

Caracterización de la biomasa vegetal “cascarilla de café”

Characterization of vegetable biomass coffee husk

MSc. Enma M. Manals-Cutiño, MSc. Dolores Salas-Tort, Dra.C. Margarita Penedo-Medina

Especialidad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

mpenedo@uo.edu.cu

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar las propiedades físicas y químicas de diferentes clases de tamaño de muestras de cascarilla de café, como parte del estudio de descomposición térmica de las mismas. El estudio granulométrico se realizó aplicando los métodos: acumulativo y diferencial, como resultado se obtuvo el diámetro promedio (D_p) en cada caso. Por el método diferencial el $D_p=1,29$ mm y por el método acumulativo $D_p=1,5$ mm, siendo el error de 13,7 % lo cual es un valor aceptable. Aplicando la metodología experimental se determinaron para cada tamaño de partícula las siguientes propiedades químicas: humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo. En el caso de la humedad y el contenido de carbono fijo no existe una tendencia definida, en cambio al disminuir el diámetro de partícula el contenido de materia volátil disminuye y el contenido de cenizas aumenta. Se realizó un diseño de experimentos en la zona correspondiente a las mayores acumulaciones y con ayuda del programa estadístico STATGRAPHICS Centurion XV se logró determinar la influencia que ejerce el tamaño de partícula en las propiedades estudiadas encontrándose que este tiene una influencia significativa en todos los casos.

Palabras clave: caracterización de biomásas, “cascarilla de café”, caracterización granulométrica.

Abstract

This work has as main objective to evaluate the physical and chemical properties of different sample size classes of coffee husk as part of the thermal decomposition study of the samples. The granulometric study was conducted using methods: cumulative and differential, as result the average diameter (D_p) was obtained in each case. By the differential method the $D_p = 1,29$ mm and by the cumulative method the $D_p = 1,5$ mm, giving a 13,7 % error which is an acceptable value. Applying the experimental methodology the following chemical properties were determined for each particle size: moisture, volatiles, fixed carbon and ashes. For moisture and fixed carbon content there is no definite trend, instead, by decreasing the particle diameter, decreases volatile matter content and ash content increases. Design experiments corresponding to the largest accumulations area was carried out and using the statistical program STATGRAPHICS

Centurion XV it was possible to determine the influence of particle size on the properties studied, it was found that this has a significant influence in all cases performed.

Keywords: characterization of biomasses, coffee husk, size characterization.

Introducción

La biomasa cubre un amplio espectro de materiales orgánicos, y por tal motivo, es considerada una mezcla compleja de polímeros de carbohidratos conocidos como celulosa, hemicelulosa, lignina y pequeñas cantidades de otras sustancias contenidas en la pared celular de las plantas [2].

Dentro de las fuentes renovables de energía existentes, la biomasa se diferencia por permitir la obtención de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos a través de procesos bioquímicos, termoquímicos y fisicoquímicos. La naturaleza y la composición de los productos obtenidos en estos procesos dependen de la composición química del tipo de biomasa tratada y de las condiciones de operación [2].

Como parte de los estudios desarrollados en la Facultad de Ingeniería Química y Agronomía de la Universidad de Oriente referentes al aprovechamiento de la biomasa vegetal se ha desarrollado el presente trabajo, cuyo objetivo es evaluar propiedades físicas y químicas de diferentes clases de tamaño de muestras de cascarilla de café, como parte del estudio de descomposición térmica de las mismas [12].

Fundamentación teórica

Caracterización de la biomasa vegetal

En diferentes países se cuenta con variedades de residuos los cuales son empleados en la búsqueda de fuentes de energía limpias mediante la termo conversión de estos. A continuación se muestra un resumen donde se evidencia que las biomazas suelen caracterizarse en base a análisis próximo (% de humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo) y último (C - H - O - N).

[11] Xianwen pirolizó polvo de madera de pino en un reactor de cama fluidizada circulante donde fue variado el tamaño de partícula, la temperatura de la cama y la posición del alimentado.

En los estudios realizados por Tsai [9] se utilizó la pirolisis rápida para determinar el efecto de los parámetros de proceso como temperatura de pirolisis, velocidad de calentamiento y el tiempo de permanencia sobre el rendimiento de la pirolisis y su composición química.

[10] Wei, realizó la pirolisis rápida de cuatro clases de biomasa (paja de legumbre, tallo de tabaco, aserrín de pino y semilla de albaricoque) con el objetivo de producir gas hidrógeno.

[3] Demiral, pirolizó el bagazo de uva para estudiar la distribución del producto y la composición química e identificar las condiciones óptimas del proceso y así maximizar el rendimiento del bio-aceite.

En la tabla 1 se presenta la caracterización de diferentes tipos de biomasa

Tabla 1- Caracterización de diferentes tipos de biomosas

Biomasa	Hum (%)	V (%)	Cen (%)	CF (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
Pino [11]	5,8	70,7	2,3	21,2	47,9	7,0	41,4	0,1
Paja de arroz [9]	13,61	76,8	9,54	-	50,9	6,04	41,6	0,83
Bagazo de caña [9]	16,07	79,6	4,34	-	58,1	6,05	34,6	0,69
Cascarón de coco [9]	11,26	85,4	3,38	-	63,4	6,73	28,3	0,43
Paja de legumbre [10]	9,8	73,7	1,62	14,84	43,3	5,62	50,3	0,61
Tallo de tabaco [10]	8,54	65,5	9,97	16,0	39,6	4,85	52,3	3,18
Aserrín de pino [10]	5,01	77,7	0,34	16,94	50,3	6,72	42,7	0,16
Semilla de albaricoque [10]	8,52	75,1	16,94	16,17	44,4	5,74	49,4	0,37
Bagazo de uva [3]	6,2	68,4	4,7	20,68	46,6	6,25	45,5	1,67

Humedad - Hum Volátiles - V Ceniza - Cen Carbono Fijo - CF

Al analizar estas caracterizaciones se notó que varían de biomasa en biomasa, no obstante, es común en todas que el % de volátiles tenga los mayores valores, así como que el % de hidrógeno y carbono adquieran los menores valores. Esto es propio de la composición de los materiales lignocelulósicos.

El café y sus características

El pergamino de café o cascarilla es la parte que envuelve el grano inmediatamente después de la capa mucilaginosa y representa alrededor de 12 % del grano de café en base seca (figura 1). Esta cascarilla constituye una excelente fuente de celulosa, y lignina, pentosanos, sílice y cenizas, así como otros compuestos en menor proporción [1].

Un grano de café está formado por las siguientes partes:



Fig. 1- Partes de un grano de café

Descripción del proceso de beneficio de Las Coloradas, Guamá

La biomasa utilizada en nuestra investigación (cascarilla de café) proviene de la beneficiadora de café que se encuentra en “Las Coloradas” municipio Guamá, Santiago de Cuba y fue obtenida a partir del método seco. A continuación se muestra una breve descripción del proceso donde se obtiene esta.

Descripción del proceso

Los granos de café ya despulpados llegan a la beneficiadora donde primeramente se determina su humedad, si esta es menor del 10 % pasa directamente al proceso, si no se aplica el método de beneficio seco hasta que se cumpla este parámetro. Luego los granos pasan hacia una tolva y de ahí hacia una zaranda que se encarga de eliminar los objetos extraños que pueda tener el grano, posteriormente estos granos suben hacia el depósito del molino mediante bandas transportadoras y comienza la operación de molinaje, el grano limpio va hacia un segundo depósito para luego ser pesado y almacenado en sacos; por otra parte cuando se separa el grano de la cáscara una criba impide que se mezclen estos y un extractor acoplado al molino se encarga de la separación en sí. Como parte del estudio se pudo constatar que este residuo del proceso no se

utiliza y que se genera aproximadamente un 23 % de cascarilla por masa de café bruto procesado.

Estudios de termo conversión de la cascarilla de café

Para aprovechar de manera eficiente este residuo y someter el mismo a un sinnúmero de tratamientos con la finalidad de obtener productos orgánicos, es necesario conocer las propiedades tanto químicas como físicas de la cascarilla del café, ya que dichas características determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar.

Como parte de un estudio realizado por Gómez ⁽⁵⁾, acerca del proceso de extracción de palma se caracterizaron diferentes tipos de biomasa como las que se muestran en la tabla 2:

Tabla 2- Caracterización de diferentes tipos de biomasa

Biomasa	Humedad (%)	Volátiles (%)	Ceniza (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
Almendras	6,5	93	1,7	62,5	8,8	26,6	2,1
Afrecho	10,5	81	3,5	59,6	5,5	42,5	2,4
Cascarilla de café	10,1	82	1,2	50,3	5,3	43,8	< 1
Bagazo	15	87	8,1	53,1	4,7	41,7	< 1

[4] Fonseca, reportó que se recogieron muestras de aserrín, cáscara de arroz y cascarilla de café las cuales se analizaron para determinar sus propiedades termoquímicas. A continuación se muestran los resultados alcanzados a través de la tabla 3:

Tabla 3- Propiedades de los residuos

Residuos	Hum (%)	V (%)	Cen (%)	CF (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
Aserrín	9,1	81,8	0,2	18,0	48,3	6,1	45,3	0,2
Cáscara de arroz	11,4	65,9	17,0	17,1	35,5	5,2	42,1	0,2
Cascarilla de café	13,1	73,2	3,7	23,1	47,5	6,4	43,7	-

Humedad - Hum Volátiles - V Ceniza - Cen Carbono Fijo - CF

Influencia del tamaño de partícula en los rendimientos de los productos de pirolisis

[8] S. Şensöz y colaboradores, estudiaron la semilla de colza con el objetivo de determinar el efecto de tamaño de la partícula en los rendimientos del producto, en un horno de cama fija a 500 °C, con una velocidad de calentamiento de 40 °C/min. El tamaño de partícula estuvo en el rango de 0,224 – 1,8 mm. La biomasa estudiada tiene las características que se presentan en la tabla 4:

Tabla 4- Características de la biomasa semilla de colza

Biomasa: semilla de colza (<i>Brassica napus</i> L)	
Características	% másico
Humedad	4,0
Volátiles	86,04
Carbono fijo	8,23
Cenizas	5,73
Carbono	52,25
Hidrógeno	8,06
Oxígeno	35,78
Nitrógeno	3,91

La figura 2 representa el porcentaje másico, en base seca, de los productos obtenidos de la pirolisis (aceite, carbón y gas) en relación con la masa de semilla de colza alimentada a la temperatura de 500°C.

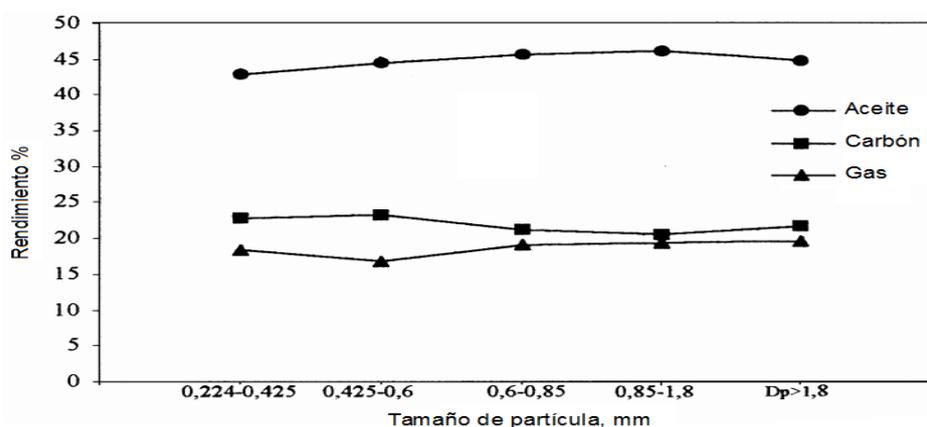


Fig. 2 Efecto del tamaño de partícula en el rendimiento de los productos de la pirolisis

Como se puede observar el rendimiento mayor es de aceite (46,1 %) para las partículas de 0,85 – 1,8 mm, y el rendimiento de gases tiende a aumentar con el tamaño de partícula; siendo los rendimientos del producto de pirolisis medianamente independientes de tamaño de la partícula para la semilla de colza.

Al analizar la influencia del tamaño de partícula en los estudios realizados por Pattiya [6] (dos residuos agrícolas de plantaciones de yuca, particularmente el rizoma de la yuca (CR) y el tallo de la yuca (CS)), este presenta los rendimientos de bio-aceite, carbón y gas provenientes de la pirolisis rápida de CR con un filtro de vapor incorporado. El tamaño de la partícula de la biomasa fue seleccionado como: 0–250 (125), 250–425 (337,5), 212–600 (406), y 425–600 (512,5) μm . Ver figura 3.

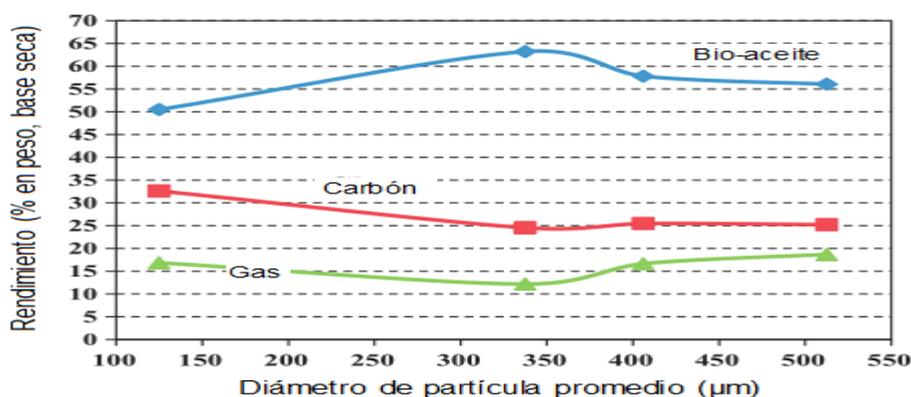


Fig. 3 Efecto del tamaño de la partícula en los rendimientos de productos derivados de la pirolisis rápida del rizoma de la yuca

Los resultados demostraron que el rendimiento de bio-aceite aumenta con el tamaño de la partícula de la biomasa hasta 250–425 (337,5) μm y hay una tendencia a que pase lo contrario para los rendimientos de carbón y gas. La razón por la que el tamaño de la partícula de la biomasa de 0–250 μm dio rendimiento mínimo de bio-aceite podría ser debido a dos razones. Lo primero está relacionado con el contenido alto de ceniza de la biomasa. La segunda razón está relacionada con la naturaleza hidrodinámica de las partículas finas de la biomasa. Por consiguiente, es recomendable que un rango demasiado pequeño del tamaño de partícula de la biomasa debería ser evitado para la producción de bio-aceite por vía pirolisis rápida.

La razón por la que el tamaño de partícula de la biomasa más alto que 337,5 μm hizo más pequeño el rendimiento bio-aceite podría estar relacionado con la

transferencia de calor. Las partículas grandes no son usualmente pirolizadas completamente y sólo reacciones restringidas, como la deshidratación, pueden tener lugar en la parte interior del alimentado, lo cual usualmente conduce a la formación de carbón.

Materiales, equipos y métodos

Materia Prima: cascarilla de café

Equipos:

- Balanza Analítica marca SARTORIUS. Modelo BP124S, con un valor máximo de 120 g y un mínimo de 0,1 mg, voltaje de 115-230V, 50-60Hz, de procedencia alemana, utilizada para medir masa.
- Estufa modelo DHG-9146A, electrotérmica, temperatura máxima. 200°C, marca China (Shanghai Pudong Rongfing Scientific Instrument).
- Desecadora con cama desecante de sílica gel.
- Mufla: Nabertherm. Modelo L9/S, con un valor máximo de 1100°C, voltaje 230V, 50-60Hz, 13A y 3KW de fabricación Alemana.
- Tamizadora marca VEBMLM LABORTECHNIK ILMENAU, voltaje 220V y 60Hz.

Caracterización de la materia prima. Técnicas aplicadas

Para desarrollar el estudio de caracterización de la biomasa, se procedió primeramente a la selección de las muestras de cascarilla de café. Para ello, se aplicó el método de cuarteo manual de Cono y anillo. Las muestras, según su masa, fueron colocadas en un juego de tamices con la siguiente estructura de tamaños: 6,3; 4,76; 3,36; 2,5; 1,69; 1,19; 0,85; 0,59; 0,35; 0,297; 0,25; 0.149 mm siendo el tiempo de tamizado de 20 min.

Análisis granulométrico por tamizado

Separación y clasificación de sólidos [7]

El conocimiento de la composición granulométrica de los materiales es indispensable para el ingeniero que estudia proceso o proyecta sistemas donde intervienen sólidos finamente divididos.

Atendiendo a que el tamaño de partícula ejerce una gran influencia en los rendimientos de los productos de la pirolisis se realizó la caracterización granulométrica de la cascarilla de café. Para hacer la representación del análisis se usan dos métodos diferentes: diferencial y acumulativo.

El análisis por tamizado permite calcular el diámetro promedio (D_p), de las partículas contenidas en una muestra determinada. También permite realizar el cálculo de la superficie específica del material, cuando se cuenta con datos para ello.

Fórmulas fundamentales

El diámetro de una muestra con una distribución de tamaño dada se calcula a partir de la distribución diferencial empleando la siguiente ecuación:

$$D_p = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{D_{pi}} \right)} \dots \dots \dots (1)$$

Luego fueron evaluadas las características químicas de esta biomasa para cada tamaño de partícula obtenido en base a la determinación del contenido de humedad, compuestos volátiles, carbono fijo y cenizas.

Fórmulas fundamentales

$$\%Humedad = \frac{m_h - m_s}{m_s} \cdot 100 \dots \dots \dots (2)$$

donde

m_h : masa de sólido húmedo y m_s : masa de sólido seco en gramos (g).

$$\%volátiles = \frac{m_s - m_{nv}}{m_s} \cdot 100 \dots \dots \dots (3)$$

donde

m_s : masa seca y m_{nv} : masa de no volátiles, que es lo que queda en el crisol al realizar la prueba de volátiles en g

$$\%cenizas = \frac{m_{cen}}{m_s} \cdot 100 \dots \dots \dots (4)$$

$$\%c.fijo = \frac{m_{nv} - m_{cen}}{m_s} \cdot 100 \dots \dots \dots (5)$$

donde

m_{cen} : masa de cenizas, m_{nv} : masa de no volátiles, que es lo que queda en el crisol al realizar la prueba de volátiles y m_s : masa seca en g.

Análisis estadístico para determinar la dependencia de las propiedades químicas de la cascarilla de café con los diámetros de partículas obtenidos

Los análisis estadísticos se realizaron aplicando el programa STATGRAPHICS Centurion XV y un análisis de regresión simple. Con el objetivo de analizar la influencia del diámetro de partícula en las propiedades químicas determinadas, se planificó un diseño de experimentos 3^1 , con un factor experimental, cuatro variables de respuesta, dando lugar a 12 experimentos, en la zona correspondiente a las mayores acumulaciones durante el estudio granulométrico; de acuerdo a lo planteado en la tabla 5.

Tabla 5- Niveles y respuestas de los análisis estadísticos

Factores	Niveles	Respuestas
Dp (mm)	3	% Humedad
0,59	-1	% Materia volátil
1,69	0	% Cenizas
3,36	1	% Carbono fijo

Resultados y discusión

Análisis granulométrico del bagazo de caña

En la tabla 6 se muestra el resultado de la determinación del diámetro promedio de partículas de las muestras analizadas, aplicando el método diferencial y auxiliándonos de la ecuación 1.

Tabla 6- Diámetros promedios de partículas de las diferentes muestras por el método diferencial

Muestra I	Dp _m (mm)	Muestra II	Dp _m (mm)
$m_{1,1} = 194,16$ g	1,295	$m_{2,1} = 126,13$ g	1,215
$m_{1,2} = 199,24$ g	1,137	$m_{2,2} = 127,63$ g	1,15

Al graficar para el método diferencial se observa que, independientemente de la muestra, se obtiene el mismo comportamiento de distribución granulométrica, es por ello que al concluir este estudio se determinaron las restantes propiedades solo a una de las muestras analizadas.

Las mayores acumulaciones fueron obtenidas para partículas mayores de 0,59 mm y hasta 3,36 mm de diámetro. En la figura 1 se muestra el gráfico por el método acumulativo de una de la muestra I, en el punto de intercepción encontramos el diámetro promedio. El diámetro promedio de partícula por el método acumulativo es de 1,55 mm para la muestra I y de 1,5 mm para la muestra II, mientras que para las mismas muestras a través de la ecuación de distribución diferencial es de 1,295 mm y 1,214 mm respectivamente. Por ambos métodos se obtiene un diámetro de partícula relativamente cercano, siendo el % de error menor de 20, lo cual es aceptable en estos casos.

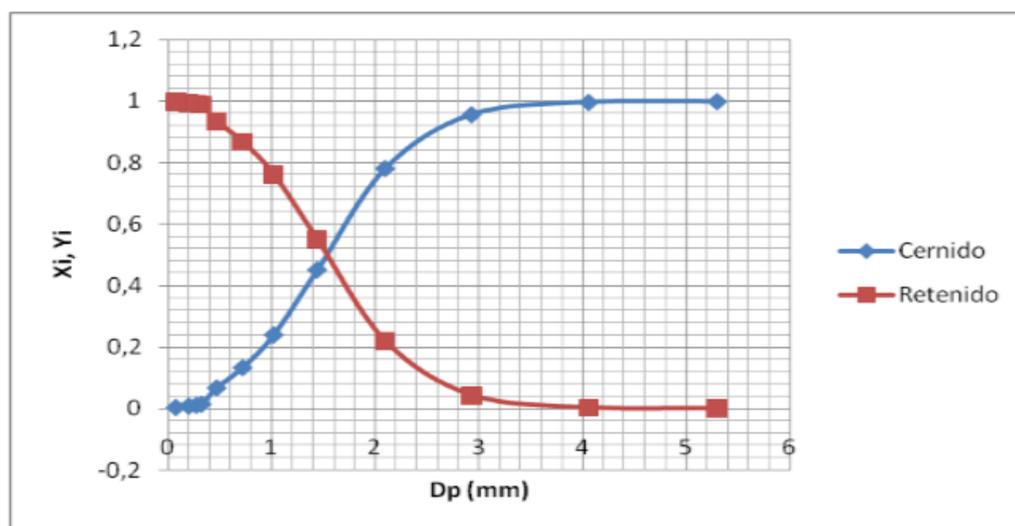


Fig.4- Método Acumulativo de la Muestra I

Resultados de la determinación del contenido de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo de la cascarilla de café

La determinación del contenido de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo se realizó para cada una de las clases de tamaño de partículas obtenidas en el análisis por tamizado. Se realizaron cinco réplicas para cada una de estas propiedades, lo cual permitió hacer los análisis estadísticos correspondientes y las valoraciones necesarias para arribar a conclusiones.

Utilizando diagramas de barra, se presentan a continuación los resultados obtenidos. En el caso de la humedad (figura 5) los valores oscilan entre 9,86 % y 12,33 %, sin una tendencia definida. Se puede observar una tendencia a la disminución del contenido de volátiles con la disminución del diámetro de las partículas (figura 6). De forma opuesta el contenido de cenizas se incrementó con la disminución del diámetro de partícula (figura 7). Por último para el caso del contenido de carbono fijo (figura 8) se obtuvieron valores entre 18,39 % y 24,09 %, para este parámetro tampoco se obtiene un comportamiento definido.

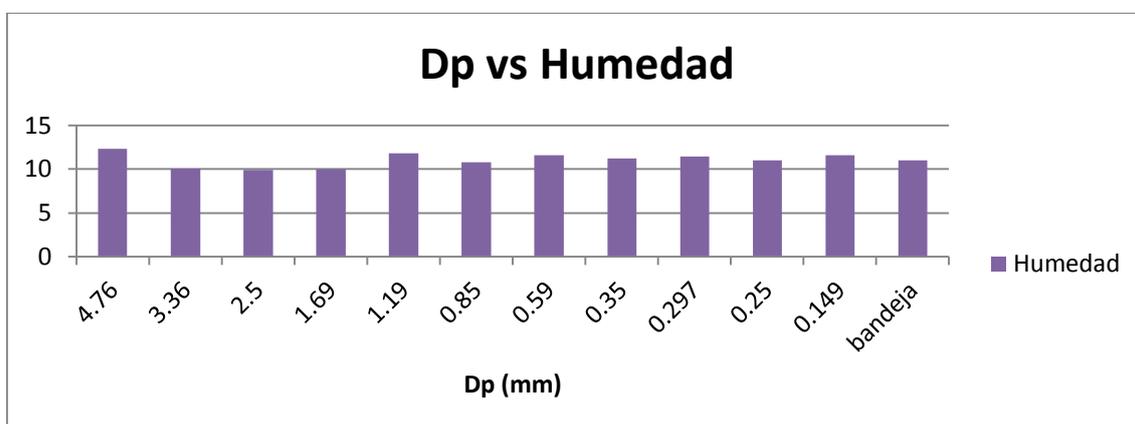


Fig. 5 Contenido de humedad de los diferentes tamaños de partículas

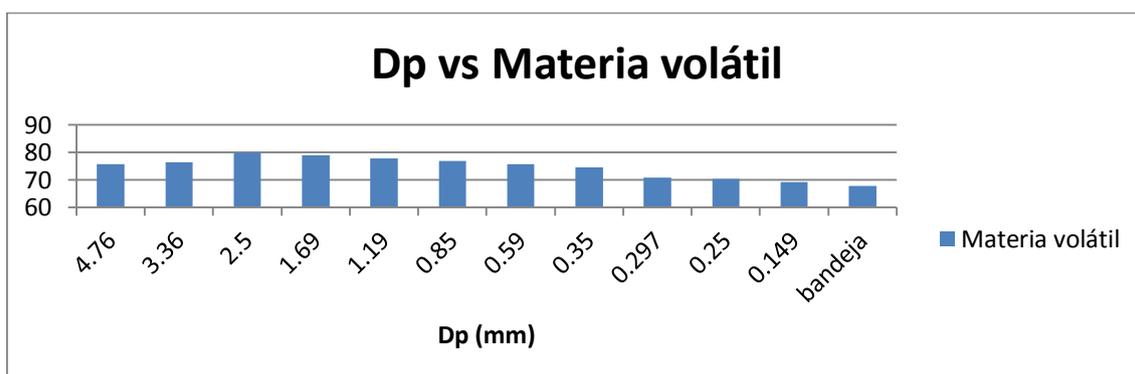


Fig. 6 Contenido de materia volátil de los diferentes tamaños de partículas

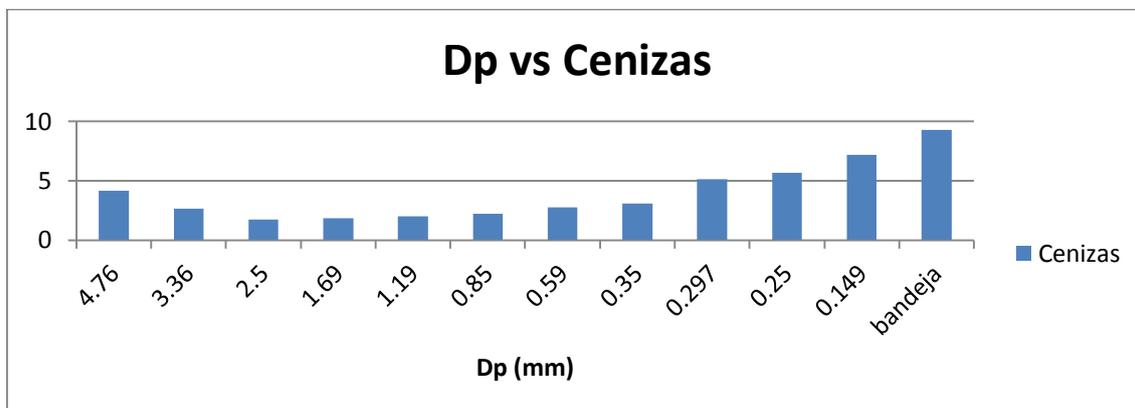


Fig. 7 Contenido de cenizas de los diferentes tamaños de partículas

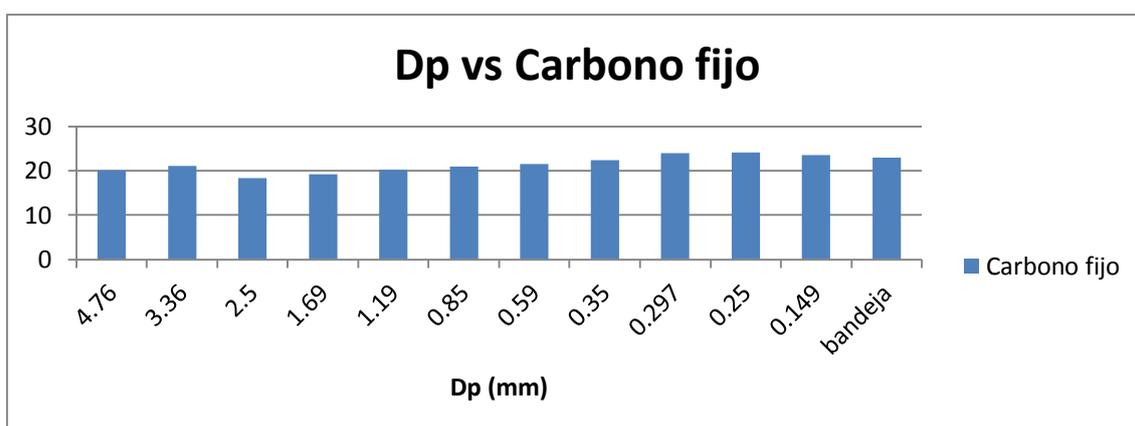


Fig. 8 Contenido de carbono fijo de los diferentes tamaños de partículas

Todos los resultados antes mostrados se analizaron estadísticamente, comprobándose que siguen una distribución normal, estando el sesgo y la curtosis estandarizada en el rango de -2 a +2. Además, independientemente del diámetro de partícula las propiedades químicas determinadas coinciden con los valores reportados en la literatura [4, 5].

Resultados del estudio de la dependencia de la humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo con el diámetro de partícula

Para realizar este análisis se aplicará el diseño estadístico propuesto en el capítulo anterior. Los diámetros de partícula escogidos se corresponden a la zona (0,59 mm – 3,36 mm) donde se encuentran las mayores acumulaciones de la biomasa a partir del análisis granulométrico realizado. Se realizaron las pruebas F, las pruebas de múltiples rangos y las medias. Como resultado se obtuvo que el diámetro de partícula influye en todas las propiedades ya que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las

propiedades entre un nivel de D_{pi} y otro, con un nivel del 95% de confianza.

Obteniéndose en cada caso las siguientes correlaciones matemáticas:

$$\text{Humedad} = 9,486\ 93 + 1,183\ 44/D_p \quad \text{Materia volátil} = 77,863 - 1,036\ 33/D_p$$

$$\text{Cenizas} = 2,171\ 82 + 0,275\ 755/D_p \quad \text{Carbono fijo} = 19,964\ 6 + 0,760\ 532/D_p$$

Conclusiones

- 1. Los resultados obtenidos en este trabajo permitieron evaluar las propiedades físicas y químicas de diferentes clases de tamaño de muestras de cascarilla de café, como parte del estudio de descomposición térmica de las mismas. Se realizó el análisis granulométrico encontrándose las mayores acumulaciones en el rango de 0,59 mm a 3,36 mm. Del análisis químico resultó que: al disminuir el diámetro de partícula el contenido de materia volátil disminuye y el contenido de cenizas aumenta. Para el caso de la humedad y el carbono fijo no existe una tendencia definida entre el diámetro de partícula y la variación de estas propiedades, las cuales oscilan arbitrariamente. Se determinó que el diámetro de partículas influye en la variación de todas las propiedades.**

NOMENCLATURA

x_i	Cernido de la clase i
D_p	Diámetro promedio de partículas
D_{pi}	Diámetro medio de la fracción x_i i
D_{pai}	Abertura del tamiz
Δx_i	Fracción en peso
m_h	Masa de sólido húmedo,
m_s	Masa de sólido seco
m_{nv}	masa de no volátiles
m_{cen}	masa de cenizas
p_i	Peso de la muestra de cada tamiz
y_i	Retenido de la clase i

Referencias bibliográficas

1. AKHTAR, J *et al.* "A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012,16, pp. 5101-5109.
2. DEL TORO, Y. "Obtención y caracterización de líquidos y carbón obtenidos por la pirolisis del aserrín de Acacia", Trabajo de Diploma, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente. Cuba, 2012.
3. DEMIRAL, İ *et al.* "Pyrolysis of grape bagasse: effect of pyrolysis conditions on the product yields and characterization of the liquid product". *Bioresource technology*, 2011,102, pp. 3946-3951.
4. FONSECA, F *et al.* "Biomass briquetting and its perspectives in Brazil". *Biomass and bioenergy*, 2011,35, pp. 236-242.
5. GÓMEZ, A *et al.* "Transformación termoquímica de la biomasa residual del proceso de extracción del aceite de palma: tecnologías y perspectivas". *Revista Palmas*, 2004, 25 (especial), pp. 388-397.
6. PATTIYA, A *et al.* "Production of bio-oil via fast pyrolysis of agricultural residues from cassava plantations in a fluidised-bed reactor with a hot vapour filtration unit". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012, 95, pp. 227-235.
7. ROSABAL VEGA J.; GARCELL-PUYÁNS, L., "Hidrodinámica y separaciones mecánicas", Tomo I, 2da ed., La Habana: ed. Félix Varela, 2006, p. 295 ISBN: 959-258-982-8.
8. ŞENSÖZ, S *et al.* "Influence of particle size on the pyrolysis of rapeseed (*Brassica napus* L.): fuel properties of bio-oil". *Biomass and Bioenergy*, 2000, 19, pp. 271-279.
9. TSAI, W *et al.* "Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2006, 76, pp. 230-237.
10. WEI, L. *et al.* "Characteristics of fast pyrolysis of biomass in a free fall reactor". *Fuel Processing Technology*, 2006, 87, pp. 863-871.
11. XIANWEN, D. *et al.* "The fast pyrolysis of biomass in CFB reactor". *Energy & Fuels*, 2000, 14, pp. 552-557.

12. MANALS CUTIÑO E.M. *et al*, "Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal" *Tecnología Química*, 35(2), 2015, pp.179-192.

13. Sitios de Internet

http://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria18/CT_L_IE%20La_cascarilla_de_cafe_como_mater.pdf

