrales mini-hidráulicas, eólica y la fotovoltaica, un lugar prioritario dentro de las energías procedentes de fuentes renovables.

La madera antes de ser transformada térmicamente sufre un proceso de cambio que comprende: trozado y secado para después ser combustionada, pirolizada o gasificada (Rodríguez *et al.*, 1990; Van Belle y Schenkel, 1998).

La combustión, pirolisis y gasificación, constituyen probablemente alternativas de mayores posibilidades de implantación industrial a corto plazo, para el uso de los residuos lignocelulósicos.

La madera está compuesta de forma general por tres grupos de sustancias, las que conforman la pared celular, donde se encuentran las principales macromoléculas: celulosa, poliosas (hemicelulosas) y ligninas; que están presentes en todas las maderas. El otro grupo lo conforman las sustancias de baja masa molar conocidas también como sustancias extraíbles que se encuentran en menor cantidad, y las sustancias minerales. La proporción de estos componentes varía con la especie entre la madera de árboles de la misma especie y en diferentes partes del propio árbol.

El proceso de pirólisis consiste en la descomposición de la materia orgánica por la acción del calor y en ausencia de oxígeno. La descomposición térmica de estos materiales biomásicos se produce a través de una serie compleja de reacciones químicas, además de procesos de transferencia de masa y calor, lo que hace difícil predecir el transcurso de la pirolisis, puesto que influyen una serie de variables como son las condiciones de operación o el tipo de biomasa empleada.

En el intervalo de 250 a 350 °C tiene lugar la fase cuantitativamente más importante de la pirólisis de la madera, (Cordero *et al.*, 1989; Zanci *et al.*, 1996). Este intervalo puede ser a mayores valores de temperatura para madera si ésta es pretratada con iones metálicos (Qirong *et al.*, 2008).

En este trabajo, dada la necesidad de utilizar en Cuba la madera de eucalipto como fuente de energía, con una fundamentación científica, se continuó su estudio con el objetivo de determinar la influencia de la altura del árbol en la composición química de la madera, así como en el rendimiento de productos de la pirolisis de la madera, a temperatura no isotérmica de 700 °C.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de la materia prima

Para la realización de este estudio experimental, se seleccionó la materia prima, para ello se cortaron 10 árboles en plantación homogénea de la primera rotación para cada especie, en cada plantación se seleccionaron cinco parcelas de 500 m² y 2 árboles, con características morfológicas semejantes, comprendidos entre 20 y 22 años de edad, selección completamente aleatorizada, según Norma Estándar TAPPI T- 257-cm-85 de 1998. Del fuste comercial de cada árbol se tomaron discos de 20 a 25 cm; 55 y 85 %.

Los discos de madera, se redujeron a partículas empleando una sierra circular, la muestra homogeneizada de cada especie y altura se secó al aire y tamizó, se tomó la porción menor a 200 micras de diámetro. Se guardó en frascos con tapa para su conservación y posterior estudio.

Para comprobar la distribución de tamaños de partícula de la materia prima de la especie estudiada, se tamizó una parte de la muestra.

Las partículas de tamaño entre 1 y 1.5 mm resultaron las más abundantes y se tomaron las de estas dimensiones para el estudio, lográndose a la vez la mayor homogeneidad en la selección del tamaño de la partícula, lo que garantizó una pirolisis homogénea de la materia prima. Este tamaño de partícula está en el rango de las utilizadas por otros autores para otros estudios de pirolisis, (Zanci *et al.*, 1996; Márquez. *et al.*, 2001; Acikgoz, C. *et al.*, 2004; Onay, Ö y Mete Koçkar, 2004). Posteriormente se le hizo el análisis inmediato, efectuado según las normas ASTM (1998).

Composición química de la materia prima

Para el estudio de la composición química del material de partida se utilizaron las normas TAPPI T, 1998.

Las hemicelulosas totales se estimaron por diferencia entre 100 % y la suma del porcentaje de celulosa y el porcentaje de lignina en madera libre de extraíbles, según Bland, (1985).

Análisis termogravimétrico

Par el análisis termogravimétricos se utilizó una termobalanza acoplada a computadora para el registro de datos. Fue escogido un reactor discontinuo para la muestra y continuo para el gas inerte dinitrógeno.

Las distintas pruebas termogravimétricas se hicieron manteniendo constantes los siguientes parámetros:

- Temperatura de termoconversión: 800 °C
- Velocidad de calentamiento: 10 °C/min
- Caudal de Nitrógeno: 800 ml N/min
- Duración del experimento: 90 min.

Análisis inmediato

Humedad (H)

Se utilizaron para este análisis las Normas CEFIC de 1986 y las Normas ASTM de 1998.

La humedad se calculó de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\% \text{ de H} = \frac{A - B}{A - C} \times 100 = \frac{g.agua}{g.muestra} \times 100$$

donde:

A : crisol más masa de la muestra original.

B : crisol más masa seca.

C : crisol vacío.

Volátiles (V).

La determinación de volátiles se llevó a cabo en una mufla a 900 °C de acuerdo con la norma ASTM de 1998.

Los cálculos se hicieron según la siguiente expresión:

$$\% MV = \frac{100(B - F) - Mc(B - G)}{(B - G)} \times 100$$

El divisor (B-G) se multiplica por (100-Mc)

B : masa del crisol más la muestra original.

F : masa del crisol más muestra después de tratada.

G : masa del crisol vacío.

Mc: humedad

Ceniza (C)

El crisol con la muestra seca y su tapa, se colocó en la mufla a 650 °C durante un tiempo no inferior a 16 h.

Los cálculos se hicieron por la siguiente expresión:

$$\% C = \frac{F - G}{B - G} \times 100 = \frac{g.ceniza}{g.muestra} \times 100 \quad (22)$$

F: masa en g del crisol más las cenizas.

G : masa en g del crisol vacío.

B : masa en g. del crisol más la muestra.

El por ciento de carbono (Cf), se calculó por diferencia con base en el 100 %.

Obtención de carbones

Posteriormente se obtuvieron carbones a la temperatura de 700 °C y dos horas de residencia sobre la base de los resultados derivados de los estudios en termobalanza.

Para el cálculo del Poder Calórico Inferior (PCI) de la biomasa estudiada y los carbones obtenidos, se utilizó una ecuación que se apoya en los valores de porcentaje de materia volátil y carbono fijo, a su vez es aplicable tanto al material original como a carbonizados, (Cordero *et al.*, 2001).

$$PC = 0,3543 CF + 0,1755 V$$

donde:

pc: poder calórico de la muestra (kJ·g⁻¹)

CF: porcentaje de carbono fijo

V: porcentaje de materia volátil

Análisis estadístico

Para los análisis estadísticos realizados en el estudio de la influencia de la composición química de la madera en su descomposición térmica, se utilizaron las pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis y la prueba SNK de comparación de medias. Para todos los análisis realizados se utilizó el paquete estadístico SPSS para Windows.

RESULTADOS

Composición química

En el Cuadro 1 se muestran los resultados del análisis de la composición química de la materia prima original.

Los resultados expresan los valores promedios de tres determinaciones para cada una de las variables.

Análisis Termogravimétrico

Del análisis termogravimétrico se derivó que posterior a las 2 h y 700 °C la descomposición térmica de la biomasa estudiada no experimenta cambios que justifiquen mayor tiempo del experimento

Análisis inmediato

La prueba Kolmogorov-Smirnov para obtener criterio de normalidad, realizadas a todas las determinaciones que intervinieron en el análisis previo de la madera, no se cumplieron a un nivel significativo del 95 % en las variables empleadas, por lo que fue necesario emplear la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, donde se reflejan diferencia significativas en todas las variables (ceniza, volátiles, carbono fijo, valor calórico de la madera y valor calórico del carbón) (Anexo 1 al Anexo 5) y posteriormente se aplicó la prueba SNK de comparación de medias.

En el Cuadro 2 se muestran los contenidos porcentuales del análisis inmediato (sustancias volátiles, cenizas y carbono fijo) de la madera de la especie estudiada.

CUADRO 1. Contenido porcentual de los componentes de la pared celular.

Especie Lignina (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	
E. saligna 25 %	42.03 (*)	33.14 (*)	24.58 (*)
E. saligna 55 %	41.57 (**)	32.56 (**)	25.35 (**)
E. saligna 85 %	41.87 (***)	29.79 (***)	28.5 (***)

CUADRO 2. Porcentajes en base seca del análisis inmediato y valor calórico de las especies analizadas

	Volátiles%	Ceniza%	Carbono fijo%	Valor calorKJ.g ⁻¹
E. saligna 25 %	84.420 (***)	0.11 (****)	15.464 (*)	20.325 (*)
E. saligna 55 %	84,357 (***)	0,11 (****)	15,283 (*)	20.248 (**)
E. saligna 85 %	83,722 (****)	0,17 (***)	15,114 (*)	20.223 (**)

La misma cantidad de asteriscos significan que no existen diferencias significativas (NS) entre esos valores medios, como resultado de aplicar la prueba SNK de comparación de medias (probabilidad menor que 0.05 se rechaza la hipótesis nula y existe por tanto diferencia entre las medias).

Rendimiento de los carbones

En el Cuadro 3, presentan los resultados acerca de los productos de la pirolisis de las muestras de *Eucalipto Saligna* hasta los 700 °C.

En el Cuadro 4 se muestran los valores calóricos y el análisis inmediato de los carbones obtenidos en la pirolisis, para las tres alturas del fuste comercial, determinada por la ecuación seleccionada.

DISCUSIÓN

Composición química

Los datos reflejados en el Cuadro 1 están en correspondencia con los obtenidos por Márquez *et al.*, 2003, para la misma especie, en condiciones agrometeorológicas diferentes, de la provincia de Pinar del Río, así como por los reportados en la literatura consultada, (Hillis y Udompongsanon, 1990; Cartagena, 1994; Di Blasi *et al.*, 1999; Zanci *et al.*, 2002; Franco *et al.*, 2003).

Se observan diferencias significativas de todos los componentes por separado a las tres alturas del fuste. Los porcentajes de lignina obtenidos aumentan con la altura, consecuencia de la diferencia en cuanto a la fortaleza de los complejos polisacáridos-polisacáridos entre las celulosas y las hemicelulosas presentes, así como con la menor o mayor complejidad en las estructuras de la celulosa referente al grado de polimerización y cristalinidad de la misma a diferentes alturas del árbol. En la parte más joven la lignina es más fácilmente removible, aislable, con

CUADRO 3. Productos de la pirolisis de las muestras de *Eucalipto saligna* hasta los 700 °C.

	E. Saligna 25 %	E. Saligna 55 %	E. Saligna 85 %
Gas	22.56	24.71	26.22
Alquitranes	23.43	21.43	20.08
Agua	29.49	28.26	29.78
Carbón	24.64	24.58	24.47

CUADRO 4. Poder calórico y análisis inmediato de los carbones.

	Volátiles%	Ceniza%	carbonofijo %	Poder calórico(kJ·g ⁻¹)
E. saligna 25 %	16.21 (***)	0.411 (****)	83.37 (*)	32.54 (*)
E. saligna 55 %	17.438 (**)	0.509 (****)	82.050 (***)	32.2950 (**)
E. saligna 85 %	17.34 (**)	0.711 (**)	81.948 (***)	32.24 (**)

La misma cantidad de asteriscos significan que no existen diferencias significativas (NS) entre esos valores medios, como resultado de aplicar la prueba SNK (probabilidad menor que 0.05 se rechaza la hipótesis nula y existe por tanto diferencia entre las medias)

ligeramente bajos contenidos de polisacáridos totales y celulosa, mientras en la parte más baja, la más vieja, al estar tan lignificadas, hace muy difícil la extracción o separación de la lignina, lo que quiere decir que esta sustancia no aumenta con la altura sino que se extrae con mayor facilidad, (Orea *et al.*, 2000; Orea *et al.*, 2004).

Análisis termogravimétrico

Del estudio termogravimétrico (TG) realizado se observó que en el intervalo de valores de temperatura de 200 a 500 °C, se produce la descomposición pirolítica de las muestras originales, base seca (b.s.), de la fase cuantitativamente más significativa del proceso, completándose la descomposición térmica de la hemicelulosa y en su mayor parte de la celulosa, resultados que se confirman con los obtenidos por Cordero, T. *et al.*, 1989; Raveendran, K.; Ganesh, A., 1996; Haiping, Y. *et al.*, 2007.

La completa desvolatilización de la muestra original se produce a temperaturas superiores a 700 °C, resultados que se corroboran por los obtenidos por (Márquez, F. *et al.*, 2001).

Análisis inmediato

Los valores porcentuales de volátiles, cenizas y carbono fijo reflejados en el Cuadro 2, están en el rango de los reportados en la literatura (Zanci *et al.*, 1996; Zanci *et al.*, 2002; Luo *et al.*, 2004; Onay, Ö y Mete Koçkar, 2004).

Se observó diferencia significativa en los valores medios de volátiles al comparar la parte baja (25 %) y media (55 %), con la parte alta (85 %), no observándose diferencias significativas con la altura para el porcentaje de carbono fijo, lo que se corresponde con los valores de lignina reales acorde a la explicación dada anteriormente respecto a la composición de la lignina.

Igualmente se observó diferencia significativa en los valores de ceniza al comparar la parte baja (25 %) y media (55 %), con la parte alta (85 %). Esta diferencia puede ser atribuida a que las sustancias minerales conducidas por el agua a todas las partes del árbol, se concentran en mayor proporción en sus partes terminales más jóvenes.

Rendimiento del carbón obtenido

En los datos del Cuadro 3, se observó un ligero decrecimiento en el rendimiento del carbón con la altura del árbol, lo cual está en correspondencia con el menor porcentaje de lignina en la parte más joven del fuste del árbol (altura de 85 %) y el porcentaje de carbono fijo, lo que demuestra la relación entre ellos; estos resultados están acordes a los reportados en la literatura, (Luo *et al.*, 2004). Al ser considerado lento este proceso de pirolisis, es posible la despolarización y desvolatilización lenta de la biomasa. Como la descomposición de la celulosa es lenta y ocurre a temperaturas inferiores a 300 °C, pueden ocurrir a velocidades de calentamiento baja, incrementándose el rendimiento de carbones a los niveles obtenidos para las maderas (Zanci *et al.*, 1996).

El carbono fijo está directamente relacionado con la masa de lignina por ser ésta la más resistente a la descomposición térmica y por tanto la que más aporta a carbón.

De igual forma se observa una disminución del porcentaje de alquitranes con la altura del árbol lo que se corresponde con el mayor porcentaje de celulosa y hemicelulosa en la parte más baja del bolo y su disminución con la altura. Al comparar estos resultados con otros reportados en la literatura a velocidad de calentamiento de 300 y 700 °C de temperatura (Onay, Ö. y Mete Koçkar, 2004), se observó que para la parte baja del fuste, a la temperatura de 700 °C, hay un comportamiento inverso en cuanto a rendimiento de carbón y gas; o sea, en esas condiciones experimentales, se obtiene mayor rendimiento de carbón que de gas no sólo por la composición química de la biomasa como ya ha sido explicado, sino que puede atribuirse también a las reacciones de desproporcionamiento, polimerización y condensación vía recombinación de volátiles, generalmente vía radicales y que dan lugar al sólido carbonoso (Beis *et al.*, 2002; Onay, Ö.; Mete Koçkar, 2004).

No obstante, para la parte inferior del fuste del árbol se invierten los resultados con un comportamiento similar a los resultados de la literatura citada, habiendo mayor rendimiento en gas que en carbón lo cual se debe a la más fácil desvolatilización de la biomasa en la parte más joven del árbol, ya explicado, así como a la destrucción de los

alquitranes que ocurre a elevadas temperaturas de pirolisis, disminuyendo su porcentaje e incrementándose el rendimiento de gases; similar análisis se reporta en la literatura, (González, J. F. *et al*, 2005).

De los resultados obtenidos de la carbonización a escala de laboratorio, se pueden predecir las posibilidades de utilización de estos carbones desde el punto de vista energético. Los valores que se reflejan en el Cuadro 4, están acorde a los reportados en la literatura para carbones de madera de eucalipto, (Márquez *et al.*, 2001; Zanci *et al.*, 2002; González *et al.*, 2005; Peralta *et al.*, 2005).

Existen diferencias significativas entre los valores calóricos de los carbones, entre la parte baja, media y alta. Se observa el menor valor para la parte alta del fuste del árbol lo que se relaciona con el menor porcentaje de carbono fijo.

CONCLUSIONES

Existen diferencias significativas en cuanto a la composición química de la madera estudiada.

El análisis previo se corresponde con la composición química de la biomasa estudiada. Hay diferencias significativas entre los valores medios de volátiles al comparar la parte baja (25 %) y media (55 %), con la parte alta (85 %). No se observan diferencias significativas entre los porcentajes de carbono fijo relacionados con la altura.

Un ligero decrecimiento en el rendimiento del carbón y del porcentaje de alquitranes, con la altura del árbol, es observado.

Existen diferencias significativas entre los valores calóricos de los carbones, entre la parte baja, media y alta, observándose el menor valor para la parte alta del fuste del árbol.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Proyecto ALFAALE—Thermochemical Conversion of Biomass into energy and fuels por el financiamiento para poder desarrollar la parte experimental de este trabajo, así como al Centro Politécnico de la Universidad de Barcelona que nos permitió desarrollar parte de los experimentos. Asimismo extendemos este agradecimiento al Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente, Universidad de Zaragoza, por su apoyo financiero y experimental

LITERATURA CITADA

ACIKGOZ, C.; ONAY, Ö.; KOÇKAR, Ö. M. 2004. Fast pyrolysis of linseed: product yields and compositions. *J. Anal. Appl. Pirolisis* 71: 417-29.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 1993. Annual book of ASTM Standards, 15.01.

BEIS, S.H.; ONAY, Ö.; KOÇKAR, Ö. M. 2002. Fixed-bed pirolisis of safflower seed: influence of pirolisis parameters on product yields and compositions. *Revista Renewable Energy* 26: 21-32.

BLAND, D. E. 1985. The composition and Analysis of eucalyptus Wood, *Appita* 38 (4): 291-294.

CARTAGENA, M. DEL C. 1994. La biosfera IV: el árbol muerto como fuente de materia prima. In Vian Ortuño, A. (ed). *Introducción a la Química Industrial*. Reverté, Barcelona, España.

CORDERO, T.; GARCÍA HERRUZO, F.; LAHOZ GÓMEZ, C. 1989. Estudio de la pirolisis convencional de madera de Encina (*Quercus rotundifolia*) y pino (*Pinus halepensis*). *An. Quim.* 85 (3): 445-447.

CORDERO T.; MÁRQUEZ F.; RODRÍGUEZ-MIRASOL J.; RODRÍGUEZ J. J. 2001. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate análisis. *Fuel* 80 (11): 1567-1571.

DI BLASI, C.; SIGNORELLI, G.; PORTORICCO, G. 1999. Countercurrent Fixed-Bed Gasification of Biomass at Laboratory. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2571-2581.

FRANCO, C.; PINTO, F.; GULYURTLU, I.; CABRITA, I. 2003. The study of reactions influencing the biomass steam gasification process. *Fuel* 82: 835-842.

GONZÁLEZ, J. F.; RAMIRO, A.; GONZÁLEZ-GARCÍA, CARMEN M.; GAÑÁN, J.; ENCINAR, J. M.; SABIO, E.; RUBIALES, J. 2005. Pyrolysis of Almond Shell. *Energy Applications of Fractions*. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44: 3003-3012.

HAIPING, Y.; RONG, Y.; HANPING, C.; DONG, HO L.; CHUGUANG Z. 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel* 86:1781-1788.

HILLIS, W. E.; UDOMPONGSANON, P. 1990. The proportion of fibres in the bark of *E.globulus* and *E.regnans*. *Appita* 43 (5): 363-366.

LUO, Z.; SHURONG, W.; YANFEN, L.; JINSONG, Z.; YUELING, G.; KEFA, C. 2004. Research on biomass fast pyrolysis for liquid fuel. *Biomass and Bioenergy* 26: 455-462.

MÁRQUEZ F.; CORDERO T.; RODRÍGUEZ-MIRASOL J.; RODRÍGUEZ J. J. 2001. Estudio del potencial energético de biomasa *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* (Pc) y *Pinus tropicalis* Morelet (Pt); *Eucalyptus saligna* Smith (Es), *Eucalyptus citriodora* Hook (Ec) y *Eucalytus pellita* F. Muell (Ep), de la provincia e Pinar del Río. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7 (1): 83-89.

ONAY, Ö.; KOÇKAR, Ö. M. 2004. Fixed-bed pyrolysis of rapeseed (*Brassica napus* L.); *Biomasa and Bioenergy*, 26, 2004, p. 289-99.

OREA-IGARZA U.; CARBALLO-ABREU, L. R.; CORDERO-MACHADO, E. 2000. Estudio del comportamiento térmico de la celulosa de las maderas de Eucalipto *Citriodora* Hook a tres alturas del bolo comercial (25, 55, 85%) mediante calorimetría diferencial de barrido. *Sobre Los Derivados* 34(1).

OREA-IGARZA U.; CARBALLO-ABREU, L. R.; CORDERO-MACHADO, E. 2004. Composición química de tres maderas en la provincia de Pinar del Río, Cuba a tres alturas del bolo comercial Parte N° 2 E. *pellita* F. Muell. *Revista Chapingo Series Forestales y del Ambiente* 10(1): 51-55

PERALTA, D.; PATERSON, N.; DUGWELL, D.; KANDIYOTI, R. 2005. Pyrolysis and CO₂ Gasification of Chinese Coals in a High-Pressure Wire-Mesh Reactor under Conditions Relevant to Entrained-Flow Gasification. *Energy and Fuels* 19: 532-537.

- QIRONG, F.; DIMITRIS, S. A.; DAVID, C. T.; LUCIAN, A. L. 2008. Understanding the pyrolysis of CCA-treated wood Part I. Effect of metal ions. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 81: 60–64.
- RAVEENDRAN, K.; GANESH, A. 1996. Heating value of biomass and biomass pyrolysis products. *Fuel* 75 (15): 1715-1719.
- RODRÍGUEZ-JIMÉNEZ, J.J.; GARCÍA HERRUZO, F.; CORDERO ALCÁNTARA, T. 1990. Posibilidades de aprovechamiento de los residuos lignocelulósicos. *Ing. Química*, mayo: 191-103.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY, 1998. TAPPI Test Methods; TAPPI Press, Atlanta, GA.
- VAN BELLE, J. F.; SCHENKEL, Y. 1998. Energy from residues in the forest industry. *Welt Forum Wald*. Schneverdingen, Germany: p. 3.
- ZANCI, R.; SJÖRTRÖM, K.; BJÖRNBOM, E. 2002. Rapid pyrolysis of agricultural residues at high temperature. *Biomass and Bioenergy*: 23, 357-366.
- ZANCI, R.; SJÖSTROM, K.; BJÖRNBOM, E. 1996. Rapid high temperature pyrolysis of biomass in a free-fall reactor. *Fuel* 75 (5): 545-550.

ANEXOS

ANEXO 1. Valores de probabilidad a partir de la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis.

	Análisis estadístico ^{a,b}						
	Cenizas (%)	Volátiles (%)	Carbono fijo	Valor calórico de la madera	Celulosa (%)	Lignina (%)	Valor calórico del carbón (kJ-g)
Análisis Chi-cuadrado	59.306	54.937	53.782	54.367	61.203	61.067	58.728
diferencial	8	8	8	8	8	8	8

a: análisis de Kruskal Wallis

b: agrupando variable: VAR00003.

ANEXO 2. Prueba SNK para la ceniza.

Ceniza (%)						
Análisis Student-Newman-Keuls ^a						
VAR00003	N	Nivel de confianza= 0,05				
		1	2	3	4	5
8.00	7	8.47E-02				
7.00	7	9.73E-02	9.73E-02			
2.00	7		0.110800			
1.00	7		0.113000			
9.00	7			0.164771		
3.00	7			0.174757		
5.00	7				0.378300	
6.00	7					0.575800
4.00	7					0.585771
Significación		0.122	0.132	0.217	1.000	0.218

a: Número de experimentos realizados: 7.

ANEXO 3. Prueba SNK para los volátiles.

Volátiles (%)					
Análisis Student-Newman-Keuls ^a					
VAR00003	N	nivel de confianza= 0,05			
		1	2	3	4
3.00	7	83.722829			
2.00	7		84.352857		
1.00	7		84.424143		
8.00	7			85.357929	
7.00	7			85.375000	
9.00	7			85.773843	
4.00	7				87.309986
6.00	7				87.380429
5.00	7				87.415443
Significación		1.000	0.748	0.153	0.882

a: Número de experimentos realizados: 7.

ANEXO 4. Prueba SNK para el carbono fijo.

Carbono fijo (%)				
Análisis Student-Newman-Keuls ^a				
VAR00003	N	nivel de confianza= 0,05		
		1	2	3
6.00	7	12.0438		
5.00	7	12.0868		
4.00	7	12.1042		
9.00	7		14.0614	
8.00	7		14.2570	
7.00	7		14.5277	
3.00	7			15.1122
2.00	7			15.2834
1.00	7			15.4629
Significación		0.948	0.052	0.179

a: Número de experimentos realizados: 7.

ANEXO 5 Prueba SNK para el valor calórico.

Valor calórico de la madera (kJ·g⁻¹)					
Análisis Student-Newman-Keuls ^a					
VAR00003	N	nivel de confianza= 0,05			
		1	2	3	4
6.00	7	19.6265			
4.00	7	19.6356			
5.00	7	19.6479			
8.00	7		20.0601		
9.00	7		20.0634		
7.00	7			20.1595	
3.00	7			20.2236	
2.00	7			20.2476	
1.00	7				20.3259
Significación		0.830	0.929	0.053	1.000

a: Número de experimentos realizados: 7.