

**Artículo Original**

**PROPIEDADES DEL MARABÚ (*DICHOSTACHYS CINEREA L.*)  
COSECHADO CON MÁQUINAS, COMO COMBUSTIBLE PARA LA  
GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD  
(PRIMERA PARTE)**

**PROPERTIES OF MARABÚ (*DICHOSTACHYS CINEREA L.*) HARVESTED  
WITH MACHINES AS FUEL FOR ELECTRICITY GENERATION  
(FIRST PART)**

Angel Rubio-González <sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0890-5475>  
Pedro Jesús Iturria Quintero <sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9134-4209>  
Lizet Rodríguez-Machín <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8251-4440>  
Delvis Palmero Marín <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3524-5054>

<sup>1</sup> Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní, km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

<sup>2</sup> Departamento de Licenciatura Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní, km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Junio 13, 2020; Revisado: Agosto 15, 2020; Aceptado: Agosto 20, 2020

**RESUMEN**

**Introducción:**

El marabú, *Dichrostachys cinerea* (L.), está identificado en Cuba como una importante fuente de biomasa para la generación de electricidad, para lo cual se demandan grandes cantidades, lo que obliga a la mecanización de su cosecha. Sus propiedades obtenidas bajo condiciones de mecanización no han sido estudiadas a profundidad.

**Objetivo:**

Determinar la composición elemental, el análisis inmediato, el contenido de ceniza, la composición química de la ceniza y el calor de combustión del marabú cosechado con la máquina BMH-480 con el cabezal H 600.

**Materiales y Métodos:**

Mediante observaciones directas del proceso de cosecha se determinaron los factores que podían tener mayor influencia en las propiedades de las muestras correspondientes del marabú cosechado y se determinaron sus propiedades en varios laboratorios.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

\* Autor para la correspondencia: Angel Rubio, Email: [arubio@uclv.edu.cu](mailto:arubio@uclv.edu.cu)



### **Resultados y Discusión:**

En esta primera parte, de una serie de dos artículos, se presentan varias de las propiedades más importantes del marabú cosechado con máquina y la dependencia de las mismas con la densidad del campo y la altura de corte de la máquina.

### **Conclusiones:**

Se determinó la composición elemental, el análisis inmediato y el calor específico de combustión de la masa seca (superior 19,15 MJ/kg e inferior 17,85 MJ/kg). Se encontró una tendencia al incremento del calor de combustión con la altura de corte, y el valor medio del contenido de ceniza varió entre 4,07 y 4,45 %.

**Palabras clave:** biomasa; calor de combustión; contenido de ceniza; generación eléctrica; industria azucarera.

### **ABSTRACT**

#### **Introduction:**

*Marabú, Dichrostachys cinerea (L.)*, is identified as an important source of biomass for electricity generation in Cuba, so large quantities are demanded, forcing its harvest mechanization. Its obtained properties under mechanized conditions have not been profundity studied.

#### **Objective:**

To determine elemental composition, proximate analysis, ash content, ash chemical composition and heat value of *marabú* harvested with the BMH-480 machine with H 600 head as fuel.

#### **Materials and Methods:**

By direct harvesting process observations, the factors that could have the greatest influence on *marabú* as a fuel, properties, were determined. Harvested *marabú* corresponding samples were obtained and their properties were determined in several laboratories.

#### **Results and Discussion:**

In the first part of a two articles series, several of the most important properties of mechanically harvested *marabú* and their dependence with field density and machine cutting height, are presented.

#### **Conclusions:**

Elemental composition, proximate analysis and dry mass combustion specific heat (higher 19,15 MJ/kg and lower 17,85 MJ/kg) were determined. A tendency to increase the heat of combustion with the cutting height was found and ash content mean value varied between 4,07 and 4,45%.

**Keywords:** biomass; heating value; ash content; electricity generation; sugar industry.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El presente estudio de las propiedades del marabú, *Dichrostachys cinerea (L.)* como combustible, se ha dividido en dos partes. La primera abarca: la composición elemental, el análisis inmediato, el contenido de ceniza, la composición química de la ceniza y el

calor de combustión. La segunda parte incluye: la humedad y temperatura de la pila de marabú a la intemperie en función del tiempo, la composición microbiana, la granulometría y el ángulo de reposo de la pila.

La agroindustria azucarera, a base de caña de azúcar, es una importante fuente de biomasa (bagazo y residuos agrícolas cañeros) la que constituye una trascendental fuente renovable de energía para la generación de electricidad; pero, esta industria tiene el inconveniente de que solo labora una parte del año, lo que hace poco rentable las inversiones para la generación de electricidad. Para minimizar este problema se trabajan dos vías, la hibridación de su biomasa y la energía solar térmica (Konrad et al., 2015) y (Herrera et al., 2019) y el uso de combustibles complementarios (fósiles y renovables) para generar electricidad la mayor parte del año (Rubio-González et al., 2019).

Para el año 2030, Cuba se ha propuesto generar el 14 % de su electricidad con biomasa. Esta meta tiene su sustento en la construcción de un grupo de bioeléctricas (plantas de generación de electricidad con biomasa cañera y altos parámetros de vapor) anexas a centrales azucareros, pero dicha biomasa cañera no es suficiente para que la planta opere largos períodos (al menos 300 días al año) que hagan favorables los indicadores financieros, en especial el período de recuperación de la inversión. Lo anterior ha llevado a la búsqueda de otras biomasa que puedan ser empleadas como combustibles complementarios y que permitan operar un tiempo adecuado.

El marabú existe en Cuba en grandes cantidades, se estiman 1,14 millones de ha con una densidad media de 37 t/ha (Hernández et al., 2017). Esto ha hecho que se identifique como un importante combustible complementario para las bioeléctricas (MINAG, 2019), aunque tiene una limitante, pues es finito en el tiempo, ya que las tierras cultivables que se liberen al cosecharlo deberán dedicarse a la producción de alimentos (Vidal et al., 2015).

Durante años, se han realizado muchos estudios del marabú con diferentes finalidades (producción de carbón vegetal, carbón activado y energía) pero prácticamente todos han tenido la característica que las muestras tomadas han sido del tronco y ramas gruesas y con criterios selectivos, en ningún caso se encontraron estudios amplios con las condiciones con que se obtiene al ser cosechado con una máquina. Los estudios existentes, aunque con esa característica apuntada, tienen un importante valor informativo y comparativo.

Los análisis elementales de marabú, reportados, presentan un bajo contenido de carbono y alto de oxígeno, lo que se corresponde con un combustible orgánico joven. El reporte de presencia de azufre y cloro en su composición resulta interesante por tratarse de una biomasa, mientras que el contenido de ceniza resulta típico para este tipo de biomasa de origen forestal (C= 46,34-49,40; H=3,33-6,12; N=0,44-0,79; O=40,24-49,28; S=0,05-0,49; Cl=0,06 y Ceniza=2,35-3,4 todos en por ciento de masa seca); en cuanto a análisis inmediato los valores reportados se encuentran en rangos estrechos (Carbono fijo=19,23-19,34 % y Volátiles=77,26-78,9 %) (Abreu-Naranjo et al., 2010); (Travieso y Kaltschmitt, 2012) y (Cantos et al., 2017).

El calor de combustión inferior de la masa seca se reporta que oscila entre 16,24 y 17,04 MJ/kg, mientras que el superior lo hace entre 18,06 y 20,20 MJ/kg (Abreu-Naranjo et al., 2010); (Guyat-Dupuy et al., 2014); (Cantos et al., 2017); (Alba-Reyes et al., 2018) e (INAF, 2018).

La composición de la ceniza se encontró solo en (Travieso y Kaltschmitt, 2012), donde se destaca como elemento predominante el Ca y se da el índice de álcali ( $0,08 \text{ kg}_{\text{alcali}}/\text{GJ}$ ) el que reporta como inferior al de otras biomásas y similar al del bagazo.

En Cuba, durante los años 2011 al 2015, se llevó a cabo el proyecto Aprovechamiento de la biomasa de marabú y otras especies energéticas como combustible en la generación de electricidad y recuperación ambiental en Camagüey, pero en sus artículos e informes no se encontraron reportes de propiedades como combustible del marabú cosechado mecanizadamente (Martínez et al., 2015) y (Paredes y Padrón, 2015).

Las bioeléctricas demandan grandes cantidades de marabú como combustible, lo que obliga a la mecanización de su cosecha, es de suponer que las propiedades de la biomasa obtenida mecanizadamente, sean diferentes a las ya estudiadas, pues esta biomasa incluye todas las partes de la planta (tronco, ramas gruesas y finas, hojas y flores) y tierra por la forma de cosecharla. Esta posible diferencia lleva a la necesidad de evaluar sus propiedades, por lo que el presente trabajo tiene como objetivo: determinar la composición elemental, el análisis inmediato, el contenido de ceniza, la composición química de la ceniza y el calor de combustión del marabú como combustible, cosechado con la máquina BMH-480 con el cabezal H 600.

Adicionalmente, el conocimiento de la influencia de los factores a estudiar, en las propiedades del marabú cosechado, contribuirá a establecer estrategias de corte para su abasto a las bioeléctricas.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

En la metodología establecida para el estudio de las propiedades y que a continuación se describe: se decidieron dos variables a considerar: densidad de campo (masa de biomasa/área) y condiciones de la máquina durante la cosecha (altura de corte). Se tuvieron como constantes, a saber: tipo de suelo (pardo) y condiciones climáticas de la cosecha (seca). Las muestras proceden de la biomasa cosechada con la máquina BMH 480 con el cabezal H 600, que es la importada en el país para estas labores. Las variaciones previstas para las variables consideradas fueron:

- Densidad de campo: 1 Alta ( $\approx 100 \text{ t/ha}$ ), 2 Media ( $\approx 75 \text{ t/ha}$ ), 3 Baja ( $\approx 50 \text{ t/ha}$ ).
- Altura de corte: 1 Alta (25 cm), 2 Baja (8 cm)

Las densidades de campo y las alturas de corte se establecieron a partir de la experiencia de los operadores de las máquinas y las características de éstas. Las muestras para los estudios se tomaron en áreas de la Empresa La Cuba, provincia de Ciego de Ávila, Cuba. Una vez efectuada la cosecha por la máquina (nunca menos de 3 t) la biomasa era descargada en el terreno formando una pila, de la que de forma manual se tomaba la muestra (mínimo 3, de diferentes puntos de la pila y de aproximadamente 1 kg). El material se mezclaba y se reducía su humedad (desde humedad natural hasta la de equilibrio 10 -12 %) en una estufa para poder tritarlo en un molino de cuchillas, hasta obtener un polvo (partículas menores de 1 mm). El material obtenido se dividió en partes iguales para las diferentes pruebas. La selección de la muestra final, para las diferentes pruebas, se realizó mediante un sistema de cuarteo.

El análisis elemental se realizó en el Department of Green Chemistry and Technology (DGChT) de la Universidad de Gante (UGent) en Bélgica. Se utilizó el analizador

Thermo Scientific™ FLASH 2000 CHNS/O, calibrado con estándares de metionina, BBOT y cisteína. El oxígeno se determinó por diferencia. Cada muestra (de masa seca) se evaluó por triplicado.

El análisis inmediato se realizó en la institución belga ya mencionada. Los volátiles se determinaron por la norma (ASTM E872-82, 2013) y la ceniza por la (ASTM E1755-01, 2015). El carbono fijo se determinó por diferencia. Cada muestra (de masa seca) se evaluó por duplicado.

El contenido de ceniza se replicó en el Laboratorio de Bioenergía del Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En las pruebas se empleó la mufla Felisa, modelo FE-340 y se siguió la norma (NMX-F-284-SCFI, 2011). Las muestras se evaluaron por triplicado y para la masa de trabajo (humedad diferente de cero). La humedad se determinó con el horno Riossa, modelo HD-35 y se empleó la norma (NOM-247-SSA1, 2008). Los resultados se llevaron a masa seca mediante cálculos.

Para la composición química de la ceniza, las muestras fueron reducidas a ceniza en el Laboratorio de Análisis Químico de la UCLV y los análisis se realizaron en el Centro de Investigaciones Agropecuarias (CIAP) de la UCLV, mediante absorción atómica con el Espectrofotómetro Pye Unicam SP-9. Esto permitió determinar la composición en porcentaje de iones y mediante conversión analítica se obtuvieron los porcentajes de los óxidos correspondientes. Los iones de Si, Al y P no pudieron ser determinados.

El calor de combustión se evaluó por dos vías. La primera, se calculó por el modelo de Channiwala y Parikh referido en (Wigley et al., 2016) teniendo en cuenta la composición elemental y el contenido de ceniza, se efectuó con los datos obtenidos en Bélgica (masa seca). La segunda, se determinó la humedad de cada muestra y se midió en un calorímetro el calor de combustión superior para la masa de trabajo (tres repeticiones) y se calculó su valor para la masa seca. Estas pruebas se hicieron en la UNAM, con el calorímetro 6400 Automatic Isoperibol Calorimeter de Parr Instruments Company; se utilizó la norma (ISO 1928, 2009) y (BS 1016-5, 1967).

Con vista a ampliar la información, se evaluó el contenido de ceniza de las partes de la planta en la UNAM y en el Laboratorio de Análisis Químico de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV) utilizándose: mufla Undian, estufa Selecta y balanza analítica Sartorius. Las muestras seleccionadas fueron de la madera (A), las ramas gruesas (B), la corteza (C), los rebrotes (D) y las hojas (E). Todas las muestras se tomaron de forma manual, de un mismo campo y de varias plantas, y fueron secadas en estufa y molidas. Cada muestra a analizar se obtuvo por cuarteo.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados del análisis elemental se muestran en la Tabla 1. Observando los valores obtenidos puede notarse una ligera tendencia al incremento del C y el H con el aumento de la altura de corte y por el contrario una disminución del O. El N tiene un comportamiento aleatorio. La densidad del campo no ejerce influencia. Los valores promedio de todas las muestras, en por ciento de la masa orgánica seca, fueron: C=44,43; H=5,75, N=1,35; O=48,47 y S no se detectó. Comparando los valores promedio con los de (Cantos et al., 2017) que los da también para la masa orgánica seca, se puede ver que el C resulta ligeramente menor, el H y el N por encima y el O en

un rango similar.

**Tabla 1.** Composición elemental de la masa orgánica seca (%)

<i>Densidad del campo</i>	<i>Altura de corte</i>	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>S</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>Q<sup>s</sup></i>
Alta	Baja	42,9	5,4	ND	1,3	50,4	20,53
Media	Baja	44,1	5,8	ND	1,4	48,7	21,45
Baja	Baja	43,2	5,5	ND	1,4	49,9	20,77
Alta	Alta	45,6	5,9	ND	1,1	47,4	22,16
Media	Alta	45,6	6,0	ND	1,2	47,2	22,22
Baja	Alta	45,2	5,9	ND	1,7	47,2	22,03
Promedio		44,43	5,75	ND	1,35	48,47	21,53
ND- No detectado							
Q <sup>s</sup> - Calor específico de combustión superior (MJ/kg)							

Los análisis inmediatos se muestran en la Tabla 2. Se observa en este caso una ligera tendencia a incrementar los volátiles con la altura de corte y a una muy ligera disminución del carbono fijo. La densidad del campo no ejerce influencia tampoco en este caso. Los valores promedio de todas las muestras, en por ciento de la masa seca, fueron: Volátiles 72,28; Carbono fijo 23,65 y Ceniza 4,07. Comparando estos valores con los reportados en la introducción se encuentra que los volátiles disminuyen un 6,45 % respecto al menor valor, el carbono fijo incrementa un 22,28 % y la ceniza incrementa un 19,71 % estos dos últimos respecto a los valores superiores reportados. El contenido de ceniza evaluado en México se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 2.** Análisis inmediato de la masa seca (%)

<i>Densidad del campo</i>	<i>Altura de corte</i>	<i>Volátiles (% de masa seca)</i>	<i>Carbono fijo (% de masa seca)</i>	<i>Ceniza (% de masa seca)</i>
Alta	Baja	72,2	24,0	3,8
Media	Baja	71,8	23,8	4,4
Baja	Baja	70,6	23,7	5,7
Alta	Alta	72,7	23,7	3,6
Media	Alta	73,0	23,4	3,6
Baja	Alta	73,4	23,3	3,3
Promedio		72,28	23,65	4,07

**Tabla 3.** Contenido de ceniza del marabú

<i>Densidad del campo</i>	<i>Altura de corte</i>	<i>Muestra No</i>	<i>Masa de trabajo (% en masa de trabajo)</i>		<i>Masa seca (% en masa seca)</i>	
			<i>Humedad</i>	<i>Ceniza</i>	<i>Ceniza</i>	<i>Ceniza Promedio</i>
Alta	Baja	1	6,25	4,10	4,38	4,59
		2	6,23	4,14	4,41	
		3	6,23	4,67	4,98	
Media	Baja	1	6,11	4,48	4,77	4,81

		2	6,11	4,08	4,35	
		3	6,10	5,00	5,32	
Baja	Baja	1	6,87	4,53	4,86	5,03
		2	6,95	4,76	5,12	
		3	6,91	4,75	5,10	
Alta	Alta	1	5,41	3,53	3,73	3,52
		2	5,44	3,10	3,28	
		3	5,43	3,36	3,56	
Media	Alta	1	5,55	4,00	4,23	4,15
		2	5,64	3,80	4,02	
		3	5,56	3,95	4,19	
Baja	Alta	1	5,53	4,31	4,57	4,56
		2	5,58	4,24	4,49	
		3	5,57	4,37	4,63	
Promedio general del contenido de ceniza de la masa seca						4,45

Con el contenido de ceniza evaluado en Bélgica (Tabla 2) y el evaluado en México (Tabla 3) se confeccionó, a modo de resumen, la Tabla 4.

**Tabla 4.** Valores medios de contenido de ceniza para dos alturas de corte y tres densidades de campo incluidas en el estudio

<i>Condiciones</i>		<i>Valores medios (% en masa seca)</i>	
<i>Variable</i>	<i>Rango</i>	<i>Bélgica</i>	<i>México</i>
Altura de corte	Baja	4,63	4,81
	Alta	3,50	4,08
Densidad del campo	Baja	4,50	4,80
	Media	4,00	4,48
	Alta	3,70	4,06
Promedio general		4,07	4,45

Se puede afirmar que el contenido de ceniza disminuye con el incremento de la altura de corte, lo que se atribuye a la menor cantidad de tierra que se incorpora a la biomasa en esas condiciones. Al aumentar la densidad del campo el contenido de ceniza tiende a disminuir también. Esto tiene su origen en el incremento de la parte que es madera y ramas gruesas en el campo de marabú, lo que es característico de campos de alta densidad en que las plantas son más adultas (más años de crecimiento). Esas fracciones tienen un menor contenido de ceniza como puede verse en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Contenido de ceniza en partes de la planta de marabú (% masa seca)

<i>Parte de la planta</i>	<i>Madera</i>	<i>Ramas gruesas</i>	<i>Hojas</i>	<i>Rebrotos</i>	<i>Corteza</i>
Pruebas en Cuba (UCLV)	1,63	4,58	6,48	6,58	9,15
Pruebas en México	1,56	4,49	6,50	7,20	9,16

(UNAM)					
Nota: Muestras cosechadas manualmente en campo de densidad media					

Los valores medios de la ceniza en los dos estudios efectuados (Tabla 4) resultaron 4,07 y 4,45 % lo que permite considerar un valor medio general de 4,26 %, el que resulta muy superior a lo reportado en la literatura consultada. Esto se debe a que cuando el marabú es cosechado con máquinas se incrementa la inclusión de tierra en la biomasa. En la Tabla 6 puede verse la composición química (% en masa de los óxidos) de la ceniza del marabú. En este caso predominan: el Ca<sub>2</sub>O (46,53 %), el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11,46 %) y los álcalis (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) que varían entre un mínimo de 4,44 y un máximo de 8,05, el valor medio es de 5,80 %.

**Tabla 6.** Composición química de la ceniza del marabú (% en masa)

<i>Dens. del campo</i>	<i>Alt. de corte</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>CuO</i>	<i>ZnO</i>	<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>MnO</i>	<i>K<sub>2</sub>O</i>	<i>Na<sub>2</sub>O</i>
Alta	Baja	32,217	3,217	0,018	0,052	15,671	0,124	5,663	0,755
Media	Baja	40,635	3,736	0,018	0,034	13,196	0,119	5,071	0,752
Baja	Baja	42,473	4,232	0,019	0,020	18,185	0,176	7,338	0,709
Alta	Alta	36,513	2,924	0,013	0,009	7,455	0,013	5,000	0,437
Media	Alta	78,033	3,338	0,014	0,006	10,621	0,046	4,225	0,414
Baja	Alta	46,491	2,978	0,013	0,005	3,617	0,036	4,046	0,398
Promedio		46,527	3,404	0,015	0,021	11,458	0,085	5,224	0,577

El calor específico de combustión superior de la masa seca, calculado en Bélgica, se mostró en la Tabla 1 y el determinado mediante calorímetro en México se puede ver en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Calor específico de combustión del marabú (MJ/kg)

<i>Densidad de campo</i>	<i>Altura de corte</i>	<i>Muestra No</i>	<i>Masa de trabajo</i>		<i>Masa seca</i>	
			<i>Calor de Combust. Superior</i>	<i>Calor de Combust. Superior Promedio</i>	<i>Calor de Combust. Superior</i>	<i>Calor de Combust. Superior Promedio</i>
Alta	Baja	1	18,27	18,27	19,48	19,49
		2	18,28		19,49	
		3	18,27		19,48	
Media	Baja	1	17,83	17,83	18,99	18,99
		2	17,84		19,00	
		3	17,80		18,96	
Baja	Baja	1	17,24	17,27	18,51	18,55
		2	17,33		18,63	
		3	17,24		18,52	
Alta	Alta	1	18,94	18,94	20,02	20,03
		2	18,95		20,04	



		3	18,94		20,02	
Media	Alta	1	17,90	17,89	18,95	18,95
		2	17,88		18,95	
		3	17,90		18,96	
Baja	Alta	1	17,86	17,82	18,91	18,87
		2	17,75		18,80	
		3	17,84		18,89	
Promedio general del calor de combustión superior de la masa seca						19,15

Los valores de calor de combustión superior medidos (Tabla 7) oscilan entre 18,55 y 20,03 MJ/kg (valor medio 19,15 MJ/kg) lo que está en el rango de lo reportado en la literatura referida en la introducción (Guyat-Dupuy et al., 2014); (Alba-Reyes et al., 2018). Los valores calculados (Tabla 1) están en el rango de 20,53 a 22,22 MJ/kg valores superiores a los reportados por los autores referidos anteriormente y a los medidos en este estudio.

En la Tabla 8 se presenta un resumen de los valores promediados para cada altura de corte y cada densidad de campo de las Tablas 1 y 7. Valorando los datos de esta tabla se puede concluir que existe una tendencia a incrementar el calor de combustión con la altura de corte, lo que es resultado, principalmente, de la disminución del contenido de ceniza. Por otro lado, los datos obtenidos no permiten una conclusión firme en cuanto a la posible influencia de la densidad del campo.

**Tabla 8.** Valores medios del calor específico de combustión superior de la masa seca para dos alturas de corte y tres densidades de campo incluidas en el estudio (MJ/kg)

<i>Condiciones</i>		<i>Valores medios</i>	
<i>Variable</i>	<i>Rango</i>	<i>Bélgica</i>	<i>México</i>
Altura de corte	Baja	20,92	19,01
	Alta	22,14	19,28
Densidad del campo	Baja	21,40	18,71
	Media	21,84	18,97
	Alta	21,35	19,76
Promedio general		21,53	19,15

En cálculos de ingeniería se emplea el calor de combustión inferior de la masa de trabajo (masa húmeda) el que se calcula con el calor de combustión inferior de la masa seca y la humedad de trabajo. Por lo anterior, se decidió calcular el valor de este último para las magnitudes extremas del calor superior de la masa seca (18,55 y 20,03 MJ/kg). Para este cálculo se empleó el modelo reportado en (Rubio-González, 2015) y un contenido de Hidrógeno de 5,75 % (ver Tabla 1). Los valores del calor de combustión inferior de la masa seca obtenidos fueron: 17,25 y 18,73 MJ/kg. Estos valores están ligeramente por encima de lo reportado en la literatura consultada (Abreu-Naranjo et al., 2010); (Guyat-Dupuy et al., 2014); (Cantos et al., 2017); (Alba-Reyes et al., 2018) e (INAF, 2018).

Este estudio permite recomendar para cálculos de ingeniería los valores medios siguientes: calor específico de combustión superior de la masa seca: 19,15 MJ/kg y

calor específico de combustión inferior de la masa seca: 17,85 MJ/kg.

#### **4. CONCLUSIONES**

- 1- En el análisis inmediato del marabú cosechado con la máquina BMH-480 (cabezal H 600), se determinó un incremento de la ceniza de un 19,71 % y el carbono fijo de un 22,28 % respecto a los valores máximos reportados en la literatura citada (con cosecha manual) (Abreu-Naranjo et al., 2010); (Travieso y Kaltschmitt, 2012) y (Cantos et al., 2017).
- 2- El valor medio general del contenido de ceniza varía entre 4,07 y 4,45 %. El contenido de ceniza tiende a disminuir con el incremento de la altura de corte y con el aumento de la densidad del campo.
- 3- El contenido de álcalis en las cenizas varió desde 4,44 % hasta 8,05 % para un valor medio de 5,80 %.
- 4- Se determinó el calor específico de combustión de la masa seca, resultando el superior 19,15 MJ/kg y el inferior 17,85 MJ/kg. Se encontró una tendencia a incrementar el calor de combustión con la altura de corte. Por otro lado, los datos obtenidos no permitieron una conclusión firme en cuanto a la posible influencia de la densidad del campo.
- 5- El conocimiento de la influencia de los factores a estudiados, en las propiedades del marabú cosechado, permitirá establecer estrategias de corte para su abasto a las bioeléctricas en cuanto a campos a cosechar y altura de corte de la máquina.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Al IER de la UNAM (México), al DGChT de la UGent (Bélgica) y al CIAP de la UCLV (Cuba) por la extraordinaria colaboración prestada.

#### **REFERENCIAS**

- Abreu-Naranjo, R., Foppa-Pedretti, E., Romero-Romero, O. y Riva, G., Caracterización energética del marabú., *Dyna*, Vol. 85, No. 7, 2010, pp. 581-586.
- Alba-Reyes, Y., Pérez-Gil, M., Ley-Chong, N., y Arteaga-Pérez, L.E., Diseño de una planta de torrefacción de marabú con fines energéticos., *Tecnología Química*, Vol. 38, No. 1, 2018, pp. 145-161.
- ASTM E872-82., Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, pp. 1-3.
- ASTM E1755-01., Standard Test Method for Ash in Biomass., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, pp. 1-3.
- BS 1016-5., Methods for analysis and testing of coal and coke. Gross calorific value of coal and coke., 1967, pp 1-124.  
<https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=000000000030306472>,
- Cantos, M.A., Quesada, O., Rodríguez, R., Brito, A.L. y Casanova, A., Guachapelí contra marabú., *Revista Cubana de Química*, Vol. 29, No. 3, 2017, pp. 362-378.
- Guyat-Dupuy, M.A., Velázquez-Viera, D., Aguirre-Dorado, F. y Capote-Pérez, V., Características del *Dichrostachys cinérea* (L) Wight et Arm. (Marabú) para la

- producción de carbón., *Revista Forestal Baracoa*, Vol. 33, No. 2, 2014, pp. 67-72.
- Hernández, A., González, V., y Freide, M., Aprovechamiento de las posibles fuentes de biomasa para entregar más electricidad en la fábrica de azúcar Antonio Sánchez., *Centro Azúcar*, Vol. 44, No.3, 2017, pp. 88-97.
- Herrera, I., Rojas, A., Villardefranco, F., Malmquist A. & Wegener M., Analysis for the integration of solar energy to sugarcane bagasse cogeneration power plant in the Cuban context: a case study., *Proceeding of International Conference ECOS*, Wroclaw, Poland, June 23-28, 2019.
- INAF., Principales especies forestales energéticas que crecen en Cuba., Documento Interno del Instituto de Investigaciones Agro-Forestales de Cuba, La Habana, 5 de noviembre de 2018, pp. 1-9.
- ISO 1928., Solid mineral fuels - Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value., 2009, pp. 1-59. <https://www.iso.org/standard/41592.html>
- Konrad, E., Buranello, L., Lo Giudice, P., Vogel T., Görner, K. & Bazzo, E., Boosting power output of a sugarcane bagasse cogeneration plant using parabolic trough collectors in a feedwater heating scheme., *Applied Energy*, Vol. 154, 2015, pp. 232–241.
- Martínez, A., Curbelo, A., Manssón, R. y Rodríguez, A., Capacitación para el aprovechamiento de la biomasa forestal como fuente de energía., *Agricultura Orgánica*, Vol. 21, No. 1, 2015, pp. 26-29.
- MINAG., Propuesta para asegurar la cosecha, plantación y agrotecnia de los bosques energéticos., Documento interno del Ministerio de la Agricultura de Cuba, La Habana, 2019, pp. 1-11.
- NMX-F-284-SCFI., Industria Azucarera y Alcoholera - Determinación del Contenido Total de Cenizas en Muestras de Carbones Activados Empleados en la Refinación de Azúcar., 2011, pp 1-9. <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-f-284-scfi-2011.pdf>
- NOM-247-SSA1., Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba., 2008, pp 1-117. [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/NOMcereales\\_12434.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/NOMcereales_12434.pdf)
- Paredes, L. y Padrón, R., Generación de electricidad a partir de biomasa de marabú en el central azucarero Ignacio Agramonte., *Agricultura Orgánica*, Vol. 21, No. 1, 2015, pp. 24-25.
- Rubio-González, A., Generadores de vapor. Funcionamiento y explotación Editorial Feijóo, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2015, Libro digital, pp. 8-10.
- Rubio-González, A., Galindo, P., Pérez, F., Ríos, P., Perdomo, L., Pérez, E. y Rubio-Rodríguez, M.A., Estudio sobre el empleo de los residuos agrícolas cañeros como combustibles para la generación de electricidad en la industria azucarera cubana., Monografía electrónica, Editorial Feijóo, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2019, Monografía, pp. 3-4.

- Travieso, D., & Kaltschmitt, M., *Dichrostachys cinerea* as a possible energy crop-facts and figures., *Biomass Conv. Bioref.*, Vol. 2, 2012, pp. 41–51.
- Vidal, A., Bravo, J. A., Hernández, A., García, T., Valle, M. y Pi, D., Inventario para el aprovechamiento de las áreas cubiertas de la vegetación *Dichrostachys cinerea* (marabú) pertenecientes al municipio “Carlos Manuel de Céspedes”, provincia Camagüey., Informe parcial del proyecto: Aprovechamiento de la biomasa de marabú y otras especies energéticas como combustible en la generación de electricidad y recuperación ambiental., Febrero 2015, pp. 2-46.
- Wigley, T., Yip, A., & Pang, S., Pretreating biomass via demineralisation and torrefaction to improve the quality of crude pyrolysis oil., *Energy*, Vol. 109, August 2016, pp. 481-494.

### **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

### **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- Dr.C. Angel Rubio-González. Realizó la dirección científica del trabajo, las coordinaciones para obtención de muestras y análisis y escribió el artículo.
- M.Sc. Pedro Jesús Iturria Quintero. Realizó el procesamiento de parte de las muestras y colaboró en la escritura del artículo.
- Dra.C. Lizet Rodríguez-Machín. Realizó el procesamiento de parte de las muestras y colaboró en la escritura del artículo.
- Ing. Delvis Palmero Marín. Realizó la recolección de las muestras, procesó parte de ellas y colaboró en la escritura del artículo.