

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN

DIRECCIÓN DE PROYECTOS

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INNOVACION FORESTAL

INFORME FINAL DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**GASIFICACIÓN DE BIOMASA PROVENIENTE DE PLANTACIONES
ENERGÉTICAS DE *GMELINA ARBOREA***

(DOCUMENTO I)

INVESTIGADORES:

*Roger Moya R, Ph.D.
Carolina Tenorio M, M. Eng.
Dagoberto Arias A, Ph.D.
Jaime Quesada K, Ph.D.*

Marzo, 2019

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
2. RESUMEN	3
3. PALABRAS CLAVE	3
4. INTRODUCCIÓN	4
5. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS:	6
Artículo 1: Producción de biomasa y características de plantaciones de corta rotación de <i>Gmelina arborea</i> : dos años de resultados para dos clones en tres espaciamientos	6
Artículo 2: Propiedades de la biomasa de plantaciones de corta rotación de dos clones de <i>Gmelina arborea</i> en tres espaciamientos	25
Artículo 3: Evaluación de la incidencia de pellets y astillas de madera en el desempeño de un gasificador tipo “downdraft”	37
7. BIBLIOGRAFÍA	49

**Gasificación de biomasa proveniente de plantaciones energéticas de
Gmelina arborea
Código: 1401025**

1. Autores:

- 1.1. Ing. Roger Moya R, Ph.D. (Coordinador).
- 1.2. Ing. Carolina Tenorio M, M. Eng.
- 1.3. Ing. Dagoberto Arias Aguilar, Ph.D.
- 1.4. Ing. Jaime Quesada Kimley, PhD.

2. RESUMEN

Los primeros intentos en el establecimiento de cultivos energéticos con especies de corta rotación (SRC) en la región tropical están basados en la utilización de clones utilizados en la producción de madera. Así, en el presente estudio tuvo como objetivo de evaluar aspectos de crecimiento, arquitectura del árbol, la producción y calidad de biomasa y el efecto sobre la gasificación de madera de árboles de *Gmelina arborea* plantados en SRC en tres espaciamientos (1.0x1.0 m, 0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m). Los resultados muestran que el diámetro a 30 cm del suelo incrementa con la edad, de 3.0 cm a los 6 meses a 8.0 cm en 24 meses y una altura total de 2.00 a 10.00 m respectivamente. La sobrevivencia de los clones varía de 20 a 60%, el índice de área foliar (IAF), ángulo de las ramas y ramas silépticas aumenta con la edad. Las diferencias entre clones se presentan luego de 12 meses para el IAF y para el ángulo de ramas. La producción de biomasa fue similar entre clones, de 6 ton/ha en 6 meses a 67 ton/ha a 24 meses. Uno de los clones presenta mejor producción de biomasa en los espaciamientos más amplios y el otro clon para los espaciamientos más reducidos.

En cuanto a la calidad de biomasa, los resultados muestran que el peso específico básico varió de entre 0.30 a 0.38, la densidad verde de 0,9 a 1,0 g/cm³, el contenido de humedad entre 40 y 70%, el poder calorífico de 18000 a 20000 kJ/kg, la cantidad de cenizas fue menor a 4,8% y el contenido de volátiles de entre un 70 a 86%. Se observaron diferencias en la calidad de biomasa entre los dos clones en edades tempranas, pero éstas tienden a desaparecer con el aumento de la edad, en especial a la edad de 24 meses, que es donde se pretende que la plantación sea cosechada, siendo esto una ventaja ya que se tiene una biomasa uniforme si los dos clones son utilizados. Entonces basado en los resultados de producción de biomasa y el desarrollo del diámetro y altura, un clon, de los dos estudiados es recomendado para el espaciamiento de 1.0x1.0 m y el otro para el espaciamiento 0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m. En ambos casos no altera la calidad de biomasa a las edades de 24 meses.

En un proceso de gasificación de biomasa la geometría de la biomasa (astilla) es un factor necesario que considerar. El perfil de temperatura de la zona de pirólisis fue en promedio 147°C, el poder calorífico del gas de síntesis obtenido fue de 6,18 MJ/Nm³, la capacidad de aprovechamiento de la energía del syngas para producir potencia eléctrica, medido como la Eficiencia del Motor/Generador fue de 21,41%. Se obtuvo 564,50 kWh/t de rendimiento de proceso en términos eléctricos a una potencia de 6,2 kW. Con respecto al rendimiento de producción de gas de síntesis, se produjo en promedio 1,75 kg de gas de síntesis por kilogramo de astillas. Basados en estos valores de producción de syngas, la especie *G. arborea* es óptima para realizar un proceso de gasificación.

INFORME FINAL DE PROYECTO

Gasificación de biomasa proveniente de plantaciones energéticas de *Gmelina arborea*

Gasification of biomass from short-rotation woody crops of *Gmelina arborea*

Abstract

The first tested in energy crops plantation with short rotation species (SRC) in the tropical region are based in the establishment of clones used in the production of sawlog. Thus, in this study aims to assess aspects of growth, tree architecture, production and quality of biomass and the effect on wood gasification of *Gmelina arborea* trees planted in SRC at three spacings (1.0x1.0 m, 0.75x0.75 m and 1.0x0.5 m). The results show that the diameter at 30 cm of the soil increases with age, from 3.0 cm at 6 months to 8.0 cm in 24 months and a total height of 2.00 to 10.00 m respectively. The survival of the clones varies from 20 to 60%, leaf area index (LAI), angle of the branches and sylleptic branches increases with age. The differences between clones are presented after 12 months for LAI and for the branch angle. Biomass production was similar between clones, from 6 tonnes / ha in 6 months to 67 tonnes / ha in 24 months. One of the clones presents better biomass production at the wider spacings and the other clone for the smaller spacings.

Regarding the quality of biomass, the results show that the basic specific gravity varied from 0.30 to 0.38, the green density from 0.9 to 1.0 g / cm³, the moisture content between 40 and 70%, the power Caloric from 18,000 to 20,000 kJ / kg, the amount of ash was less than 4.8% and the volatile content was between 70 and 86%. Differences in the quality of biomass between the two clones at early ages were observed, but they tend to disappear with increasing age, especially at the age of 24 months, which is where the plantation is intended to be harvested, this being an advantage since you have a uniform biomass if the two clones are used. Then based on the results of biomass production and the development of diameter and height, one clone of the two studied is recommended for the spacing of 1.0x1.0 m and the other for the spacing 0.75x0.75 m and 1.0x0.5 m. In both cases it does not alter the biomass quality at the ages of 24 months.

In a biomass gasification process the geometry of the biomass (splinter) is a necessary factor to consider. The temperature profile of the pyrolysis zone was on average 147 °C, the calorific power of the synthesis gas obtained was 6.18 MJ / Nm³, the power utilization capacity of the syngas to produce electrical power, measured as the Efficiency of the Motor / Generator was 21.41%. 564.50 kWh / t of process performance was obtained in electrical terms at a power of 6.2 kW. With respect to the production yield of synthesis gas, an average of 1.75 kg of synthesis gas per kilogram of chips was produced. Based on these production values of syngas, the *G. arborea* species is optimal for a gasification process

3. PALABRAS CLAVE

Especies tropicales, bioenergía, biomasa, potencial energético.

Key words: tropical species; plantation density; woody crops, energy crops.

4. INTRODUCCIÓN

La demanda de energía a nivel mundial crece rápidamente. Los altos precios de los combustibles fósiles combinados con el incremento de los problemas ambientales, intensificados por el cambio climático, han obligado a crear políticas a nivel mundial para apoyar fuentes alternativas de energía renovable, las cuales contribuyen a cerca del 19% del consumo de la energía total del planeta, cuya mitad es suplida por la biomasa (Kullander, 2009; Hauk et al., 2014).

INFORME FINAL DE PROYECTO

Gasificación de biomasa proveniente de plantaciones energéticas de *Gmelina arborea*

La biomasa es una de las fuentes energéticas más prometedoras ya que es una alternativa a las fuentes convencionales de energía tales como petróleo y el gas natural. Entre las ventajas que tiene el uso de la biomasa está principalmente que es un producto limpio y renovable, lo cual contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la dependencia de los combustibles fósiles (Luque et al. 2008). En este sentido la búsqueda de biomasa provenientes de los cultivos agrícolas o de residuos forestales ha tomado un importante desarrollo en los últimos años (Gokcol et al. 2009).

Sin embargo, para manipular esta biomasa se requiere de un gran consumo energético, lo que se traduce en un limitante para su utilización (Stelte et al. 2011). Su alto contenido de humedad, sus formas y tamaños irregulares, y su baja densidad aparente, hacen de la biomasa un material difícil de transportar, almacenar y utilizar en su forma original (Kaliyan and Morey 2009). Estos factores hacen que el uso de la biomasa para la producción de energía sea ineficiente, por lo que es necesario mejorar su eficiencia energética por medio de procesos como la gasificación.

La gasificación es un proceso de oxidación parcial termo químico en el que la biomasa es convertida en gas en presencia de un agente gasificante (aire, vapor, oxígeno, CO₂ o una mezcla de éstos). El gas generado, comúnmente conocido como syngas (gas de síntesis), se compone principalmente de H₂, CO, CO₂, N₂, pequeñas partículas de carbón, cenizas y aceites (Ruiz et al. 2013). La gasificación ha demostrado ser una opción exitosa para la gestión de residuos, la producción química y la producción de energía a partir residuos (Kumar and Sheth 2015).

La gasificación se plantea como una tecnología viable para dar tratamiento a los residuos orgánicos procedentes del sector industrial y agrícola con el fin de generar energía renovable. Sin embargo, no todos los tipos de biomasa pueden ser utilizados en el proceso de gasificación (Plis and Wilk 2011). Por ejemplo, algunos biocombustibles como la cascarilla de la avena presenta resultados insatisfactorios durante el proceso de gasificación, produciendo syngas con un poder calórico muy bajo (Plis and Wilk 2011). Es necesario evaluar características específicas de la biomasa como el porcentaje de humedad, densidad real y aparente, poder calórico y porcentaje y tipo de cenizas (Ruiz et al. 2013).

En la actualidad existe la necesidad de investigaciones más detalladas sobre la caracterización de la biomasa que puede ser utilizada con fines energéticos. El comportamiento o rendimiento del proceso de gasificación va a depender entre varias cosas de factores como la temperatura, el agente gasificante y el contenido de humedad y el tamaño de partícula de la biomasa (Vassilev et al. 2012). Algunos estudios señalan el tamaño de partícula como un factor determinante dentro del proceso de gasificado, al respecto Zou et al. (2012) determinaron que a nivel experimental tamaños de partícula menores a 2 mm no poseen influencia en la composición del gas producido. Pérez et al. (2012) desarrollaron un experimento con un reactor downdraft y determinaron que la biomasa se comporta de forma diferente de acuerdo con su tamaño, ellos observaron que el aumentar el tamaño de la partícula se traduce en un menor radio de consumo de la biomasa y lo tanto en una menor eficiencia del proceso, y concluyeron que tamaños de partículas en el rango de 2 a 6 mm son los óptimos.

La biomasa proveniente de madera, presenta grandes ventajas sobre otras fuentes de energía renovable como por ejemplo mejores propiedades energéticas y una menor emisión de CO₂ en comparación con la biomasa proveniente de pastos o algunos cultivos agrícolas (Tenorio et al., 2015). Sin embargo, el aumento en la demanda de la biomasa maderable ha conducido a la explotación de los recursos forestales naturales (FAO, 2012), y en este sentido, el establecimiento de plantaciones energéticas para la producción de biomasa maderable ha aumentado a nivel mundial (Evans et al., 2010; Liu et al., 2014).

En el establecimiento de las plantaciones maderables energéticas de corta rotación en climas templados se destacan los géneros *Populus*, *Salix*, *Eucalyptus*, *Pinus* y sus respectivos híbridos (DeBell et al., 1996; Dickmann, 2006; Hinchee et al., 2009). Sin embargo, el desarrollo de cultivos de corta rotación para la producción de biomasa maderable es muy limitado en las regiones

INFORME FINAL DE PROYECTO

Gasificación de biomasa proveniente de plantaciones energéticas de *Gmelina arborea*

tropicales, a excepción de Brasil, que presenta los primeros cultivos de este tipo utilizados en plantaciones energéticas (Le Maire et al., 2014; Betters et al., 1991).

En Costa Rica, recientemente se han establecido plantaciones energéticas de corta rotación (Navarro-Camacho et al., 2014, Tenorio et al. 2016). Dentro de las especies utilizadas *Gmelina arborea* ha ganado popularidad. Tenorio et al. (2016 and 2017) reportan los primeros resultados de plantaciones energéticas utilizando árboles de *Gmelina arborea*, y mencionan que durante los dos primeros años de crecimiento los espaciamientos de 0.5x1.0m (20 000 árboles por hectárea) y 1.0x1.0 m (10 árboles por hectárea), presentaron una mayor producción (Ton/ha) y mejores características de biomasa en comparación con los espaciamientos de 2.0x1.0 m (5000 árboles/hectárea). Dichos autores señalan que el factor del sitio es un factor determinante para la producción de biomasa y que las características de los árboles creciendo en sistemas SRWC varían considerablemente de un año a otro.

Ante la limitada información científica sobre las características de la biomasa obtenida de plantaciones energéticas maderables y sobre el comportamiento de dicha biomasa durante procesos de gasificado, es que la presente propuesta de investigación tuvo como objetivo aumentar la eficiencia energética de biomasa proveniente de plantaciones energéticas de *Gmelina arborea* mediante el proceso de gasificación.

5. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS:

Artículo 1: Producción de biomasa y características de plantaciones de corta rotación de clones de *Gmelina arborea* en tres espaciamientos

Carolina Tenorio¹
Roger Moya^{2*}
Juan Carlos Valverde³
Dagoberto Arias⁴

Resumen

Los primeros intentos en el establecimiento de cultivos energéticos con especies de corta rotación (SRC) en la región tropical están basados en la utilización de clones para la producción de madera. Así, el presente estudio tiene como objetivo evaluar aspectos de crecimiento (sobrevivencia, diámetro y altura del árbol), arquitectura foliar (índice área foliar [IAF], cantidad y ángulo de ramas y ramas sylleptic), la producción de biomasa y flujo de biomasa por hojas a la edad de 24 meses de edad de dos clones de *Gmelina arborea* utilizados para la producción de madera, pero plantados en SRC en tres espaciamientos (1.0x1.0 m, 0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m). Los resultados muestran un incremento del diámetro a 30 cm del suelo con la edad, de 3.0 cm a los 6 meses a 8.0 cm en 24 meses y se observa una altura total de 2.00 m a 10.00 m respectivamente. La sobrevivencia de los clones varió de 20 a 60%. El IAF, ángulo de las ramas y ramas silépticas aumenta con la edad. Las diferencias entre clones se presentan luego de 12 meses para IAF en el espaciamiento de 0.75x0.75 m en 12 meses y en el espaciamiento de 1.0x1.0 m en 24 meses para el ángulo de ramas y en el espaciamiento de 0.75x0.75 m en 6 meses y el espaciamiento de 1.0x0.5 m en las edades menores a 18 meses para las ramas silépticas. La producción de biomasa fue similar entre clones, de 6 tonnes/ha en 6 meses a 67 tonnes/ha a 24 meses. Además, se encontró que el clon 2 presentó un mayor flujo de biomasa que el clon 1. Basado en los resultados de producción de biomasa y el desarrollo del diámetro y altura, el clon 1 es recomendado para el espaciamiento de 1.0x1.0 m y el clon 2 para los espaciamientos 0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m. En ambos casos no altera la calidad de biomasa a las edades de 24 meses.

Palabras claves: fast growth; tropical species; plantation density; woody crops, energy crops.

¹Instituto Tecnológico de Costa Rica; Escuela de Ingeniería Forestal; Apartado Postal: 159-7050 Cartago-Costa Rica; Teléfono: (506) 2550-2531 / Fax: (506) 591-3315; ctenorio@itcr.ac.cr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2901-7079>

²Instituto Tecnológico de Costa Rica; Escuela de Ingeniería Forestal; Apartado Postal: 159-7050 Cartago-Costa Rica; Teléfono: (506)2550-2433/Fax: (506) 591-3315; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6201-8383>

*Autor correspondiente: rmoya@itcr.ac.cr

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial los altos precios de los combustibles fósiles combinados con el incremento de los problemas ambientales han obligado a crear políticas para fomentar el uso de la energía renovable (Inglesi-Lotz, 2016). En este sentido, la biomasa ha sido una importante fuente de energía, debido a que es renovable y amigable con el ambiente (Pleguezuelo et al. 2015). Se estima que la energía renovable representa el 14% del consumo anual de energía del mundo (Rosua and Pasadas 2012). De acuerdo con Cerda et al. (2008), la biomasa sólida puede ser dividida en dos grupos: (i) los cultivos energéticos, que son especies plantadas y usadas específicamente para la producción de biomasa, dentro de los que se incluyen las especies maderables cultivadas bajo sistemas de corta rotación (SRWC en inglés) y (ii) los residuos provenientes de bosques o plantaciones forestales maderables (como los que resultan de la limpieza y la poda), residuos agrícolas y residuos de industriales forestales (aserrín, costillas, etc.).

Los SRWC son de gran interés debido a que son sistemas de producción de corta rotación en los que especies arbóreas de rápido crecimiento se cultivan bajo prácticas agrícolas intensivas para lograr altos rendimientos de biomasa (Pleguezuelo et al. 2015). Los SRWC se han vuelto muy importantes en algunos países de la Unión Europea (Scarlat et al., 2015, Schulze, et al., 2016) y en Estados Unidos (Djomo et al., 2015). En el caso de América Latina el establecimiento de SRWC ha sido lento (Moya et al., 2019, Scarlat et al., 2015, Matzenberger et al., 2015), pero poco a poco han venido ganando importancia en países como Chile (Morales et al., 2015, Carmona et al., 2015), Brasil (Lemos et al, 2015, Junior et al., 2016) y en algunos países de Centro América (Cutz, et al., 2016, Tenorio et al., 2016, 2018, Salazar-Zeledón et al., 2015).

En Costa Rica, Tenorio et al. (2016 y 2018) reportan los primeros resultados de SRWC utilizando árboles de *Gmelina arborea*, y mencionan que, durante los dos primeros años de crecimiento, los espaciamientos de 0.5x1.0 m (20 000 N/ha) y 1.0x1.0 m (10 000 N/ha), presentaron una mayor producción (Ton/ha) y las mejores características de biomasa en comparación con los espaciamientos de 2.0x1.0 m (5000 N/ha). Dichos autores señalan que el factor del sitio es determinante para la producción de biomasa y que las características de los árboles creciendo en sistemas SRWC varían considerablemente de un año a otro.

Una estrategia práctica y efectiva en el aumento de la productividad de las plantaciones es el desarrollo de programas de reforestación clonal (Li et al., 2017). El uso de clones en SRWC ha sido estudiado por diversos autores, y algunos de los géneros más utilizados son *Populus* spp (Fang et al. 1999, Baettig et al. 2010, Paris et al. 2011), *Salix* spp (Dawson y McCracken, 1995; Stolarski et al. 2011) y *Eucalyptus* spp (Dias Müller et al. 2005; Gadelha et al. 2015; Souza et al. 2015; Eufrede Junior et al. 2016). Una característica en común en el desarrollo de los clones de estas especies en SRWC, es que los clones provienen de programas de reforestación para la producción de madera o para la industria de la pulpa (Zamora et al., 2015). De acuerdo con Fang et al. (1999), luego de estudiar por 6 años clones de *Populus* utilizados en la producción de sawlog, pero plantados en SRWC, concluyó que los clones más productivos deben ser resistentes a enfermedades y plagas de insectos, y se deben ajustar a las condiciones del sitio y a técnicas de siembra de alta competencia, producto de reducidos espaciamientos.

Por otra parte, *Gmelina arborea* es una especie de alta importancia para la reforestación comercial en los países de clima tropical y es plantada para la producción de madera aserrada, pulpa y recientemente para la producción de energía (Dvorak 2004, Tenorio et al., 2016, 2018). En Centro América, *G. arborea* crece en sitios de diferente nivel de precipitación, temperatura y en suelos con niveles adecuados de calcio (Arguedas et al., 2018). En el caso de Costa Rica, *G. arborea* es plantada en una alta variedad de sitios y el crecimiento de los árboles en plantaciones permite que en la actualidad su turno de corta sea inferior a 10 años (Vallejos et al., 2017). En la producción de madera, *G. arborea* tradicionalmente se ha utilizado en densidades que van desde los 600-1200 N/ha con el objetivo de obtener madera para el mercado de las tarimas (Lansing, 2013).

INFORME FINAL DE PROYECTO

Gasificación de biomasa proveniente de plantaciones energéticas de *Gmelina arborea*

Actualmente, el desarrollo de programas de mejoramiento genético permite disminuir la densidad de siembra inicial hasta 625 N/ha (Serrano and Moya, 2012) y obtener niveles de producción superiores a los 30 m³/ha-año con turnos de rotación entre 6-8 años (Ávila-Arias et al., 2015). Estos programas de reforestación comercial cuentan con una serie de clones aptos para la producción de madera, los cuales se han concentrado en el desarrollo de las características morfológicas del árbol y la producción en volumen por hectárea (Ávila-Arias et al., 2016-2015, Murillo et al., 2018). Sin embargo, en la actualidad no existen datos sobre el uso de estos clones en espaciamientos reducidos como los utilizados SRWC con fines energéticos.

Ante tal situación, en el presente estudio tiene como objetivo evaluar dos clones de *Gmelina arborea* utilizados para la producción de madera, pero plantados en SRWC con tres espaciamientos (1.0x1.0 m, 0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m). La evaluación incluye la mortalidad en el SWRC, las características morfológicas de los árboles (diámetro en la base del árbol y altura total), arquitectura del área foliar (índice área foliar [IAF], cantidad y ángulo de ramas y ramas silépticas), la producción de biomasa y flujo de biomasa por hojas durante los primeros 24 meses de edad de la plantación. Con esta información se pretende conocer el potencial energético y de producción de biomasa de dos clones utilizados en la producción de madera, pero evaluados en los espaciamientos de SRWC.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación geográfica y condiciones de la plantación

Se trabajó con una plantación energética de dos clones de *Gmelina arborea* ubicada en Santa Rosa de Pocosol, Alajuela, Costa Rica. Los clones utilizados en esta plantación energética presentaban mayor desarrollo en diámetro y una mayor producción de madera aserrada cuando son plantados para la producción de madera. Tres tipos de espaciamientos con tres repeticiones fueron utilizados: 1.0x1.0 m (10 000 N/ha), 0.75x0.75 m (17500 N/ha) y 1.0x0.5 m (20000 N/ha) para cada clon. Por lo que fueron muestreadas 18 unidades experimentales (2 clones x 3 espaciamientos x 3 repeticiones = 18 unidades experimentales).

Muestreo de árboles en la plantación y muestreo en el árbol

El muestreo se realizó en 4 diferentes edades: 6, 12, 18 y 24 meses. Primeramente, en cada edad se contó la cantidad de árboles presentes en las unidades experimentales para determinar la sobrevivencia de cada uno de los clones en las diferentes condiciones de espaciamiento. Entonces, en cada unidad experimental se muestrearon cinco árboles (2 clones x 3 espaciamientos x 3 bloques x 5 árboles = 90 árboles), a los cuales se les midió el diámetro a 30 cm del suelo y la altura total. Luego, los árboles se cortaron a nivel del suelo y se les separaron las hojas, quedando el fuste con las ramas. En esta condición se midió la altura total, la cantidad de ramas totales presentes en el fuste y el ángulo de 5 ramas. Cada una de partes del árbol (hojas, ramas y fuste) fueron pesadas de forma independiente mediante el uso de una balanza de 0.01 kg. Seguidamente se procedió a extraer seis secciones transversales de 10 cm de largo en tres diferentes alturas: 2 muestras en la base del árbol, 2 muestras en la altura total y 2 muestras al 50% de la altura total. Así mismo se tomó aproximadamente 500 gramos representativos de las hojas y otros 500 gramos de las ramas de cada uno de los árboles. El material restante del fuste fue molido y se obtuvo material granulado con dimensiones no mayores a 3 mm de largo.

Determinación del índice de área foliar y caracterización de las ramas

El índice de área foliar (IAF) se determinó con un método destructivo, siguiendo la metodología propuesta por Mason et al. (2012). Para esto, las hojas de los árboles muestreados de cada clon se separaron y pesaron en condición verde, posteriormente se tomó una muestra de 500 gramos de la copa y estas fueron expandidas sobre una superficie de color negro y se fotografiaron a una resolución de 450 dpi para calcular el área foliar específica (AFE) y la relación de peso por AFE. Finalmente, IAF se calculó utilizando el peso total de las hojas y la relación de hojas por el peso de hojas en la muestra tomada con respecto al área de desarrollo del individuo (definida para cada espaciamiento utilizado).

INFORME FINAL DE PROYECTO

Gasificación de biomasa proveniente de plantaciones energéticas de *Gmelina arborea*

En la determinación de la cantidad de ramas, este parámetro fue expresado en cantidad de ramas por metro. A cada árbol se le contabilizaron todas las ramas y se dividió por la altura total del árbol. En el caso del ángulo de ramas, se trabajó con la parte superior de la copa, esto con fin trabajar con la copa viva del individuo (Weiss et al. 2004). Se seleccionaron 5 ramas de forma aleatoria y con una escuadra digital con un error de 0,5° se midió el ángulo interno de cada rama y posterior a ello se sacó un promedio por clon. Finalmente, se estimó la cantidad de ramas silépticas por metro. Las ramas silépticas se presentan de forma inmediata en un eje lateral sin que el meristema apical haya tenido un período de descanso intermedio (Benomar et al., 2012). La determinación de este tipo de ramas se realizó sobre un muestreo de 5 ramas de copa superior y se evaluó visualmente si la rama era siléptica, con ello se determinó un porcentaje de presencia de silépticas y extrapoló su cantidad por metro lineal a partir de la cantidad de ramas por metro presentes en cada clon.

Determinación y distribución de biomasa

Primeramente, se determinó el contenido de humedad (CH) de la biomasa. En el CH de las hojas y ramas se utilizó la muestra de 500 gramos de cada una de estas partes. Estas fueron pesadas en condición verde y colocadas en un horno a 103°C por 24 horas, para posterior a ese período volver a pesar. El CH fue calculado por ratio de agua con relación al peso verde ($CH = 100 * (\text{peso antes de secado} - \text{peso después de secado}) / \text{peso antes de secado}$). En tanto que, para el CH del fuste y la corteza, se utilizaron las muestras de 10 cm obtenidas en las 3 diferentes alturas. Para ello se separó la corteza del fuste. Estas dos partes se secaron en un horno a 103°C por 24 horas. El peso antes y después del secado fue determinado y utilizado para calcular el CH con la misma relación porcentual arriba mencionada. Con el cálculo del CH del fuste y con el peso en condición verde del fuste, fue determinada la cantidad de biomasa de la totalidad del fuste (Ecuación 1). Así mismo el peso de la totalidad de las hojas y de las ramas luego del secado se utilizó para el cálculo de la biomasa de cada una de estas partes del árbol. La biomasa calculada del fuste, hojas y ramas fue utilizada para calcular la distribución porcentual de la biomasa por cada una de estas partes de árbol. Luego los valores de biomasa obtenidos fueron proyectados para calcular la biomasa por hectárea para cada tipo de espaciamiento de plantación (1.0x1.0 m, 0.75x0.75m y 1.0x0.5 m).

$$Biomasa\ seca = \text{Peso verde}_{\text{parte del árbol}} \left(1 - \frac{CH_{\text{parte del árbol}}}{100} \right) \quad (1)$$

Flujo de biomasa en hojas

En cada unidad experimental se seleccionaron cinco árboles aleatoriamente y en la base del árbol se colocó un sarán de aproximadamente 1 m² (Figura 1a), con la finalidad que las hojas que caían del árbol se mantuvieran en esta trampa. No obstante, al aumentar la edad del árbol fue necesario incrementar el área de la trampa con el fin de recolectar todas las hojas que caían (Figura 1b). La recolección de las hojas se realizó de forma mensual. Estas hojas se secaron en un horno a 103°C por 24 horas y se determinó su peso. Este peso representó el flujo de la biomasa eliminada por el árbol durante un mes. Estos valores no se extrapolaron a hectárea, esto porque la mortalidad de los árboles, ocurrida durante todo el año, no permitía tener un dato preciso, por lo que se mantuvo el dato de biomasa en gramos/árbol. Seguidamente se presentó el flujo de la biomasa con el tiempo en cada uno de los meses evaluados durante los 24 meses para cada espaciamiento y la cantidad de biomasa en los cuatro periodos de evaluación, 6, 12, 18 y 24 meses por espaciamiento.



Figura 1. Colocación de las trampas de recolección de hojas en los árboles al inicio de la plantación (a) y en la plantación de 6 meses (b), para dos clones de *Gmelina arborea* creciendo en un sistema de corta rotación.

Análisis estadístico

Se verificó que las variables medidas cumplieran con los supuestos de la distribución normal, homogeneidad de las varianzas, así como la presencia de datos extremos. Se aplicó un análisis de varianza para verificar el efecto del clon y los diferentes espaciamientos de plantación en cada una de las edades en que fueron evaluados los clones. Se utilizó como variables independientes del modelo el clon, espaciamiento y su interrelación y las variables medidas (diámetro, altura, CH, biomasa de las diferentes partes, IAF, cantidad y ángulo de ramas y ramas silépticas) como variables de respuesta. La prueba de tukey fue utilizada para determinar las diferencias estadísticas entre las medias de las variables medidas. El análisis de varianza y las pruebas Tukey fueron realizados utilizando el software SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC).

RESULTADOS

1. Crecimiento en altura y diámetro

El diámetro de los árboles aumento con la edad y se observaron diferencias entre los clones en todas las edades y en la mayoría de los espaciamientos, con excepción del espaciamiento de 1.0x0.5 m en 6 y 24 meses y el espaciamiento de 1.0x1.0 m en 12 y 18 meses, donde no se observaron diferencias estadísticas entre los clones (Figura 2a). Con respecto a la altura se observaron diferencias entre los clones en el espaciamiento de 1.0x1.0 m en 6 y 18 meses y en el espaciamiento de 0.75x0.75 m a los 6 y 24 meses (Figura 2b). El aumento del diámetro y la altura con la edad corresponde al desarrollo normal de los árboles en sus primeros años, donde el árbol trata de posicionarse en altura para luego empezar su desarrollo en diámetro (Ryan y Yober, 1997). El mejor desarrollo del clon 1 en diámetro en las edades de 6 y 24 meses (Figura 2a) y en altura en las edades de 6 y 18 meses (Figura 2b) en el espaciamiento de 1.0x1.0 m sugieren que este clon presenta mejor crecimiento en espaciamientos amplios, mientras que el clon 2, que presentó un diámetro mayor en los espaciamientos de 0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m en las edades de 12, 18 y 24 meses (Figura 2a), por lo que presenta mejor desarrollo en espaciamientos más reducidos.

Las diferencias en el desarrollo del diámetro y la altura de cada clon en los diferentes espaciamientos son asociadas a la aptitud del clon a las condiciones de competencia (Zamora et al., 2015). En este sentido DeBell et al. (1996) indica que algunos clones están preparados genéticamente para condiciones de competencia más severas, como por ejemplo en clon 2 en los espaciamientos bajos (0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m). Este clon, probablemente desarrolle procesos fisiológicos mejor adaptados a las condiciones de competencia que se producen en los espaciamientos bajos

(Carmona et al., 2015). En tanto que el clon 1 está más preparado fisiológicamente a condiciones de baja competencia, como el espaciamiento de 1.0 x 1.0 m, donde presentó mejores condiciones de crecimiento en altura y diámetro.

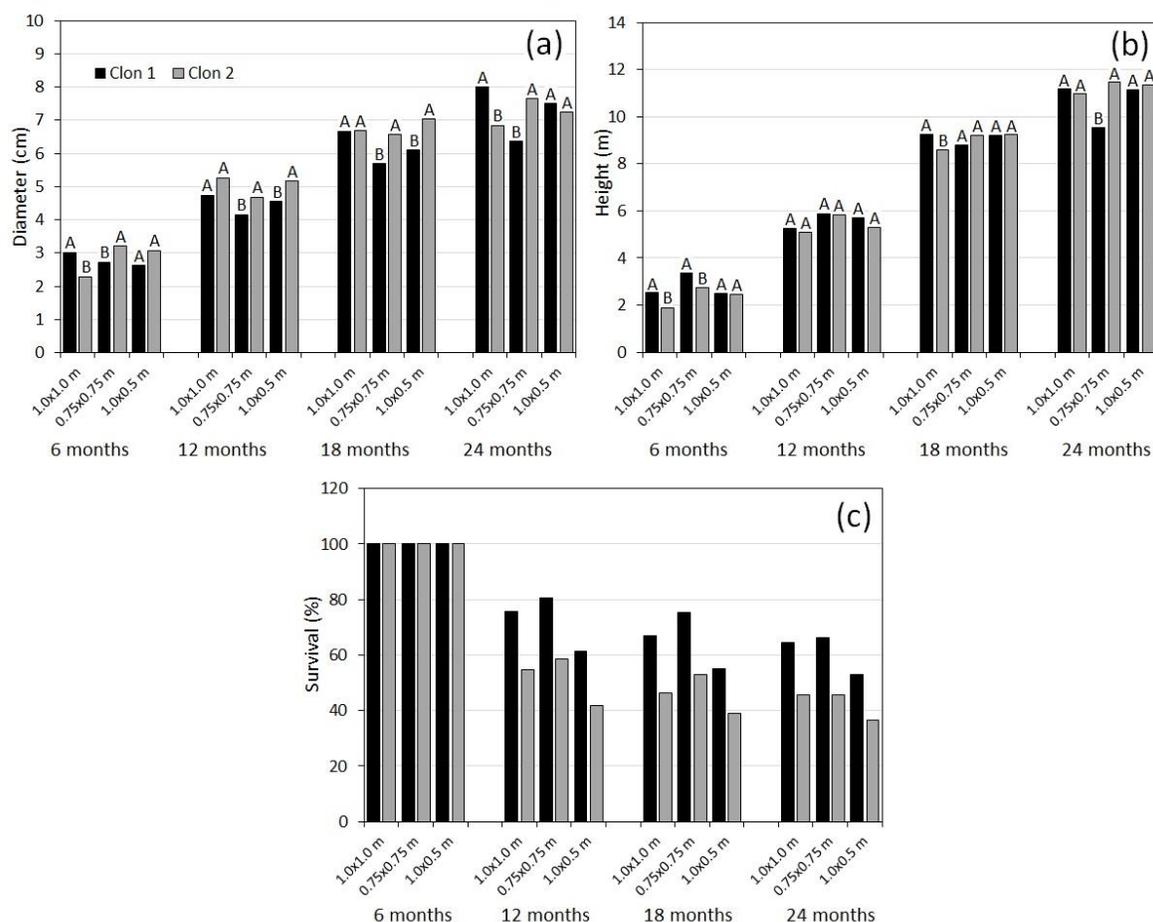


Figura 2. Average diameter (a), height (b) and survival (c) by age and spacing of the two clones of *Gmelina arborea* growing in a short rotation system.

Note: Survival is function of the initial density. Different letters indicate statistical differences at 95% between spacings.

2. Sobrevivencia/mortalidad

Una mayor mortalidad de los árboles se presentó entre los 6 y 12 meses para ambos clones, sin embargo, el nivel de sobrevivencia del clon 1 fue mayor en comparación con el clon 2 para los tres espaciamientos utilizados (Figura 1c). Para este periodo y para el clon 1 se presentaron porcentajes de sobrevivencia de 76%, 81% y 61%, mientras que para el clon 2 de 55%, 58% y 42% para los espaciamientos de 1.0x1.0 m, 0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m respectivamente (Figura 2c). A los 24 meses el porcentaje de sobrevivencia de los árboles con respecto a la densidad de siembra inicial fue de 64%, 66% y 53% para el clon 1 y de 46%, 46% y 37% para clon 2 para los espaciamientos de 1.0x1.0 m, 0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m respectivamente (Figura 2c).

Las condiciones del suelo donde se estableció el sistema SRWC probablemente no fueron adecuadas para la especie y sobre todo para el nivel de demanda de recursos que necesita el árbol

en los espaciamientos utilizados (Paris et al, 2011). Entonces, esta condición provocó que el nivel de sobrevivencia de los árboles fuera bajo producto de la alta mortalidad en los diferentes espaciamientos (Figura 1c). La mortalidad de los árboles puede ser explicada desde varios aspectos (Paris et al., 2011; Shifflett et al., 2014). (i) demanda de recursos: luego del establecimiento de la plantación, los arboles empiezan a crecer hasta alcanzar el máximo recurso que puede soportar el sitio (Onyekwelu et al., 2003). Sin embargo, este crecimiento se empieza a limitar a la medida que inicia la competencia entre árboles (DeBell et al., 1989), lo que provoca la liberación de recursos a través de la mortalidad (Hall, 1994), (ii) cantidad de recursos en el suelo: la sobrevivencia del árbol es condicionada por la cantidad de recursos presentes en el suelo (Laureysens et al., 2004), si un sitio no cuenta con recursos necesarios para el crecimiento de los árboles la competencia por estos recursos es mayor, lo que ocasiona la mortalidad de algunos individuos (Dillen et al., 2013).

Con relación al porcentaje de sobrevivencia de los clones, el cual fue mayor en el clon 1 que en el clon 2, es posible señalar que el clon 1 posee mejores habilidades para sobrevivir a las condiciones de SRWC, situación que es común en clones ya que algunos son genéticamente mejor adaptados a condiciones de competencia (Zamora et al., 2015). No obstante, a pesar de esta condición, en ambos clones la sobrevivencia fue baja, entre 20 y 60%, lo que puede indicar que estos no son adecuados para SRWC en el sitio donde se estableció la plantación. Lo que no significa que estos mismos clones tengan mejor sobrevivencia y producción en otros sitios. Acorde con Dillen et al. (2013), the breeding and selection for SRC are complex; fast growth rates are not the only aim, but also sustained biomass yields and good ability to survive.

Al comparar los resultados de mortalidad del presente estudio con otros estudios, se tiene que estos están muy próximos a los obtenidos en otras regiones de Costa Rica. Por ejemplo, Tenorio et al. (2019) reportan un porcentaje de sobrevivencia entre 60 y 77% a la edad de 2 años, valores similares a los encontrados para el clon 1 (Figura 1c). Estos autores señalan que la fertilidad del sitio es importante en el establecimiento de SRWC de *G. arborea*, ya que, de varios sitios analizados en Costa Rica, algunos presentaban una sobrevivencia del 95%, debido a las buenas condiciones de suelo.

3. Características de la copa: índice de área foliar, biomasa de hojas y caracterización de las ramas (frecuencia de ramas totales, silépticas y biomasa)

Como era de esperar el índice de área foliar (IAF) por árbol aumentó con la edad, y el clon 2 presentó valores más altos en relación con el clon 1 (Figura 3a). Únicamente a los 6 meses en el espaciamiento de 1.0x1.0 m no se presentaron diferencias entre los clones (Figura 3a). En la figura 3b se observa claramente la diferencia en el color de la copa de los clones en cada bloque, siendo la copa del clon 2 de un color verde más intenso del que presenta la copa del clon 1.

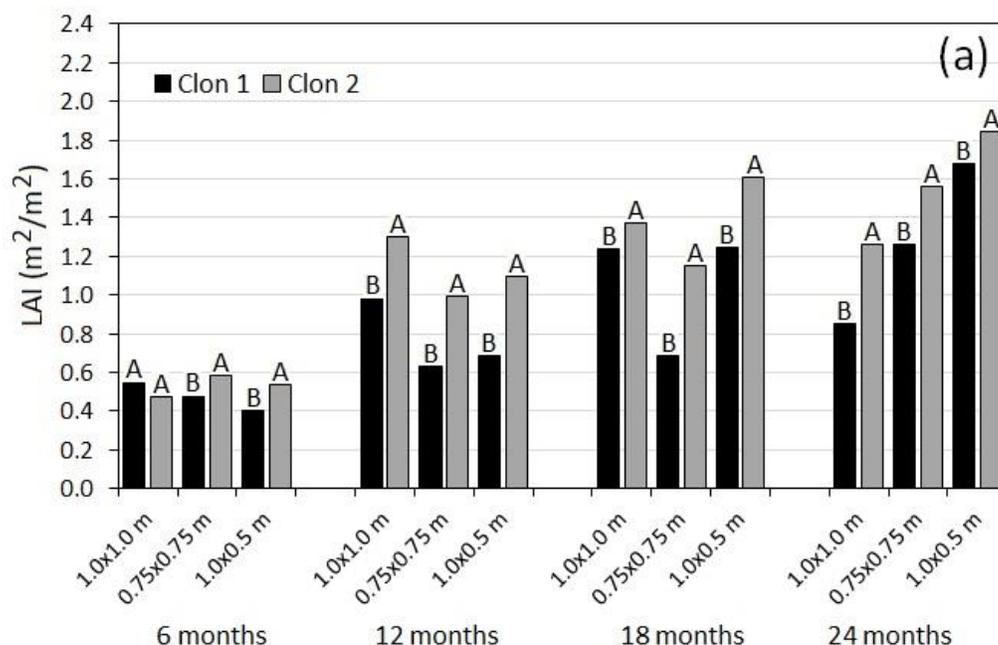


Figure 3. Leaf area variation per tree by age and spacing (a) and aerial aspect of the experimental units of the two clones of *Gmelina arborea* growing in a short rotation system at the age of 18 months (b).

Note: Different letters indicate statistical differences at 95% between spacing.

En el caso del ángulo de las ramas (Cuadro 1), se encontró que aumenta con la edad en el espaciamiento más amplio (1.0x1.0 m). En el espaciamiento de 0.75x0.75 m se mantuvo estable en 54° entre los 6 y 18 meses, pero luego aumento aproximadamente a 58° a la edad de 24 meses. En tanto que en el espaciamiento de 1.0x0.5 m hasta la edad de 12 meses fue estable, luego siguió una tendencia a disminuir con la edad. Otra observación fue que el ángulo de las ramas disminuye con la disminución del espaciamiento, luego de los 12 meses de edad, siendo más grandes los cambios con el aumento de edad de la plantación. En relación con las diferencias entre clones, estas se

INFORME FINAL DE PROYECTO

Gasificación de biomasa proveniente de plantaciones energéticas de *Gmelina arborea*

presentaron solamente en el espaciamiento de 0.75x0.75 m a la edad de 12 meses y el espaciamiento de 1.0x1.0 m a la edad de 24 meses (Cuadro 1).

Con relación a la frecuencia de ramas por metro, se observó que a la edad de 24 meses ocurre un ligero incremento en la cantidad de ramas, especialmente en los espaciamientos de 0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m, mientras que no se evidenció que se presentará diferencia estadística entre los dos clones analizados (Cuadro 1). En tanto que, en las ramas silépticas, se observó un ligero aumento con la edad y se presentaron algunas diferencias entre los clones: a la edad de 6 meses y en el espaciamiento de 1.0x1.0 m el clon 1 presenta una mayor cantidad de ramas, pero a esa edad y en las edades de 12 y 18 meses en el espaciamiento de 1.0x0.5 m el clon 1, presenta menor frecuencia de ramas silépticas (Cuadro 1). Así mismo la frecuencia de este tipo de ramas disminuye con la disminución del espaciamiento en las diferentes edades en los dos tipos de clones.

En la evaluación de la biomasa en hojas y ramas (tonnes/ha), se observó un aumento con la edad de la plantación y al disminuir el espaciamiento entre los árboles. En relación con las diferencias entre clones, se tiene que el clon 2 presentó los valores más altos a los 6 meses en los espaciamientos de 0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m y a los 12 meses en el espaciamiento de 0.75x0.75 m (Cuadro 1), en tanto que en el resto de las condiciones no se presentó diferencias estadísticas entre los clones. En la biomasa en las ramas (tonnes/ha), se observaron diferencias a los 6 meses en el espaciamiento de 0.75x0.75 m, donde el clon 1 obtuvo el valor más alto, y a los 12 en los espaciamientos de 0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m y 24 meses en todos los espaciamientos, donde el clon 2 obtuvo los valores estadísticamente más altos (Cuadro 1).

Los parámetros evaluados de la copa (IAF y las características de las ramas) han mostrado que son consecuencia de la edad de la plantación, el espaciamiento y el tipo de clon, en especial cuando la competencia entre árboles comienza, luego de 6 meses de edad (Cuadro 1, Figura 3). Estos resultados son concordantes con los resultados reportados por Benomar et al. (2012), Alcorn et al. (2007) y Henskens et al. (2001). Benomar et al. (2012) y Roeh y Maguire (1997) indican que la estructura, forma y abundancia de la copa ocurre en el árbol como un efecto directo de su habilidad y eficiencia en el uso de la luz, lo cual está relacionado con la edad del árbol, el espacio entre los árboles y la disposición genética del árbol a estos dos factores.

La productividad en SRWC se determina por la intercepción de la luz y por la eficiencia de convertir la radiación interceptada en biomasa, es decir, la eficiencia del uso de la radiación (Braeckx et al., 2015; Schwerz et al., 2019). A su vez la capacidad del cultivo para interceptar la radiación está determinada por su área fotosintética, generalmente evaluada a través del IAF, que se relaciona linealmente con la producción de biomasa en plantaciones (Taylor et al., 2001). Esto confirma el aumento de la producción de la biomasa en las hojas con el aumento del IAF con la edad (Cuadro 1) y un aumento de la cantidad de biomasa en hojas en el clon 2, con mayor IAF (Figura 3a), especialmente en los espaciamientos más amplios (Cuadro 2).

La arquitectura, distribución y biomasa de las ramas es influenciada por la edad y el espaciamiento principalmente (Cuadro 1), lo cual es confirmado en varias especies plantadas en sistemas SRWC (Alcorn et al. 2007; DeBell et al. 1996; Henskens et al. 2001). Estas características de la copa del árbol determinan la capacidad de captura de luz y de realizar la fotosíntesis para convertir estos recursos en biomasa (Roeh and Maguire 1997; Wang and Jarvis 1990). Las diferencias en los ángulos de las ramas con el espaciamiento aparecen luego de 12 meses, esto porque en las edades tempranas no hay competencia, por lo que las ramas se desarrollan normalmente, pero cuando empieza la competencia, empiezan a ocurrir los cambios en la arquitectura de la copa (Benomar et al., 2012, Hegazy et al. 2008; Proe et al. 2002). La disminución del ángulo con la disminución del espaciamiento se debe a que rápidamente los árboles tienden a entrar en competencia en los espaciamientos reducidos, dando como resultado que las ramas tiendan a reducir su ángulo en busca de una mayor intercepción de la luz (Benomar et al., 2012).

INFORME FINAL DE PROYECTO

Gasificación de biomasa proveniente de plantaciones energéticas de *Gmelina arborea*

Sin embargo, no se evidencian diferencias entre los clones en el ángulo o frecuencia de las ramas (Cuadro 1), lo que si ocurre en la frecuencia de las ramas silépticas (Cuadro 1) y en la biomasa en ramas (Cuadro 1). La variación en el ángulo y frecuencia de ramas es una estrategia del árbol para optimizar su desarrollo foliar y así contar con mayor capacidad sintética ante el efecto de la competencia generada por el espaciamiento (Benomar et al., 2012), mostrando así la plasticidad en estos parámetros para lograr una mayor eficiencia en captura de luz (Ceulemans et al. 1990), por tanto ambos tipos de clones tienen una similitud en este comportamiento ya que se presentan pocas diferencias entre ellos.

El peso de la biomasa en las hojas aumentó por la capacidad de intercepción que tiene que tener el árbol al aumentar su edad y al disminuir el espaciamiento entre los árboles (Benomar et al., 2012), debido a una mayor disposición para la producción de biomasa (Braeckx et al., 2015). No obstante, las diferencias en la cantidad de biomasa en hojas tienden a desaparecer al aumentar la edad de los árboles (Cuadro 1). De acuerdo con varias investigaciones en SRWC, la biomasa en hojas disminuye al disminuir la disponibilidad de nitrógeno en el suelo (Hegazy et al. 2008; Proe et al. 2002), lo cual podría estar sucediendo en las edades de 18 y 24 meses, donde este nutriente probablemente se haya agotado. En las edades iniciales 6 y 12 meses, el suelo contaba con las condiciones de fertilización para potenciar las características de cada clon, como fue el caso del clon 2, que en esas edades presentó una mayor biomasa (Cuadro 1).

Cuadro 1. Angulo y frecuencia de ramas, frecuencia de ramas silépticas en árboles de dos clones de *Gmelina arborea* por edad y espaciamiento en sistemas de corta rotación.

Tree age (months)	Spacing (m)	Clon	Angle (graus)	Frequency of branch (N/m)	Frequency of sylleptic branch (N/m)	Biomass in banch (ton/ha)	Biomass in leaf (ton/ha)
6 meses	1.0x1.0	1	54.89 ^A (6.6)	6.67 ^A (25.1)	1.93 ^A (45.7)	1.64 ^A (0.51)	2.59 ^A (0.78)
		2	54.50 ^A (6.0)	6.07 ^A (14.6)	0.87 ^B (85.8)	1.55 ^A (0.20)	2.17 ^A (0.22)
	0.75x0.75	1	54.87 ^A (3.7)	6.47 ^A (18.4)	1.33 ^A (54.3)	2.20 ^A (0.25)	3.14 ^A (0.09)
		2	54.95 ^A (3.7)	6.07 ^A (20.2)	1.60 ^A (61.6)	2.92 ^B (0.22)	4.38 ^B (0.17)
	1.0x0.5	1	54.63 ^A (4.6)	5.73 ^A (21.3)	1.13 ^A (73.6)	2.24 ^A (0.31)	3.04 ^A (0.47)
		2	54.58 ^A (3.5)	6.40 ^A (16.5)	2.27 ^B (39.0)	3.59 ^A (0.98)	5.67 ^B (0.64)
12 meses	1.0x1.0	1	58.74 ^A (3.1)	6.00 ^A (17.8)	1.33 ^A (67.5)	2.48 ^A (0.53)	2.89 ^A (0.31)
		2	58.83 ^A (4.1)	6.20 ^A (15.2)	1.47 ^A (35.2)	2.62 ^A (0.51)	2.72 ^A (0.32)
	0.75x0.75	1	54.32 ^A (4.2)	5.87 ^A (16.9)	1.60 ^A (51.8)	2.83 ^A (0.39)	3.20 ^A (0.32)
		2	52.75 ^B (3.5)	6.27 ^A (12.7)	1.67 ^A (43.4)	3.72 ^B (0.64)	3.83 ^B (0.02)
	1.0x0.5	1	54.23 ^A (3.0)	6.00 ^A (12.6)	1.40 ^A (36.2)	2.80 ^A (0.41)	3.16 ^A (0.93)
		2	53.43 ^A (4.2)	6.27 ^A (15.3)	2.33 ^B (41.8)	3.69 ^B (0.32)	3.46 ^A (0.47)
18 meses	1.0x1.0	1	64.73 ^A (2.3)	5.33 ^A (16.9)	2.60 ^A (24.3)	4.44 ^A (0.84)	2.92 ^A (0.57)
		2	65.69 ^A (4.3)	5.40 ^A (18.3)	2.53 ^A (20.4)	4.00 ^A (0.88)	2.70 ^A (0.23)
	0.75x0.75	1	54.97 ^A (2.9)	6.13 ^A (16.1)	1.80 ^A (43.0)	5.10 ^A (1.83)	3.21 ^A (1.38)
		2	54.17 ^A (2.2)	6.27 ^A (15.3)	2.13 ^A (30.0)	5.46 ^A (0.78)	3.82 ^A (0.17)
	1.0x0.5	1	51.68 ^A (2.5)	6.73 ^A (16.3)	2.07 ^A (42.8)	3.64 ^A (0.95)	2.75 ^A (1.07)
		2	50.30 ^A (2.3)	7.00 ^A (12.1)	2.87 ^B (31.9)	5.01 ^A (1.86)	4.04 ^A (1.68)
24 meses	1.0x1.0	1	73.18 ^A (3.9)	5.33 ^A (19.6)	2.93 ^A (20.2)	4.97 ^A (1.78)	2.73 ^A (0.97)
		2	69.81 ^B (4.3)	6.40 ^A (15.4)	2.60 ^A (19.5)	9.20 ^B (4.95)	3.12 ^A (1.97)
	0.75x0.75	1	58.11 ^A (1.5)	6.93 ^A (13.9)	2.07 ^A (22.1)	5.34 ^A (1.64)	2.81 ^A (0.93)
		2	57.96 ^A (2.2)	7.00 ^A (17.1)	2.27 ^A (26.2)	11.90 ^B (3.22)	4.27 ^A (1.54)
	1.0x0.5	1	47.78 ^A (4.3)	8.47 ^A (16.0)	2.07 ^A (34.1)	5.80 ^A (0.68)	3.32 ^A (0.46)
		2	47.35 ^A (4.0)	7.47 ^A (19.5)	2.20 ^A (35.2)	10.51 ^B (2.45)	3.39 ^A (0.64)

Note: values in parentheses correspond to the coefficient of variation and different letters indicate statistical differences at 95% between spacing.

INFORME FINAL DE PROYECTO

Gasificación de biomasa proveniente de plantaciones energéticas de *Gmelina arborea*

4. Producción de biomasa

Con respecto a la biomasa, en el fuste (ton/ha) se observó que solo se presentan diferencias entre los clones en el espaciamiento de 1.0x1.0 m a los 18 meses, donde el clon 1 presenta los valores promedio más altos (Cuadro 2). En la biomasa con corteza las diferencias entre los clones se presentaron a los 12 y 18 meses en el espaciamiento de 1.0x1.0 m y a los 24 meses en el espaciamiento de 1.0x0.5 m, donde el clon 1 obtuvo los valores más altos. Para la biomasa total se presentaron diferencias únicamente a los 18 meses para el espaciamiento de 1.0x1.0 m, donde el clon 1 tuvo los valores más altos. Para el espaciamiento de 0.75x0.75 m, el clon 2 presentó la mayor cantidad de biomasa (Cuadro 2).

Cuadro 2. Biomasa promedio por parte del árbol por edad y espaciamiento para dos clones de *Gmelina arborea* creciendo en un sistema de corta rotación.

Edad (meses)	Espaciamiento (metros)	Clon	Fuste (ton/ha)	Corteza (ton/ha)	Total (ton/ha)
6	1.0x1.0	1	2.26 ^A (0.33)	0.41 ^A (0.09)	6.90 ^A (1.59)
		2	1.63 ^A (0.90)	0.29 ^A (0.13)	5.64 ^A (1.17)
	0.75x0.75	1	4.48 ^A (0.96)	0.66 ^A (0.10)	10.48 ^A (1.40)
		2	4.50 ^A (0.31)	0.64 ^A (0.05)	12.44 ^A (0.29)
	1.0x0.5	1	4.18 ^A (2.56)	0.63 ^A (0.29)	10.10 ^A (3.52)
		2	4.59 ^A (0.69)	0.72 ^A (0.12)	14.56 ^A (2.22)
12	1.0x1.0	1	9.54 ^A (0.86)	1.58 ^A (0.09)	16.49 ^A (1.69)
		2	7.97 ^A (2.76)	1.00 ^B (0.11)	14.31 ^A (3.05)
	0.75x0.75	1	15.24 ^A (3.97)	2.05 ^A (0.20)	23.32 ^A (4.58)
		2	14.31 ^A (1.08)	1.63 ^A (0.22)	23.49 ^A (1.65)
	1.0x0.5	1	13.93 ^A (0.65)	2.06 ^A (0.26)	21.95 ^A (0.72)
		2	12.29 ^A (1.48)	1.66 ^A (0.38)	21.09 ^A (2.53)
18	1.0x1.0	1	35.81 ^A (6.75)	4.49 ^A (1.04)	47.65 ^A (8.81)
		2	21.05 ^B (3.74)	2.19 ^B (0.42)	29.94 ^B (4.85)
	0.75x0.75	1	37.11 ^A (11.68)	4.86 ^A (1.18)	50.28 ^A (15.40)
		2	43.84 ^A (8.20)	4.04 ^A (0.97)	57.16 ^B (8.90)
	1.0x0.5	1	33.35 ^A (0.30)	3.92 ^A (0.29)	43.65 ^A (1.94)
		2	41.40 ^A (16.71)	4.30 ^A (2.02)	54.75 ^A (22.04)
24	1.0x1.0	1	44.29 ^A (13.23)	5.11 ^A (1.21)	57.11 ^A (16.59)
		2	35.41 ^A (18.32)	2.96 ^A (0.94)	50.68 ^A (25.81)
	0.75x0.75	1	43.72 ^A (5.92)	5.16 ^A (1.12)	57.03 ^A (8.43)
		2	57.15 ^A (14.31)	4.30 ^A (0.62)	77.62 ^A (19.05)
	1.0x0.5	1	53.62 ^A (11.70)	5.60 ^A (0.60)	68.35 ^A (12.94)
		2	49.05 ^A (0.82)	4.40 ^B (0.12)	67.35 ^A (2.28)

Note: values in parentheses correspond to the coefficient of variation and different letters indicate statistical differences at 95% between spacing.

El promedio de producción de biomasa de los diferentes clones (Tabla 2) en el sistema de SRWC es comparado con lo reportado para *G. arborea* en Costa Rica. Tenorio et al. (2018-2019) reportan una biomasa total entre 25 a 65 tonnes/ha a la edad de dos años y con similar comportamiento con relación al espaciamiento, aumento de la cantidad de biomasa con la disminución del espaciamiento.

Un aspecto importante de los SWRC, como en el caso de la *G. arborea* utilizando clones, es la producción de biomasa en cortos periodos de tiempo (Zamora et al., 2015; Volk et al., 2011) y acorde con varios estudios conducidos en América Latina, una adecuada producción a los dos años de edad de las especies en SWRC, puede variar entre 10 a 60 tonnes/ha (Moya et al., 2019, Cabrera et al., 2016, Carmona et al., 2015, Guerra et al., 2016, Da Costa et al., 2015). Entonces basados en los resultados de los dos clones de *G. arborea* comúnmente utilizados para la producción de madera

INFORME FINAL DE PROYECTO

Gasificación de biomasa proveniente de plantaciones energéticas de *Gmelina arborea*

pero plantados en SWRC en los diferentes espaciamientos (Tabla 2), la producción puede considerarse como óptima, a pesar de una relativa baja sobrevivencia de los árboles en el sistema.

Las pocas diferencias encontradas en la biomasa tanto en la producción total como en las diferentes partes de los árboles y en las distintas edades entre los dos clones (Tabla 2), es otro factor importante de resaltar. Este comportamiento es contradictorio cuando se compara con los resultados de desarrollo del diámetro y la altura del árbol, porque cada clon se comportó de manera diferente en los distintos espaciamientos. El clon 1 es apropiado para los espaciamientos más amplios (1.0x1.0 m) y el clon 2 para los espaciamientos más reducidos (0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m). Esto podría sugerir una mayor producción de biomasa total de cada clon en estos espaciamientos, lo cual no sucedió. Así mismo un aspecto importante de destacar en los valores de biomasa es que presentan un coeficiente de variación muy alto, principalmente a edades mayores (Tabla 2), lo que influye en las diferencias encontradas entre los clones (Wu et al., 2008).

En los resultados presentados se ha indicado que en el uso de clones no solamente es importante el desarrollo de la altura y el diámetro, sino que también la sobrevivencia. Este último factor está influyendo en las escasas diferencias encontradas entre los clones en los diferentes espaciamientos (Cuadro 2), esto porque en el caso de los espaciamientos reducidos (0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m), los árboles tienden a presentar mejor desarrollo de diámetro (Tabla 1), pero baja sobrevivencia (Figura 2c). Entonces, el desarrollo en altura y diámetro alcanzado por los árboles del clon 2 en esos espaciamientos, es debido a la menor sobrevivencia. No obstante, la sobrevivencia es una indicación de que algunos clones son genéticamente mejor adaptados a las condiciones de competencia que otros (Zamora et al., 2015).

Flujo de biomasa

El flujo de biomasa, medido individualmente por árbol, presentó una variación con el envejecimiento del árbol (edad), época del año, el espaciamiento y el tipo de clon (Figura 4a-c). La cantidad de biomasa por árbol aumentó con la edad en los 3 espaciamientos (Figura 4d). Sin embargo, hubo una variación durante el año en los tres espaciamientos, al finalizar el año 1, el árbol alcanzó el punto de mayor eliminación de biomasa por la caída de las hojas. Luego de este punto, la caída de hojas disminuye hasta enero, donde empieza nuevamente a aumentar hasta alcanzar un punto máximo en los meses de abril-mayo (meses 21-23), para luego volver a disminuir la eliminación de biomasa hasta cumplir los 24 meses (o mes de junio).

Este comportamiento del flujo de biomasa por caída de hojas es explicado por los niveles de precipitación durante el año (Wright y Cornejo, 1990). Para explicar el comportamiento de la caída de hojas de los clones es importante conocer la distribución de lluvias en la región donde están plantados los clones. Los meses de mayor precipitación se presentan de la segunda semana de mayo a agosto, luego de setiembre disminuye la precipitación ligeramente hasta octubre, seguidamente hay un ligero aumento de las precipitaciones en diciembre y entre enero y la primera semana de mayo, las precipitaciones son casi nulas (Moya y Tomazello, 2008). Durante el primer año el flujo de biomasa parece no tener influencia por la precipitación, debido al periodo seco (Man et al., 2015). En este ensayo, ocurre una pequeña inflexión en la caída de hojas durante los meses secos (marzo a mayo) del primer año de todos los espaciamientos (Figura 4a-c). Pero en el segundo año, hay una disminución constante de la biomasa por la caída de las hojas una vez que empieza el periodo seco (luego de mayo del primer año). En el caso de la máxima pérdida de biomasa por la caída de las hojas, ocurre en el segundo mes de iniciado el periodo de lluvias, que corresponde al mes de julio, periodo que ocurre el máximo crecimiento de los árboles de melina en Costa Rica (Moya y Tomazello, 2009).

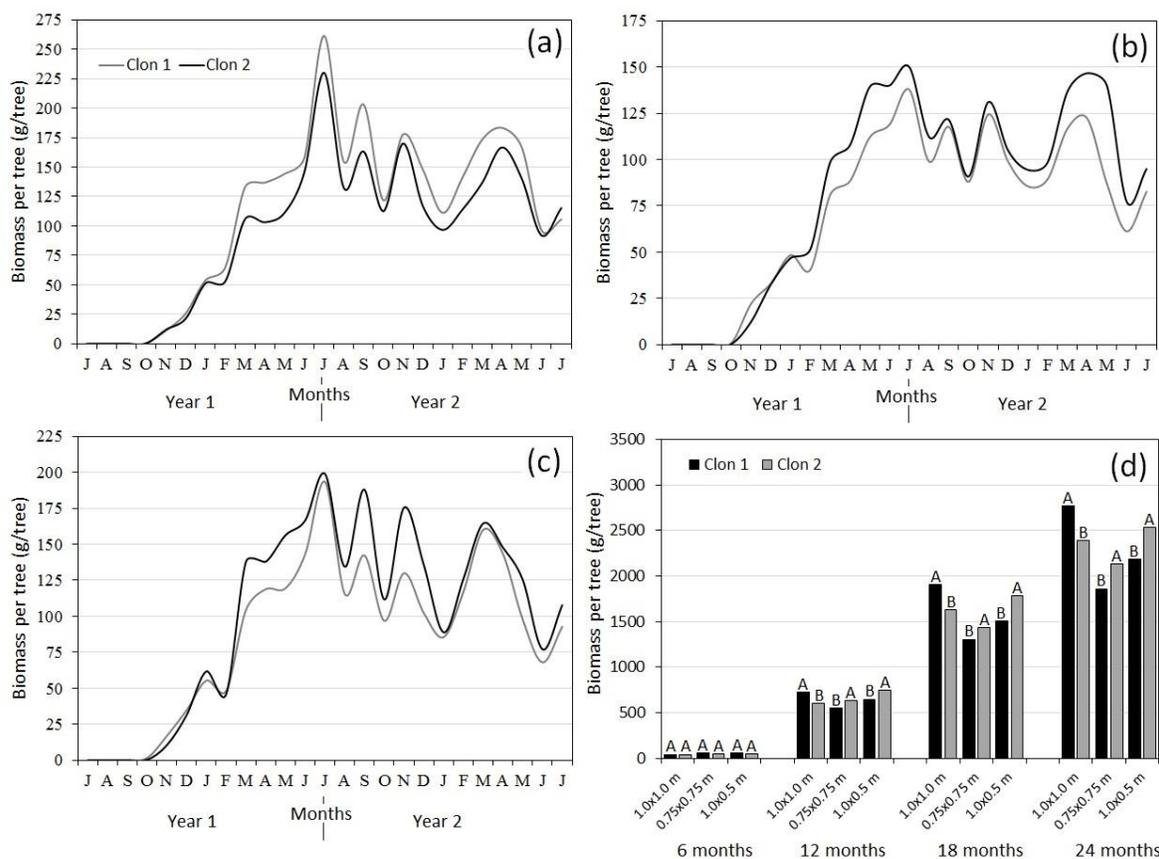


Figura 4. Flujo de biomasa por árbol durante los dos años de la plantación en los espaciamientos de 1.0x1.0 m (a), 0.75x0.75 m (b), 1.0x0.5 m (c) y totalidad de la biomasa por árbol por edad y espaciamiento (d).

Note: values in parentheses correspond to the coefficient of variation and different letters indicate statistical differences at 95% between spacing.

Se observó que los espaciamientos tienen un comportamiento irregular en el flujo de la biomasa, el espaciamiento más amplio presentó una mayor eliminación de biomasa por la caída de las hojas, luego de los 6 meses de edad, pero el espaciamiento más reducido (1.0x0.5 m) presenta mayor eliminación de biomasa por hojas en relación con el espaciamiento de 0.75x0.75 m (Figura 4d), tendencia que fue observada durante el periodo de 6 a 24 meses (Figura 4a-c).

Con relación a los dos clones estudiados, se observaron distintos comportamientos con el espaciamiento, en el espaciamiento más amplio (1.0x1.0 m) el clon 1 presenta valores ligeramente superiores que los que presenta el clon 2 luego de los 7 meses de edad y hasta que la plantación es cosechada (Figura 4a). No obstante, en los espaciamientos más reducidos (0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m), el clon 2 presenta valores más altos que el clon 1, para el mismo periodo señalado (Figura 4b-c). En comportamiento también fue confirmado en el análisis de los espaciamientos por edad, a la edad de 6 meses no hay diferencia entre los clones en los diferentes espaciamientos, pero en las edades de 12, 18 y 24 meses, el clon 1 presenta pérdida biomasa por árbol estadísticamente mayor que el clon 2 en el espaciamiento de 1.0x1.0 m. El clon 2 presenta valores de pérdida de biomasa estadísticas mayores que el clon 1 en los espaciamientos de 0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m (Figura 4d). Este comportamiento confirma lo indicado anteriormente de que el clon 1 parece ser óptimo para espacios amplios y el clon 2 para espaciamientos más reducidos.

INFORME FINAL DE PROYECTO

Gasificación de biomasa proveniente de plantaciones energéticas de *Gmelina arborea*

Conclusión

La cantidad de biomasa y la morfología de los dos clones utilizados para la producción de madera, pero plantados bajo el sistema de SRWC, tienen el problema de presentar una sobrevivencia poco adecuada en los espaciamientos de 1.0x1.0 m, 0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m en las condiciones del sitio estudiado. No obstante, esta situación permite que el desarrollo del diámetro, altura y la producción de biomasa sean comparables con los valores obtenidos para otras especies en mejores condiciones de sitio. Los dos clones estudiados, orientados a la producción de madera de *G. arborea*, pero utilizados SRWC en este estudio, presentan diferencias con el espaciamiento. El clon 2 presenta mejor desempeño en diámetro, altura y cantidad de biomasa en los espaciamientos reducidos (0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m), debido a un mayor desarrollo de la copa. En tanto clon 1 presenta un mejor desempeño en el espaciamiento más amplio (1.0x1.0 m), también por que produce un mayor desarrollo de la copa en este espaciamiento.

Agradecimiento

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) por el apoyo económico de esta investigación y la empresa Maderas Cultivas de Costa Rica (MCC) por el apoyo dado en el establecimiento y manejo de las plantaciones.

Bibliografía

- Alcorn PJ, Pyttel P, Bauhus J, Smith RGB, Thomas D, James R, Nicotra A (2007) Effects of initial planting density on branch development in 4-year-old plantation grown *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana* trees. For Ecol Manag 252(1–3):41–51
- Arguedas, M., Rodríguez-Solis, R., Moya, R., Berrocal, A. 2018. *Gmelina arborea* “death disease” in fast-growth plantations: effects of soil and climatic conditions on severity and incidence and its implications for wood quality. Forest Systems 27(1): 003-0016.
- Ávila-Arias, C., Murillo-Cruz, R., Murillo-Gamboa, O., & Sandoval-Sandoval, C. (2015). Desarrollo juvenil de clones de *Gmelina arborea* Roxb. de dos procedencias, en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 12(28), 23-35.
- Ávila-Arias A, C., Murillo, O., Arias, D., & Murillo, R. 2016. Early selection potential of *Gmelina arborea* Roxb. clones based on physiological correlations of their nursery-field behavior. International Journal of Applied Science and Technology 6(1):112-124
- Baettig, R.; Yáñez, M.; Albornoz, M. A. Cultivos dendroenergéticos de híbridos de álamo para la obtención de biocombustibles en Chile: estado del arte. Bosque, Chile, v. 31, n.2, p. 89199, 2010.
- Benomar, L.; A. DesRochers, GR. Larocque. (2012). The effects of spacing on growth, morphology and biomass production and allocation in two hybrid poplar clones growing in the boreal region of Canada. Trees. 26:939–949
- Broeckx, L. S., Vanbeveren, S. P., Verlinden, M. S., & Ceulemans, R. (2015). First vs. second rotation of a poplar short rotation coppice: leaf area development, light interception and radiation use efficiency. iForest: Biogeosciences and Forestry, 8, 565-573
- Carmona, R., Nuñez, T., Alonso, M.F., 2015. Biomass yield and quality of an energy dedicated crop of poplar (*Populus* spp.) clones in the Mediterranean zone of Chile. Biomass and Bioenergy 74: 96-102.
- Cabrera, A.M., Tozzini, C., Espinoza, S., Santelices, R. and Meza, F., 2016. Biomass production and carbon balance of a short rotation forestry of *Populus deltoides* (clone Lux) under two different cutting cycles. Bosque, 37(1), pp.205-210.
- Cerdá, E., Caparrós, A., Ovando, P. 2008. Bioenergía en la Unión Europea. Ekonomiaz 67:156–181
- Ceulemans R, Stettler RF, Hinckley TM, Isebrands JG, Heilman PE (1990) Crown architecture of *Populus* clones as determined by branch orientation and branch characteristics. Tree Physiol 7:157–167
- Cutz, L., Haro, P., Santana, D., Johnsson, F. 2016. Assessment of biomass energy sources and technologies: The case of Central America. Renewable Sustainable Energy Review.58: 1411-1431.

- Dawson, W.M; McCracken, A.R. 1995. The performance of polyclonal stands in short rotation coppice willow for energy production. *Biomass and Bioenergy*, 8(1): 1-5.
- Da Costa, K.C.P., de Lima, R.M.B. and Ferreira, M.J., 2015. Biomass and energy yield of leguminous trees cultivated in Amazonas. *FLORESTA*, 45(4), pp.705-712.
- DeBell, D. S., Clendenen, G. W., Harrington, C. A., & Zasada, J. C. (1996). Tree growth and stand development in short-rotation *Populus* plantings: 7-year results for two clones at three spacings. *Biomass and Bioenergy*, 11(4), 253-269.
- DeBell, D. S., W. R. Harms and C. D. Whitesell. Stockability: a major factor in productivity differences between *Pinus taeda* plantations in Hawaii and the southeastern United States. *Forest Science* 35, 708-719 (1989).
- Dillen, S. Y., Djomo, S. N., Al Afas, N., Vanbeveren, S., & Ceulemans, R. (2013). Biomass yield and energy balance of a short-rotation poplar coppice with multiple clones on degraded land during 16 years. *Biomass and bioenergy*, 56, 157-165.
- Dias Müller, M; Couto, L; Garcia Leite, H; Brito, J.O. 2005. Biomass and Energy Yield Evaluation of a Eucalypt Clone, Established at Different Planting Densities. *Biomassa & Energia*, 2(3): 177-186.
- Djomo, S.N., Zenone, A. Ac, T., De Groot, T., Bergante, S., Facciotto, G., Sixto, H., Ciria Ciria, P., Wegerg, J., Ceulemans, R. 2015. Energy performances of intensive and extensive short rotation cropping systems for woody biomass production in the EU. *Renewable Sustainable Energy Review* 41: 845-854.
- Dvorak, W.S. 2004. World view of *Gmelina arborea*: opportunities and challenges. *New Forest* 28: 111-126
- Eufrade Junior, H.J.; Melo, R.X; Pereira Sartori, M.M; Sebastiao Guerra, S.P; Ballarin, A.W. 2016. Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 90: 15-21
- Fang, S., Xu, X., Lu, S., Tang, L. Growth dynamics and biomass production in short-rotation poplar plantations: 6-year results for three clones at four spacings, *Biomass and Bioenergy* 17 (1999) 415-425.
- Gadelha, F. H. L.; Silva, J. A. A.; Ferreira, R. L. C.; Santos, R.C; Tavares, J.A. Produtividade de clones de eucaliptos em diferentes sistemas de manejo para fins energéticos. *Pesquisa Florestal Brasileira Brazilian Journal of Forestry Research*
- Guerra, S. P. S., Oguri, G., & Spinelli, R. (2016). Harvesting eucalyptus energy plantations in Brazil with a modified New Holland forage harvester. *Biomass and Bioenergy*, 86, 21-27.
- Hall, R. B. Use of the crown competition factor concept to select clones and spacings for short-rotation woody crops. *Tree Physiology* 14, 899-909 (1994)
- Henskens F, Battaglia M, Cherry M, Beadle C (2001) Physiological basis of spacing effects on tree growth and form in *Eucalyptus globulus*. *Trees-Struct Funct* 15(6):365–377
- Hegazy SS, Aref IM, Al-Mefarrej H, El-Juhany LI (2008) Effect of spacing on the biomass production and allocation in *Conocarpus erectus* L. trees grown in Riyadh, Saudi Arabia. *Saudi J Biol Sci* 15(2):315–322
- Inglesi-Lotz, R. 2016. The Impact of Renewable energy consumption to economic welfare: A panel data application. *Energy Economics* 53: 58-63.
- Junior, H.J.E., de Melo, R.X., Sartori, M.M.P., Guerra, S.P.S., Ballarin, A.W. 2016. Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy, *Biomass and Bioenergy* 90: 15-21.
- Laureysens, I., Bogaert, J., Blust, R., & Ceulemans, R. (2004). Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. *Forest ecology and management*, 187(2-3), 295-309.
- Lemos, S.V., Sartori, M.M.P., Junior, E., Ribas, L.C., Guerra, S.P.S. 2015 Energy generation of short rotation eucalyptus. *Energia na Agricultura* 30(3): 263-268.

INFORME FINAL DE PROYECTO

Gasificación de biomasa proveniente de plantaciones energéticas de *Gmelina arborea*

- Li, Y., Suontama, M., Burdon, R. D., Dungey, H. S. 2017. Genotype by environment interactions in forest tree breeding: review of methodology and perspectives on research and application. *Tree Genetics and Genomes* 13(3): 60-71.
- Man, J., Shi, Y., Yu, Z., & Zhang, Y. (2015). Dry matter production, photosynthesis of flag leaves and water use in winter wheat are affected by supplemental irrigation in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *PLoS one*, 10(9), e0137274.
- Mason, E.G., M. Diepstraten, G.L. Pinjuv, J.P. Lasserre. (2012). Comparison of direct and indirect leaf area index measurements of *Pinus radiata* D. Don. *Agricultural and Forest Meteorology* 166–167: 113– 119
- Matzenberger, L., Kranzl, E., Tromborg, M., Junginger, V., Daioglou, C.S., Goh, K., Keramidas, L. 2015. Future perspectives of international bioenergy trade, *Renewable Sustainable Energy Review* 43: 926-941
- Morales, M., Aroca, G., Rubilar, R., Acuna, E., Mola-Yudego, B., González-García, S, 2015. Cradle-to-gate life cycle assessment of *Eucalyptus globulus* short rotation plantations in Chile, *Journal of Cleaner Production* 99: 239-249.
- Moya, R., Tenorio, R., Oporto, G., 2019. Short rotation wood crops in Latin American: A review on status and potential uses of biomass. *Energies* (Submitted).
- Moya, R., Tomazello, M. 2008. Variation in the wood anatomical structure of *Gmelina arborea* trees at different ecological conditions in Costa Rica. *Revista Biología Tropical* 56(2) 689-704(2008).
- Moya, R., Tomazello, M. 2009. Wood density variation and tree ring demarcation in *Gmelina arborea* trees using x-ray densitometry. *Cerne* 15 (1): 92-100.
- Murillo, O. M., Badilla, Y., & Flores, S. B. (2018). Costos de producción en ambiente protegido de clones para reforestación. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15(37), 15-24.
- Oneykwelu, J., Mosandl, R., El Kateb, H., & Stimm, B. (2003). Growth characteristics of unthinned plantations of *Gmelina arborea* (Roxb) in South-Western Nigeria: Silvicultural implications. *J. Trop. For. Res.*, 20, S-50.
- P. Paris, L. Mareschi, M. Sabatti, A. Pisanelli, A. Ecosse, F. Nardin, et al., 2011. Comparing hybrid populus clones for SRF across northern Italy after two biennial rotations: survival, growth and yield, *Biomass and Bioenergy*, 35:1524-1532.
- Pleguezuelo, C.R.R., Zuazo, V.H.D., Biolders, C., Bocanegra, J.A.J., PereaTorres, F., Martínez, J.R.F. 2015. Bioenergy farming using woody crops. A review. *Agronomy Sustainable Development* 35(1), 95-119.
- Proe, M. F., Griffiths, J. H., & Craig, J. (2002). Effects of spacing, species and coppicing on leaf area, light interception and photosynthesis in short rotation forestry. *Biomass and Bioenergy*, 23(5), 315-326.
- Roeh RL, Maguire DA (1997) Crown profile models based on branch attributes in coastal Douglas-fir. *For Ecol Manag* 96(1–2):77–100
- Rosua, J.M., Pasadas, M. 2012. Biomass potential in Andalusia, from grapevines, olives, fruit trees and poplar for providing heating in homes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16:4190–4195.
- Ryan, M. G., & Yoder, B. J. (1997). Hydraulic limits to tree height and tree growth. *Bioscience*, 47(4), 235-242.
- Salazar-Zeledón, E., Moya, R., Valaert, J., 2015 Biomass and bioenergy production of *Arundo donax* L., *Pennisetum purpureum* Schum. and *Pennisetum purpureum* Schumack. x *Pennisetum glaucum* L. in short rotation cropping system in Costa Rica. *Journal of Biobased Material and Bioenergy* 9: 572-579.
- N. Scarlat, J.F. Dallemand, F. Monforti-Ferrario, H. Medarac, M. Banja, K. Bódis, Bioenergy monitoring and mapping in the European Union. *Bioenergy and Latin America: A Multi-Country Perspective*, European Union, Luxemburg, 2015, p.163.
- Schulze, J., Frank, K., Priess, J.A., Meyer, M.A. 2016 Assessing regional-scale impacts of short rotation coppices on ecosystem services by modeling land-use decisions. *PLoS one*. 11(4): e0153862.
- Schwerz, F., Eloy, E., Elli, E. F., & Caron, B. O. (2019). Reduced planting spacing increase radiation use efficiency and biomass for energy in black wattle plantations: Towards sustainable production systems. *Biomass and Bioenergy*, 120, 229-239.

- Serrano, R., Moya, R., 2011. Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico. *Revista Forestal Mesoamericana* 9(21): 12-28
- Shifflett, S. D., Hazel, D. W., Frederick, D. J., & Nichols, E. G. (2014). Species trials of short rotation woody crops on two wastewater application sites in North Carolina, USA. *BioEnergy Research*, 7(1), 157-173.
- Stolarski, M.J.; Szczukowski, S.; Tworkowski, J.; Wróblewska, H.; Krzyżaniak, M. 2011. Short rotation willow coppice biomass as an industrial and energy feedstock. *Industrial Crops and Products* 33: 217-223. DOI: 10.1016/j.indcrop.2010.10.013.
- Souza, F. C., G. G. dos Reis, M. G. F. Reis, H. G. Leite, R. S. de Faria, J. P. Caliman, R. A. Barbosa and C. H. R. de Oliveira. 2015. Growth of intact plants and coppice in short rotation eucalypt plantations. *New Forests* 47(2): 195-208.
- Taylor G, Ceulemans R, Ferris R, Gardner SDL, Shao BY (2001). Increased leaf area expansion of hybrid poplar in elevated CO₂. From controlled environments to open-top chambers and to FACE. *Environmental Pollution* 115: 463- 472. - doi: 10.1016/S0269-7491(01)00235-4
- Tenorio, C., Moya, R., Arias-Aguilar, D., E. Briceño-Elizondo, E. 2016. Biomass yield and energy potential of short-rotation energy plantations of *Gmelina arborea* one year old in Costa Rica, *Industrial Crops and Products* 83: 63-73.
- Tenorio, C., Moya, R., Arias, D., 2018. Evaluation of changes in tree morphology parameters, biomass yield, chemical and energy properties at three spacings of short rotation energy plantations of *Gmelina arborea* in Costa Rica, from one to two years of age. *Waste and Biomass Valorization* 9(7): 1163-1179.
- Tenorio, C., Moya, R., Ortiz, E., Arias, D. (2019). Production and regression models for biomass and carbon captured in *Gmelina arborea* trees in short rotation energy plantations in Costa Rica. *Forest* (submitted).
- Vallejos, J., Moya, R., Serrano, R. 2015. Effects of thinning on diameter, heartwood, density and drying defects of *Gmelina arborea*. *Maderas Ciencia y Tecnología* 17(2): 365-372
- Volk T.A., Abrahamson L.P., Cameron K.D., Castellano P., Corbin T., Fabio E., Johnson, G., Kuzovkina-eischen, Y., Labrecque, M., Miller, M., Sidders, D., Smart, B., Staver, K. Stanosz, G., Yields of willow biomass crops across a range of sites in North America. *Aspects of Applied Biology* 112: 67-74 (2011)
- Wang YP, Jarvis PG (1990) Influence of crown structural properties on PAR absorption, photosynthesis, and transpiration in Sitka spruce: application of a model (MAESTRO). *Tree Physiol* 7(1-4):297-316
- Weiss, M., F. Baret, G.J. Smith, I. Jonckheere, P. Coppin. 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 37-53
- Wright, S. J., & Cornejo, F. H. (1990). Seasonal drought and leaf fall in a tropical forest. *Ecology*, 71(3), 1165-1175.
- Wu, H. X., Ivkovic, M., Gapare, W. J., Matheson, A. C., Baltunis, B. S., Powell, M. B., & McRae, T. A. (2008). Breeding for wood quality and profit in *Pinus radiata*: a review of genetic parameter estimates and implications for breeding and deployment. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 38(1), 56-87.

Artículo 2: Propiedades de la biomasa de plantaciones de corta rotación de dos clones de *Gmelina arborea* en tres espaciamientos



20 de marzo 2019

Respetados investigadores

Carolina Tenorio Monge
Roger Moya Roque

Hemos aceptado su artículo titulado:

Propiedades de la biomasa de plantaciones de corta rotación de dos clones de *Gmelina arborea* en tres espaciamientos.

El mismo será publicado en el VOL 16, num 39 de la Revista Forestal Mesoamericana Kurú en el mes de julio del 2019.

Les agradecemos su selección para difundir los resultados de sus investigaciones.

Muy atentamente

Dorian Carvajal Vanegas, M.Sc.
Editor
Revista Forestal Mesoamericana Kurú
Escuela de Ingeniería Forestal
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Propiedades de la biomasa de plantaciones de corta rotación de dos clones de *Gmelina arborea* en tres espaciamientos

Carolina Tenorio^{1*}
Roger Moya²

Resumen

El conocimiento de las propiedades de la biomasa proveniente de clones de *Gmelina arborea* en cultivos energéticos en sistemas de corta rotación (SRC) en Costa Rica es limitado. Los primeros intentos están basados en el uso de clones para la producción de madera, pero plantados en SRC. Así, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar las propiedades físicas (peso específico, densidad y contenido de humedad), energéticas (poder calórico, contenido de cenizas y materiales volátiles) y contenido de carbón de dos clones de *G. arborea* utilizados para la producción de madera, pero plantados en SRC bajo tres espaciamientos (1,0x1,0 m, 0,75x0,75 m y 1,0x0,5 m), entre 6 y 24 meses de edad. Los resultados muestran que el peso específico básico fue de entre 0.30 a 0.38, la densidad verde de 0,9 a 1,0 g/cm³, el contenido de humedad entre 40 y 70%, el poder calórico de 18000 a 20000 kJ/kg, la cantidad de cenizas fue menor a 4,8% y el contenido de volátiles de entre un 70 a 86%. Se observaron diferencias entre los dos clones en edades tempranas, pero éstas tienden a desaparecer con el aumento de la edad, en especial a la edad de 24 meses, que es donde se pretende que la plantación sea cosechada, siendo esto una ventaja ya que se tiene una biomasa uniforme si los dos clones son utilizados.

Palabras claves: rápido crecimiento, especies tropicales, densidad de plantación, cultivo de madera, cultivo energético.

¹Instituto Tecnológico de Costa Rica; Escuela de Ingeniería Forestal; Apartado Postal: 159-7050 Cartago-Costa Rica; Teléfono: (506) 2550-2531 / Fax: (506) 591-3315; ctenorio@itcr.ac.cr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2901-7079>

²Instituto Tecnológico de Costa Rica; Escuela de Ingeniería Forestal; Apartado Postal: 159-7050 Cartago-Costa Rica; Teléfono: (506)2550-2433/Fax: (506) 591-3315; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6201-8383>

*Autor correspondiente: ctenorio@itcr.ac.cr

Biomass properties of short rotation plantations of two *Gmelina arborea* clones in three spacings

Abstract

The properties of biomass for energy properties from clone trees of *Gmelina arborea* in short rotation crops (SRC) is limited its knowing in Costa Rica. The first attempts in SRC with *G. arborea* are based on the use of clones planted in systems for sawlog production. Thus, this study aims to study the physical properties (specific gravity, green density and moisture content), energy (net caloric values, ash content and volatile materials) and carbon content between 6 and 24 months of age of two clones of *G. arborea* used for the wood production, but planted in SRS in three spacings (1.0x1.0 m, 0.75x0.75 m and 1.0x0.5 m). The results showed that the specific gravity varied from 0.30 to 0.38, green density from 0.9 to 1.0 g/cm³, the moisture content between 40 and 70%, net caloric values of 18000-20000 kJ/kg, ash content was less than 4.8% and the volatile content varied from 70 to 86%. The two clones planted in SRC present difference between the different clones at early ages, but they this performance tends to disappear with increasing age, and especially at 24 months old, which is the age to be harvested. This being an advantage since it has a uniform biomass if the two clones are used.

Keywords: fast growth; tropical species; plantation density; woody crops, energy crops.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial los altos precios de los combustibles fósiles combinados con el incremento de los problemas ambientales, han obligado a crear políticas para fomentar el uso de la energía renovable [1]. En este sentido, la biomasa ha sido una importante fuente de energía, debido a que es renovable y amigable con el ambiente [2] y se estima que representa el 14% del consumo anual de energía del mundo [3]. De acuerdo con Cerdá et al. [4], la biomasa sólida puede ser dividida en dos grupos: (i) los cultivos energéticos, que son especies plantadas y usadas específicamente para la producción de biomasa, dentro de los que se incluyen las especies maderables cultivadas bajo sistemas de corta rotación (SRC en inglés) y (ii) los residuos provenientes de bosques o plantaciones forestales maderables (como los que resultan de la limpieza y la poda), residuos agrícolas y residuos de industriales forestales (aserrín, costillas, etc.).

Los SRC son de gran interés debido a que son sistemas de producción de corto período de tiempo en los que especies arbóreas de rápido crecimiento se cultivan bajo prácticas agrícolas intensivas para lograr altos rendimientos de biomasa [2]. Los SRC se han vuelto muy importantes en algunos países de la Unión Europea [5] y en Estados Unidos [6]. En el caso de América Latina el establecimiento de SRC con especies forestales ha sido lento [7], pero poco a poco han venido ganando importancia en países como Chile [8-9], Brasil [10-11] y en algunos países de Centro América [12-15].

En Costa Rica, Tenorio et al. [13-14] reportan los primeros resultados de SRC utilizando árboles de *Gmelina arborea*, y mencionan que durante los dos primeros años de crecimiento, los espaciamientos de 0,5x1,0m (20 000 árboles por hectárea) y 1,0x1,0 m (10 árboles por hectárea), presentaron una mayor producción y mejores características de biomasa en comparación con los espaciamientos de 2.0x1.0 m (5000 árboles/hectárea).

Una estrategia práctica y efectiva en el aumento de la productividad de las plantaciones es el desarrollo de programas de reforestación clonal [16]. El uso de clones en SRC ha sido estudiado por diversos autores, y algunos de los géneros más utilizados son *Populus* spp [17-18], *Salix* spp [19] y *Eucalyptus* spp [17,20]. Una característica en común en el desarrollo de los clones de estas especies en SRC, es que los clones provienen de programas de reforestación para la producción de madera o para la industria de la pulpa [21].

Por otra parte, *Gmelina arborea* es una especie de alta importancia para la reforestación comercial en los países de clima tropical y es plantada para la producción de madera aserrada, pulpa y recientemente para la producción de energía [13-14, 22]. En Centro América, *G. arborea* crece en sitios de diferente nivel de precipitación, temperatura y en suelos con niveles adecuados de calcio [23]. En el caso de Costa Rica, *G. arborea* es plantada en una alta variedad de sitios y el crecimiento de los árboles en plantaciones permite que en la actualidad su turno de corta sea inferior a 10 años [24]. En la producción de madera, *G. arborea* tradicionalmente se ha utilizado en densidades que van desde los 600-1200 árboles/hectárea con el objetivo de obtener madera para el mercado de las tarimas [25].

Actualmente, el desarrollo de programas de mejoramiento genético permite disminuir la densidad de siembra inicial hasta 625 árboles/ha [26], obtener niveles de producción superiores a los 30 m³/ha-año y lograr turnos de rotación entre 6-8 años [27]. Estos programas de reforestación comercial cuentan con una serie de clones aptos para la producción de madera, los cuales se han concentrado en el desarrollo de las características morfológicas del árbol [28]. Sin embargo, en la actualidad no existen datos sobre el uso de estos clones en espaciamientos reducidos como los utilizados en plantaciones de corta rotación con fines energéticos.

Ante tal situación, en el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la biomasa de dos clones de *Gmelina arborea* utilizados para la producción de madera, pero plantados en SRC con tres espaciamientos (1.0x1.0 m, 0.75x0.75 m y 1.0x0.5 m). La evaluación de la biomasa se llevó a cabo mediante la determinación de las propiedades físicas del fuste (peso específico, densidad y contenido de humedad), las propiedades energéticas (poder calorífico, contenido de cenizas y materiales volátiles) y el contenido de carbono del fuste y las ramas a los 6, 12, 18 y 24 meses de establecida la plantación. Con esta

información es posible conocer el potencial energético de la biomasa de los clones utilizados en la producción de madera, pero evaluados en los espaciamientos de SRC.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación geográfica y condiciones de la plantación

Se trabajó con una plantación energética de dos clones de *Gmelina arborea* ubicada en Santa Rosa de Pocosol, Alajuela, Costa Rica. Estos clones fueron seleccionados por que presentaban mayor desarrollo en diámetro y producción cuando son utilizados en plantaciones para madera aserrada. Tres tipos de espaciamientos con tres repeticiones fueron utilizados: 1,0x1,0 m, 0,75x0,75 m y 1,0x0,5 m para cada clon. Por lo que fueron muestreadas 18 unidades experimentales (2 clones x 3 espaciamientos de plantación x 3 repeticiones = 18 unidades experimentales).

Muestreo de árboles en la plantación y muestreo en el árbol

El muestreo se realizó en 4 diferentes edades: 6, 12, 18 y 24 meses. En cada unidad experimental fueron muestreados cinco árboles (2 clones x 3 espaciamientos x 3 bloques x 5 árboles = 90 árboles). Luego, los árboles se cortaron a nivel del suelo y se separaron las hojas y ramas del fuste. Seguidamente se procedió a extraer seis secciones transversales de 10 cm de largo en tres diferentes alturas: 2 muestras en la base del árbol, 2 muestras en la altura total y 2 muestras al 50% de la altura total. El material restante del fuste fue molido y se obtuvo material granulado con dimensiones no mayores a 3 mm de largo.

Determinación del contenido de humedad, peso específico básico y densidad verde

Para el cálculo del contenido de humedad (CH) de las hojas y ramas, estas fueron pesadas en condición verde y colocadas en un horno a 103°C por 24 horas, para posterior a ese período volver a pesar. El contenido de humedad (CH) fue calculado por relación porcentual del peso después de secado con el peso antes del secado ($CH = 100 \cdot (\text{peso antes de secado} - \text{peso después de secado}) / \text{peso después de secado}$). En tanto que para el CH del fuste y la corteza, se utilizaron las muestras de 10 cm obtenidas en las 3 diferentes alturas. Para ello se separó la corteza del fuste. Estas dos partes fueron secadas en un horno a 103°C por 24 horas. El peso antes y después del secado fue determinado y utilizado para determinar el CH con la misma relación porcentual arriba mencionada. El peso específico básico fue determinado solamente para el fuste. Este fue pesado y se determinó su volumen por desplazamiento de agua acorde con la norma ASTM D-143 [29]. Luego fue colocado al horno por 24 horas a 103 °C. El peso específico básico fue determinado acorde a la norma ASTM D-4442 [30]. Así mismo fue calculada la densidad del fuste por la relación entre del peso verde/volumen verde.

Determinación de contenido de carbono y características energéticas

El material granulado del fuste (madera y corteza) de los 5 árboles de cada unidad experimental fueron unidos en una sola muestra y dicha muestra fue secada al aire, al 12% de CH. Luego el material fue tamizado en mallas de 0.25 mm y 0.42 mm (40 a 60 meshes respectivamente). El mismo procedimiento fue realizado para las ramas de los 5 árboles muestreados. En las características químicas se determinó el contenido de carbono (C) mediante el uso del Elementar Analysensysteme, modelo Vario Macro Cube. Se utilizaron tres muestras de aproximadamente 3 g del material tamizado tanto a nivel de fuste (madera y corteza) como de ramas.

Las características energéticas determinadas fueron el poder calórico, el porcentaje de cenizas y porcentaje de volátiles del material del fuste y ramas. Una proporción (10 gramos aproximadamente) del material tamizado del fuste (madera y corteza) y de las ramas fue utilizada en la determinación del poder calórico, para lo cual dicha muestra se secó al horno por 24 horas a 103 °C. El poder calórico se determinó usando la prueba calorimétrica de Parr's mediante la norma ASTM D-5865 [31] donde se utilizaron cinco muestras de 2 g cada una. En relación con el porcentaje de cenizas nuevamente se tomaron 10 gramos del material tamizado de cada unidad experimental (fuste y ramas) y se llevó a cabo el procedimiento detallado en la norma ASTM D 1102 [32]. Para el cálculo del porcentaje de volátiles se utilizaron cinco muestras de 2 g del material tamizado de cada unidad experimental (fuste y ramas), y se siguió la norma ASTM D1762 [33].

Análisis estadístico

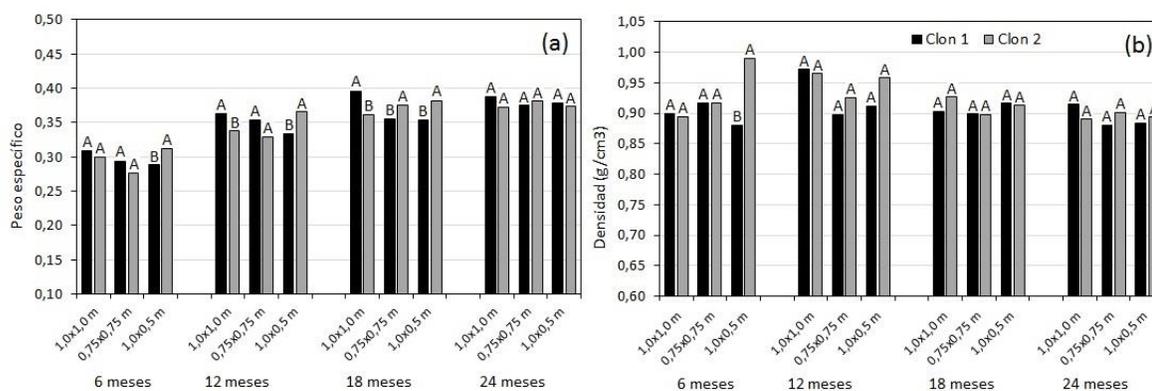
Se verificó que las variables medidas cumplieran con los supuestos de la distribución normal, homogeneidad de las varianzas, así como la presencia de datos extremos. Un análisis de varianza fue aplicado para verificar el efecto del clon y los diferentes espaciamientos de plantación en cada una de las edades. El clon, espaciamiento de plantación y su interrelación como variables independientes del modelo y las variables medidas (CH, peso específico básico, densidad, porcentaje de carbono, poder calórico, porcentaje de cenizas y de materiales volátiles) como variables de respuesta. La prueba de tukey fue utilizada para determinar las diferencias estadísticas entre las medias de las variables medidas. El análisis de varianza y las pruebas tukey fueron realizados utilizando el software SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC).

Resultados

Características físicas

El peso específico básico de los árboles de los dos clones aumentó con la edad (Figura 1a). Se observan diferencias entre los dos clones a los 6 meses en el espaciamiento de 1,0x0,5 m, a los 12 meses en los espaciamientos de 1,0x1,0 m y 1,0x0,5 m y a los 18 meses en los tres espaciamientos (Figura 1a). Con respecto a la densidad verde esta se mantuvo alrededor de los 0,91 g/cm³ para los dos clones y solo se presentaron diferencias entre clones a los 6 meses para el espaciamiento de 1,0x0,5 m, donde el clon 2 obtuvo el valor de densidad más alto (Figura 1b).

Figura 1. Valores promedio de peso específico básico (a) y densidad verde (b) por edad y espaciamiento



para dos clones de *Gmelina arborea* creciendo en un sistema de corta rotación.

Legenda: letras diferentes sobre los promedios en las mismas edades y mismos espaciamientos indican que hay diferencia estadística a un 99% de nivel de confianza.

Figure 1. Average values of specify gravity and green density by age and spacing for two clones of *Gmelina arborea* growing in short rotation crops systems.

Legend: different letters on average in same age and same spacing means statistical different at 99% confidence level.

El CH de los árboles de los dos clones disminuyó con la edad, con excepción del CH de la corteza que aumento (Cuadro 1). En el caso del CH del fuste solo se presentaron diferencias a nivel de clon a los 18 meses para los tres espaciamientos y a los 24 meses para el espaciamiento de 1,0x0,5 m (Cuadro 2). En el CH de la corteza se observaron diferencias entre los clones a los 6 meses en los espaciamientos de 1,0x1,0 m y 0,75x0,75 m, a los 12 meses en el espaciamiento de 1,0x1,0 m, a los 18 y 24 meses en el de 1,0x0,5 m, donde el clon 1 presento los CH más altos. Para el CH de las ramas se obtuvieron diferencias entre los clones a los 6 meses en el espaciamiento de 0,75x0,75 m a los 6 y 12 meses, y en el espaciamiento de 1,0x1,0 m a los 12 meses. Con respecto al CH de las hojas, solo se observaron diferencias a los 6 meses en los espaciamientos de 1,0x1,0 m y 1,0x0,5 m donde el clon 1 presentó los CH más altos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Variación del contenido de humedad en las diferentes partes del árbol por edad y espaciamiento para dos clones de *Gmelina arborea* creciendo en un sistema de corta rotación.

Table 1. Variation of moisture content by age and spacing for two clones of *Gmelina arborea* growing in short rotation crops systems

Edad (meses)	Espaciamiento (metros)	Clon	Contenido de humedad (%) en			
			Fuste	Corteza	Ramas	Hojas
6	1,0 x 1,0	1	68,49 ^a (1,94)	81,24 ^a (2,85)	62,67 ^a (4,08)	72,47 ^a (2,57)
		2	66,82 ^a (2,61)	73,58 ^b (4,67)	57,79 ^a (8,99)	69,51 ^b (3,22)
	0,75 x 0,75	1	68,21 ^a (2,63)	82,88 ^a (1,69)	55,06 ^b (8,06)	72,65 ^a (1,81)
		2	69,80 ^a (2,51)	78,03 ^b (2,30)	63,12 ^a (5,27)	71,87 ^a (4,31)
	1,0 x 0,5	1	67,42 ^a (2,85)	77,41 ^a (5,65)	54,37 ^a (7,22)	71,74 ^a (1,99)
		2	68,72 ^a (2,49)	78,59 ^a (3,51)	60,57 ^a (4,39)	68,85 ^b (3,08)
12	1,0 x 1,0	1	59,73 ^a (3,96)	81,92 ^a (2,18)	60,64 ^b (4,98)	71,93 ^a (1,81)
		2	61,73 ^a (3,64)	83,33 ^b (1,46)	61,37 ^a (7,75)	72,46 ^a (2,10)
	0,75 x 0,75	1	58,28 ^a (7,87)	83,07 ^a (3,09)	51,41 ^b (5,45)	74,31 ^a (2,50)
		2	62,39 ^a (6,95)	82,62 ^a (3,62)	56,29 ^a (5,21)	73,07 ^a (1,75)
	1,0 x 0,5	1	58,99 ^a (6,41)	82,55 ^a (1,88)	55,78 ^a (7,45)	73,00 ^a (1,42)
		2	56,44 ^a (4,32)	80,89 ^a (3,66)	60,36 ^a (3,82)	73,08 ^a (2,16)
18	1,0 x 1,0	1	48,06 ^b (7,75)	78,89 ^a (5,51)	44,74 ^a (3,72)	68,41 ^a (4,08)
		2	55,71 ^a (3,90)	81,40 ^a (2,03)	44,81 ^a (3,60)	67,41 ^a (4,15)
	0,75 x 0,75	1	55,06 ^a (4,09)	81,98 ^a (0,79)	40,61 ^a (6,31)	67,93 ^a (2,95)
		2	51,31 ^b (4,30)	81,06 ^a (3,34)	41,51 ^a (4,51)	67,82 ^a (3,72)
	1,0 x 0,5	1	57,30 ^a (1,89)	82,68 ^a (0,90)	41,74 ^a (8,15)	67,97 ^a (7,41)
		2	51,86 ^b (5,08)	80,27 ^b (2,95)	44,19 ^a (5,11)	66,56 ^a (6,03)
24	1,0 x 1,0	1	54,71 ^a (4,10)	80,70 ^a (1,97)	54,36 ^a (7,50)	65,51 ^a (2,66)
		2	54,18 ^a (2,87)	81,54 ^a (1,79)	52,32 ^a (8,94)	65,49 ^a (2,04)
	0,75 x 0,75	1	49,51 ^a (8,71)	80,91 ^a (1,06)	47,27 ^a (8,54)	65,85 ^a (1,87)
		2	50,11 ^a (8,94)	81,63 ^a (1,09)	42,38 ^a (9,54)	64,61 ^a (4,31)
	1,0 x 0,5	1	53,87 ^a (3,43)	81,84 ^a (0,90)	52,65 ^a (8,63)	68,53 ^a (2,73)
		2	51,00 ^b (3,29)	80,23 ^b (2,58)	53,29 ^a (6,28)	67,68 ^a (3,63)

Legenda: Los valores entre paréntesis indican el coeficiente de variación y letras diferentes sobre los promedios en las mismas edades y mismos espaciamientos indican que hay diferencia estadística a un 99% de nivel de confianza.

Legend: the values in parenthesis means coefficient of variation and different letters next to average at same age and same spacing means statistical different at 99% confidence level.

Características energéticas

El poder calórico del fuste fue mayor para el clon 1 en los espaciamientos de 0,75x0,75 m y 1,0x0,5 m a los 6 y 12 meses, mientras que para los 18 y 24 meses no se observaron diferencias entre los clones (Figura 2a). Con respecto al poder calórico de las ramas se observó un comportamiento similar al obtenido para el fuste, el clon 1 obtuvo valores más altos a los 6 meses para los espaciamientos de 0,75x0,75 m y 1,0x0,5 m y a los 12 meses en el espaciamiento de 1,0x0,5 m, en el resto de las edades y espaciamientos no hubo diferencias entre los clones (Figura 2b).

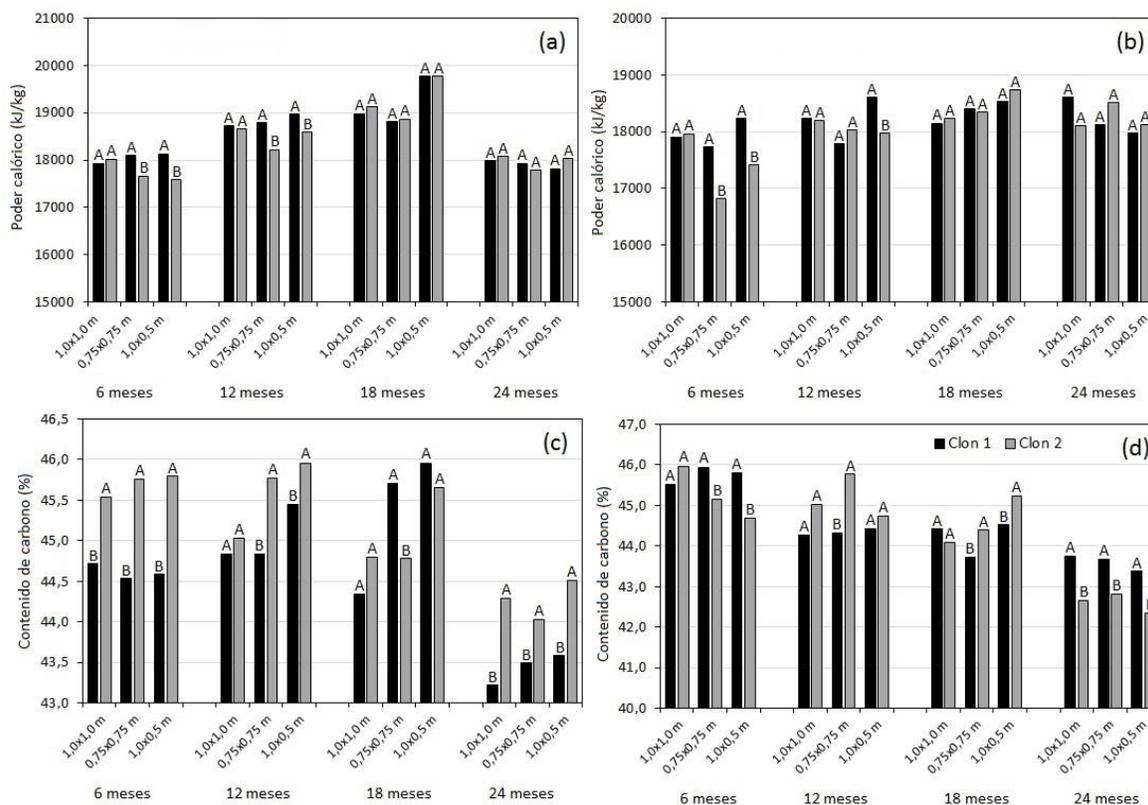


Figura 2. Poder calórico en fuste (a) y ramas (b) y contenido de carbono en fuste (c) y ramas (d) por edad y espaciamiento para dos clones de *Gmelina arborea* creciendo en un sistema de corta rotación.

Legenda: letras diferentes sobre los promedios en las mismas edades y mismos espaciamientos indican que hay diferencia estadística a un 99% de nivel de confianza.

Figure 2. Net caloric values in trunk (a) and branch (b) and content of carbon in trunk (c) and branch (d) by age and spacing for two clones of *Gmelina arborea* growing in short rotation crops systems. Legend: different letters on average in same age and same spacing means statistical different at 99% confidence level.

El contenido de cenizas de los árboles disminuyó con la edad tanto para el fuste como para las ramas. Se observaron diferencias a nivel de clon a los 6 meses en el espaciamiento de 1,0x1,0 m para las ramas y en el 0,75x0,75 m para el fuste y a los 18 meses en los espaciamientos de 0,75x0,75 m y 1,0x0,5 m para el fuste y 1,0x0,5 m para las ramas (Cuadro 2). Con respecto al contenido de volátiles a nivel de fuste y ramas se observó un aumento con la edad, y se observaron diferencias a nivel de clon a los 6 meses en los espaciamientos de 1,0x1,0 m y 0,75x0,75 m para el fuste, y 0,75x0,75 m y 1,0x0,5 m para las ramas. A los 12 meses en el espaciamiento de 0,75x0,75 m en las ramas y 1,0x0,5 m en el fuste. En los espaciamientos de 1,0x1,0 m en el fuste y de 1,0x0,5 m en el fuste y las ramas a los 18 meses. Finalmente, a los 24 meses se observaron diferencias a nivel de fuste y ramas en el espaciamiento de 0,75x0,75 m (Cuadro 2).

Cuadro 2. Variación del contenido de cenizas y volátiles en fuste y ramas por edad y espaciamiento para dos clones de *Gmelina arborea* creciendo en un sistema de corta rotación.

Table 2. Variation of ash content and volatile content by age and spacing for two clones of *Gmelina arborea* growing in short rotation crops systems

Edad (meses)	Espaciamiento (metros)	Clon	Contenido de cenizas (%)		Contenido de volátiles (%)	
			Fuste	Ramas	Fuste	Ramas
6	1,0 x 1,0	1	2,75 ^a (0,23)	4,87 ^b (0,45)	76,54 ^b (0,68)	73,68 ^a (2,07)
		2	3,08 ^a (0,74)	5,47 ^a (0,58)	77,35 ^a (0,71)	73,94 ^a (0,60)
	0,75 x 0,75	1	2,46 ^b (0,52)	4,81 ^a (0,56)	77,45 ^a (0,95)	75,41 ^a (1,58)
		2	3,87 ^a (1,21)	4,74 ^a (0,51)	75,37 ^b (0,89)	73,58 ^b (0,48)
	1,0 x 0,5	1	2,83 ^a (0,27)	5,14 ^a (0,90)	76,99 ^a (0,93)	74,48 ^a (0,67)
		2	3,41 ^a (0,77)	4,63 ^a (0,60)	76,69 ^a (0,84)	73,07 ^b (0,94)
12	1,0 x 1,0	1	2,13 ^a (0,32)	3,63 ^a (0,51)	78,01 ^a (0,72)	75,54 ^a (1,26)
		2	1,87 ^a (0,30)	3,97 ^a (0,41)	77,85 ^a (0,79)	75,52 ^a (0,97)
	0,75 x 0,75	1	2,08 ^a (0,43)	3,42 ^a (0,45)	77,18 ^a (0,90)	75,97 ^a (1,31)
		2	2,09 ^a (0,16)	3,75 ^a (0,29)	76,78 ^a (0,70)	74,36 ^b (0,50)
	1,0 x 0,5	1	2,10 ^a (0,38)	3,73 ^a (0,57)	78,37 ^a (0,44)	75,31 ^a (1,04)
		2	2,05 ^a (0,16)	3,77 ^a (0,21)	77,66 ^b (0,32)	75,01 ^a (1,06)
18	1,0 x 1,0	1	1,58 ^a (0,17)	2,54 ^a (0,28)	77,74 ^b (0,66)	77,45 ^a (1,01)
		2	1,69 ^a (0,14)	2,59 ^a (0,20)	79,61 ^a (0,58)	77,29 ^a (0,79)
	0,75 x 0,75	1	2,20 ^a (0,33)	2,52 ^a (0,40)	79,95 ^a (1,88)	77,84 ^a (0,59)
		2	1,57 ^b (0,19)	2,52 ^a (0,43)	79,46 ^a (0,57)	77,48 ^a (1,64)
	1,0 x 0,5	1	1,84 ^a (0,11)	2,30 ^b (0,21)	79,18 ^b (0,74)	77,83 ^a (0,79)
		2	1,55 ^b (0,17)	2,63 ^a (0,24)	79,93 ^a (0,43)	76,81 ^b (0,73)
24	1,0 x 1,0	1	1,67 ^a (0,32)	1,67 ^a (0,31)	79,35 ^a (1,46)	79,41 ^a (1,39)
		2	1,66 ^a (0,20)	1,64 ^a (0,24)	79,24 ^a (0,64)	79,26 ^a (0,66)
	0,75 x 0,75	1	1,49 ^a (0,26)	1,52 ^a (0,28)	81,04 ^a (0,87)	80,95 ^a (1,02)
		2	1,49 ^a (0,19)	1,56 ^a (0,21)	79,65 ^b (0,83)	79,50 ^b (0,87)
	1,0 x 0,5	2	1,79 ^a (0,16)	1,74 ^a (0,20)	79,50 ^a (0,45)	79,58 ^a (0,45)
		2	1,63 ^a (0,23)	1,60 ^a (0,22)	80,84 ^a (2,25)	81,11 ^a (2,26)

Legenda: Los valores entre paréntesis indican el coeficiente de variación y letras diferentes sobre los promedios en las mismas edades y mismos espaciamientos indican que hay diferencia estadística a un 99% de nivel de confianza.

Legend: the values in parenthesis means coefficient of variation and different letters next to average at same age and same spacing means statistical different at 99% confidence level

Contenido de carbono

Con respecto al carbono, este disminuyó con la edad para ambos clones tanto para el fuste como para las ramas (Figuras 2c-d). Con respecto al fuste, el clon 2 presentó en la mayoría de los casos el porcentaje de carbono más alto y no se observaron diferencias entre los clones únicamente en el espaciamiento de 1,0x1,0 m a los 12 y 18 meses y en el espaciamiento de 1,0x0,5 m a los 18 meses (Figura 2c). En el porcentaje de carbono en las ramas no se observaron diferencias entre clones en el espaciamiento de 1,0x1,0 m a los 6, 12 y 18 meses y en el espaciamiento de 1,0x0,5 m a los 12 meses (Figura 2d).

DISCUSIÓN

Las características de la biomasa encontrada en los diferentes clones (Tabla 1-2 y Figura 1-2), son comparables con las características de la biomasa de *G. arborea* de plantaciones de 6 años de edad, pero para un sistema de plantaciones para producción de madera [34]. Así también, al comparar las características de la biomasa con la *G. arborea* proveniente de clones también bajo el sistema de SRC presentados por Tenorio et al. [13-14], se obtienen valores bastantes similares a los presentado en las SRC de clones de melina. Este resultado confirma lo propuesto por Tenorio et al. [14], al indicar que en

general la biomasa de la especie de *G. arborea* es bastante uniforme en las propiedades físicas y químicas, lo que permitirá establecer procesos de aprovechamiento de biomasa bastantes estables.

Por otra parte, se observa que las características físicas y energéticas de la biomasa de los clones varían principalmente por la edad, como suele suceder para *G. arborea* [24,35]. Por ejemplo, el peso específico básico (Figura 1a), el poder calórico y contenido de cenizas de fuste y ramas aumenta (Figura 2a-b) con la edad, pero en el caso de la densidad en condición verde (Figura 1b), contenido de cenizas (Tabla 2) y cantidad de carbón (Figura 2c-d) de ramas y fuste, disminuyen con la edad. Dichos cambios son producidos por el envejecimiento de los diferentes elementos anatómicos y la constitución química de las células, dando lugar a un aumento del peso específico básico [36] o bien una relación de los celulosa/hemicelulosa/lignina diferente en la madera [37], provocando el favorecimiento del poder calórico (Figura 2), aumento de la cantidad de cenizas o bien la disminución el contenido de humedad o del contenido de volátiles (Tabla 1-2). Pero en el caso de la corteza, este comportamiento con la edad es bastante irregular, probablemente (Tabla 1) debido al alto grado de participación de este tejido en los procesos fisiológicos que se están llevando a cabo en el árbol en edades muy tempranas [38].

Otro aspecto importante de destacar, además de la variación por la edad, es la diferencia que se presenta en las diferentes partes de los árboles [2]. En la biomasa de *G. arborea*, las diferencias en la biomasa en las diferentes partes del árbol han sido ampliamente detalladas y explicadas por Tenorio et al. [13-14]. Dichos autores indican que las diferencias son atribuidas a las diversas funciones de las partes del árbol (fuste, ramas, hojas y corteza). Entonces, es de esperar que la constitución química de estas partes, relacionada con las propiedades energéticas y físicas de la madera, provoquen cambios en las propiedades de la biomasa [34,39-40], como por ejemplo las diferencias en el contenido de humedad, poder calórico y contenido de cenizas entre la biomasa del tronco y las ramas (Tabla 1-2).

En general se observa que la propiedades físicas y energéticas de la biomasa generada por los clones en sistemas de SRC, presentan poca diferencia entre los diferentes clones en edades tempranas, entre 6 y 18 meses y que éstas tienden a desaparecer con el aumento de la edad. Específicamente se observan diferencias en edades tempranas en el peso específico y el poder calórico a las edades de 12 y 18 meses (Figura 1a-b), el contenido de humedad de corteza a los 6 meses y el contenido de humedad del fuste a los 18 meses (Tabla 2). No obstante, la cantidad de carbono es el parámetro más afectado de la biomasa por el tipo de clon. El fuste del clon 1 presenta un contenido de carbono más bajo que clon 2 en las diferentes edades (Figura 2c-d).

Las diferencias encontradas entre los diferentes clones, como se ha indicado, es atribuible a que cada clon tiene diferentes respuestas a las condiciones de crecimiento (competencia por alta densidad en SRC), los cuales influye las condiciones de la biomasa [41], provocando las diferencias detalladas previamente.

La falta de diferencias en las propiedades de la biomasa a la edad de 24 meses, se puede atribuir a que los niveles de competencia del árbol tienden a ser similares, lo que da como resultado que las características de la biomasa que está siendo generada por el árbol sea de condiciones bastante similares entre los clones. En este sentido el manejo de clones en sistemas de SRC, es diferente a cuando el árbol es plantado para la producción de madera, como en el caso de los clones utilizados. Esto porque cuando los clones son utilizados para la producción de madera, el control genético de las propiedades de la madera aumenta con la edad [42-43]. Dicho comportamiento es contrario al presente resultado, donde se observa una tendencia a desaparecer el control genético, esto probablemente porque las condiciones de competencia son más severas en SRC que cuando el árbol se planta en los sistemas de producción de madera [21].

Conclusión

Las propiedades físicas y energéticas y el contenido de carbono de la biomasa generada por los clones para la producción de madera son comparables con las características de la biomasa de *G. arborea* de plantaciones de 6 años de edad y también comparable con la producción y características de la biomasa de árboles de *G. arborea* también bajo el sistema de SRC presentados en otras regiones del país. La calidad de biomasa, basado en las propiedades físicas y energéticas, de los clones evaluados pero plantadas en sistemas de SRC, presenta diferencias entre los clones en edades tempranas, pero éstas tienden a desaparecer con el aumento de la edad y en especial a la edad de 24 meses, que es

donde se pretende que la plantación sea cosechada, siendo esto una ventaja ya que se tiene una biomasa uniforme si los dos clones son utilizados.

Agradecimiento

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) por el apoyo económico de esta investigación y a la empresa Maderas Cultivas de Costa Rica (MCC) por el apoyo dado en el establecimiento y manejo de las plantaciones.

Referencias

- [1] Inglesi-Lotz, R. 2016. The Impact of Renewable energy consumption to economic welfare: A panel data application. *Energy Economics* 53: 58-63.
- [2] Pleguezuelo, C.R.R., Zuazo, V.H.D., Biolders, C., Bocanegra, J.A.J., PereaTorres, F., Martínez, J.R.F. 2015. Bioenergy farming using woody crops. A review. *Agronomy Sustainable Development* 35(1), 95-119.
- [3] Rosua, J.M., Pasadas, M. 2012. Biomass potential in Andalusia, from grapevines, olives, fruit trees and poplar for providing heating in homes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16:4190–4195.
- [4] Cerdá, E., Caparrós, A., Ovando, P. 2008. Bioenergía en la Unión Europea. *Ekonomiaz* 67:156–181
- [5] Schulze, J., Frank, K., Priess, J.A., Meyer, M.A. 2016 Assessing regional-scale impacts of short rotation coppices on ecosystem services by modeling land-use decisions. *PloS one*. 11(4): e0153862.
- [6] Djomo, S.N., Zenone, A. Ac, T., De Groote, T., Bergante, S., Facciotto, G., Sixto, H., Ciria Ciria, P., Wegerg, J., Ceulemans, R. 2015. Energy performances of intensive and extensive short rotation cropping systems for woody biomass production in the EU. *Renewable Sustainable Energy Review* 41: 845-854.
- [7] Matzenberger, L., Kranzl, E., Tromborg, M., Junginger, V., Daioglou, C.S., Goh, K., Keramidas, L. 2015. Future perspectives of international bioenergy trade, *Renewable Sustainable Energy Review* 43: 926-941
- [8] Morales, M., Aroca, G., Rubilar, R., Acuna, E., Mola-Yudego, B., González-García, S, 2015. Cradle-to-gate life cycle assessment of *Eucalyptus globulus* short rotation plantations in Chile, *Journal of Cleaner Production* 99: 239-249.
- [9] Carmona, R., Nuñez, T., Alonso, M.F., 2015. Biomass yield and quality of an energy dedicated crop of poplar (*Populus* spp.) clones in the Mediterranean zone of Chile. *Biomass and Bioenergy* 74: 96-102.
- [10] Lemos, S.V., Sartori, M.M.P., Junior, E., Ribas, L.C., Guerra, S.P.S. 2015 Energy generation of short rotation eucalyptus. *Energia na Agricultura* 30(3): 263-268.
- [11] Junior, H.J.E., de Melo, R.X., Sartori, M.M.P., Guerra, S.P.S., Ballarin, A.W. 2016. Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy, *Biomass and Bioenergy* 90: 15-21.
- [12] Cutz, L., Haro, P., Santana, D., Johnsson, F. 2016. Assessment of biomass energy sources and technologies: The case of Central America. *Renewable Sustainable Energy Review*.58: 1411-1431.
- [13] Tenorio, C., Moya, R., Arias-Aguilar, D., E. Briceño-Elizondo, E. 2016. Biomass yield and energy potential of short-rotation energy plantations of *Gmelina arborea* one year old in Costa Rica, *Industrial Crops and Products* 83: 63-73.
- [14] Tenorio, C., Moya, R., Arias, D., 2018. Evaluation of changes in tree morphology parameters, biomass yield, chemical and energy properties at three spacings of short rotation energy plantations of *Gmelina arborea* in Costa Rica, from one to two years of age. *Waste and Biomass Valorization* 9(7): 1163-1179.
- [15] Salazar-Zeledón, E., Moya, R., Valaert, J., 2015 Biomass and bioenergy production of *Arundo donax* L., *Pennisetum purpureum* Schum. and *Pennisetum purpureum* Schumack. x *Pennisetum glaucum* L. in short rotation cropping system in Costa Rica. *Journal of Biobased Material and Bioenergy* 9: 572-579.

- [16] Li, Y., Suontama, M., Burdon, R. D., Dungey, H. S. 2017. Genotype by environment interactions in forest tree breeding: review of methodology and perspectives on research and application. *Tree Genetics and Genomes* 13(3): 60-71.
- [18] Carmona, R., Nuñez, T., Alonso, M.F. 2015. Biomass yield and quality of an energy dedicated crop of poplar (*Populus* spp.) clones in the Mediterranean zone of Chile. *Biomass and Bioenergy* 74: 96-102.
- [19] Stolarski, M.J., Szczukowski, S., Tworowski, J., Wróblewska, H., Krzyżaniak, M. 2011. Short rotation willow coppice biomass as an industrial and energy feedstock. *Industrial Crops and Products* 33: 217-223.
- [20] Souza, F. C., dos Reis, G.G., Reis, M.G.F., Leite, H.G., de Faria, R.S., Caliman, J.P., Barbosa, R. A., de Oliveira, C.H.R. 2015. Growth of intact plants and coppice in short rotation eucalypt plantations. *New Forests* 47(2): 195-208.
- [21] Zamora, D.S., Apostol, K.G., Berguson, W. E., Volk, T.A., Wright, J., Ogdahl, E. J. 2015. Short rotation woody crops biomass production. *Biomass and biofuels: advanced biorefineries for sustainable production and distribution*, 49-76.
- [22] Dvorak, W.S. 2004. World view of *Gmelina arborea*: opportunities and challenges. *New Forest* 28: 111-126
- [23] Arguedas, M., Rodriguez-Solis, R., Moya, R., Berrocal, A. 2018. *Gmelina arborea* “death disease” in fast-growth plantations: effects of soil and climatic conditions on severity and incidence and its implications for wood quality. *Forest Systems* 27(1): 003-0016.
- [24] Vallejos, J., Moya, R., Serrano, R. 2015. Effects of thinning on diameter, heartwood, density and drying defects of *Gmelina arborea*. *Maderas Ciencia y Tecnología* 17(2): 365-372.
- [25] Lansing, D. M. 2013. Understanding linkages between ecosystem service payments, forest plantations, and export agriculture. *Geoforum* 47: 103-112.
- [26] Serrano, R., Moya, R., 2011. Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico. *Revista Forestal Mesoamericana* 9(21): 12-28
- [27] Ávila-Arias, C., Murillo-Cruz, R., Murillo-Gamboa, O., Sandoval-Sandoval, C. 2015. Desarrollo juvenil de clones de *Gmelina arborea* Roxb. de dos procedencias, en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 12(28), 23-35.
- [28] Ávila-Arias A, C., Murillo, O., Arias, D., & Murillo, R. 2016. Early selection potential of *Gmelina arborea* Roxb. clones based on physiological correlations of their nursery-field behavior. *International Journal of Applied Science and Technology* 6(1):112-124
- [29] ASTM. 2014. D143-14. Standard test method for small clear specimens of timber. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [30] ASTM. 2007. D4442-07. Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials, ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [31] ASTM. 2004. D5865-04. Standard test method for gross calorific value of coal and coke. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [32] ASTM. 2013. D1102-84. Standard test method for ash in wood. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [33] ASTM. 2013b. D1762-84. Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [34] Moya, R., Tenorio, C., 2013. Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. *Biomass Bioenergy* 56: 14-21
- [35] Moya, R., Tomazello, M. 2009. Variação radial da estrutura anatômica do lenho de árvores de *Gmelina arborea* em diferentes condições de clima e de manejo na Costa Rica. *Scientia Florestalis* 76:65-75.
- [36] Plomion C, Leprovost G, Stokes A. 2001. Wood Formation in trees. *Physiology* 127:1513-1523.
- [37] Kojima, M., Yamamoto, H., Marsoem, S. N., Okuyama, T., Yoshida, M., Nakai, T., Inoue, Y. 2009. Effects of the lateral growth rate on wood quality of *Gmelina arborea* from 3.5-, 7- and 12-year-old plantations. *Annals of Forest Science* 66(5): 1-6.
- [38] Little, C.H., Savidge, R.A. 1987. The role of plant growth regulators in forest tree cambial growth. *Plant Growth Regular* 6(1-2): 137-169.
- [39] Tenorio, C., Moya, R., 2013. Thermogravimetric characteristics, its relation with extractives and chemical properties and combustion characteristics of ten fast-growth species in Costa Rica. *Thermochimica Acta* 563: 12-21

- [40] Moya, R., Rodriguez-Zuñiga, A., Puente-Urbina, A. 2017. Thermogravimetric and devolatilisation analysis for five plantation species: Effect of extractives, ash compositions, chemical compositions and energy parameters. *Thermochimica Acta* 647(10): 36-48
- [41] González-García, M., Hevia, A., Majada, J., Barrio-Anta, M., 2013. Above-ground biomass estimation at tree and stand level for short rotation plantations of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden in Northwest Spain. *Biomass Bioenergy* 54: 147-157.
- [42] Callister, A.N., Collins, S.L. 2008. Genetic parameter estimates in a clonally replicated progeny test of teak (*Tectona grandis* Linn. f). *Tree Genetics and Genomes* 4: 237-245.
- [43] Fujimoto T., Akutso, H., Nei, M., Kita, M., Kuromaru, M., Oda, K. 2006. Genetic variation in wood stiffness and strength properties of hybrid larch (*Larixgmelinii* var. *japonica* L. kaempferi). *Journal Forest Research* 11:343-349.

Artículo 3: Evaluación de la incidencia de pellets y astillas de madera en el desempeño de un gasificador tipo “downdraft”

Evaluación de la incidencia de pellets y astillas de madera en el desempeño de un gasificador tipo “downdraft”

Evaluation of the incidence of pellets and wood chips in the performance of a “downdraft” type gasifier

Cindy Torres¹ • Marco Chaves² • Luis Urvinz² • Roger Moya³ 

Abstract

The size, geometry, density and mechanical properties of the biofuel particles are important factors in the performance of any biomass gasification process. They influence the mass transfer rates of the reacting species just as the drying and the thermal decomposition rates in the rest of the system. This work evaluates the significant differences between two different feedstocks, wood pellets and woodchips, on the performance and efficiency of a pilot scale “downdraft” gasifier unit with a combined heat and power system. When using woodchips as feedstock, on average, the temperature profile of the pyrolysis zone was 147 ± 15 °C higher, while the pressure drop inside the reactor and its variability were lower. The Cold Gas Efficiency and Global Thermal Efficiency of the system were higher as well with the woodchips as feedstock, despite the fact that the calorific value of the synthesis gas produced from the wood pellets was 8.00 MJ/Nm³ and the one obtained from the woodchips was slightly lower at 6.18 MJ/Nm³. At a power generation of 6.2 kW, the syngas and electrical energy yields, were also higher on average for the woodchips at 1.75 kg/kg and 564.50 kWh/t, compared to the wood pellets as feedstock at 1.40 kg/kg and 487.35 kWh/t respectively. The relationship between the electrical energy yield and the calorific value of the syngas flow was established by means of the Motor/Generator Efficiency, and it was within typical range for this type conversion systems, at 21.41 ± 3.23 % for the woodchips and 18.94 ± 3.68 % for wood pellets. In conclusion, even though the transport of the woodchips within system is more prone to clogging, the higher efficiency and better overall process performance obtained when using woodchips, makes it the preferred feedstock for the system compared to the wood pellets.

Key words: Pellets, biomass, energy production.

1. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica; cindytorres@ucr.ac.cr

2. Centro de Electroquímica y Energía Química, Universidad de Costa Rica; San José, Costa Rica; marco.chaves@biomafac.net; luis.urvinz@biomafac.net

3. Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica; Cartago, Costa Rica; moya@tec.ac.cr

Recibido: 31/05/2018

Aceptado: 03/09/2018

Publicado: 19/09/2018

DOI: 10.18845/rfmk.v15i1.3847



Resumen

En un proceso de gasificación de biomasa la geometría de la biomasa es un factor necesario que considerar. El tamaño, forma y densidad de las partículas del biocombustible influyen en el transporte de las especies del sistema de reacción, velocidades de secado y descomposición térmica; los cuales son factores relacionados al desempeño general del proceso. Este trabajo evaluó las diferencias significativas que existen en el rendimiento y eficiencia del sistema de generación de energía eléctrica y térmica por la incidencia de dos geometrías en la biomasa de alimentación (pellets y astillas de madera), en el desempeño de un gasificador tipo "downdraft". El perfil de temperatura de la zona de pirólisis fue en promedio $(147 \pm 15) ^\circ\text{C}$ mayor al utilizar astillas como alimentación en comparación con el uso de pellets. La caída de presión dentro del reactor fue menor en promedio, así como su variabilidad en el sistema, al utilizar astillas como alimentación; esto a pesar de que el poder calorífico del gas de síntesis obtenido fue levemente mayor para pellets $(8,00 \text{ MJ Nm}^{-3})$ que con respecto al obtenido con astillas $(6,18 \text{ MJ Nm}^{-3})$. Se obtuvo una Eficiencia de Gas Frío, así como la Eficiencia Térmica Global mayor al utilizar astillas de madera. La capacidad de aprovechamiento de la energía del syngas para producir potencia eléctrica, medido como la Eficiencia del Motor/Generador, estuvo dentro de los valores típicos para este sistema de conversión, y fue de $(21,41 \pm 3,23) \%$ para astillas y $(18,94 \pm 3,68) \%$ para pellets. Se obtuvo $564,50 \text{ kWh/t}$ de rendimiento de proceso en términos eléctricos al emplear astillas, el cual fue mayor que al utilizar pellets $(487,35 \text{ kWh/t})$, esto a una potencia de $6,2 \text{ kW}$. Con respecto al rendimiento de producción de gas de síntesis, con pellets fue menor con respecto a las astillas de madera (i.e. en promedio se produjo $1,75 \text{ kg}$ de gas de síntesis por kilogramo de astillas, lo que significa un 25% más que con pellets de madera). En conclusión, a pesar de que el manejo de astillas de maderas requiere ciertos cuidados para evitar el atascamiento dentro del sistema de conversión "downdraft" para producir gas combustible, en general las ventajas en proceso y eficiencias son mayores al utilizar madera en forma de astillas en comparación con pellets.

Palabras clave: Pellets, downdraft, biomasa, producción eléctrica.

Introducción

La biomasa es la principal fuente de energía renovable en todo el mundo, las estimaciones de implementación varían del 44% al 85% y la Agencia Internacional de Energía prevé que la capacidad de generación eléctrica global de la biomasa aumentará diez veces, de 50 GW

(Gigawatts) en el 2009 a 560 GW en el 2050 (Forestry & Natural Resources Development, 2014). Según el Plan de Expansión de la Generación Eléctrica 2016-2035 del ICE, la biomasa como fuente de generación tiene un potencial identificado de 445 MW de los cuales, solo se ha instalado 9% ($46,9 \text{ MW}$) que corresponden mayoritariamente al uso del bagazo y proyectos de biogás conocidos. El sector industrial usa intensivamente los combustibles fósiles, que cubren el 33% de sus necesidades, para la generación de calor y vapor. El 50% del consumo de ese sector proviene de biomasa (residuos vegetales y leña), utilizado en su mayor proporción por la industria de producción de alimentos (Ramírez y Solano, 2017).

A nivel mundial el tipo más común de biomasa utilizado en los sistemas de transformación térmica (calderas y gasificadores) es la madera astillada o astillas, el cual es un subproducto que normalmente proviene de aserraderos. Hay muchas fuentes de madera de las cuales se obtiene este tipo de combustible, ya que existen muchas maneras en que la madera puede ser cosechada, procesada, cargada, transportada y recibida, aunque cada fuente determina la calidad general de la astilla combustible (BERC, 2011). En contraste, se considera que al aprovechar energéticamente el residuo forestal, como las ramas y troncos de madera, tiene una serie de desventajas con respecto a otros combustibles por su baja densidad y dificultad de manejo, ya que mientras un combustible fluido es fácil de transportar y de manejar, residuos madereros, por ejemplo, no son susceptibles de ser aprovechados en una caldera, y sus usos se reducen a sistemas tradicionales, como las chimeneas (González, 2012).

Una de las posibilidades que se plantean para evitar este tipo de problemas es la densificación de la biomasa, es decir, su compactación para la obtención de productos combustibles densificados con un alto poder calorífico y que sean homogéneos tanto en propiedades como en dimensiones. Entonces, la densificación de biomasa (también llamado pelletización) es un proceso de aplicación de una fuerza mecánica a los residuos de biomasa, como aserrín, afeitado, astillas o placa, para compactarlos en partículas sólidas de tamaño uniforme, tales como pellets, briquetas y troncos. Los objetivos de la densificación de la biomasa es: aumentar la densidad volumétrica de $(40 - 200) \text{ kg/m}^3$ a una final de $(800 - 1400) \text{ kg/m}^3$, para facilitar el almacenamiento, la manipulación, el costo de transporte, y para disminuir el contenido de humedad (McMullen, 2005).

Para esta investigación se estudió el aprovechamiento de estos dos tipos de combustibles forestales empleando la tecnología de gasificación con aire, el cual es un proceso termoquímico de oxidación parcial en el cual





Figura 1. Proceso de gasificación de biomasa para la generación de energía eléctrica.

Figure 1. Biomass gasification process for the generation of electric power.

sustancias con carbono (biomasa, carbón y plásticos) se convierten en gas en presencia de un agente gasificante (aire, vapor, oxígeno, CO_2 o una mezcla de estos). El gas generado, comúnmente referido como syngas (gas de síntesis), consiste principalmente de H_2 , CO , CO_2 , N_2 y pequeñas partículas de char (residuos de carbono sólidos), ceniza y aceites (Ruiz et al., 2013). La versatilidad de la gasificación es que se puede usar para producir syngas, H_2 y CO , que a partir de ellos se pueden producir combustibles líquidos, polímeros y, por

lo tanto, este proceso puede enfrentar la demanda de electricidad, la demanda de energía térmica y síntesis de compuestos. Añadir que el syngas generado puede ser transportado fácilmente sin perder su gran densidad energética, permitiendo una generación de electricidad no centralizada (Ruiz et al., 2013).

El proceso de gasificación de biomasa para la generación de energía eléctrica se resume en la figura 1. Durante las diferentes etapas de transformación termoquímica de la materia que se muestran en este esquema existe una eficiencia y un rendimiento, lo cuales se explican en el cuadro 1. Por lo tanto, este estudio se basó en obtener dichos valores y poder compararlos entre los dos combustibles forestales y evaluar el desempeño de cada proceso.

Materiales y métodos

La gasificación de la biomasa se realizó en el Laboratorio de Biomateriales, el cual forma parte de la Escuela de

Cuadro 1. Parámetros requeridos para evaluar el desempeño de un gasificador de biomasa (Torres et al., 2016).

Table 1. Parameters required to evaluate the performance of a biomass gasifier (Torres et al., 2016).

Parámetro	Descripción
Conversión de carbono	La razón entre el carbono restante en el sistema en cenizas más alquitrán y el carbono que ingresa al sistema en la biomasa alimentada. Esto, pues bajo condiciones de gasificación típicas, una porción del carbono que entra con la biomasa abandona el reactor sin convertir a fase gaseosa.
Razón biomasa/agente oxidante	Se define como la razón entre el flujo de biomasa seca que ingresa al sistema y el flujo de oxígeno que ingresa al sistema de reacción. Lo cual indica la capacidad del agente gasificante, el oxígeno, para lograr la conversión termoquímica alcanzada de la biomasa que ingresa al reactor.
Razón equivalente	Es la razón entre el flujo de aire que ingresa al sistema y el flujo de aire requerido para una combustión estequiométrica de la biomasa, lo cual indica el grado de combustión parcial, esencial para evaluar el desempeño de la oxidación de la biomasa como fuente de energía para el proceso de reducción dentro del reactor.
Rendimiento eléctrico base húmeda	Se define en este trabajo como la potencia real generada en una hora, entre el flujo de biomasa consumido en el mismo periodo a una condición de operación dada, las unidades son kWh/t (Energía entregada por tonelada de biomasa húmeda). La magnitud de este valor funciona para estimar cantidades requeridas de biomasa para satisfacer una demanda energética empleando un sistema de gasificación similar.
Rendimiento de syngas	La razón entre el flujo de syngas producido en kg/h y el flujo de biomasa alimentada también en kg/h. Las unidades son kilogramo de biomasa por kilogramo de biomasa. Indica la capacidad de conversión de la biomasa en el gas producido o syngas, una magnitud necesaria para definir la viabilidad operativa del proceso.
Eficiencia térmica global	Es un parámetro que permite conocer el desempeño de conversión de la energía térmica disponible a electricidad, por tanto, se define como el porcentaje de potencia eléctrica generada en MJ/h, según el contenido energético de la biomasa también en MJ/h.
Eficiencia de gas frío	Se define como el porcentaje del contenido energético de la biomasa y el contenido energético del syngas en porcentaje. Este parámetro indica la capacidad del sistema de reacción para aprovechar la energía disponible en la biomasa y transformarla en energía disponible en el gas producido.
Eficiencia de motor/generador	El porcentaje de energía entregada por la unidad en MJ/h con respecto al contenido energético del syngas producido en MJ/h que ingresa al motor. Se obtiene al dividir la eficiencia térmica global entre la eficiencia de gas frío. Esta eficiencia indica la capacidad de aprovechamiento energético del motor y generador que acarea el syngas para ser convertido en energía eléctrica fija y estable.



Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica. El gasificador empleado consistió en el modelo Power Palet PP20 (figura 2), de fabricación estadounidense por la empresa All Power Labs. Las especificaciones técnicas más importantes de la planta piloto se muestran en el cuadro 2.

Para obtener los parámetros que describen el desempeño del proceso de gasificación tanto en sistema de reacción como en el sistema de generación de energía eléctrica se realizaron mediciones continuas de distintas variables dentro de la planta. Para ello se adaptó el módulo con una serie de sensores/transmisores que permitieron adquirir los datos de proceso en línea, con insumos de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica. En el cuadro 3 se detalla la instrumentación utilizada para cada tipo de variable en el sistema.

Ambos combustibles fueron suministrados por la empresa Pelleticos, con el objetivo de determinar sus propiedades y así lograr fijar la mayor cantidad de variables dentro del experimento, se les realizaron pruebas de caracterización fisicoquímica. La propiedad y el método empleado se muestran en el cuadro 4.

Para evaluar la incidencia de la geometría de la biomasa se realizó un diseño experimental de un factor y dos

niveles para distinguir las diferencias significativas que existe al alimentar pellets o astillas de madera en una unidad de gasificación con un reactor "downdraft". El diseño se conforma de la siguiente manera:

- Factor de estudio: Geometría de biomasa forestal.
- Niveles: 1. Astillas de madera y 2. Pellets de madera.
- Variables fijas: el contenido de humedad (16 % en base húmeda), tiempo de comida (4 h motor) y carga eléctrica del generador (6.2 kW).
- Variables no controlables: la humedad relativa del ambiente, temperatura ambiente y composición fisicoquímica.
- Variables de respuesta: la caída de presión en el lecho del reactor, caída de presión en sistema de limpieza, la composición del syngas, temperaturas en el sistema, flujos de: biomasa, aire, syngas, cenizas y alquitranes.

No se trabajó a potencia máxima, pues el objetivo fue evaluar el desempeño del proceso comparando la geometría de los combustibles, lo cual aplica a cualquier valor de potencia eléctrica. A partir de todas las variables de respuesta descritas se obtienen los

Cuadro 2. Especificaciones técnicas de la planta piloto Power Palet PP20 empleada en el estudio.

Table 2. Technical specifications of the Power Palet PP20 pilot plant used in the study.

Parámetro	Valor
Régimen de potencia continua (kW)	15@50Hz/18@60Hz
Tiempo máximo de operación (h)	12
Tamaño de la biomasa (mm)	12-40
Contenido de humedad base seca (%)	5-30
Tipo de motor	HM Vortac
Tipo de generador	Mooc Alfa NPE32-E/4 12 wire

Cuadro 3. Variables medidas e instrumentación utilizada.

Table 3. Measured variables and instrumentation used.

Variable	Instrumentación
Flujo de aire	Medidor de flujo tipo Vortax
Humedad relativa y temperatura aire	Vaisala Humidity and Temperature Probe, serie HMP110
Flujo de syngas	Medidor tipo orificio (diseño propio)
Caídas de presión	Sensores de presión diferenciales Dwyer
Temperaturas	Termocopias AF WATLOW
Adquisición de datos	Chasis y módulos National Instruments
Composición en syngas	MCA 100 Syn Portable MULTICOMPONENT ANALYZER
Potencia y energía	Análizador de redes Fluke 435





Figura 2. Planta piloto gasificador con reactor de lecho descendente (TEC).

Figure 2. Gasifier pilot plant with descending bed reactor (TEC).

parámetros que permiten evaluar el desempeño de un proceso de gasificación: en el cuadro 4 se describen cada uno de estos parámetros.

Resultados y discusión

En la primera etapa del proyecto se caracterizaron ambos combustibles, los valores promedio para cada propiedad determinada en los diferentes ensayos realizados por triplicado se aprecian en el cuadro 5. No existió variación significativa entre las propiedades fisicoquímicas de los dos combustibles estudiados; esto se debió a que ambos combustibles son de origen forestal y sus propiedades no deberían variar sustancialmente, como se obtuvo también en el estudio de caracterización de especies forestales nacionales por Tenorio et al., (2016).

De los resultados de las pruebas t-Student realizadas a los valores determinados para cada propiedad se concluyó que para el contenido de cenizas y para el poder calórico existe evidencia estadística para concluir que existe una diferencia significativa entre ambas geometrías con respecto a estas propiedades. Para el poder calórico se obtuvo que hay $(17,41 \pm 0,18)$ MJ/kg disponibles en las astillas de madera y en pellets hay un aumento de 1 MJ/kg aproximadamente, lo cual implica que los pellets de madera utilizados poseían una mayor cantidad de

Cuadro 4. Metodologías empleadas y lugares de realización de las pruebas de caracterización.

Table 4. Methodologies used and locations for the characterization tests.

Propiedad	Método
Contenido de humedad	ASTM E871-82: Método de prueba estándar para el análisis de la humedad de los combustibles de mederos en partículas
Contenido de cenizas	ASTM D1102-84: Contenido de cenizas para de madera y productos de madera
Contenido de materias volátiles	ASTM D1782-84: Método de prueba estándar para el análisis químico de carbón
Contenido de carbono fijo	ASTM D1782-84: Método de prueba estándar para el análisis químico de carbón
Contenido de metales	Espectrómetro de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía S2 RANGER (EDXRF): Se utilizó la técnica de cuantificación estándar EQUA ALL.
Composición elemental	Según la norma EN 15104 para su medición. Para el azufre y el cloro se describen diferentes procedimientos en la norma EN 15289.
Poder calórico	Guía de Laboratorio: Calor de combustión del curso IQ-0331 Medición y Tratamiento de Datos Experimentales, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica.

energía disponible por unidad másica, lo cual es debido a una compactación de fibras y una mayor disponibilidad de contenido de carbono por unidad másica, resultados intrínsecos del proceso de densificación.

El análisis del balance de masa es esencial para la obtención de las variables requeridas para la evaluar el desempeño del proceso y, como se muestra en la figura 1, existen dos corrientes que ingresan al sistema: la de biomasa y la de aire. La primera se calculó como la razón entre la biomasa consumida y el tiempo total de operación con motor. Para la segunda se empleó el medidor de flujo tipo vortex, junto a la medición de temperatura realizada por el Vaisala, se calculó el flujo másico de aire que se inyecta al sistema de reacción como agente gasificante. El flujo de syngas se midió con un medidor de flujo de tipo orificio de manera continua y el flujo de cenizas fue cuantificado posterior a la corrida en operación de limpieza y mantenimiento. Con todos estos datos se resolvió un balance de masa global con una serie de balances elementales, ya que el gasificador es un sistema donde intervienen reacciones químicas y a pesar de que las especies en cada corriente varíen, el número de átomos de cada elemento no lo harán. Los resultados se observan en el cuadro 6.



Cuadro 5. Resultados de caracterización fisicoquímica de las biomásas estudiadas.

Table 5. Results of physicochemical characterization of studied biomasses.

Variable	Astillas	Pellets
Contenido de cenizas en base seca A (% m/m)	0,985	1,097
D.std. Contenido de cenizas en base seca (% m/m)	0,031	0,028
Contenido de humedad en base húmeda WH (% m/m)	16,331	15,882
D.std. Contenido de humedad en base húmeda (% m/m)	0,452	0,913
Contenido de humedad en base seca DH (% m/m)	14,034	13,703
D.std. Contenido de humedad en base seca (% m/m)	0,333	0,682
Contenido de materias volátiles en base seca V (% m/m)	79,893	80,242
D.std. Contenido de materias volátiles base seca (% m/m)	0,158	0,272
Contenido de carbono fijo en base seca FC (% m/m)	4,978	5,070
D.std. Contenido de carbono fijo en base seca (% m/m)	0,457	0,887
Poder calorífico PC (MJ/kg)	17,413	18,317
D.std. Poder calorífico (MJ/kg)	0,184	0,149

La medición en varios puntos de la temperatura también permitió apreciar diferencias dentro del proceso de gasificación de las biomásas empleadas. Esto, pues el perfil de temperatura dentro del reactor está relacionado directamente con el desempeño del proceso de descomposición térmica de la biomasa, pues las reacciones de gasificación son en su mayoría endotérmicas. Como se aprecia en el Cuadro 7, durante las pruebas experimentales, en la zona de restricción, sección donde ocurren la mayor cantidad de reacciones de gasificación (crackeo extensivo de corrientes gaseosas, líquidas y sólidas en CO, H₂, CO₂, CH₄ y subproductos) se obtuvieron temperaturas de (804,19 ± 36,93) °C con astillas y de (731 ± 82,99) °C con pellets. Se obtuvo un perfil de más bajas temperaturas al emplear pellets que al emplear astillas de madera, lo cual indica en este primer nivel que el rendimiento del proceso fue mejor con las astillas que con pellets, pero esto se debe respaldar con las mediciones de composición del syngas y con los valores de rendimientos y eficiencias que se discutirán posteriormente.

La composición de los diferentes compuestos en el syngas es un aspecto importante para estudiar el desempeño de un combustible biomásico en un proceso

Cuadro 6. Flujos de corrientes que ingresan y sales del sistema de reacción.

Table 6. Current flows entering and leaving the reaction system.

Variables	Astillas	Pellets
Flujo de biomasa B (kg/h)	11,04	12,75
D.std. Flujo de biomasa B (kg/h)	0,03	0,03
Flujo de aire A (kg/h)	11,23	9,48
D.std. Flujo de aire A, (kg/h)	1,74	0,97
Flujo de syngas S (kg/h)	19,36	16,80
D.std. Flujo de syngas S (kg/h)	5,09	3,93
Acumulación de cenizas del reactor X (kg/h)	0,38	0,78
D.std. Acumulación de cenizas del reactor X (kg/h)	0,01	0,02
Acumulación de cenizas del ciclón Y (kg/h)	0,08	0,15

Cuadro 7. Temperaturas promedio en el sistema de reacción.

Table 7. Average temperatures in the reaction system.

Variables	Astillas	Pellets
Temperatura aire a la de entrada Ta (°C)	34,19	31,49
D.std. Temperatura aire de entrada (°C)	1,89	0,89
Temperatura promedio pirólisis T _{piro} (°C)	329,27	182,11
D.std. Temperatura promedio pirólisis (°C)	42,32	41,11
Temperatura en zona de restricción Tr _{st} (°C)	804,19	731,69
D.std. Temperatura en zona de restricción (°C)	36,93	82,99
Temperatura en zona de reducción Tr _{red} (°C)	584,99	514,24
D.std. Temperatura en zona de reducción (°C)	52,27	19,58
Temperatura a la salida del gasificador T _{gas} (°C)	373,71	348,64
D.std. Salida del gasificador (°C)	19,95	18,47

de gasificación. El reporte de los valores de composición se puede realizar de dos maneras: en base limpio y seco, el cual no incluye la composición de alquitranes, ni de agua ni de oxígeno; o limpio y húmedo, sin incluir alquitranes ni oxígeno, pero sí agua. Se reportaron ambos en base libre de oxígeno, pues, aunque se procuró que la línea instalada para la toma de la muestra de syngas estuviera sellada, el ingreso de aire fue inevitable. En el cuadro 8 se muestran los valores de composición del



Cuadro 8. Composición del syngas seco y en base libre de oxígeno.
Table 8. Composition of dry and oxygen-free base syngas.

Variables	Astillas	Pellets
Composición de monóxido de carbono CO (% v/v)	25,11	27,96
D.std. Composición de monóxido de carbono CO (% v/v)	1,24	1,59
Composición de metano CH ₄ (% v/v)	4,70	10,06
D.std. Composición de metano CH ₄ (% v/v)	0,56	1,88
Composición de hidrógeno H ₂ (% v/v)	16,42	13,37
D.std. Composición de hidrógeno H ₂ (% v/v)	0,83	3,65
Composición de dióxido de carbono CO ₂ (% v/v)	12,03	12,01
D.std. Composición de dióxido de carbono CO ₂ (% v/v)	1,47	1,36
Temperatura a la salida del gasificador Tgas, (°C)	373,71	348,64
D.std. Salida del gasificador, (°C)	19,95	16,47

syngas en base limpia y seca. Las composiciones de monóxido de carbono e hidrógeno, (los compuestos que en mezcla se denominan gas de síntesis, gas producto o syngas), son las más importantes que se deben analizar.

En detalle, la composición de monóxido de carbono para astillas fue de (25,11 ± 1,24) % y para pellets de (27,96 ± 1,59) %, por lo cual, según la desviación estándar asociada a las mediciones, para ambos niveles no existieron diferencias en el contenido de monóxido de carbono del syngas para ambas biomásas. Para el contenido de hidrógeno en pellets, se obtuvo 3,65 %, valores más bajos que al alimentar astillas. Lo cual concuerda con una mayor formación de metano, según Kumar, Jones, & Hanna, (2009) a temperaturas superiores a (750 - 800) °C, la naturaleza endotérmica de las reacciones de producción de H₂ (reacción de reformado de metano en vapor, reacción 1 y la reacción heterogénea agua-gas, reacción 2) resulta en un aumento del contenido de H₂ y una disminución del contenido de CH₄ con un aumento de la temperatura. Contrario a esta condición, se reportaron valores entre 690 °C y 750 °C en la zona de restricción al operar con pellets. Mencionar que a temperaturas superiores a los (850 - 900) °C, dominan el reformado de metano con vapor y las reacciones de Boudouard (reacción 3), lo que da lugar a aumentos en el contenido de CO. La alta temperatura también favorece la destrucción y el reformado del alquitrán (reacción 4) que conduce a una disminución del contenido de alquitrán y un aumento la eficiencia del proceso.

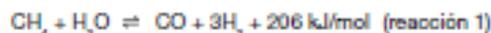


Cuadro 9. Composición del syngas húmedo y en base libre de oxígeno.

Table 9. Composition of moist and oxygen-free base syngas.

Variables	Astillas	Pellets
Composición de monóxido de carbono CO (% v/v)	23,52	26,33
D.std. Composición de monóxido de carbono CO (% v/v)	1,21	1,58
Composición de metano y CH ₄ (% v/v)	4,40	8,97
D.std. Composición de metano CH ₄ (% v/v)	0,54	1,65
Composición de hidrógeno H ₂ , % v/v	15,31	13,38
D.std. Composición de hidrógeno H ₂ (% v/v)	0,80	3,46
Composición de dióxido de carbono CO ₂ (% v/v)	11,24	11,36
D.std. Composición de dióxido de carbono CO ₂ (% v/v)	1,40	1,35
Composición de nitrógeno N ₂ , % v/v	38,90	34,68
D.std. Composición de nitrógeno N ₂ (% v/v)	2,49	3,67
Composición de vapor de agua H ₂ O (% v/v)	7,09	5,28
D.std. Composición de vapor de agua H ₂ O (% v/v)	0,75	0,62

Reacción de reformado de metano en vapor



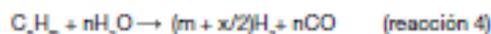
Reacción heterogénea agua-gas



Reacción de Boudouard



Reformado de alquitranes en vapor



La segunda hipótesis está ligada a la primera, ya que el tiempo de residencia de las partículas sólidas dentro del

Cuadro 10. Corrientes energéticas dentro del sistema para ambos tipos de biomasa.

Table 10. Energy currents within the system for both types of biomass.

Variables	Astillas	Pellets
Poder calórico syngas por volumen Lv (MJ/Nm ³)	8,18	8,00
D.std. Poder calórico syngas por volumen LHV (MJ/Nm ³)	0,25	0,78
Contenido energético syngas Es (MJ/h)	105,47	118,94
D.std. Contenido energético LHV syngas (MJ/h)	15,44	22,81
Contenido energético biomasa seca Eb (MJ/h)	147,43	180,78
D.std. Contenido energético LHV biomasa seca (MJ/h)	3,22	3,74
Potencia Ep (MJ/h)	22,42	22,32
D.std. Potencia (MJ/h)	0,41	0,25
Temperatura a la salida del gasificador Tgas (°C)	373,71	348,64
D.std. Salida del gasificador (°C)	19,96	16,47

reactor estuvo afectado por la acción del agitador a la base del mismo, ya que se configuró el equipo para que este componente se activara con mucha más frecuencia con pellets que al emplear astillas de madera y evitar un incremento sustancial en la caída de presión. Se realizó esta modificación debido a la desintegración de algunos pellets en la zona de combustión, provocando atascamientos en esta zona en específico. Por lo tanto, antes de configurar la nueva frecuencia de agitación, cuando la parrilla agitaba, casi de inmediato, se liberaba el atascamiento y parte del material no combustionado caía a una zona de reducción vacía, ya que, al no descender biomasa de forma continua, el material en la zona se consumía sin reponerse, fenómeno que provocaba que la temperatura disminuyera hasta 200 °C a la base del reactor zona en cuestión de (20-30) s aproximadamente. Aun aumentando la frecuencia de agitación, esta situación dentro del reactor sucedía, pero en menores magnitudes, por lo que durante la operación con pellets de madera no solo se afectó el tiempo de residencia de las partículas, sino que también el perfil térmico dentro del reactor, pues este cambiaba abruptamente en manera casi periódica, lo cual en última instancia afectó los equilibrios de las reacciones y por ende la producción de gas combustible con altas composiciones de hidrógeno al alimentar con astillas el gasificador.

En adición, reportar en base húmeda la composición del syngas, es decir cuando se suma el porcentaje de agua en la corriente gaseosa, obtenida según Ley de Raoult, es una manera más acertada de caracterizar la corriente

Cuadro 11. Eficiencias del proceso de gasificación para obtención de energía eléctrica para los dos tipos de Biomasa

Table 11. Deficiencias of the gasification process to obtain electricity for the two types of biomass.

Variables	Astillas	Pellets
Eficiencia gas frío (syn/bio) eCGE (%)	71,46	88,12
D.std. Eficiencia gas frío CGE (syn/bio), %	10,58	12,78
Eficiencia térmica global (pot/bio) BGTE, %	15,21	12,38
D.std. Eficiencia térmica global TE (pot/bio), %	0,44	0,29
Eficiencia del generador/motor (pot/syn) MEGE, %	21,41	18,94
D.std. Eficiencia del generador/motor EE (pot/syn), %	3,23	3,68

gaseosa, pues integra la mayoría de sus componentes. En el cuadro 9 se muestran los valores de composición incluyendo el vapor de agua. Como se esperaba, el monóxido de carbono, el dióxido de carbono producido para ambos tipos de biomasa fue altamente similar, al igual que el nitrógeno presente. Como ya se mencionó, el contenido de metano aumentó al alimentar pellets (8,97 % en pellets y 4,40 % en astillas) sacrificando el contenido de hidrógeno en la mezcla.

El diseño experimental realizado planteó variar la geometría de la biomasa y evaluar su incidencia en el desempeño en un proceso de gasificación que culminara en producción de energía eléctrica a partir de la combustión del gas combustible generado. Para completar este objetivo se midieron una gran cantidad de variables que ya se discutieron, que permitieron el cálculo de los diferentes parámetros que evalúan el desempeño de un gasificador. Primeramente, se analizó el papel del aire como agente gasificante, pues este suministró el O₂ para la combustión e influyó en el tiempo de residencia de la biomasa, pues al variar la cantidad de suministro de O₂ se controla el grado de combustión que, a su vez, afecta a la temperatura de gasificación, fenómeno observado en las corridas con pellets de madera: flujo bajo de aire y bajas temperaturas en el reactor. Por lo tanto, una mayor velocidad de flujo de aire da como resultado una temperatura más alta que conduce a una mayor conversión de biomasa y a una mayor calidad de combustible. Sin embargo, un grado excesivo de combustión, por otra parte, da lugar a una disminución del contenido energético del gas producido porque una parte de la energía de la biomasa (producto de la pirólisis) se gasta durante la combustión. Entonces, un exceso de flujo de aire reduce el tiempo de residencia, lo que provoca una disminución en el grado de conversión de biomasa.



Cuadro 12. Rendimientos del proceso de gasificación para los dos tipos de biomásas.

Table 12. Yields of the gasification process for the two types of biomasses.

Variables	Astillas	Pellets
Rendimiento eléctrico base húmeda RWH (kWh/t)	564,50	487,35
D.std. Rendimiento eléctrico base húmeda (kWh/t)	10,53	5,57
Rendimiento eléctrico base seca RDH, kWh/t	674,68	579,24
D.std. Rendimiento eléctrico base seca, (kWh/t)	13,08	7,34
Rendimiento de syngas/biomasa Rs,b (kg/kg)	1,75	1,31
D.std. Rendimiento de syngas/biomasa slim (kg/kg)	0,46	0,31
Rendimiento de gas limpio y seco en base húmeda (Nm ³ /kg)	1,55	1,18
D.std. Rendimiento de gas limpio y seco en base húmeda (Nm ³ /kg)	0,31	0,29
Temperatura a la salida del gasificador Tgas (°C)	373,71	348,64
D.std. Salida del gasificador (°C)	19,95	16,47

Un primer parámetro de desempeño del proceso para evaluar este fenómeno y el papel del agente gasificante es la razón biomasa/agente oxidante, valor que indica los kilogramos de biomasa seca y sin cenizas que ingresaron al sistema por kilogramo de oxígeno que ingresa por la corriente de aire. A la hora de gasificar pellets de madera, se requirió de menos cantidad de oxígeno, un 26 % de diferencia específicamente. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el flujo

de biomasa fue mayor al usar pellets, y el flujo de aire fue menor, lo cual indica que no se aprovechó el combustible durante el proceso de combustión parcial dentro de reactor, provocando temperaturas menores dentro del reactor que como consecuencia principal fue la mejor producción de syngas con un menor contenido de hidrógeno y una mayor producción de cenizas que se removieron del sistema. El siguiente parámetro es la razón equivalente, el cual es relación de equivalencia que se utiliza comúnmente para indicar cuantitativamente si una mezcla de oxidante/combustible es rica, pobre o estequiométrica. Si es mayor que uno la mezcla es rica, menor que uno es pobre e igual a uno es una mezcla estequiométrica. Es decir, a medida que disminuye la cantidad de oxígeno, la mezcla de combustible y aire se vuelve rica en combustible ($Z_{eq} > 1$) con el resultado de que el CO₂ disminuirá y al mismo tiempo el CO aumentará (Jangsawang, Laohalidanond & Kerdswan, 2015).

El propósito del proceso de gasificación es producir un gas de síntesis ajustando la relación de equivalencia y la temperatura del agente de gasificación. Estos parámetros son críticos para optimizar el proceso. Jangsawang, Laohalidanond & Kerdswan (2015), identificaron dos casos distintos de equilibrio químico en el proceso de gasificación. El primero está con el exceso de carbono presente en el proceso de gasificación, mientras que el segundo abarca el exceso de agente de gasificación con todo el gasificado. Un caso único en el punto entre estos dos casos se identifica donde el carbono está completamente gasificado sin exceso del agente de gasificación.

El valor promedio de la razón equivalente para astillas de madera es cercano a 1, con un valor de $(1,68 \pm 0,09)$, y es menor que el encontrado al gasificar pellets de madera $(2,29 \pm 0,08)$, lo cual indica que la atmósfera dentro del reactor al alimentar astillas de madera fue

Cuadro 13. Resultados de pruebas t-Student para datos de parámetros de desempeño de planta piloto.

Table 13. Student t-test results for pilot plant performance parameter data.

Parámetro	Grados de libertad	Estadístico t	Valor crítico de t (dos colas)	P(T<=t) dos colas	Condición
Conversión de carbono	4	2,238	2,778	0,111	No hay evidencia de diferencia
Razón equivalente	4	3,550	2,778	0,038	No hay evidencia de diferencia
Eficiencia de Gas Feto	4	0,790	2,778	0,487	No hay evidencia de diferencia
Eficiencia Térmica Global	4	6,910	2,778	0,002	Rechaza hipótesis nula
Eficiencia Generador/Motor	4	1,303	2,778	0,262	No hay evidencia de diferencia
Rendimiento eléctrico base húmeda	4	4,400	2,778	0,022	Rechaza hipótesis nula, hay diferencia
Rendimiento de syngas/biomasa	4	4,489	2,778	0,021	Rechaza hipótesis nula, hay diferencia

cercana a la ideal, donde se gasificó la biomasa sin un exceso considerable de agente gasificante, lo cual indica un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles: la biomasa como combustible y el aire como agente gasificante para producir syngas de manera más eficiente.

Estas condiciones de ineficacia de descomposición térmica de los pellets de madera se reflejan también en una conversión de carbono menor con respecto a astillas de madera. Los resultados estadísticos de la caracterización fisicoquímica determinaron que ambas biomásas son fisicoquímicamente similares; sin embargo, el proceso de descomposición térmica dentro del reactor de lecho descendente fue más ineficiente cuando se utilizaron pellets de madera como combustible. Pues existió un 20 % aproximadamente de diferencia en la conversión de carbono entre una geometría y la otra: $(86,38 \pm 0,52)$ % para astillas y $(67,99 \pm 0,84)$ % para pellets, es decir una gran cantidad de carbono en los pellets no logró participar en los mecanismos de reacción dentro del reactor y se acumuló en las cenizas y en el biochar, ambos posteriormente eliminados del sistema.

Para el cálculo de los otros parámetros (eficiencias y rendimientos) se deben calcular las corrientes energéticas a partir de los flujos mássicos y los poderes calóricos respectivos. Existen tres corrientes: la energía que contiene el syngas, que se calculó utilizando las composiciones promedio de sus compuestos y el poder calórico teórico de cada uno. Para la biomasa se utilizó el poder calórico inferior, el cual excluye el calor de condensación del agua producida, y el flujo de biomasa. La tercera corriente energética es la potencia entregada, que se mide en kW, entonces fue solo realizar un cambio de unidades a MJ/h. Los resultados se muestran en el cuadro 10. Estos valores de flujos energéticos permitieron calcular las diferentes eficiencias que caracterizaron el proceso de gasificación estudiado.

Los valores obtenidos de las diferentes eficiencias en el proceso se muestran en el cuadro 11. La primera en obtener fue la Eficiencia de Gas Frio (CGE-Cold Gas Efficiency en inglés), este valor nos indica que para astillas de madera hubo menores pérdidas de energía de la biomasa después del proceso de transformación termoquímica en el reactor y luego del proceso limpieza del gas; en otras palabras, la eficiencia del proceso de gasificación dentro del reactor es mayor al alimentar astillas con un valor de $(71,46 \pm 10,58)$ %, que, al utilizar pellets, con los cuales disminuye 5 puntos porcentuales según el valor promedio $(66,12 \pm 12,76)$ %. Este concuerda con todo lo ya discutido para el proceso de gasificación de astillas de madera: temperaturas altas y estables dentro del reactor, composiciones de hidrógeno mayores, razón equivalente cercana a la unidad y un menor flujo de alquitranes generados.

Otro parámetro importante es la eficiencia de conversión de la energía disponible en la biomasa alimentada en energía eléctrica. La Eficiencia Térmica Global indica

el desempeño general del módulo para realizar el proceso de gasificación para obtención de energía eléctrica. Fueron eficiencias pequeñas, pero son las esperadas, pues cualquier proceso de transformación de la materia incluye pérdidas de energía según las leyes de la termodinámica, sobre todo porque existieron una serie de operaciones unitarias y transformaciones termoquímicas, en el reactor y en el motor, que provocaron grandes pérdidas de energía en calor disipado y en el transporte de partículas. Se obtuvo mayor eficiencia en el aprovechamiento de la energía con los combustibles en forma de astillas, según los resultados obtenidos, pues $(15,21 \pm 0,44)$ % de la energía disponible en las astillas fue convertida en energía eléctrica y solo un $(12,36 \pm 0,29)$ % sucedió en los pellets de madera.

La tercera eficiencia dentro del proceso es la capacidad de aprovechar la energía que posee la corriente de syngas para la producción de energía eléctrica. Según el cálculo de la Eficiencia del Generador/Motor, hay una mejor conversión en esta unidad cuando se emplean astillas de madera, pero la diferencia es poca, ya que según la desviación promedio de los datos, calculada a partir de todas las desviaciones con el promedio de las variables medidas y requeridas para la obtención de estos valores, el rango en que ambas eficiencias interceden es amplio. Por lo tanto, el proceso de combustión del syngas dentro del motor para producir energía mecánica que será aprovechada por el generador (el cual posee una eficiencia de diseño del 95 %) para generar energía eléctrica es eficiente como operación unitaria.

Los rendimientos muestran la utilidad de una cosa en relación con lo que cuesta, con lo que gasta, con lo que en ello se ha invertido. En el cuadro 12 se muestran los rendimientos más importantes que caracterizan la operación del gasificador; por ejemplo, para obtener $(564 \pm 10,53)$ kWh de energía en un mes se requiere una tonelada de astillas de madera a un 16,00 % de humedad. En contraste, se requiere una tonelada de pellets para entregar 487,35 kWh en un mes también, es decir se obtiene un 13 % de más energía al emplear una tonelada de astillas de madera.

Sin embargo, hay que considerar que se debe alimentar con astillas de madera de un tamaño específico, es decir se requiere entre un (30 - 40) % más de lo estimado para que después del proceso de tamizaje del producto recién "chipeado" se obtenga la tonelada calculada, en otras palabras, se requieren entre (1,3-1,4) ton de astillas de madera para obtener la cantidad de energía mencionada. Al despreciar el contenido de humedad, menos la cantidad de combustible que es requerido para generar la misma cantidad de energía, pero se debe recordar que el combustible debe contener entre (15 - 22) % de humedad en base húmeda para que el proceso de gasificación sea eficiente. A forma de ejemplo, una residencia en promedio consume 350 kWh en un mes en la zona metropolitana, por lo tanto, se requieren 620 kg

de astillas de madera o 719 kg de pellets de madera para satisfacer esa demanda empleando una planta piloto como la empleada como fuente única de energía.

El rendimiento de syngas/biomasa es un valor que indica cuántos kilogramos se obtiene de syngas al alimentar un kilogramo de biomasa a la planta. Para las astillas de madera se obtuvo en promedio 1,75 kg de syngas por kilogramo de biomasa, 25 % más que al alimentar pellets de madera. El rendimiento de producción del flujo volumétrico de gas limpio y seco con base a flujo de biomasa húmeda que ingresa al sistema es de $(1,55 \pm 0,31)$ Nm³/kg para las astillas y $(1,18 \pm 0,29)$ Nm³/kg para los pellets de madera. Ambos rendimientos se reflejan fácilmente en los flujos de las corrientes obtenidas y los valores de las eficiencias de gas frío para las corridas con pellets de madera, ambos casos ya se discutieron anteriormente. Entonces, en general, existe un mejor desempeño de la planta al utilizar astillas de madera como combustible.

Para concluir si existe o no diferencia estadísticamente significativa entre los parámetros típicos que describen el desempeño de un proceso de gasificación de biomasa para la generación de energía eléctrica y térmica según el tipo de geometría de la biomasa alimentada, se realizaron pruebas t-Student como se aprecia en el cuadro 13. Los resultados obtenidos a partir de este análisis estadístico indica que parámetros importantes para describir el desempeño general del proceso como lo es la eficiencia térmica global, el rendimiento eléctrico y el rendimiento syngas son estadísticamente diferentes, lo cual, apoyado con lo anteriormente discutido con respecto a los valores promedio, indica que la incidencia de la geometría de la biomasa, empleada en un proceso de gasificación con un reactor "downdraft" o de lecho descendente, es importante para el desempeño del proceso, siendo en este caso en específico, las astillas de madera un combustible que supera a los pellets de madera en el desempeño de su transformación termoquímica para la generación de energía térmica y eléctrica.

El resultado estadístico de dos colas para los parámetros que difieren estadísticamente, por sus valores de p-value, permite deducir que la diferencia es poca, debido a la cercanía del valor de 0,025 para los p-value, sin embargo, lo suficiente para concluir que hay incidencia de la geometría de los combustibles en el desempeño del proceso en todas las unidades de la planta.

Conclusiones

Se evidenció, estadísticamente, que solo existe diferencia en el contenido de cenizas y el poder calórico entre ambos combustibles utilizados.

Los valores de las propiedades fisicoquímicas de ambos combustibles indican que ambos son aptos para ser

utilizados en el proceso de gasificación en la planta piloto según las especificaciones del fabricante.

Al comparar los promedios de los flujos de las corrientes según cada tipo de combustible alimentado, se apreció que al alimentar pellets de madera el consumo de biomasa aumentó, sin embargo, el consumo de aire y la producción de syngas disminuyeron y la cantidad de cenizas recolectadas aumentaron. Aunque el porcentaje analítico de cenizas es prácticamente igual entre las biomásas, al operar una cantidad similar de horas la planta piloto, el material que no se transformó en gas y fue removido del sistema aumentó al utilizar pellets de madera.

En una corrida con pellets, debido al atascamiento frecuente en la garganta del reactor, la estabilidad del proceso es baja, ya que de forma periódica se generó una caída de presión de magnitud apreciable entre la zona de combustión y la zona de reducción del reactor, hasta que la parrilla en la base se activa, por lo tanto, se tuvo que aumentar la frecuencia de activación de este componente, provocando un aumento en el consumo de biomasa y en la producción de cenizas, lo cual afecta también al perfil de temperatura dentro del reactor.

Las temperaturas dentro del reactor fueron menores al emplear pellets de madera. En la zona de restricción existe una disminución de 70 °C aproximadamente con respecto a las astillas, lo cual afecta directamente el desempeño de las reacciones de reducción o gasificación que son endotérmicas.

Al no alcanzar temperaturas lo suficientemente altas dentro del reactor, el contenido de H₂ en el syngas disminuyó y aumentó el contenido de CH₄ al emplear pellets de madera debido a la naturaleza endotérmica de las reacciones de producción de H₂.

Las corrientes de proceso en general son más calientes cuando se emplearon astillas de madera como combustible, lo cual es importante para un uso térmico de intercambio del gas producto.

Parámetros importantes como lo son la eficiencia térmica global, el rendimiento eléctrico y el rendimiento de syngas fueron estadísticamente diferentes, lo cual, apoyado con los valores promedio de cada uno, indica que la incidencia de la geometría de la biomasa, empleada en un proceso de gasificación con un reactor "downdraft" o de lecho descendente, es importante para el desempeño del proceso, siendo en este caso en específico las astillas de madera un combustible que superó a los pellets de madera en el desempeño de la planta piloto. Por lo tanto, esta geometría posee gran capacidad para un proceso de transformación termoquímica para la generación de energía térmica y eléctrica.



Referencias

- BERC. (2011). Woodchip Heating Fuel Specifications in the Northeastern United States. Retrieved from http://www.biomasscenter.org/images/stories/Woodchip_Heating_Fuel_Specs_electronic.pdf
- Forestry&NaturalResourcesDevelopment. (2014). Wood Chip for Biomass Power Generation. Retrieved January 1, 2017, from <http://www.active-energy.com/wood-chip-biomass-power-generation>
- González, G. (2012). Diseño de una planta de pelletización en Castilla y León. Castilla: Universidad Carlos III Castilla.
- Jangsewang, W., Laohalimonon, K., & Kartsuwan, S. (2015). Optimum Equivalence Ratio of Biomass Gasification Process Based on Thermodynamic Equilibrium Model. *Energy Procedia* (Vol. 79). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.528>
- Kumar, A., Jones, D. D., & Hanna, M. A. (2009). Thermochemical biomass gasification: A review of the current status of the technology. *Energies*, 2(3), 556–581. <https://doi.org/10.3390/en20300556>
- McMullen, J. . (2006). Storage and handling characteristics of pellets from poultry litter. *Appl Eng Agric.*
- Ramírez, M., & Solano, F. (2017). PLAN DE EXPANSION DE LA GENERACION ELECTRICA PERIODO 2016-2035 SUS COMENTARIOS SON BIENVENIDOS Por favor dirija sus comentarios, observaciones o consultas a Contenido. Retrieved from www.grupoec.com
- Ruiz, J. A., Juárez, M. C., Morales, M. P., Muñoz, P., & Mendivil, M. A. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.021>
- Toroño, C., Moya, R., Salas, C., & Barrocal, A. (2016). Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica Estudio de propiedades de la madera de seis especies nativas en plantaciones de Costa Rica. *Bosque*, 37(1), 71–84. <https://doi.org/10.4067/S0717-9202016000100008>
- Torres, C., Molina, D., Hernández, N., & Urvina, L. (2018). Informe técnico: Evaluación de desempeño de la tecnología comercial de gasificación utilizando residuos de café. San José.

Este artículo debe citarse como:

Torres, C; Chavez, M; Urvina, L; Moya, R. (2018). Evaluación de la incidencia de pellets y astillas de madera en el desempeño de un gasificador tipo "downdraft". *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15 (Suppl. 01): 25-36. doi. 10.18845/rfmk.v15i1.3847



7. BIBLIOGRAFÍA

- Betters, D.R., Wright, L.L., Couto, L., 1991. Short rotation woody crop plantations in Brazil and the United States. *Biomass Bioenergy*. 1(6), 305-316.
- DeBell, D. S., Clendenen, G. W., Harrington, C. A., Zasada, J.C., 1996. Tree growth and stand development in short-rotation *Populus* plantings: 7-year results for two clones at three spacings. *Biomass Bioenergy*. 11(4), 253-269.
- Dickmann, D.L., 2006. Silviculture and biology of short rotation woody crops in temperate regions: then and now. *Biomass Bioenergy*. 30, 696-705.
- Evans, A., Strezov, V., Evans, T.J., 2010. Sustainability considerations for electricity generation from biomass. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 14, 1419-1427.
- FAO, State of the world's forests, 2012, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2012.
- Gokcol, C., Dursunb, B., Alboyaci, B. and Sunan, E. (2009). "Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey," *Energy Policy* 37, 424–431.
- Hauk, S., Knoke, T., Wittkopf, S., 2014. Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—A review. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 29, 435-448.
- Hinchee, M., Rottmann, W., Mullinax, L., Zhang, C., Chang, S., Cunningham, M., Nehra, N., 2009. Short-rotation woody crops for bioenergy and biofuels applications. *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant.* 45(6), 619-629.
- Kalihan, N. and Morey, R.V. (2009). "Factors affecting strength and durability of densified biomass products," *Biomass Bioenergy* 33, 337–359.
- Kullander, S., 2009. Energy from biomass. *Eur Phys J Spec Top.* 176, 115-125.
- Kumar, T; Sheth, P. 2015. Biomass gasification models for downdraft gasifier. A state of the art review. *Renewable and sustainable energy reviews.* 50: 583-593.
- Le Maire, G., Dupuy, S., Nouvellon, Y., Loos, R. A., Hakamada, R., 2014. Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil. *Remote Sens. Environ.* 152, 136-149.
- Liu, Y., Xu, Y., Zhang, F., Yun, J., Shen, Z., 2014. The impact of biofuel plantation on biodiversity: a review. *Chin. Sci. Bull.* 59(34), 4639-4651.
- Luque, R., Herrero-Davila, L., Campelo, J.M., Clark, J.H., Hidalgo, J.M., Luna, D., Marinasa, J.M. and Romero, A.A. (2008). "Biofuels: a technological perspective," *Energy Environ. Sci.* 1, 542–564.
- Moya, R., Tenorio, C., 2013. Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. *Biomass Bioenergy*. 56, 14-21.
- Navarro-Camacho, R., Esquivel-Segura, E., Briceño-Elizondo, E., Arias-Aguilar, D., 2014. Estimating aboveground biomass for *Eucalyptus saligna* Sm. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehn in the center region of Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú.* 11(27), 22-33.
- Perez JF, Melgar A, Benjumea PN. 2012. Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: an experimental study. *Fuel.* 96:487–96.

Plis P, Wilk RK. 2011. Theoretical and experimental investigation of biomass gasification process in a fixed bed gasifier. *Energy*. 36:3838–45.

Ruiz, JA; Juárez, MC; Morales, MP; Muñoz, P; Mendivil. MA. 2013. Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and sustainable energy reviews*. 18: 174-183.

Singh, V. C. J., & Sekhar, S. J. (2015). Performance studies on a downdraft biomass gasifier with blends of coconut shell and rubber seed shell as feedstock. *Applied Thermal Engineering* 97: 22-27.

Sharma, S., & Sheth, P. N. (2016). Air–steam biomass gasification: Experiments, modeling and simulation. *Energy Conversion and Management*, 110, 307-318.

Stelte, W., Clemons, C., Holm, J.K., Sanadi, A.R., Ahrenfeldt, J., Shang, L. and Henriksen, U.B. (2011a). "Pelletizing properties of torrefied spruce," *Biomass Bioenergy* 35, 4690-4698.

Tenorio, C; Moya, R; Tomazello Filho, M; Valaert, J. 2015. Quality of pellets made from agricultural and forestry crops in Costa Rican tropical climates. *BioResources*, 10(1): 482-498.

Tenorio, C; Moya, R; Arias-Aguilar, E; Briceño-Elizondo, E. 2016. Biomass yield and energy potential of short-rotation energy plantations of *Gmelina arborea* one year old in Costa Rica. *Industrial Crops and Products*. 82: 63–73.

Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG, Morgan TJ. 2012. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*. 94:1–33.

Zou W, Song C, Xu S, Lu C, Tursun Y. Biomass gasification in an external circulating countercurrent moving bed gasifier. *Fuel*, Available on-line June 2012 10.1016/j.fuel.2012.06.061