

**Análisis del impacto de la fertilización  
química en el contenido de cenizas de  
*Pennisetum purpureum* para fines energéticos**

**María José Oviedo Ventura**

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano**

**Honduras**

Noviembre, 2017

ZAMORANO  
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

**Análisis del impacto de la fertilización  
química en el contenido de cenizas de  
*Pennisetum purpureum* para fines energéticos**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar  
al título de Ingeniera en Ambiente y Desarrollo en el  
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

**María José Oviedo Ventura**

**Zamorano, Honduras**

Noviembre, 2017

## **Análisis del impacto de la fertilización química en contenido de cenizas de *Pennisetum purpureum* para fines energéticos**

**María José Oviedo Ventura**

**Resumen.** La presente investigación evaluó el impacto de la fertilización potásica en las cenizas de *Pennisetum purpureum* para fines energéticos, con el fin de proponer el mejor escenario de producción. El estudio se realizó en las fincas de la empresa Honduran Green Power Corporation S.A., aplicando tres dosificaciones de cloruro de potasio (46, 111 y 138 kg), bajo un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones. Se evaluó el rendimiento de biomasa por hectárea, características del cultivo en campo, producción de ceniza y concentración de potasio resultantes para cada escenario de fertilización. Los resultados obtenidos denotan que no existió diferencia significativa en productividad de biomasa entre los sitios seleccionados, sin embargo, la producción de ceniza y la concentración de potasio en éstas presentaron una correlación positiva. Ambos parámetros presentaron menores valores en el escenario con menor disponibilidad de potasio y la segunda menor aplicación de fertilizante (111 kg de KCl), representando el mejor escenario de fertilización implementado por la empresa para la producción energética. Por otro lado, el escenario menos favorable para producción energética fue el que registró mayor potasio disponible y fertilizante aplicado (138 kg de KCl), derivando en la mayor producción de ceniza y contenido de potasio en éstas. Se concluye en la necesidad de realizar un monitoreo constante del potasio disponible en el suelo con el fin de disminuir la concentración de este elemento en el cultivo sin afectar la producción de biomasa, optimizando así la calidad de este recurso para producción energética.

**Palabras clave:** Biomasa, cultivos energéticos, potasio.

**Abstract.** The present study evaluated the impact of potassium fertilization on the ash content of *Pennisetum purpureum* for energy purposes, in order to propose the best production scenario. The study was carried out on the Honduran Green Power Corporation S.A farms, applying three different potassium chloride dosages (46, 111 and 138 kg), under a completely randomized experimental design with three replicates. The biomass yield per hectare, field crop characteristics, ash content and potassium concentration resulting for each fertilization scenario were evaluated.. The results showed that there was no significant difference in biomass yield among selected sites, however, the ash content and its potassium concentration presented a positive correlation. Both parameters presented lower values in the scenario with least potassium availability and the second lower fertilizer application (111 kg of KCl), which is why it is the best current fertilization scenario for energy production. The least favorable scenario for energy production was the one that registered the highest potassium availability and highest application of fertilizer (138 kg KCl). A constant potassium availability monitoring plan on soils and crops to reduce the concentration of this element without affecting yield productivity, thus optimizing the quality of this resource for energy production.

**Key words:** Biomass, energy crop, potassium.

## CONTENIDO

Portadilla.....	i
Página de firmas.....	ii
Resumen.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>6</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>21</b>
<b>5. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>22</b>
<b>6. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>23</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>27</b>

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Principales cultivos para producción energética a partir de biomasa.....	2
2. Características del sitio de estudio .....	11
3. Resultados de análisis de suelo en las fincas seleccionadas.....	13
4. Datos recolectados en campo .....	13
5. Porcentajes de humedad .....	14
6. Rendimientos de biomasa por hectárea .....	14
7. Producción de ceniza .....	15
8. Potasio residual .....	18
9. Porcentajes de potasio en términos de biomasa. ....	18
10. Potasio disponible.....	20

Figuras	Página
1. Mapa de ubicación de parcelas .....	10
2. Diagrama de análisis de muestras.....	11
3. Dosificación de fertilizante aplicado .....	12
4. Gráfico de cajas de producción de ceniza total .....	16
5. Relación producción de ceniza y niveles de fertilización .....	17
6. Producción de ceniza de tallos y hojas en cada tratamiento .....	17
7. Relación entre potasio residual y producción de ceniza.....	19
8. Concentración de potasio disponible y potasio residual.....	20
9. Concentración de potasio disponible y producción de ceniza.....	20

Anexos	Página
1. Test de normalidad Shapiro Wilk para todas las variables.....	27
2. Diferencia en producción de biomasa según escenario .....	28
3. Diferencia de producción de biomasa entre hojas y tallos .....	29
4. Diferencia en la producción de ceniza según el escenario .....	29
5. Medias de producción de ceniza en hojas .....	30
6. Medias de producción de ceniza en tallos .....	30
7. Medias de producción total de ceniza .....	30
8. Diferencia en la producción de ceniza entre tallos y hojas .....	31

9. Diferencia en potasio residual entre tallos y hojas en términos de ceniza.....	31
10. Diferencia de potasio residual en términos de ceniza .....	32
11. Diferencia de potasio residual en términos de ceniza entre escenarios.....	32
12. Diferencia de productividad de biomasa entre tallos y hojas .....	33
13. Cuadro de correlaciones de Pearson.....	33

## 1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de energía renovable se consideran entre las alternativas energéticas con mayor potencial para disminuir el impacto antropogénico en el ambiente. Dichas tecnologías contribuyen a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por la sobre-explotación de combustibles fósiles para la realización de diversas actividades como transporte, alimentación, industria, comercio y energía eléctrica (Goldemberg, Johansson, Reddy, y Williams, 2001). Actualmente, la demanda del sector alimentario, energético e industrial se encuentran en constante aumento, proyectando mayores requerimientos energéticos y por ende aumento en las emisiones de dióxido de carbono (Perry, 2017).

En el año 2016, la energía proveniente de fuentes renovables representó el 20% de la matriz energética global, con proyecciones de duplicar su incidencia en los próximos 20 años (Finley, 2017). En el mismo año, Estados Unidos generó en promedio 5,170 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono adjudicadas al sector energético. Sin embargo, se ha evidenciado una disminución en las emisiones a lo largo del tiempo, para que las emisiones del 2015 se redujeron un 2.7% respecto las del año siguiente y actualmente se estima una disminución del 4.9% respecto al anterior año. Ambas reducciones se justifican por el aumento en la utilización de gas natural y otras fuentes de energía renovable (Perry, 2017).

La producción mundial de energía a partir de biomasa en el 2016 se estimó en 188.5 trillones de BTU, representando el 46.9% de la producción de energía a partir de fuentes renovables (Energy Information Administration, 2017). En Latinoamérica, la energía a partir de biomasa es una tecnología que presenta alto potencial energético debido a la alta disponibilidad de recursos, condiciones climáticas favorables, viabilidad económica y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> (Koçar y Civaş, 2013).

La generación de biomasa se deriva de la reacción entre el CO<sub>2</sub>, agua y luz solar a través de la fotosíntesis, produciendo carbohidratos que conforman la fracción de biomasa en los cultivos (Peter, 2001). La biomasa está compuesta de dos fases, una fase orgánica cuyo 20 al 40% está constituido por hemicelulosa y lignina, y otra fase inorgánica que contiene elementos como silicio, sodio, potasio y cloro. La fracción inorgánica posteriormente constituye la concentración de cenizas formadas durante la combustión directa de la biomasa (Demirbas, 2004).

Para la producción energética existen diversos tipos de biomasa dentro de los cuales existen especies maderables, herbáceos, plantas acuáticas y residuos agrícolas como el estiércol. El aprovechamiento energético se lleva a cabo a través de combustión directa, gasificación,

pirolisis, fermentación y extracción mecánica de aceites. La tecnología adecuada para cada tipo de biomasa depende de su composición de azúcares, cenizas y humedad (Lewandowski y Kicherer, 1996; Peter, 2001).

Las características que clasifican un cultivo como “energético” son la alta productividad de biomasa por hectárea, rápido crecimiento, balance energético positivo, bajo costo de producción, alta resistencia a contaminantes y bajos requerimientos nutricionales (Atkinson, 2009; Peter, 2001). Los compuestos herbáceos presentan ventajas en comparación con otros cultivos con fines energéticos debido a su alta productividad de biomasa por hectárea, ciclos cortos de producción, baja humedad, bajo contenido de cenizas y alta relación celulosa/lignina (Lewandowski y Kicherer, 1996).

El rendimiento de biomasa de los cultivos varía según su especie, manejo agronómico, clima y topografía del terreno bajo las cuales se desarrolla, los mayores productores de biomasa son *Pennisetum purpureum*, *Arundo donax l.* y *Miscanthus spp.* (Cuadro 1). La producción de un cultivo bajo sus condiciones óptimas de desarrollo permite mayores rendimientos. En el caso de *Pennisetum purpureum* es un cultivo cuyos rangos óptimos de producción son 32 °C. entre 0 - 1100 msnm, se adapta mejor en suelos con buen drenaje y pH entre 6 - 6.8 (Muñoz, Lardizabal, y Melisa, 2011).

Cuadro 1. Principales cultivos para producción energética a partir de biomasa.

<b>Cultivos energéticos</b>	<b>Rendimiento t MS/ha</b>	<b>Ceniza (% MS)</b>	<b>Fuente</b>
<i>Panicum virgatum L.</i> (25)	0.9 - 34.6	4.5 - 10.5	Lewandowski, Scurlock, Lindvall, y Christou, 2003; Bakker y Elbersen, 2005
<i>Saccarum officinarum L.</i> (127)	27 - 32.5	4.5 - 10.5	Lewandowski et al., 2003
<i>Miscanthus spp.</i> (22)	5.0 - 44.0	1.6 - 4.9	Dahl y Obernberge, 2004
<i>Pennisetum purpureum</i>	22.0 - 31.0	7.45%	y Lewandowski et al., 2003
<i>Arundo donax L.</i> (124)	3.0 - 37.0	4.8 - 7.8	Lewandowski et al., 2003
<i>Phalaris arundinacea L.</i>	7.0 - 13.0	7.8 - 12.3	Wrobel, Coulman, y Smith, 2009

El impacto energético derivado de la producción de ceniza se debe a que su composición química afecta su punto de fusión. Se consideran al potasio, silicio, azufre y cloro elementos que disminuyen el punto de fusión, mientras el calcio y el magnesio lo aumenta. La reducción del punto de fusión propicia la producción de una capa sólida sobre las paredes de las calderas o las superficies de convección de calor, llamada escoria. (Ingwald et al., 2005; Lewandowski y Kicherer, 1997; Rengsirikul et al., 2011). La escoria reduce la eficiencia en la transferencia de calor, disminuyendo la eficiencia en la transformación de energía, aumentando los costos de producción (Lewandowski y Kicherer, 1996). Por cada

1% que aumenta la concentración de cenizas, el poder calorífico disminuye 0.2 MJ/kg (Monti, Di Virgilio, y Venturi, 2008).

Los residuos agrícolas presentan un porcentaje de ceniza entre 15 - 20% de la materia seca (MS), mientras que los compuestos herbáceos presentan en promedio de 7% de MS están compuestas mayormente por altas concentraciones de silicio, potasio, calcio, magnesio, sodio y fósforo. (Baxter et al., 1998; Ingwald et al., 2005; Prochnow, Heiermann, Plochl, Amon, y Hobbs, 2009). La producción de ceniza es influenciada por factores como intervalo de corta, cantidad de lignina y hemicelulosa, tipo de planta (C3 o C4), fracción de constituyentes inorgánicos, condiciones y el tipo y cantidad de fertilizante aplicando, específicamente depende de sus niveles de potasio y cloro (Bakker y Elbersen, 2005; Rengsirikul et al., 2011; Saidur, Abdelaziz, Demirbas, Hossain, y Mekhilef, 2011).

El nivel crítico de concentración de potasio en cenizas para producción energética debe ser menor al 7%, para evitar deposiciones de escoria y corrosión durante la combustión (Ingwald et al., 2005). El potasio es uno de los elementos de mayor proporción dentro de los compuestos herbáceos, el cual se encuentra en forma de cloruro de potasio (KCl). El KCl es uno de los álcalis más estables en forma gaseosa durante la combustión, por lo que su punto de condensación y fusión se encuentra a 776 °C generando diferentes capas de acumulación de escoria dentro de las calderas (Bakker y Elbersen, 2005).

Otro factor crítico para la producción de ceniza es la concentración de agua del cultivo, ya que éste impide la ignición, disminuye el poder calorífico y produce más residuos después de la combustión (Lewandowski y Kicherer, 1997). Para producción energética lo recomendado son valores menores al 23% de humedad, para que no afecte la calidad de la combustión ni la calidad del pasto durante el almacenamiento (Szyszlak-Bargłowicz, Zajac, y Piekarski, 2012).

La cantidad y contenido de cenizas determina la selección de tecnología adecuada para la combustión de la biomasa (Prochnow et al., 2009). La tecnología mayormente utilizada es el reactor de lecho fluidizado. Actualmente, es la tecnología mayormente utilizada ya que disminuye la producción de cenizas, disminuye las emisiones producidas durante la combustión y aumenta el aprovechamiento energético de la biomasa (James, Thring, Helle, y Ghuman, 2012). Existen otros métodos menos eficaces de combustión directa a través de hornos, calderas o estufas, sin embargo, se basan en los mismos principios de comportamiento de los cultivos según su composición química.

Para modificar la composición mineral de las cenizas producidas se debe considerar que el potasio es un elemento presente en el suelo y en muchos fertilizantes, por lo que la absorción de dicho elemento por la planta es inevitable (Miles, Baxter, Bryers, Jenkins, y Oden, s.f). La modificación de los niveles de potasio en la planta pueden realizarse de acuerdo al sistema de fertilización y requerimientos del cultivo (Prochnow et al., 2009). Según Cardenas y Hernández (1987) para aumentar la eficiencia en la absorción de potasio (evitando la hiperacumulación) una de las opciones es el fraccionamiento de la aplicación de fertilizantes potásicos según las etapas fenológicas y el ciclo del cultivo. Así mismo, el sistema de riego influye en la optimización de la cantidad de potasio utilizado, el método recomendado es a través de riego por goteo (Muñoz et al., 2011).

No obstante, el potasio es un elemento necesario para la producción de biomasa seca en cultivos herbáceos (Escobar y Ronquillo, 2012). El cual regula el metabolismo vegetal debido a la translocación de carbohidratos solubles dentro de la planta (Herrera, Fortes, García, Cruz, y Romero, 2008). Además, dicho elemento activa 60 sistemas enzimáticos, manteniendo la presión osmótica de sus células (plantas turgentes), permitiendo la división mitótica, promoviendo el desarrollo de raíces y hojas (Bernal y Espinoza, 2003).

La concentración de potasio en la mayoría de pastos es entre 0.2 - 5.0% MS, sin embargo, ésta varía dependiendo de la época del año en que se realice el estudio (época seca o lluviosa) presentando valores mayores en época seca (Herrera, Fortes, García, Cruz, y Romero, s.f). Dentro de los órganos de la planta la concentración de potasio en términos de ceniza es mayor en la porción de los tallos, respecto a las hojas (Atkinson, 2009; Lewandowski y Kicherer, 1997; Muñoz et al., 2011).

Mayores intervalos de cosecha y de corte producen mayor formación de biomasa, lignina, celulosa, aumenta la proporción tallo: hoja, disminuye la cantidad de ceniza y contenido de potasio. En la mayor parte de cultivos se realizan dos ciclos al año, como el majeo de *Panicum virgatum* L. y *Miscanthus* (Lewandowski et al., 2003). En el caso del *P. purpureum* el mantenimiento del cultivo puede ser hasta 5 años, dependiendo del número de cortes y con tiempo de corta óptimo de 3 meses, ya que a partir de este punto las diferencias en las concentraciones de cenizas y lignina no son significativamente diferentes (Rengsirikul et al., 2011).

La altura del corte de cosecha de un pasto afecta el rebrote, ya que puede provocar la pérdida del punto meristemático de crecimiento, reduciendo las reservas de carbohidratos, el contenido de carbono fijo y el crecimiento del rebrote (Sumran, Pornchai, y Chutipong, 2009). La altura de corte óptima para pastos es de 15 cm desde el suelo, ya que a menores alturas el impacto en productividad de biomasa es bajo y propicia menor tiempo de rebrote para el siguiente ciclo (Wijitphan, Lorwilai, y Arkaseang, 2009).

Finalmente, el pH del suelo juega un papel importante dentro de la dinámica de absorción de nutrientes, ya que determina su disponibilidad para el cultivo. Para la determinación de los requerimientos de nutrientes de un cultivo se debe considerar la disponibilidad de los nutrientes en el suelo, la curva de absorción y la etapa fenológica del cultivo (Instituto Nacional Tecnológico, 2016). La modificación del pH en caso de suelos ácidos se puede realizar a través de una enmienda del suelo con cal dolomita, lo cual aumenta la absorción de nutrientes y reduce la cantidad de fertilizantes necesarios para el desarrollo del cultivo (Muñoz et al., 2011). La dosificación de fertilización recomendada para *Pennisetum purpureum* es de 195 kg de K<sub>2</sub>O/ha.

El presente estudio se realizó en las fincas pertenecientes a la empresa Honduran Green Power Corporation S.A de C.V, las cuales presentan diferentes dosificaciones de fertilización y una enmienda de suelo para mejorar la composición de los pastos energéticos. Considerando que la fertilización y aplicación de una enmienda de suelo son factores determinantes en la calidad del cultivo, se evaluó el impacto de dos diferentes fertilizaciones

químicas en pastos energéticos (*P. purpureum*) y una enmienda de suelo a partir de los siguientes objetivos:

- Determinar el rendimiento de biomasa por hectárea bajo diferentes escenarios de fertilización.
- Identificar la influencia de los escenarios de fertilización en la productividad de biomasa y el contenido de las cenizas resultantes con el fin de seleccionar la mejor alternativa para la producción energética.
- Evaluar el contenido y concentración de potasio de las cenizas obtenidas en los diferentes escenarios establecidos.

## 2. METODOLOGÍA

### **Selección del sitio de estudio.**

Las parcelas seleccionadas para el estudio contaron con un monocultivo de *Pennisetum purpureum* de la misma variedad, el mismo manejo agronómico en términos de riego e intervalo de corte. La edad del cultivo desde el rebrote debía ser la misma, además debía ser representativa del tiempo de cosecha para el proceso de generación de energía. Adicionalmente, las parcelas contaron con distintos planes de fertilización potásica para comparar el efecto de diferentes escenarios en el desarrollo y composición del cultivo.

### **Toma de muestras.**

La toma de muestras se llevó a cabo durante la época seca del año (abril 2017). Se identificaron tres fincas con diferentes escenarios de fertilización, de las cuales se seleccionaron tres parcelas. Dentro de las parcelas se recolectaron tres muestras de forma aleatoria. La delimitación del sitio de muestreo se realizó con una cinta métrica, indicando la biomasa que debía ser cortada dentro de un m<sup>2</sup> a una altura de 15 cm del suelo.

Para el análisis de cada parcela, en cada muestreo se registró la altura promedio del cultivo, la densidad del cultivo de acuerdo al número de macollas y el promedio de la humedad en campo. Para determinar ésta última se utilizó un medidor de humedad relativa CEM ® DT-129 en diferentes partes de la planta (tallo, parte media y hoja). Posteriormente a la identificación y acondicionamiento de las muestras en bloques fueron transportadas.

**Recolección de muestra de suelo.** Se utilizó un barreno para la recolección de las muestras de suelo en cada finca seleccionada para muestreo de los cultivos. Las muestras se tomaron de los primeros 20 cm del suelo hasta formar una mezcla homogénea de aproximadamente un kilogramo. Posteriormente, la muestra se llevó al Laboratorio de Suelos Zamorano para un análisis físico-químico, con el objetivo de conocer la textura y los niveles de potasio en suelo.

### **Determinación de rendimiento de Biomasa.**

**Preparación de muestras.** Las muestras fueron transportadas al laboratorio de bioenergía de la Escuela agrícola Panamericana, Zamorano para su posterior acondicionamiento. El proceso inició con la separación de las proporciones de tallo y hoja pertenecientes a cada muestra, para su manejo individual, obteniendo un total de 18 muestras. Cada porción fue secada al secado al sol durante tres días. Esta etapa preliminar pretendía eliminar la mayor cantidad de agua para evitar la proliferación de hongos y bacterias que descompusieran las

muestras. Seguidamente se inició con la reducción de la dimensión de la partícula para lo cual se utilizó una picadora manual para la porción de las hojas y una picadora eléctrica para los tallos. Sin embargo, fue necesario utilizar una licuadora y un extrusor de alimentos posteriormente para obtener un tamaño de 0.2 - 0.5 mm

**Determinación de humedad.** La determinación de humedad de las muestras se realizó en dos etapas. La primera inició con la separación de las proporciones de tallo y hoja, registrando el peso en materia fresca de cada muestra. Seguidamente, se extrajo una muestra aleatoriamente de 1 kg de hoja y otro de tallo para su secado al sol durante tres días. La pérdida en peso luego de concluir esta etapa es la humedad 1 (H1), y permite el posterior acondicionamiento de las sub-muestras mediante picado y triturado para concluir con el proceso de secado y demás análisis fisicoquímicos.

Para la segunda etapa se pesó 3 g de las muestras acondicionadas, completando la determinación de la humedad en el horno a 105 °C por 12 horas. La pérdida en peso de esta etapa representa la humedad 2 (H2). La humedad total de la biomasa analizada es la sumatoria de los valores obtenidos en ambas etapas respecto a la proporción de tallos y hojas presentadas.

$$H(\%) = \{[H1t * Pt] + [H1h * Ph]\} + [H2t * Pt] + [H2h * Ph] \quad [1]$$

Donde:

H1t = Humedad correspondiente a la etapa 1 de tallos

H1h = Humedad correspondiente a la etapa 1 de hojas

H2t = Humedad correspondiente a la etapa 2 de tallos

H2h = Humedad correspondiente a la etapa 2 de hojas

Ph = Proporción hojas

Pt = Proporción tallo

**Rendimiento de biomasa por hectárea.** La materia seca es un elemento que permite determinar la cantidad de recurso neto que podrá ser aprovechado durante el proceso de producción energética. La estimación de biomasa se hizo en el m<sup>2</sup> muestreado, través de las proporciones de hojas y tallos de cada muestra. Posteriormente, se extrapolaron los valores para una hectárea de cultivo. El rendimiento de biomasa fue calculado para cada parcela muestreada, de la cual se realizaron tres sub-repeticiones para determinar el valor final en toneladas (t) por hectárea.

$$B/ha = \{[ Ph * (t MS)] + [Pt*(t MS)]\} * 10,000 \quad [2]$$

B/ha = Biomasa por hectárea

Ph = Proporción hoja

Pt = Proporción tallo

MS = Materia seca (kg/m<sup>2</sup>)

## **Influencia de los escenarios de fertilización.**

**Determinación de cenizas.** Se pesó 3 g de materia seca acondicionada (humedad y tamaño adecuado) en un crisol, previamente tarado. Las muestras se colocaron a 600 °C en la mufla durante tres horas, para obtener una simulación de la combustión de la biomasa y la determinación del comportamiento de la biomasa. Las cenizas resultantes fueron pesadas para determinar la proporción de ceniza producida respecto a la cantidad de materia seca colocada.

$$Ce (\%) = \frac{Ce (g)}{MS (g)} * 100 \quad [3]$$

Ce = Cenizas resultantes

MS = Materia seca

Ce% = Porcentaje de ceniza en términos de materia seca

**Determinación de potasio.** La concentración de potasio funcionará como indicador para la calidad del cultivo para la producción energética, en este caso a través de la combustión directa. Su concentración se expresará el contenido en miligramos de potasio (mg K) por kilogramo de materia seca (kg MS).

Posteriormente a la producción de ceniza, se realizó una digestión de las muestras con el fin de concentrar la cantidad de metales en ellas. Se colocó la ceniza resultante de los 3 g de materia seca combustionada y se mezcló con 10 ml de HNO<sub>3</sub> diluido 1:2. Luego se se colocó la muestra en un plato caliente para una doble evaporación de HNO<sub>3</sub>. Al finalizar la evaporación, se agregó 10 ml de HCL diluido 1:2 para su ebullición por 2 minutos. Al final el proceso se llevó la solución resultante a 100 ml con agua destilada para su posteriormente filtración (Lewandowski y Kicherer, 1996).

Finalmente, se realizó una dilución 1:20,000 con Lantano al 1%. La concentración de potasio fue determinada con un espectrofotómetro de absorción atómica marca VARIAN modelo AA 240 FS. Las lecturas de las concentraciones fueron en mg/L y correspondien a la composición de la ceniza resultante durante la combustión de la materia seca. Por lo tanto las unidades a reportar los valores de potasio serán en términos de materia seca.

**Potasio disponible.** La disponibilidad de potasio en el suelo es un parámetro que impactará la absorción de dicho nutriente por la planta. Por ello, se estimó la cantidad de potasio disponible en el suelo a través de un balance de materia entre la concentración de potasio en las cenizas, la cantidad de KCl aplicado y la concentración de potasio residual en el suelo.

$$Kd = (Kc + (Kr) \quad [4]$$

Donde:

Kd= Concentración de Potasio disponible en kg/ha

Kc= Concentración de potasio en las cenizas

Kr= Concentración de potasio residual en el suelo

**Análisis estadístico.**

Se aplicó un diseño experimental completamente al azar en el cual se seleccionaron las dosificaciones de fertilizante potásico (KCl) en contraste al rendimiento de biomasa por hectárea, la concentración de cenizas resultantes y la concentración de potasio en dichas cenizas. Para el análisis de las variables se realizaron análisis descriptivos y estadísticos con la utilización de los programas IBM SPSS Statistics 19 y Excel 2010.

Para el análisis estadístico de los valores de producción de biomasa, ceniza y concentración de potasio se aplicó una prueba de normalidad Shapiro Wilk para determinar la tendencia de los datos. Al comprobar su normalidad, se determinó si existía diferencia significativa en la producción de biomasa, ceniza y concentración de potasio entre los tres escenarios de fertilización a través de una ANDEVA unifactorial y posteriormente una prueba post-hoc Duncan para determinar el mejor y peor escenario. Se realizó una prueba t para establecer si existía diferencia significativa de las variables estudiadas entre las proporciones de tallo y hoja. Finalmente se determinó correlaciones de Pearson entre la concentración de potasio y producción de ceniza. Todas las pruebas se analizaron con un  $\alpha=0.05$ .

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Localización de fincas de estudio estudio.

Las fincas seleccionadas para la realización del estudio pertenecen a la empresa Honduran Green Power Corporation S.A de C.V (HGPC), ubicadas en el distrito de Cuyamel, Cortés (Figura 1) La planta generadora de energía cuenta con una potencia instalada de 43 MW, destinados a suplir energía eléctrica y vapor al sector privado maquilero de San Pedro Sula. El cultivo de biomasa mayormente utilizado para su producción energética es el *Pennisetum purpureum* Texas 25. Actualmente la empresa posee alrededor de 4,621 ha de *Pennisetum purpureum* cultivadas. Dentro de las parcelas establecidas por la empresa HGPC S.A se escogieron tres sitios con diferentes escenarios de fertilización en relación a los niveles de potasio aplicados (Cuadro 2). Los tres muestreos de biomasa se realizaron dentro de estos sitios para ser analizados en el laboratorio posteriormente (Figura 2).

La precipitación promedio del municipio de Omoa es de 80 - 100 mm, con una temperatura promedio de 30.4 °C y una evapotranspiración de 33.5 mm. Durante los meses de marzo y abril se presenta la época más seca del año, por lo cual los cultivos se encontraban bajo riego al momento de realizar la toma de muestras.

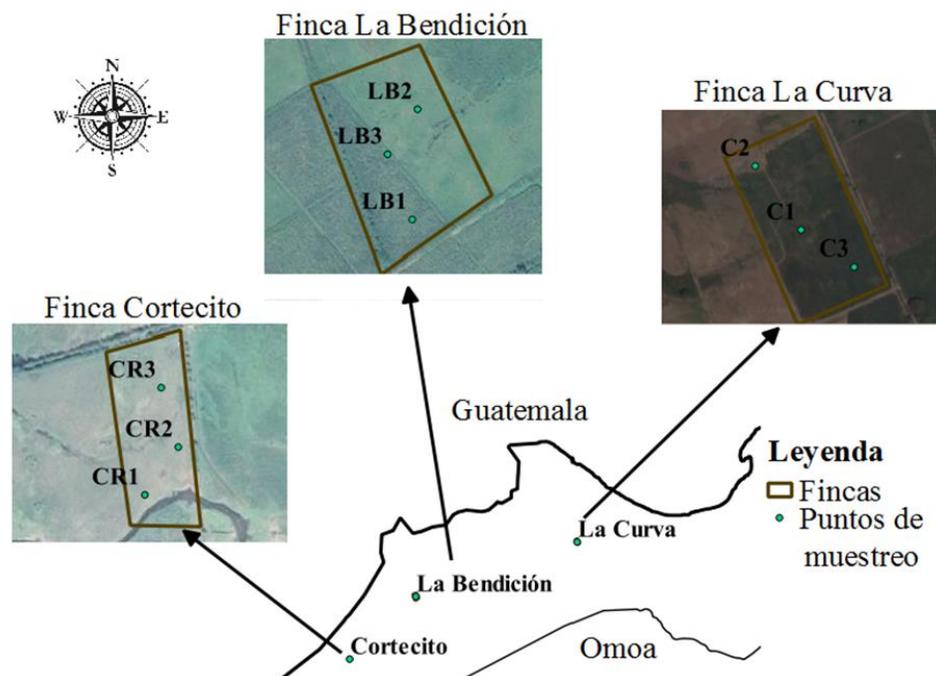


Figura 1. Mapa de ubicación de parcelas.

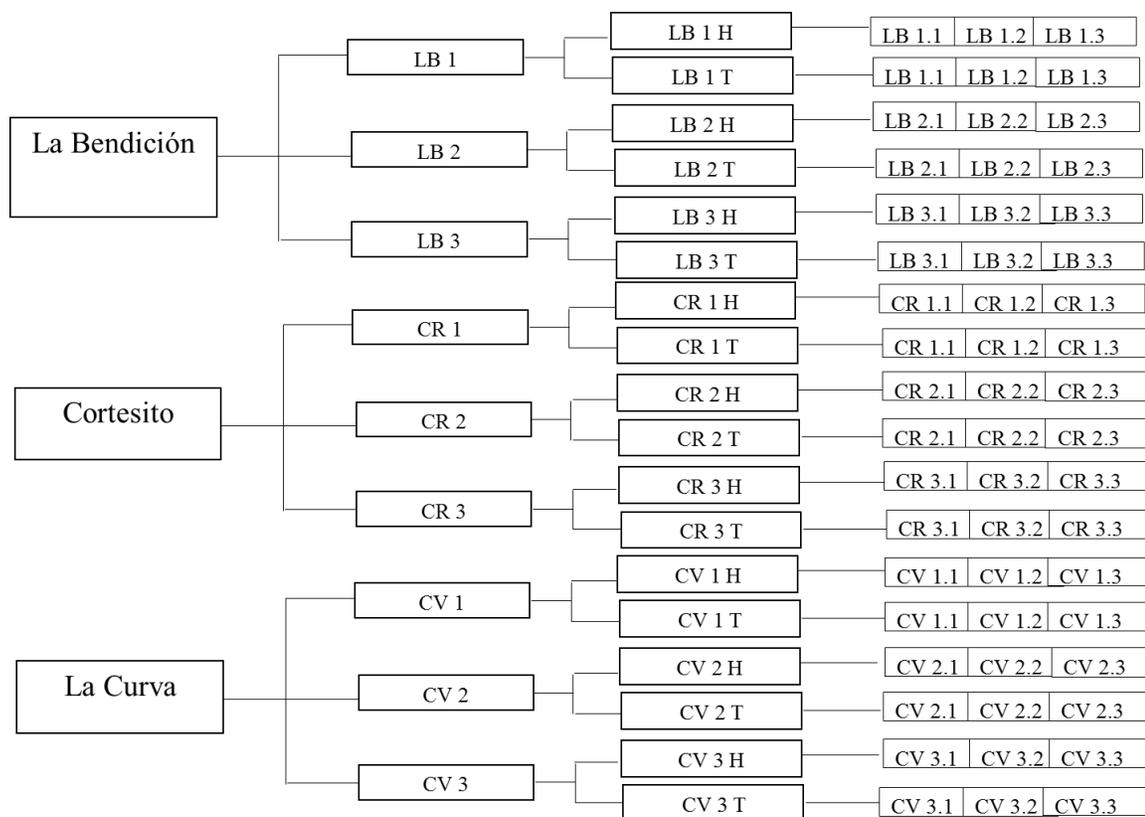


Figura 2. Diagrama de análisis de muestras.

\*La Curva (CR), Cortesito (CR) y La Bendición (LB): Parcelas muestreadas.

\* H: Hojas; T: Tallos

La aplicación de  $K_2O$  recomendada para mayor productividad de biomasa con fines energéticos es superior la establecida en los escenarios de fertilización seleccionados (Figura 3). La dosis recomendada pretende una producción de 270 t MF/ ha al año. Cortesito fue la finca con mayor aplicación de  $K_2O$  cubriendo el 44.62% de la aplicación recomendada, mientras La Bendición fue el escenario con menor aproximación supliendo un 14.87% de la dosis (Muñoz et al., 2011).

Cuadro 2. Características del sitio de estudio.

Parcelas	Coordenadas	Extensión (ha)	Aplicación de potasio-KCl (kg/ha)
La Bendición	359972 1728671	8.0	46
Cortesito	355724 1724810	1.5	138 <sup>&amp;</sup>
La Curva	370041 1732240	5.0	111

<sup>&</sup>Parcela con enmienda de suelo.

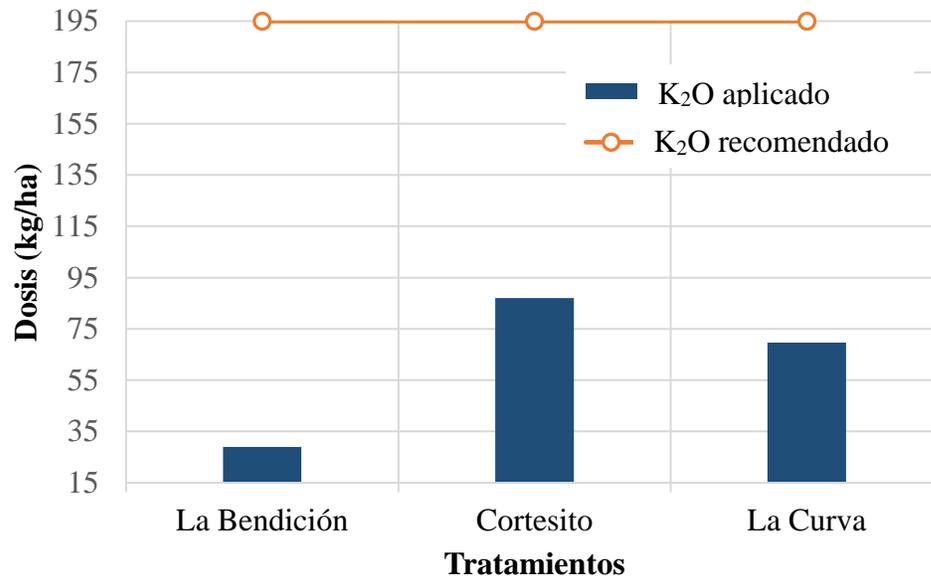


Figura 3. Dosificaciones de fertilizantes aplicadas.

### Caracterización y trabajo en campo.

**Características de los suelos.** El análisis de suelo se realizó al finalizar el ciclo del cultivo, a los 4 meses desde el rebrote. Dentro de los resultados obtenidos se identificó que la textura del suelo de las tres parcelas era franco arenosa (Cuadro 3). Sin embargo, los porcentajes de limo, arcilla y arena variaban entre ellas. La Curva fue el tratamiento con mayor porción de arena (mejor drenaje), seguido por La Bendición y Cortesito. La textura del suelo es un factor que impacta la producción de biomasa de un cultivo debido a que influye a la permeabilidad y drenaje de los suelos y por ende la disponibilidad de agua y nutrientes (Valero, 1993).

El pH del suelo permite clasificarlo como ácido, sin embargo *Pennisetum purpureum* es una especie tolerante a suelos ácidos en un rango de pH de 4.5 a 7.0 (Instituto Nacional Tecnológico, 2016). Todas las muestras presentaron niveles de materia orgánica medios-bajos, de potasio bajos y niveles medios de sodio según los niveles interpretado por el Laboratorio de Suelos de Zamorano. Por éste último nos permite inferir que no existe intrusión salina en las tierras para cultivo a pesar de su cercanía al mar (20 km). Por otro lado, Cortesito presentó las concentraciones más elevadas de calcio, lo cual evidencia lo reportado por el personal de HPGC sobre la utilización de cal como enmienda de suelo al inicio del ciclo de cultivo para favorecer la absorción de nutrientes.

Cuadro 3. Resultados de análisis de suelo en las fincas seleccionadas.

Parcela	Textura	pH	M.O. <sup>&amp;</sup>	mg/kg de suelo				
				P	K	Na	Ca	Mg
La Bendición	Franco arenosa	5.60	1.74	41	30	11	472	93
Cortesito	Franco arenosa	5.79	0.96	30	23	8	561	111
La Curva	Franco arenosa	5.42	3.11	24	20	14	241	40

<sup>&</sup>Dato expresado en g/100 g de suelo.

**Determinación densidad del cultivo.** Los datos obtenidos de densidad de macollas por hectárea fueron homogéneos entre fincas, siendo Cortesito el escenario con mayor densidad de cultivo (Cuadro 4). La Curva fue el escenario con mayor altura, mientras La Bendición presentó el menor valor de altura promedio. Las alturas obtenidas en esta investigación son superiores a las reportadas por Salazar-Zeledón, Moya y Valaert, (2015) quien evaluó diferentes especies de *Pennisetum purpureum* bajo diferentes intervalos de corta obteniendo valores máximos de 3.12 m a los 3 meses de edad. Este resultado no es congruente con lo reportado por Rengsirikul et al. (2011), ya que según él a mayor intervalo de corta mayores deberían ser la altura de los cultivos.

La humedad obtenida directamente en campo presentó datos variables dentro de la misma muestra, lo cual puede deberse a que dentro de la planta existen diferentes porcentajes de humedad siendo las hojas más susceptibles a la absorción de este elemento por lo que la toma de este parámetro en campo es menos preciso que el realizado posteriormente a nivel de laboratorio (Lewandowski et al., 2003).

Cuadro 4. Datos recolectados en campo.

Parcela	Humedad en campo (%)	Densidad (macollas/ha)	Altura (m)
La Bendición	38.64	50,000.00	3.90
Cortesito	41.43	60,000.00	4.08
La Curva	33.38	50,000.00	4.67

#### Rendimiento de biomasa por hectárea.

**Determinación de humedad.** La humedad total de los diferentes escenarios presenta valores similares entre ellos, con una variación máxima del 6% (Cuadro 5). La humedad homogénea permite inferir que la edad de corte para las tres fincas fue la misma, ya que a mayor intervalo de corta menor es la concentración de humedad (Rengsirikul et al., 2011).

El valor promedio de humedad esperado en pastos es del 50%, sin embargo, el valor crítico para producción energética indica que debe ser menor al 23%. Acorde al valor crítico los valores de humedad encontrados en todos los escenarios son mayores al recomendado. El cultivo deberá someterse a un pre-tratamiento de secado para optimizar el rendimiento energético, ya que a mayor porcentaje de humedad menor será cantidad de biomasa aprovechable (Lewandowski et al., 2003)

Cuadro 5. Porcentajes de humedad.

Parcela	Etapa 1		Etapa 2		Humedad final		Humedad total
	Hojas	Tallos	Hojas	Tallos	Hojas	Tallos	
La Bendición	52	32	8	8	56	38	43
Cortesito	50	35	8	11	54	35	40
La Curva	48	40	5	7	50	44	46

**Rendimiento de biomasa.** Los valores obtenidos de rendimiento por hectárea de las parcelas no presentaron diferencias significativas entre ellas (Cuadro 6). Sin embargo, al comparar descriptivamente los escenarios, La Curva fue el escenario con mayor productividad de biomasa, el cual corresponde al segundo escenario con mayor aplicación de potasio. La Bendición fue el escenario con menor producción de biomasa y corresponde al escenario de menor aplicación de potasio.

Los valores de biomasa total por hectárea obtenidos fueron superiores a los reportados por Lewandowski et al. (2003) los cuales varían en un rango entre 22.0 - 31.0 t MS/ha. Sin embargo, los valores coinciden con los presentados por Rengsirikul et al., (2011) quien obtuvo valores máximos de 61.4 t/ha en un intervalo de corta de 3 meses.

Cuadro 6. Rendimientos de biomasa por hectárea.

Parcelas	Biomasa total (t/ha)	Biomasa hojas secas (t/ha)	Biomasa tallos (t/ha)	Relación hoja:tallo
La Bendición	69.83 <sub>a</sub>	14.53 <sub>b</sub>	55.03 <sub>c</sub>	0.27
Cortesito	75.13 <sub>a</sub>	15.00 <sub>b</sub>	60.13 <sub>c</sub>	0.25
La Curva	89.73 <sub>a</sub>	20.99 <sub>b</sub>	67.80 <sub>c</sub>	0.32

\*a,b,c Diferentes letras en la misma columna representan diferencia significativa.

No se logró establecer una correlación que explique la relación entre la dosificación de KCl y el rendimiento de biomasa entre los escenarios planteados. Al observar la tendencia de la productividad de biomasa y los escenarios de fertilización que éstos aumentaban al aumentar su fertilización potásica a excepción de Cortesito por lo que no pudo ser marcada una tendencia lineal. No obstante, dicho resultado se justifica ya que existen otros factores que determinan la capacidad de la planta para absorber los nutrientes como el pH, la materia

orgánica, la dinámica de elementos antagónicos como el sodio y el potasio, las cantidad de riego y radiación solar (Benítez et al., 2007).

La productividad de biomasa por hectárea producida por los tallos y hojas presentó diferencia significativa, siendo los tallos la proporción con mayores valores (Cuadro 4). Así mismo, la relación hoja: tallo en promedio fue de 0.28 fue menor a la reportada por Boschini y Mora, (2005) en el mismo intervalo de corta. Según Morais et al. (2009) la relación hoja tallo disminuye a medida aumenta el intervalo de corte, lo cual nos puede dar un indicador de aumento de productividad de biomasa a medida aumenta el tiempo. Las hojas son la porción de la planta con mayor contenido de humedad y menor productividad de biomasa.

### **Influencia de los escenarios de fertilización.**

**Determinación de contenido de cenizas.** Los valores obtenidos de producción de ceniza mostraron diferencia significativa con un  $\alpha=0.05$  entre los escenarios de fertilización (Cuadro 7). Cortesito fue el escenario con mayor producción de ceniza y coincide en ser el escenario con mayor aplicación de potasio, además de haber sido enmendado al inicio del ciclo (Figura 4). La Curva fue el escenario con menor producción de ceniza, sin embargo no presentó diferencia significativa en comparación a La Bendición, éstos dos fueron los escenarios con menor aplicación de potasio.

Cuadro 7. Producción de ceniza bajo diferentes escenarios de fertilización.

Parcela	Contenido de ceniza expresado en mg/kg de suelo			
	Ceniza Hoja	Ceniza Tallo	Ceniza total	Ceniza (%)
La Bendición	86,758.34 <sup>a</sup>	37,124.84 <sup>a</sup>	51,022.22 <sup>a</sup>	5.1
Cortesito	134,541.53 <sup>b</sup>	60,325.37 <sup>b</sup>	79,621.57 <sup>b</sup>	7.9
La Curva	76,865.66 <sup>c</sup>	26,954.53 <sup>a</sup>	40,430.53 <sup>a</sup>	4.0

<sup>a,b,c</sup> Diferente letra en la misma columna representa diferencia entre las medias.

Los valores de ceniza obtenidos se encuentran en el rango esperado para compuestos herbáceos, el cual es aproximadamente del 7% MS (Ingwald, Thomas, y Georg, 2005 (Rengsirikul et al., 2011). No obstante, los valores reportados para *Pennisetum purpureum* son mayores (8.4 - 9.64%,) a los obtenidos en esta investigación (Salazar-Zeledón et al., 2015). Para la producción energética a partir de combustión directa la producción de cenizas debe ser menor al 5% (Morais et al., 2009). Lo que nos permite inferir que solo La Curva sería el escenario apto para un óptimo aprovechamiento energético.

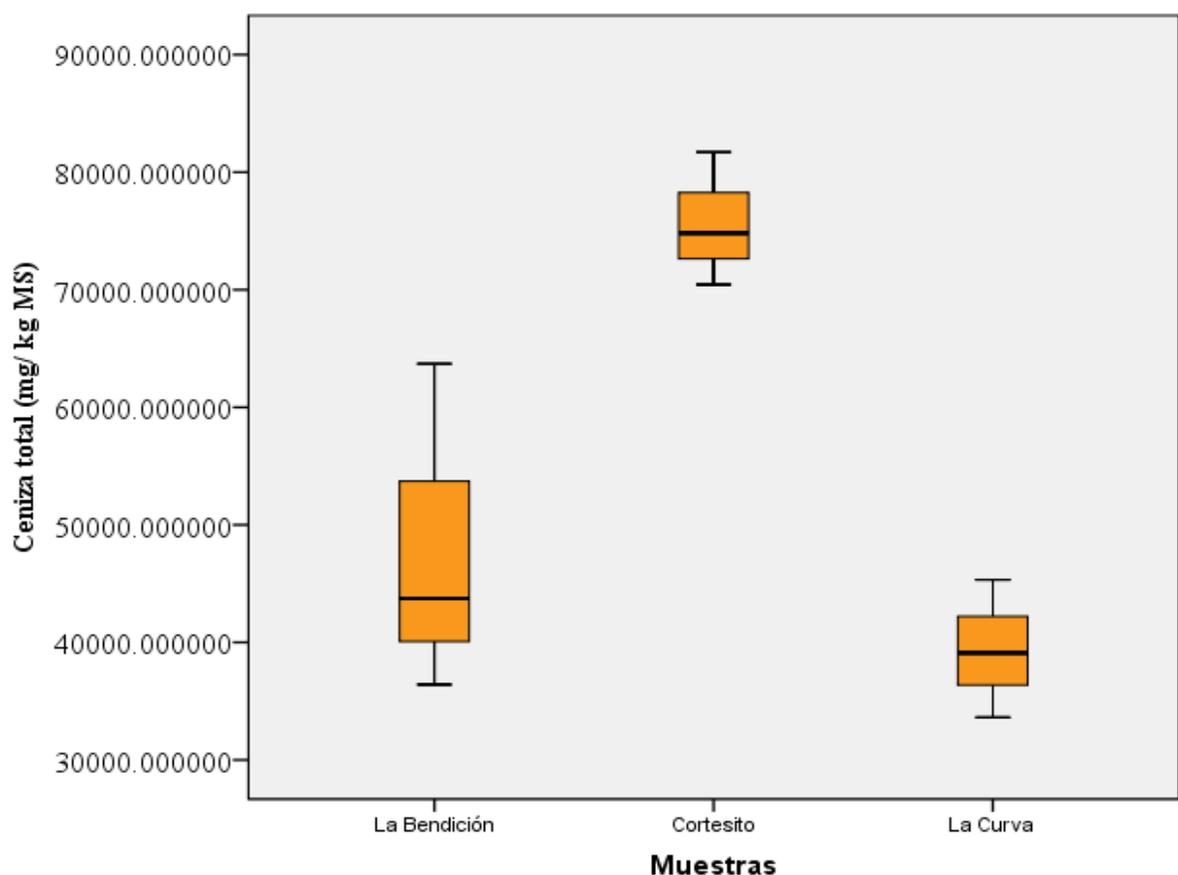


Figura 4. Gráfico de cajas de producción de ceniza total.

El cruce de variables entre la fertilización química y la producción de ceniza obtenida en el estudio presenta una tendencia lineal positiva con un  $R^2 = 0.85$  (Figura 5). Lo cual permite indicar que existe una tendencia a aumentar la producción de ceniza, al ser mayores los niveles de fertilización. El establecimiento de esta relación se sustenta ya que según de Lewandowski y Kicherer (1997) y Herrera et al. (2008) la concentración de metales influye en la calidad y cantidad de ceniza producida durante la combustión de componentes herbáceos.

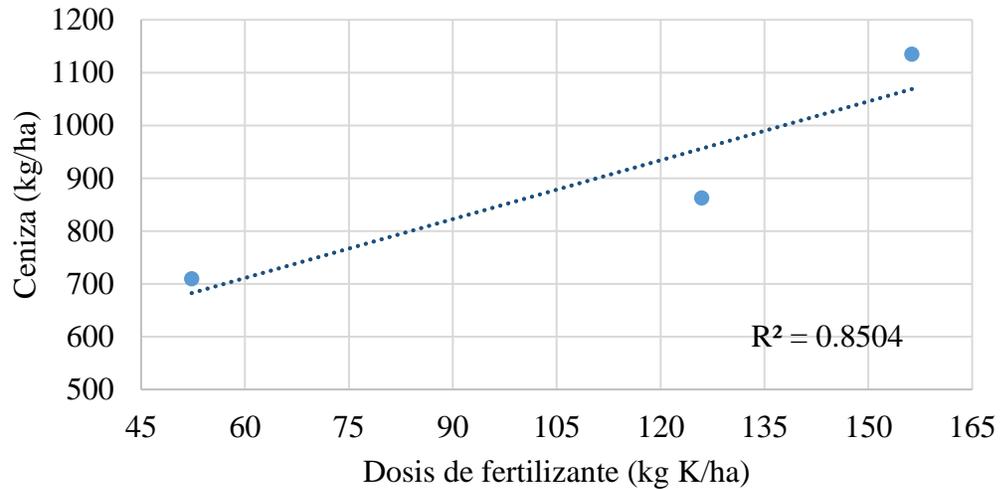


Figura 5. Relación de producción de ceniza y niveles de fertilización.

Se determinó que existía diferencia significativa en la producción de ceniza entre las proporciones de tallos y hojas (Figura 6). Las hojas presentaron la mayor producción de ceniza, lo cual concuerda con lo reportado por Lewandowski y Kicherer, (1997) y Monti et al. (2008). Las hojas fueron la porción de la planta que presentó menores valores de producción de biomasa, mayor porcentaje humedad y además mayor producción de cenizas.

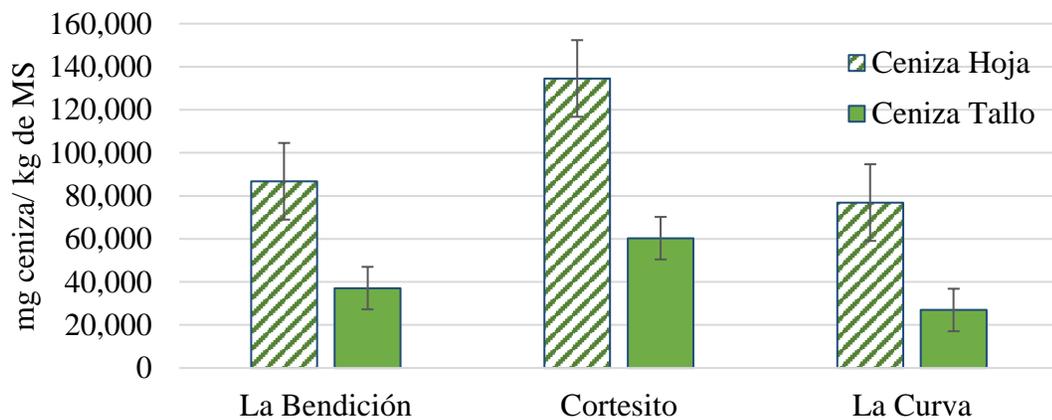


Figura 6. Producción de ceniza de tallos y hojas.

**Determinación de potasio.** Las concentraciones de potasio obtenidas no presentaron diferencia significativa en términos de biomasa entre los diferentes escenarios de fertilización (Cuadro 8). Sin embargo, descriptivamente Cortesito fue el escenario con mayor concentración de potasio el cual corresponde al escenario con mayor dosificación de potasio y es el mismo que fue sometido a una enmienda de suelo. El escenario con menor concentración de potasio fue La Curva, el cual no corresponde a la menor dosificación de

potasio entre los tres escenarios. Dicho resultado puede deberse a la disponibilidad de potasio en el suelo, ya que es un factor determinante en la absorción del cultivo.

La concentración de potasio en La Bendición y La Curva son menores a las concentraciones promedios en compuestos herbáceos la cual es de 15,000 mg K / kg MS. En el caso de Cortesito presenta valores mayores a los reportados por otros autores (Li et al., 2009; Ingwald et al., 2005). Los porcentajes de potasio obtenidos (30.6%) en promedio son mayores al valor crítico para producción energética. La concentración recomendada en las cenizas para producción energética, evitándose problemas de corrosión y producción de escoria debe ser del 7% (Ingwald et al., 2005). Dicho resultado indica que es necesario disminuir la concentración de este elemento bajo los diferentes elementos, no obstante se debe tener en cuenta la cantidad de ceniza producida versus el porcentaje de potasio presente en ellas.

Cuadro 8. Concentraciones de potasio residual.

<b>Parcelas</b>	<b>Potasio hojas (mg/ kg de MS)</b>	<b>Potasio tallos (mg/kg de MS)</b>	<b>Potasio total (mg/ kg de MS)</b>	<b>Desviación estándar</b>
La Bendición	15,190.84 <sup>ns</sup>	10,775.41 <sup>ns</sup>	11,997.33 <sup>ns</sup>	5016.44
Cortesito	14,813.64	18,697.23	17,687.50	2713.62
La Curva	13,004.37	9,211.83	10,235.81	2883.014

Datos expresados en mg k/ kg MS

<sup>ns</sup>: No existe diferencia significativa

No existió diferencia significativa en la concentración de potasio en términos de biomasa entre tallos y hojas. Sin embargo, los porcentajes obtenidos presentaron una tendencia mayor en la porción de hojas respecto a la porción de tallos (Cuadro 9). Los porcentajes obtenidos son menores a los reportados por Herrera et al. (2008) durante época seca. Sin embargo, son similares a los obtenidos en época lluviosa; lo cual puede deberse a que las plantaciones se encontraban bajo riego, lo que pudo haber provocado que hubiera inconsistencias entre los valores reportados.

Las hojas son la proporción de la planta que posee menor producción de biomasa, mayor producción de ceniza y mayor concentración de potasio. Lo cual nos permite inferir que si se aumentara el intervalo de corta disminuiría la relación hoja: tallo, reduciéndose de igual manera la presencia de factores reductores del aprovechamiento energético.

Cuadro 9. Porcentajes de potasio en términos de biomasa.

<b>Parcela</b>	<b>K total</b>	<b>K en hojas</b>	<b>K en tallos</b>
La Bendición	1.10	1.46	1.00
Cortesito	1.54	1.31	1.60
La Curva	0.95	1.24	0.86

La producción de ceniza presentó una correlación positiva respecto a las concentraciones de potasio. Presentando una correlación de Pearson  $R = 0.7992$  y un coeficiente de Pearson de 0.955 lo cual indica un grado de correlación muy alto entre las dos variables. La tendencia de la interacción de estas dos variables presenta que a mayor concentración de potasio mayor será la producción de ceniza en éstas (Figura 7).

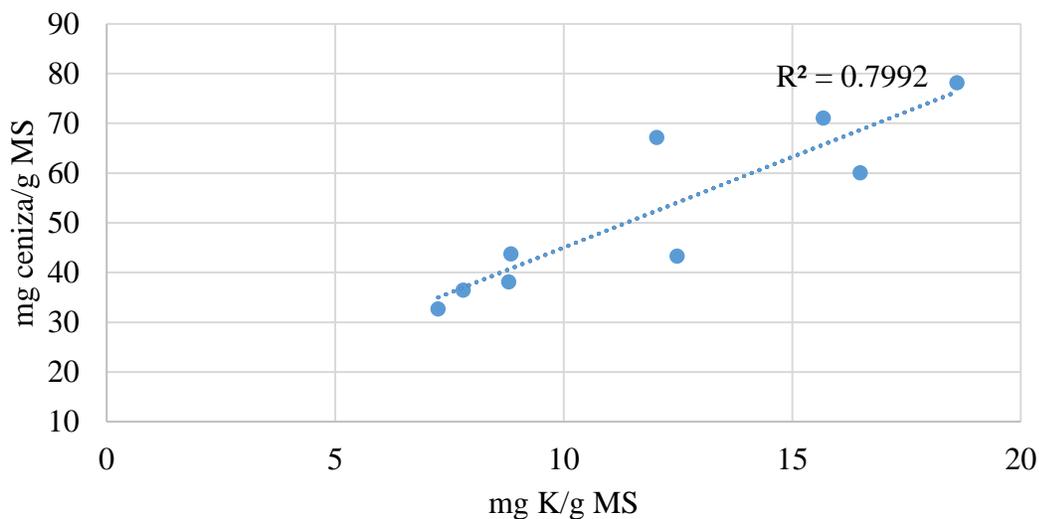


Figura 7. Relación entre potasio residual y producción de ceniza.

**Potasio disponible.** La concentración de potasio absorbido por la planta depende de la cantidad de potasio disponible por ella (Cuadro 9). La Curva es el escenario que presentó la menor cantidad de potasio disponible para la planta, a pesar de ser el escenario con la segunda mayor aplicación de fertilizante potásico. Por otro lado, Cortesito fue el escenario con mayor disponibilidad de potasio y mayor aplicación de fertilizante, además de una enmienda de suelo.

La disponibilidad de potasio en relación a la productividad de biomasa por hectárea presenta una tendencia inversa, ya que a menor potasio disponible mayor fue la productividad de biomasa por hectárea. Por el contrario, al aumentar el potasio disponible la concentración final de potasio en las cenizas presentó un aumento (Figura 8). Así mismo, la producción de ceniza aumentó a medida en los escenarios con niveles de potasio disponible más altos (Figura 9).

En términos de potasio disponible La Curva fue el tratamiento con menor potasio disponible, menor producción de ceniza y los mayores rendimientos de biomasa. Por el contrario, Cortesito fue el escenario con mayor disponibilidad de potasio mayor producción de ceniza, alta concentración de potasio en ellas y fue el segundo escenario con mayor productividad de biomasa.

Cuadro 10. Potasio disponible.

Parcela	kg K disponible/ha
La Bendición	883.88
Cortesito	1,434.84
La Curva	872.49

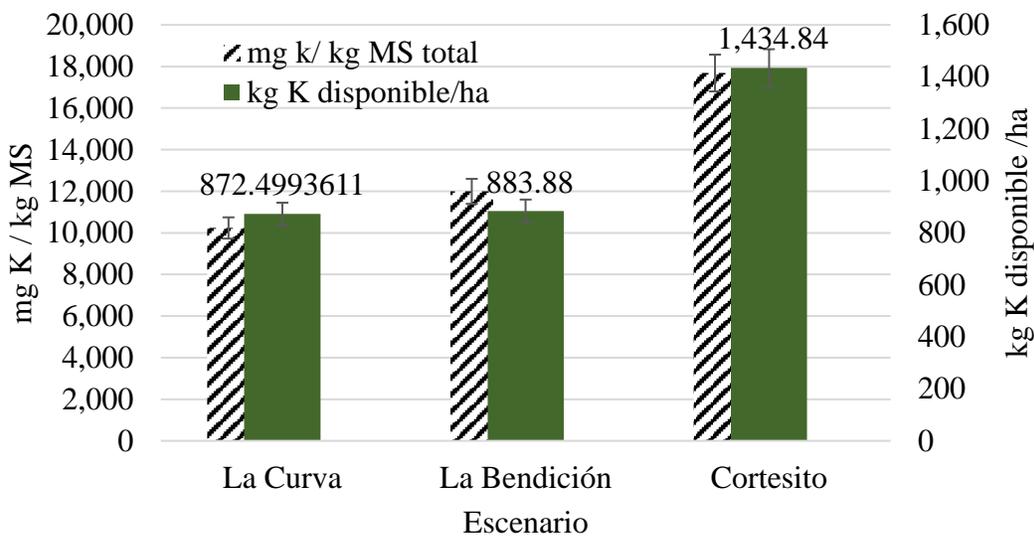


Figura 8. Concentración de potasio disponible y potasio residual.

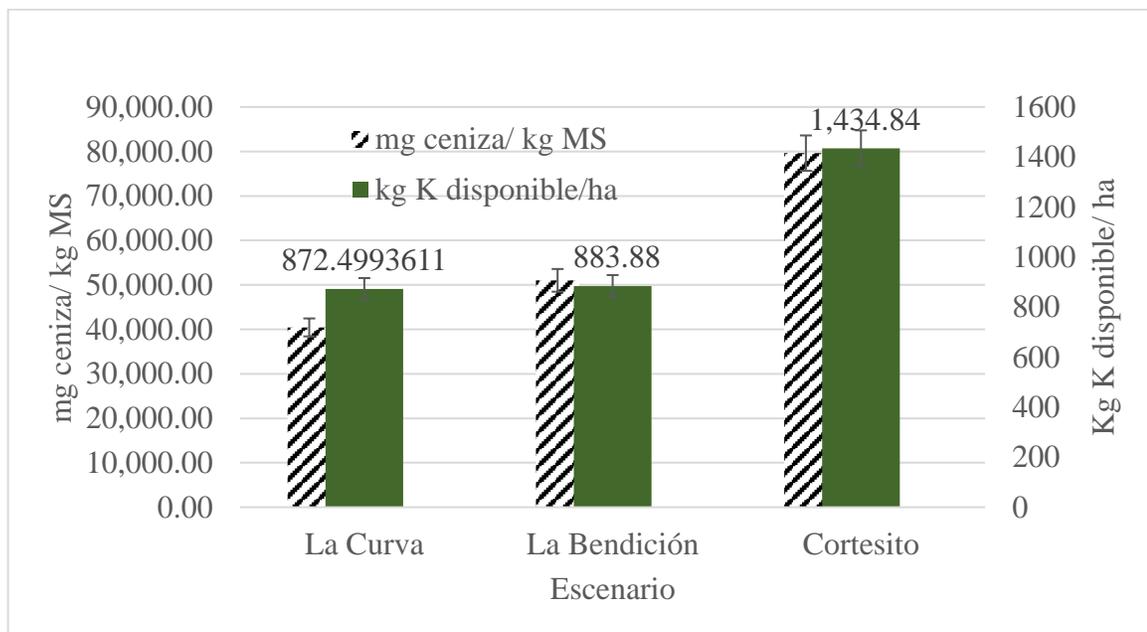


Figura 9. Concentración de potasio disponible y producción de ceniza.

#### 4. CONCLUSIONES

- No hubo un efecto significativo de los escenarios de fertilización en la productividad de biomasa, sin embargo se registra una diferencia numérica, siendo La Curva el escenario que presentó mayores valores de producción de biomasa, menor producción de ceniza y menor tendencia en la concentración de potasio en ellas. Este escenario se reporta como el más favorable para la obtención de *Pennisetum Purpureum* con fines energéticos, presentando una menor disponibilidad de potasio pero la segunda mayor aplicación de fertilizante.
- Se obtuvo una correlación entre la producción de ceniza y la concentración de potasio en ellas, lo que implica que a menor concentración de potasio aplicado se reducirá la producción de ceniza durante el aprovechamiento energético. Así mismo la concentración de potasio en las cenizas presentó tendencia a aumentar acorde a la disponibilidad de potasio en el suelo, lo que nos permite concluir que la fertilización química no es un indicador suficiente para seleccionar el mejor escenario, ya que pueden influir otros factores como el intervalo de corte, enmienda y sobre todo el potasio disponible.
- La combinación de enmienda de suelo y altos niveles de fertilización, reflejados en Cortesito, resultaron en un escenario con la mayor producción de ceniza y concentración superior de potasio en ellas. De la mezcla de ambos factores derivó en el aumento de la disponibilidad y absorción de potasio para la planta, lo cual afectó la calidad del cultivo resultando en el escenario menos favorable para fines energéticos.

## 5. RECOMENDACIONES

- Los programas de fertilización de HGPC S.A deben enfocarse en un monitoreo constante del balance de potasio, con el fin de determinar la tasa de absorción de este nutriente por parte de la planta. Esta medida podría disminuir el potasio en las cenizas, aumentando su punto de fusión, lo que reduce la corrosión y escoria producida durante el aprovechamiento energético, resultando en un aumento de la producción energética y en la vida útil de la maquinaria utilizada.
- El incremento en el intervalo de corte puede conducir a una mayor producción de biomasa con menor proporción de hojas, que a su vez presentaría menor producción de cenizas y concentración de potasio. Otra medida para el aprovechamiento energético podría ser la reducción de la proporción de hojas mediante separación previa de los tallos para el proceso de combustión, mejorándose la calidad de la mezcla para la generación energética.
- El estudio debería ser replicado durante varios ciclos de corta y con mayor número de repeticiones, de manera que se pudiera monitorear la acumulación de nutrientes en el suelo antes y después de cada ciclo productivo. Además, se podría replicar en condiciones más controladas que permitan aumentar la robustez de las tendencias encontradas en el presente estudio.
- Se deberían realizar investigaciones posteriores que permitan comparar otros cultivos energéticos en condiciones tropicales, evaluando su rendimiento de biomasa y composición de ceniza lo cual permitiría evaluar las ventajas y desventajas de utilizar *Pennisetum purpureum* en contraste a otros cultivos.

## 6. LITERATURA CITADA

- Atkinson, C. J. (2009). Establishing perennial grass energy crops in the UK: A review of current propagation options for *Miscanthus*. *Biomass and Bioenergy*, 33(5), pp. 752–759.
- Bakker, R., y Elbersen, H. (2005). Managing ash content and quality in herbaceous biomass: An analysis from plant to product, Trabajo presentado en la 14<sup>o</sup> Conferencia Europea de Biomasa (pp. 17-21). Paris, Francia: Universidad y Centro de Investigación Wageningen.
- Baxter, L., Miles, T., Jenkins, B., Milne, T., Dayton, D., Bryers, R., y Oden, L. (1998). The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experience: *Fuel Process Technol* 54(1-3), pp. 47–78.
- Benítez, D., Fernández, J., Ray, J., Ramirez, A., Torres, V., Tandrón, I., Guerra, J. (2007). Factores determinantes en la producción de biomasa en tres especies de pastos en sistemas racionales de pastoreo en el Valle de Cauto, Cuba. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 41(3), pp. 231–235.
- Bernal, J., y Espinoza, J. (Eds.). (2003). *Manual de nutrición y fertilización de pastos*. Recuperado de [http://www.academia.edu/6676325/MANUAL\\_DE\\_NUTRICION\\_Y\\_FERTILIZACION\\_DE\\_PASTOS](http://www.academia.edu/6676325/MANUAL_DE_NUTRICION_Y_FERTILIZACION_DE_PASTOS)
- Boschini, C., y Mora, M. (2005). Producción de forraje y calidad nutricional de variedades de *Pennisetum purpureum* en la Meseta Central de Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 1, pp. 37–43.
- Cardenas, M., y Hernández, M. (1987). Respuesta del King grass al fertilizante potásico y su fraccionamiento. *Pastos y Forrajes*, 10(2). 153–159.
- Dahl, J., y Obernberge, I. (2004). Evaluation of the combustion of four perennial energy crops: *Arundo donax*, *Cynara cardunculus*, *Miscanthus giganteus*, and *Panicum virgatum*, Trabajo presentado en la 2da Conferencia Mundial de Biomasa para Energía, Industria y Protección del Clima,(pp.1265–1270). Italia, Roma.

- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion science*, 30(2), pp. 219–230.
- Escobar, J., y Ronquillo, O. (2012). *Respuesta a la fertilización orgánica con el uso de Biol y potásica inorgánica en King grass (Pennisetum purpureum) para estimación energética de potencial productivo de biogás, Zamorano, Honduras* (Tesis Universitaria). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, San Antonio de Oriente.
- Finley, M. (2017). *BP energy outlook. (1)*. Recuperado de: <https://www.bp.com/en/global/corporate/investors.html>
- Goldemberg, J., Johansson, T. B., Reddy, A. K. N., y Williams, R. H. (2001). Energy for the new millennium. *A journal of the human environment*, 30(6), pp. 330–337.
- Herrera, R., Fortes, D., García, M., Cruz, A., y Romero, A. (2008). Estudio de la composición mineral en variedades de Pennisetum purpureum. *Cubana de ciencia agrícola*, 42(4), pp. 395-401
- Ingwald, O., Thomas, B., y Georg, B. (2005). Chemical properties of solid biofuels: significance and impact. *Biomass and Energy*, 30, pp. 97–982.
- Instituto Nacional Tecnológico (Ed.). (2016). *Manual de pastos y forrajes*. Recuperado de <http://es.scribd.com/document/320036030/Manual-de-Pastos-y-Forrajes>
- James, A., Thring, R., Helle, S., y Ghuman, H. (2012). Ash management review— Applications of biomass bottom ash. *Energies*, 5(10), pp. 3856–3873.
- Koçar, G., y Civaş, N. (2013). An overview of biofuels from energy crops: current status and future prospects. *Renewable and sustainable energy reviews*, 28, pp. 900–916.
- Lewandowski, I., y Kicherer, A. (1996). Combustion quality of biomass paractical relevance and experiments to modify the biomass quality of Miscanthus giganteus. *European Journal of Agronomy*, 6, pp. 163–177.
- Lewandowski, I., y Kicherer, A. (1997). Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of Miscanthus x giganteus. *Biomass and Bioenergy*, pp. 163–177.
- Lewandowski, I., Scurlock, J. M., Lindvall, E., y Christou, M. (2003). The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy*, 25(4), pp. 335–361.

- Li, S., Teng, H., Jia, W., Shang, L., y Lu, Q. (2009). Characterization of combustion and emission of several kinds of herbaceous biomass pellets in a circulation fluidized bed combustor, Trabajo presentado en la 20° Conferencia Internacional de Procedimientos para la Reactores de Cámara Fluidizada, (pp.1085–1092). Berlin, Alemania.
- Miles, T., Baxter, L. L., Bryers, R. W., Jenkins, B., y Oden, L. L. National Renewable Energy Laboratory. (1996). Alkali deposits found in biomass power plants, *1*. Recuperado de <http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy96/8142v1.pdf>
- Monti, A., Di Virgilio, N., y Venturi, G. (2008). Mineral composition and ash content of six major energy crops. *Biomass and Bioenergy*, *32*(3), pp. 216–223.
- Morais, R. F. d., Souza, B. J. d., Leite, J. M., Soares, L. H. d. B., Alves, B. J. R., Boddey, R. M., y Urquiaga, S. (2009). Elephant grass genotypes for bioenergy production by direct biomass combustion. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *44*(2), pp. 133–140.
- Secretaria de Relaciones Exteriores (2011). Manejo agronómico de King Grass para producción de Biomasa en Honduras. Tegucigalpa: Muñoz, R., Lardizabal, R., y Melisa, F.
- Perry, L. (2017). *Monthly Energy Review*. United States. Recuperado de U.S Energy Information Administration (EIA) website: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=30712#>
- Peter, M. (2001). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, *83*, pp. 37–46.
- Prochnow, A., Heiermann, M., Plochl, M., Amon, T., y Hobbs, P. J. (2009). Bioenergy from permanent grassland—a review: 2. Combustion. *Bioresource technology*, *100*(21), pp. 4945–4954.
- Rengsirikul, K., Ishii, Y., Kangvansaichol, K., Pripanapong, P., Sripichitt, P., Punsuvon, V., Tudsri, S. (2011). Effects of inter-cutting interval on biomass yield, growth components and chemical composition of napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schumacher) cultivars as bioenergy crops in Thailand. *Grassland science*, *57*(3), pp. 135–141.
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., y Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(5), pp. 2262–2289.

- Salazar-Zeledón, E., Moya, R., y Valaert, J. (2015). Biomass and bioenergy production of *Arundo donax* L., *Pennisetum purpureum* Schum. and *Pennisetum purpureum* Schumack. × *Pennisetum glaucum* L. in short rotation cropping system in Costa Rica. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 9(6), pp. 572–579. <https://doi.org/10.1166/jbmb.2015.1562>
- Sumran, W., Pornchai, L., y Chutipong, A. (2009). Effect of cutting heights on productivity and quality of King Napier Grass (*Pennisetum purpureum*) cv. King Grass) under irrigation. *Pakistan Journal of Nutrition*, pp. 1244–1250.
- Szyszlak-Bargłowicz, J., Zając, G., y Piekarski, W. (2012). Energy biomass characteristics of chosen plants. *International Agrophysics*, 26(2), 7.
- U.S Energy Information Administration. (2017). *Annual energy outlook 2017* (1). Recuperado de [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2017).pdf)
- Valero, S. (1993). *Interpretación de análisis de suelos* (5/93). Madrid: Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario.
- Wrobel, C., Coulman, B. E., y Smith, D. L. (2009). The potential use of reed canarygrass (*Phalaris arundinacea* L.) as a biofuel crop. *Acta Agricultura Scandinavica, Section B-plant soil science*, 59(1), pp. 1–18. <https://doi.org/10.1080/09064710801920230>

## 7. ANEXOS

### Anexo 1. Prueba de normalidad Shapiro Wilk.

<b>Variables</b>	<b>Muestras</b>	<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Significancia</b>
CenizasHoja	LB	.909	3	.415
	CR	.996	3	.881
	CV	.975	3	.698
CenizasTallo	LB	.879	3	.321
	CR	.950	3	.567
	CV	.997	3	.894
B Hoja	LB	.787	3	.083
	CR	.781	3	.070
	CV	.984	3	.758
B Tallo	LB	.847	3	.231
	CR	.999	3	.937
	CV	.906	3	.405
Ceniza Total	LB	.949	3	.566
	CR	.991	3	.814
	CV	.999	3	.936
B total	LB	.827	3	.179
	CR	.990	3	.809
	CV	.927	3	.479
Altura	LB	.778	3	.062
	CR	.923	3	.463
	CV	.990	3	.811
Densidad	LB	1.000	3	1.000
	CR	1.000	3	1.000
	CV	1.000	3	1.000
PR Hojas	LB	.826	3	.178
	CR	.797	3	.107
	CV	.920	3	.452

Variables	Muestras	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Significancia
PR Tallos	LB	1.000	3	.998
	CR	.792	3	.095
	CV	.881	3	.326
PR Total	LB	.984	3	.757
	CR	.815	3	.152
	CV	.783	3	.074
NaR Hojas	LB	.830	3	.187
	CR	.773	3	.051
	CV	.819	3	.161
NaR Tallos	LB	.992	3	.827
	CR	.943	3	.538
	CV	1.000	3	.983
NaRtotal	LB	.997	3	.900
	CR	.894	3	.366
	CV	.997	3	.891

\*B: Biomasa; \* PR: Potasio Residual; \* NaR: Sodio Residual

#### Anexo 2. Diferencia en producción de biomasa según escenario.

		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significancia
B Hoja	Inter-grupos	98573113.9	2	49286556.98	1.25	.351
	Intra-grupos	2.357E8	6	39282180.65	5	
	Total	3.343E8	8			
B Tallo	Inter-grupos	2.483E8	2	1.241E8	.162	.854
	Intra-grupos	4.599E9	6	7.665E8		
	Total	4.847E9	8			
B total	Inter-grupos	6.371E8	2	3.185E8	.280	.765
	Intra-grupos	6.819E9	6	1.137E9		
	Total	7.456E9	8			

\* B: Biomasa

**Anexo 3.** Diferencia de producción de biomasa entre hojas y tallos

Varianzas	Prueba Levene		Prueba T para la igualdad de medias						
	F	Significancia.	t	gl	Significancia	Diferencia de medias	Error	95% IC	
								Inferior	Superior
Igual	12.6	.003	-5.157	16	.000	-43743.4	8483.1	-61726.87	-25760.08
No igual			-5.157	9	.001	-43743.4	8483.1	-62902.09	-24584.86

gl: Grados de libertad  
 $\alpha = 0.05$

**Anexo 4.** Diferencia en la producción de ceniza según el escenario

		Grados		Media cuadrática	F	Significancia
		Suma de cuadrados	de libertad			
CenizaTotal	Inter-grupos	2.466E9	2	1.233E9	15.4	.004
	Intra-grupos	4.787E8	6	79777471.71	56	
	Total	2.945E9	8			
CenizasHoja	Inter-grupos	5.708E9	2	2.854E9	143.	.000
	Intra-grupos	1.195E8	6	19920533.98	259	
	Total	5.827E9	8			
CenizasTallo	Inter-grupos	1.755E9	2	8.77E8	6.74	.029
	Intra-grupos	7.811E8	6	1.302E8	2	
	Total	2.536E9	8			

**Anexo 5.** Medias de producción de ceniza en hojas.

		<b>Duncan<sup>a</sup></b>		
		<b>Subconjunto para alfa = 0.05</b>		
<b>Muestras</b>	<b>N</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
CV	3	76865.65		
LB	3		86758.34	
CR	3			134541.53
Sig.		1.00	1.00	1.00

\*LB: La Bendición; CR: Cortesio y CV: La Curva

**Anexo 6.** Medias de producción de ceniza en tallos

		<b>Duncan<sup>a</sup></b>	
		<b>Subconjunto para alfa = 0.05</b>	
<b>Muestras</b>	<b>N</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
CV	3	26954.5267	
LB	3	37124.8400	
CR	3		60325.3700
Sig.		.317	1.000

\*LB: La Bendición; CR: Cortesio y CV: La Curva

**Anexo 7.** Medias de producción total de ceniza.

		<b>Duncan<sup>a</sup></b>	
		<b>Subconjunto para alfa = 0.05</b>	
<b>Muestras</b>	<b>N</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
CV	3	40430.53	
LB	3	51022.22	
CR	3		79621.57
Sig.		.19	1.00

\*LB: La Bendición; CR: Cortesio y CV: La Curva

**Anexo 8.** Diferencia en producción de ceniza entre tallos y hojas.

**Prueba de muestras independientes**

	Prueba Levene		Prueba T para la igualdad de medias						
	F	Significancia	t	Grados de libertad	Significancia	Diferencia de medias	Error	95% IC	
								Inferior	Superior
iguales	3.56	.077	5.374	16	.000	57920.26	10777.74	35072.46	8076.06
No iguales			5.374	13.85	.000	57920.26	10777.74	34781.58	8105.94

**Anexo 9.** Diferencia en potasio residual entre tallos y hojas en términos de ceniza

Potasio	Prueba de Levene		Prueba T para la igualdad de medias						
	F	Significancia	t	gl	Significancia	Diferencia de medias	Error	95% IC	
								Inferior	Superior
varianzas iguales	1.360	.261	-9.61	16	.000	-159.89	16.64	-195.16	-
No varianzas iguales			-9.61	14.8	.000	-159.89	16.64	-195.39	-

gl: grados de libertad

**Anexo 10.** Diferencia de potasio residual en términos de biomasa

		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Significan cia
PotasioRHojas	Inter-grupos	12405130. 77	2	6202565.386	1.34	.328
	Intra-grupos	27591461. 77	6	4598576.963		
	Total	39996592. 55	8			
PotasioRTallos	Inter-grupos	56848040. 85	2	28424020.42	2.11	.202
	Intra-grupos	80605753. 65	6	13434292.27		
	Total	1.375E8	8			
PotasioRtotal	Inter-grupos	1.005E8	2	50241040.17	3.69	.090
	Intra-grupos	81680368. 26	6	13613394.71		
	Total	1.822E8	8			

\*R: Residual

**Anexo 11.** Diferencia de potasio residual en términos de ceniza entre escenarios.

		Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Signific ancia
POTASIOH C	Inter-grupos	9985.849	2	4992.925	10.665	.011
	Intra-grupos	2808.828	6	468.138		
	Total	12794.677	8			
POTASIoT C	Inter-grupos	3593.604	2	1796.802	3.044	.122
	Intra-grupos	3541.842	6	590.307		
	Total	7135.446	8			
POTASIoT T	Inter-grupos	9985.849	2	4992.925	10.665	.011
	Intra-grupos	2808.828	6	468.138		
	Total	12794.677	8			

**Anexo 12.** Diferencia de productividad de biomasa entre tallos y hojas

Ceniza	Prueba de Levene		Prueba T para la igualdad de medias						
	F	Significancia	T	gl	Significancia	Diferencia de medias	Error	95% IC	
								Inferior	Superior
varianzas iguales	3.56	.077	5.37	16	.000	57920.26	10777.74	35072.46	80768.06
No varianzas iguales			5.37	13.8	.000	57920.26	10777.74	34781.58	81058.94

gl: grados de libertad

**Anexo 13.** Cuadro de Correlaciones de Pearson

		Ceniza Total	Potasio Residual total	Sodio Residual total
<b>Ceniza Total</b>	Correlación de Pearson	1	.955**	-.906**
	Sig. (bilateral)		.000	.001
	N	9	9	9
<b>Potasio Residual total</b>	Correlación de Pearson	.955**	1	-.884**
	Sig. (bilateral)	.000		.002
	N	9	9	9
<b>Sodio Residual total</b>	Correlación de Pearson	-.906**	-.884**	1
	Sig. (bilateral)	.001	.002	
	N	9	9	9

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).