

Characteristics and properties of torrefied biomass pellets from *Gmelina arborea* and *Dipteryx panamensis* at different times

Características y propiedades de *pellets* de biomasa torrefaccionada de *Gmelina arborea* y *Dipteryx panamensis* a diferentes tiempos

Johanna Gaitán-Álvarez & Roger Moya*

Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica, Apartado 159-7050. rmoya@itcr.ac.cr Tel.: (506) 2550-9092 (*Corresponding author).

Abstract

Torrefaction and pelletizing were studied in the generation of energy from lignocellulosic residues to increase the energy properties of the biomass. The aim of this study was torrefied sawdust from *Gmelina arborea* and *Dipteryx panamensis* at 200 °C in three time period: 0, 15 and 20 minutes. Then with the biomass, pellets of 6 mm diameter were manufactured and their physical properties, calorific value, density and compression force were evaluated. Both species had similar physical characteristics according to the average diameter (0.50 mm), length (21.50 mm), and water absorption rate (6.00 %). The calorific value increased from 9,749 kJ·kg⁻¹ in un-torrefied biomass to 18,126 kJ·kg⁻¹ with torrefied biomass. The pellets from *D. panamensis* had greater density and compression force compared to *G. arborea* biomass. Based on the results, pellet compression force decreases as the torrefaction time increases. There is positive correlation between bulk density of pellets and compression force. The *D. panamensis* species has better torrefaction behavior and pelletizing than the wood of *G. arborea*.

Keywords: Fuel, X-rays, density profile, compression resistance.

Resumen

La torrefacción y peletización se han estudiado en la generación de calor a partir de residuos lignocelulósicos, para incrementar las propiedades energéticas del material. El objetivo del presente trabajo fue torrefaccionar aserrín de *Gmelina arborea* y *Dipteryx panamensis* a 200 °C en tres tiempos: 0, 15 y 20 minutos. Con las biomásas obtenidas se fabricaron *pellets* de 6 mm de diámetro y se evaluaron sus propiedades físicas, el poder calórico, la densidad y la propiedad mecánica de resistencia a la compresión. Ambas especies presentaron características físicas similares con respecto al diámetro (0.50 mm), longitud (21.50 mm) y porcentaje de absorción de agua (6.00 %). El poder calórico aumentó de 9,749 kJ·kg⁻¹ en la biomasa sin torrefaccionar a 18,126 kJ·kg⁻¹ en la biomasa torrefaccionada. Los *pellets* de *D. panamensis* presentaron mayor densidad y resistencia a la compresión que los de *G. arborea*. Con base en los resultados, la resistencia a la compresión del *pellet* disminuye cuando el tiempo de torrefacción aumenta. Existe correlación positiva entre la densidad de los *pellets* y la resistencia a la compresión. La especie *D. panamensis* presenta mejor comportamiento a la torrefacción y peletización que la madera de *G. arborea*.

Palabras clave: Combustible, rayos X, perfiles de densidad, compresión.

Introduction

Lignocellulosic biomass is a renewable source with greater capacity to generate energy. Biomass can be obtained from agricultural and forestry industries residues (Bahng, Mukarate, Robichaud, & Nimlos, 2009). In the case of Costa Rica, the *Gmelina arborea* Roxb. and *Dipteryx panamensis* (Pittier) Record & Mell. Species are considered important for the forest sector, for the quality of its wood and adaptation to different ecosystems when used in forest plantations (Petit & Montagnini, 2004). There are few studies showing the energy potential of these species or the possibility of increasing their energy properties, regarding the bioenergy production (Tenorio & Moya, 2012). The biomass of *G. arborea* and *D. panamensis*, among other types of biomass, can be not favorable regarding their processes or characteristics (high moisture, hygroscopic nature and low density) compared to other fossil fuels (Castellano, Gómez, Fernández, Esteban, & Carrasco, 2015). For this reason, several processes have been implemented to improve the natural conditions of the biomass, specifically, the increase of its heat capacity. Torrefaction is a treatment that improves moisture absorption and heat caloric values (Wu, Schott, & Lodewijks, 2011). In torrefaction, the temperature slowly increases to a range between 200 and 300 °C in the absence of oxygen, to prevent the biomass material from igniting due to the flammability of the element (Van der Stelt, Gerhauser, Kie, & Ptasinski, 2011). Another method of improving biomass processes, transportation oriented, is densification from the manufacture of pellets or briquettes (Chen, Peng, & Bi, 2015). In these products, biomass is densified by a mechanical process in which pressure is applied, reducing the spaces between wood particles and increasing density (Stelte et al., 2012); energy density, moisture content and ash improve considerably, and transport and storage costs decrease (Filbakk, Skjevraak, Høibø, Dibdiakova, & Jirjis, 2011).

Recently, torrefaction and compaction have been combined to improve the process and yield of biomass (Li et al., 2012). Torrefied biomass pellets decrease moisture absorption (Li et al., 2012); however, this type of biomass has greater compression difficulty, so higher energy consumption is needed for the production thereof (Wang et al., 2013). Pellets can also have lower densities and mechanical forces compared to those made with untreated biomass (Li et al., 2012).

The quality of the pellets was evaluated with different techniques, such as X-rays, which provide internal structure information (Tenorio, Moya, Tomazello, & Valaert, 2015). With this technique, a x-ray photography can be performed, in which it is possible to determine the presence of cracks and irregularities in the pellets

Introducción

La biomasa lignocelulósica es una de las fuentes renovables con mayor capacidad para generar energía. La biomasa se puede obtener de residuos de industrias agrícolas y forestales (Bahng, Mukarate, Robichaud, & Nimlos, 2009). En el caso de Costa Rica, las especies *Gmelina arborea* Roxb. y *Dipteryx panamensis* (Pittier) Record & Mell. se consideran importantes para el sector forestal, tanto por la calidad de su madera como por la adaptación a diferentes ecosistemas cuando se utilizan en plantaciones forestales (Petit & Montagnini, 2004). Con respecto a la producción de bioenergía, existen pocos estudios que muestren el potencial energético de dichas especies o bien la posibilidad de aumentar sus propiedades energéticas (Tenorio & Moya, 2012). La biomasa de *G. arborea* y *D. panamensis*, entre otros tipos de biomasa, pueden ser no favorables con relación a sus procesos o características (alto contenido de humedad, naturaleza higroscópica y densidad baja) si se comparan con otros combustibles fósiles (Castellano, Gómez, Fernández, Esteban, & Carrasco, 2015). Por esta razón se han implementado diferentes procesos para mejorar las condiciones naturales de la biomasa, específicamente, el aumento de su capacidad calórica. La torrefacción es uno de estos tratamientos que mejora la absorción de humedad y la capacidad calórica (Wu, Schott, & Lodewijks, 2011). En la torrefacción, la temperatura incrementa lentamente hasta un rango entre 200 y 300 °C en ausencia de oxígeno, para evitar que el material biomásico arda debido a la flamabilidad del elemento (Van der Stelt, Gerhauser, Kie, & Ptasinski, 2011). Otro método para mejorar los procesos de la biomasa, pero orientado al transporte, es la densificación a partir de la fabricación de *pellets* o briquetas (Chen, Peng, & Bi, 2015). En estos productos, la biomasa se densifica mediante un proceso mecánico donde se aplica presión, disminuyendo los espacios entre las partículas de la madera e incrementando su densidad (Stelte et al., 2012); la densidad energética, los contenidos de humedad y cenizas mejoran considerablemente, y los costos de transporte y almacenamiento disminuyen (Filbakk, Skjevraak, Høibø, Dibdiakova, & Jirjis, 2011).

Recientemente, la torrefacción y la compactación se han combinado para mejorar el proceso y desempeño de la biomasa (Li et al., 2012). Los *pellets* con biomasa torrefaccionada disminuyen la absorción de humedad (Li et al., 2012); sin embargo, este tipo de biomasa presenta mayor dificultad de compresión, por lo que es necesario un mayor consumo de energía para la elaboración de los mismos (Wang et al., 2013). Los *pellets* también pueden presentar densidades y fuerzas mecánicas menores que los elaborados con biomasa no tratada (Li et al., 2012).

and the mechanical resistance thereof can be tested (Tenorio et al., 2015).

Given the above conditions, the present study aims to evaluate density, water absorption and compression force of pellets manufactured with torrefied biomass (at different timings) of two forest species (*G. arborea* and *D. panamensis*) used in commercial reforestation in Costa Rica. In addition, the relationship between density of pellets and mechanical resistance was evaluated.

Materials and methods

Study material

Wood residues of *G. arborea* and *D. panamensis* from 10 years old-plantations were used. Sawdust of both species was collected directly from the sawmilling process and air-dried until approximately 12 % moisture. The particle size varied between 1 and 3 mm length and 1 to 2 mm in diameter. A description of the process to obtain the particles used can be found in Aragón, Moya, Bond, Valaert, and Tomazello (2016).

Torrefied biomass of *G. arborea* and *D. panamensis*

About 500 g sawdust were taken from each species. This amount was divided into three parts to apply three times of torrefaction, named treatments: 1) control (without torrefaction, 0 min), 2) 200 °C for 15 min and 3) 200 °C for 20 min. During the torrefaction process, the airflow is controlled by sealing the muffle (Nabertherm, model L3/12, Netherlands) and releasing the air every 5 min using a stopcock to prevent the ingress of oxygen and prevent combustion air.

Torrefied biomass pellets from *G. arborea* and *D. panamensis*

The torrefied sawdust was used to manufacture pellets, using a universal testing machine with a capacity of 1 t (JBA, model 855, Spain). The temperature and pressure of the manufacture of the pellets was controlled by an attachment built with a 6 mm diameter stem and a plunger, which pressed the biomass (Figure 1). Pellets were manufactured with 1.09 g of torrefied material which was placed in the stem of the attachment and compressed at a speed of 60 m·min⁻¹. The biomass was compressed until having a pellet of approximately 2.5 cm in length. The pellet remained for a period of 2 min at a temperature of 200 °C and then removed from the machine. A total of 20 pellets were manufactured for each evaluation time for both species.

Physical properties and calorific value of the pellets

Length, diameter, percent of water absorption and calorific value of the pellets manufactured were

La calidad de los *pellets* se ha evaluado con distintas técnicas, como los rayos X, que proporcionan información de la estructura interna (Tenorio, Moya, Tomazello, & Valaert, 2015). Con esta técnica se puede realizar una microtomografía en la cual es posible determinar la presencia de fisuras e irregularidades en los *pellets*, al igual que se puede comprobar la resistencia mecánica de los mismos (Tenorio et al., 2015).

Dadas las condiciones antes mencionadas, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la densidad, absorción de agua y la resistencia a la compresión de *pellets* fabricados con biomasa torrefaccionada (a diferentes tiempos) de dos especies forestales (*G. arborea* y *D. panamensis*) utilizadas en la reforestación comercial de Costa Rica. Asimismo se evaluó la relación de la densidad del *pellet* con la resistencia mecánica a la compresión.

Materiales y métodos

Material de estudio

Se utilizaron residuos maderables de *G. arborea* y *D. panamensis* procedente de plantaciones de 10 años de edad. El aserrín de ambas especies se recolectó directamente del proceso de aserrío y se secó al aire hasta alcanzar aproximadamente 12 % de humedad. El tamaño de las partículas varió entre 1 y 3 mm de longitud y 1 a 2 mm de diámetro. Una descripción del proceso de obtención de las partículas utilizadas puede consultarse en Aragón, Moya, Bond, Valaert, y Tomazello (2016).

Torrefacción de la biomasa de *G. arborea* y *D. panamensis*

Aproximadamente 500 g de aserrín se tomaron de cada especie. Esta cantidad se dividió en tres partes para aplicar tres tiempos de torrefacción, denominados tratamientos: 1) testigo (sin torrefacción, 0 min), 2) 200 °C por 15 min y 3) 200 °C por 20 min. Durante el proceso de torrefacción, el flujo de aire se controló sellando la mufla (Marca Nabertherm, modelo L3/12, Holanda) y liberando el aire cada 5 min mediante una llave de paso para evitar el ingreso de oxígeno y así evitar la combustión del aire.

Pelletizado de la biomasa torrefaccionada de *G. arborea* y *D. panamensis*

El aserrín torrefaccionado se utilizó para fabricar *pellets*, utilizando una máquina universal de ensayos con capacidad de 1 t (marca JBA, modelo 855, España). La temperatura y presión de la fabricación de los *pellets* se controló mediante un aditamento construido con un vástago de 6 mm de diámetro y un émbolo que comprimió la biomasa (Figura 1). Los *pellets* se elaboraron con 1.09 g del material torrefaccionado, el cual se colocó en el vástago del aditamento y se comprimió a una

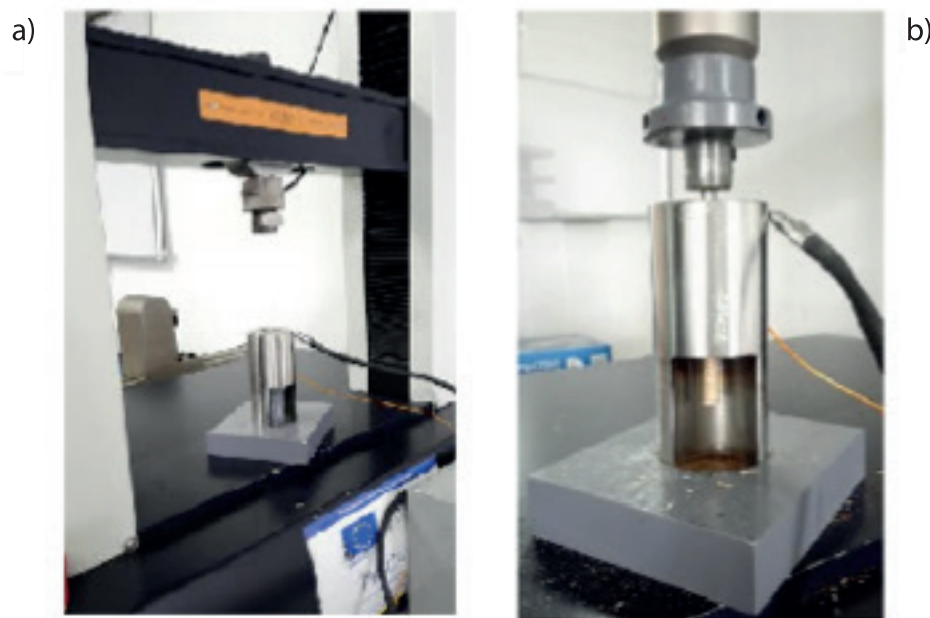


Figure 1. Universal testing machine (a) and attachment built for the production of pellets (b) from torrefied from *Gmelina arborea* and *Dipteryx panamensis*.

Figura 1. Máquina de ensayo universal (a) y aditamento construido para la fabricación de pellets (b), a partir de aserrín torrefaccionado de *Gmelina arborea* y *Dipteryx panamensis*.

determined. In the case of rate of absorption, a total of 10 pellets were selected and cut in half; one half was placed in a desiccator with a saturated solution of potassium nitrate (KNO_3) at 22 °C (equilibrium moisture content of 21 %) for 15 days until constant weight. The samples were weighed before and after this time, and the percentage of water absorption was calculated using the following equation:

$$\text{Moisture absorption (\%)} = \frac{\text{Weight at 21 \%} - \text{Start weight}}{\text{Start weight}} * 100$$

The calorific value was determined under the standard ASTM-D5865, which uses the Parr's calorimetric test (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2003).

Density of pellets by X-ray densitometry

The actual density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) of pellets was calculated with weight (kg) and measures of length (m) and diameter (m), using the following equation:

$$\text{Density of pellet} = \frac{\text{Pellet weight}}{3.14 * \text{Length} * (\text{Diameter}/2)^2}$$

Then, the density was obtained by X-ray densitometry in longitudinal direction (Quintek measurement Systems Inc., model QTRS-01X, USA), using a voltage of 7 kV in the tube; density readings were made for 1 s every 40 μm . Density was determined in a sample of 20 pellets per treatment in both species. The procedure for determining the density is extensively detailed in Tenorio et al. (2015).

velocidad de 60 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. La biomasa se comprimió hasta alcanzar un pellet de aproximadamente 2.5 cm de longitud. El pellet permaneció por un periodo de 2 min a una temperatura de 200 °C y después se extrajo de la máquina. Se elaboraron 20 pellets por cada tiempo de evaluación para ambas especies.

Propiedades físicas y poder calórico de los pellets

La longitud, diámetro, porcentaje de absorción de agua y poder calórico de los pellets construidos se determinaron. En el caso del porcentaje de absorción, se seleccionaron 10 pellets y se cortaron a la mitad; una de las mitades se colocó en un desecador con una solución saturada de nitrato de potasio (KNO_3) a 22 °C (contenido de humedad de equilibrio de 21 %) por 15 días hasta que obtuvieron peso constante. Las muestras se pesaron antes y después de este tiempo, y el porcentaje de absorción de agua se calculó con la siguiente ecuación:

$$\text{Absorción de humedad (\%)} = \frac{\text{Peso al 21 \%} - \text{Peso inicial}}{\text{Peso inicial}} * 100$$

El poder calórico se determinó bajo la norma ASTM-D5865 que utiliza la prueba calorimétrica de Parr's (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2003).

Densidad de los pellets por densitometría de rayos X

La densidad real ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) de los pellets se calculó utilizando el peso (kg) y las medidas de longitud (m) y diámetro (m), aplicando la siguiente ecuación:

Compression of pellets

The compression force was evaluated in the other 10 halves of the pellets used in the absorption test. For this, the pellet length was adjusted to about 13 mm. This test was made with the pellet sideways, according to the methodology proposed by Aarseth and Prestlokken (2003). In this test, the compression force was applied at a rate of 0.2 mm·s⁻¹. Compression force against deformation of the pellet in the elastic region or proportional limit and maximum force achieved by the pellet before losing its shape were reported.

Statistical Analysis

A descriptive analysis (mean, standard deviation, maximum and minimum values) of the variables was carried out; in addition, it was verified whether they met the assumptions of normality and homoscedasticity of variance. The existence of significant statistical differences between means was verified by analysis of variance (ANOVA, $P \leq 0.05$) and finally, the Tukey test was applied to compare these differences using the program InfoStat (InfoStat, 2014).

Results and discussion

Physical properties of pellets from *G. arborea* and *D. panamensis*

According to Table 1 there are statistical differences ($P = 0.05$) between the length of pellets from *G. arborea* and *D. panamensis*, whereas the diameter and moisture absorption were statistically similar ($P > 0.05$). The percentages of moisture absorption in non-torrefied biomass pellets (6.00 and 6.94 %) are higher compared to those indicated by Fasina (2008), who reports values of 3 to 5 % in pellets under the same conditions. The percentages of moisture absorption in the pellets manufactured with torrefied materials are related to loss of hydrophobic condition of the biomass, as in the torrefaction process extractives, starch and carbohydrates are removed in the same manner in which hemicellulose and lignin decompose (Cao et al., 2015). In addition, water absorption capacity of the pellets may be influenced by the moisture content of the material, since with higher humidity less water is absorbed and vice versa (Tenorio et al., 2015).

Moreover, the calorific value ranged from 9,749 kJ·kg⁻¹ to 18,126 kJ·kg⁻¹; the lowest values were obtained with the treatments without torrefaction. In both species, not torrefied and torrefied biomass showed significant differences ($P = 0.05$) in calorific value, while in the two times of torrefaction (15 and 20 min), no differences were observed. The values of 9,749 kJ·kg⁻¹ to 18,126 kJ·kg⁻¹ obtained in the calorific value of pellets

$$\text{Densidad del pellet} = \frac{\text{Peso del pellet}}{3.14 \cdot \text{Longitud} \cdot (\text{Diámetro}/2)^2}$$

Posteriormente, la densidad se obtuvo mediante densitometría de rayos X en sentido longitudinal (marca Quintek Measurement Systems Inc., modelo QTRS-01X, EUA), utilizando una tensión de 7 kV en el tubo; las lecturas de densidad fueron hechas durante 1 s cada 40 μm. La densidad se determinó en una muestra de 20 pellets por cada tratamiento en ambas especies. El procedimiento para la determinación de la densidad está ampliamente detallado en Tenorio et al. (2015).

Compresión de los pellets

La resistencia a la compresión se evaluó en las otras 10 mitades de los pellets utilizados en la prueba de absorción. Para ello, la longitud del pellet se ajustó a 13 mm aproximadamente. Dicha prueba se hizo en sentido lateral del pellet, acorde con la metodología propuesta por Aarseth y Prestlokken (2003). En esta prueba, la carga de compresión se aplicó a una velocidad de 0.2 mm·s⁻¹. Se reporta la carga de compresión frente a la deformación del pellet en la zona elástica o límite de proporcionalidad, y la carga máxima alcanzada por el pellet antes de perder su forma.

Análisis estadístico

Se hizo un análisis descriptivo (media, desviación estándar, valores máximos y mínimos) de las variables; además, se verificó si cumplían con los supuestos de normalidad y homocedasticidad de las varianzas. La existencia de diferencias estadísticas significativas entre las medias se verificó mediante un análisis de varianza (ANOVA, $P \leq 0.05$) y, finalmente, se aplicó la prueba de Tukey para comparar dichas diferencias con el programa InfoStat (InfoStat, 2014).

Resultados y discusión

Propiedades físicas de los pellets de *G. arborea* y *D. panamensis*

Acorde con el Cuadro 1 existen diferencias estadísticas ($P = 0.05$) entre la longitud de los pellets de *G. arborea* y *D. panamensis*, mientras que el diámetro y la absorción de humedad fueron estadísticamente similares ($P > 0.05$). Los porcentajes de absorción de humedad en los pellets de biomasa no torrefacionada (6.00 y 6.94 %) son superiores a los indicados por Fasina (2008), quien reporta valores de 3 a 5 % en pellets bajo las mismas condiciones. Los porcentajes de absorción de humedad en los pellets elaborados con material torrefaccionado están relacionados con la pérdida de la condición hidrofóbica de la biomasa, pues en el proceso de torrefacción se remueven extractivos,

under different times of torrefaction are close to those reported for timber fast-growing species in Costa Rica, which vary from 16,500 kJ·kg⁻¹ to 20,600 kJ·kg⁻¹ (Tenorio & Moya, 2012). The values obtained in this study show that the calorific value increased to 80 % (Table 1) when biomass is subjected to torrefaction. The increase of calorific value to torrefaction temperature was also consistent with the values reported by Ferro, Beatón, and Zanzi (2009), in wheat straw pellets and sawdust. Increased calorific value of biomass after torrefaction is related to the loss of oxygen and hydrogen and carbon conservation, which disintegrates at higher temperatures, retaining the solids in biomass and removing the gaseous and liquid components (Van der Stelt et al., 2011).

Density variation in pellets of *G. arborea* and *D. panamensis*

The actual density of the pellets and those obtained through X-ray densitometry are shown in Table 2. The actual density ranges from 650 to 780 kg·m⁻³, with only the treatment of *G. arborea* torrefied at 20 min which presented statistical differences ($P = 0.05$) compared to others. The coefficient of variation for the actual density and by X-ray was higher for *G. arborea* (Table 2). This result can be explained by the fact that the lower density wood, as *G. arborea*, are generally more difficult during compaction of biomass (Tenorio & Moya, 2012). The density measured by X-ray evidence differences between treatments but not between species. In the case of *G. arborea*, the density varies between 670 and

almidón y carbohidratos de la misma forma en que la hemicelulosa y la lignina se descomponen (Cao et al., 2015). También la capacidad de absorción de agua de los pellets puede estar influenciada por el contenido de humedad del material, ya que a porcentajes altos de humedad se absorbe menor cantidad de agua y viceversa (Tenorio et al., 2015).

Por otra parte, el poder calórico varió de 9,749 kJ·kg⁻¹ a 18,126 kJ·kg⁻¹; los valores más bajos se obtuvieron con los tratamientos sin torrefacción. En ambas especies, la biomasa no torrefaccionada y la torrefaccionada presentaron diferencias significativas ($P = 0.05$) en el poder calórico, mientras que en los dos tiempos de torrefacción (15 y 20 min) no se evidenciaron diferencias. Los valores de 9,749 kJ·kg⁻¹ a 18,126 kJ·kg⁻¹ obtenidos en el poder calórico de los pellets bajo diferentes tiempos de torrefacción son cercanos a los reportados para especies maderables de rápido crecimiento en Costa Rica, los cuales varían de 16,500 kJ·kg⁻¹ a 20,600 kJ·kg⁻¹ (Tenorio & Moya, 2012). Los valores obtenidos en el presente trabajo demuestran que el poder calórico incrementa hasta 80 % (Cuadro 1) cuando la biomasa se somete a la torrefacción. El aumento del poder calórico con la temperatura de torrefacción también fue congruente con los valores reportados por Ferro, Beatón, y Zanzi (2009), en pellets de paja de trigo y aserrín. El incremento del poder calórico del material después de la torrefacción está relacionado con la pérdida de oxígeno e hidrógeno y la conservación del carbono, el cual se desintegra a temperaturas más altas, conservando el producto sólido en el material y

Table 1. Physical properties and calorific value of pellets from *Gmelina arborea* and *Dipteryx panamensis* at different times (treatments) of torrefaction at 200 °C.

Cuadro 1. Propiedades físicas y poder calórico de los pellets de *Gmelina arborea* y *Dipteryx panamensis* a diferentes tiempos (tratamientos) de torrefacción a 200 °C.

Species/Especie	Time (min)/ Tiempo (min)	Properties/Propiedades			
		Length (mm)/ Largo (mm)	Diameter (mm)/ Diámetro (mm)	Moisture absorption (%)/ Absorción de humedad (%)	Calorific value (kJ·kg ⁻¹)/ Poder calórico (kJ·kg ⁻¹)
<i>Gmelina arborea</i>	0	21.59 a	6.50 a	6.00 a	9,749 a
	15	22.48 a	6.52 a	6.89 a	17,471 b
	20	19.81 a	6.45 a	6.82 a	17,302 b
<i>Dipteryx panamensis</i>	0	23.96 b	6.43 a	6.94 a	10,504 a
	15	23.97 b	6.43 a	5.69 a	17,619 b
	20	23.20 b	6.45 a	7.15 a	18,126 b

Different letters in each parameter represent statistical differences between treatments species, according to the Tukey test ($P = 0.05$)

Letras diferentes en cada parámetro significan diferencias estadísticas entre los tratamientos de las especies, de acuerdo con la prueba de Tukey ($P = 0.05$)

Table 2. Density of pellets from *Gmelina arborea* and *Dipteryx panamensis* at different times (treatments) of torrefaction at 200 °C.

Cuadro 2. Densidad de los pellets de *Gmelina arborea* y *Dipteryx panamensis* a diferentes tiempos (tratamientos) de torrefacción a 200 °C.

Species / Especie	Time (min) / Tiempo (min)	Particle density / Densidad real		X ray density / Densidad rayos X	
		Average (kg·m ⁻³) / Promedio (kg·m ⁻³)	Coefficient of variation (%) / Coeficiente de variación (%)	Average (kg·m ⁻³) / Promedio (kg·m ⁻³)	Coefficient of variation (%) / Coeficiente de variación (%)
<i>Gmelina arborea</i>	0	720 a	13.97	720 c	8.37
	15	750 a	12.83	670 b	6.94
	20	650 b	14.00	690 bc	8.10
<i>Dipteryx panamensis</i>	0	780 a	3.67	700 bc	2.48
	15	780 a	4.18	670 b	3.24
	20	760 a	5.25	630 a	3.11

Different letters in each parameter represent statistical differences between treatments species, according to the Tukey test ($P = 0.05$)

Letras diferentes en cada parámetro significan diferencias estadísticas entre los tratamientos de las especies, de acuerdo con la prueba de Tukey ($P = 0.05$)

720 kg·m⁻³, being the control similar to the treatment torrefied at 20 min. In *D. panemensis*, the density varies between 630 and 700 kg·m⁻³ being the treatment of 20 min different from treatments of 15 and control. In general, the actual or calculated density was greater than that obtained with X rays (Table 2). In the present study, pellet density decreased when the explosion time of torrefied material increased; however, this is not a disadvantage, since the calorific value of the biomass increased (Table 1). The decrease in the pellet density manufactured with torrefied biomass is a normal condition (Peng, Bi, Lim, & Sokhansanj, 2013). The torrefied material is more difficult to compress, because it has suffered the loss of structural water, and other components that act as binding agents (Cao et al., 2015), which can be solved with the use of increased pressure and increased pressing temperature (Li et al., 2012; Peng et al., 2013).

The calculated density and that obtained with x-ray densitometry were lower than those found by Tenorio et al. (2015), who reported densities from 1,200 to 1,400 kg·m⁻³. However, this low density can be corrected in the biomass of *G. arborea* and *D. panamensis*, improving pressing conditions of biomass and, specifically, the attachment used in this study.

Figure 2 shows patterns of density variation of pellets in longitudinal direction. In both species, the same behavior was observed, showing that the pellet density decreases at the end of the length. Treatments with greater variation in density were those of 20 min; in the case of treatments of 0 and 15 min, an acceptable variation (less than 3 %) was observed. Profiles of density variation with longitudinal direction show that

eliminando los componentes gaseosos y líquidos (Van der Stelt et al., 2011).

Variación de la densidad en los pellets de *G. arborea* y *D. panamensis*

Las densidades reales de los pellets y las obtenidas a través de la densitometría de rayos X se presentan en el Cuadro 2. La densidad real varía entre 650 y 780 kg·m⁻³, siendo solo el tratamiento de *G. arborea* torrefaccionado a 20 min el que presentó diferencias estadísticas ($P = 0.05$) con respecto a los demás. El coeficiente de variación para la densidad real y por rayos X fue mayor para *G. arborea* (Cuadro 2). Dicho resultado puede ser explicado por el hecho de que las maderas de menor densidad, como *G. arborea*, son por lo general más difíciles durante la compactación de la biomasa (Tenorio & Moya, 2012). La densidad medida por rayos X sí evidencia diferencias entre los tratamientos pero no entre especies. Para el caso de *G. arborea*, la densidad varía entre 670 y 720 kg·m⁻³, siendo el testigo similar al tratamiento de torrefacción de 20 min. En *D. panemensis*, la densidad varía entre 630 y 700 kg·m⁻³, siendo el tratamiento de 20 min diferente de los tratamientos de 15 min y testigo. En general, la densidad real o calculada fue mayor que la obtenida con rayos X (Cuadro 2). En el presente estudio, la densidad del pellet disminuyó cuando el tiempo de explosión del material a la torrefacción aumentó; sin embargo, esto no es una desventaja, ya que el poder calórico de la biomasa aumentó (Cuadro 1). La disminución de la densidad en el pellet fabricado con biomasa torrefaccionada es una condición normal (Peng, Bi, Lim, & Sokhansanj, 2013). El material torrefaccionado es más difícil de comprimir, pues ha sufrido la pérdida de agua estructural, al igual

the pellets are irregular (Figure 2) which may be related to the particle size (Mani, Tabil, & Sokhansanj, 2003) and the problems that biomass shows when being subjected to pressure. A smaller particle size produces higher density of the pellets, due to the greater biomass compression (Quirino, de Oliveira, de Souza, & Tomazello, 2012). However, when the particle size is

que otros componentes que actúan como agentes de unión (Cao et al., 2015), lo cual puede solucionarse con el uso de mayor presión y aumento de la temperatura de prensado (Li et al., 2012; Peng et al., 2013).

La densidad calculada y la obtenida con densitometría de rayos X fueron inferiores a las encontradas por

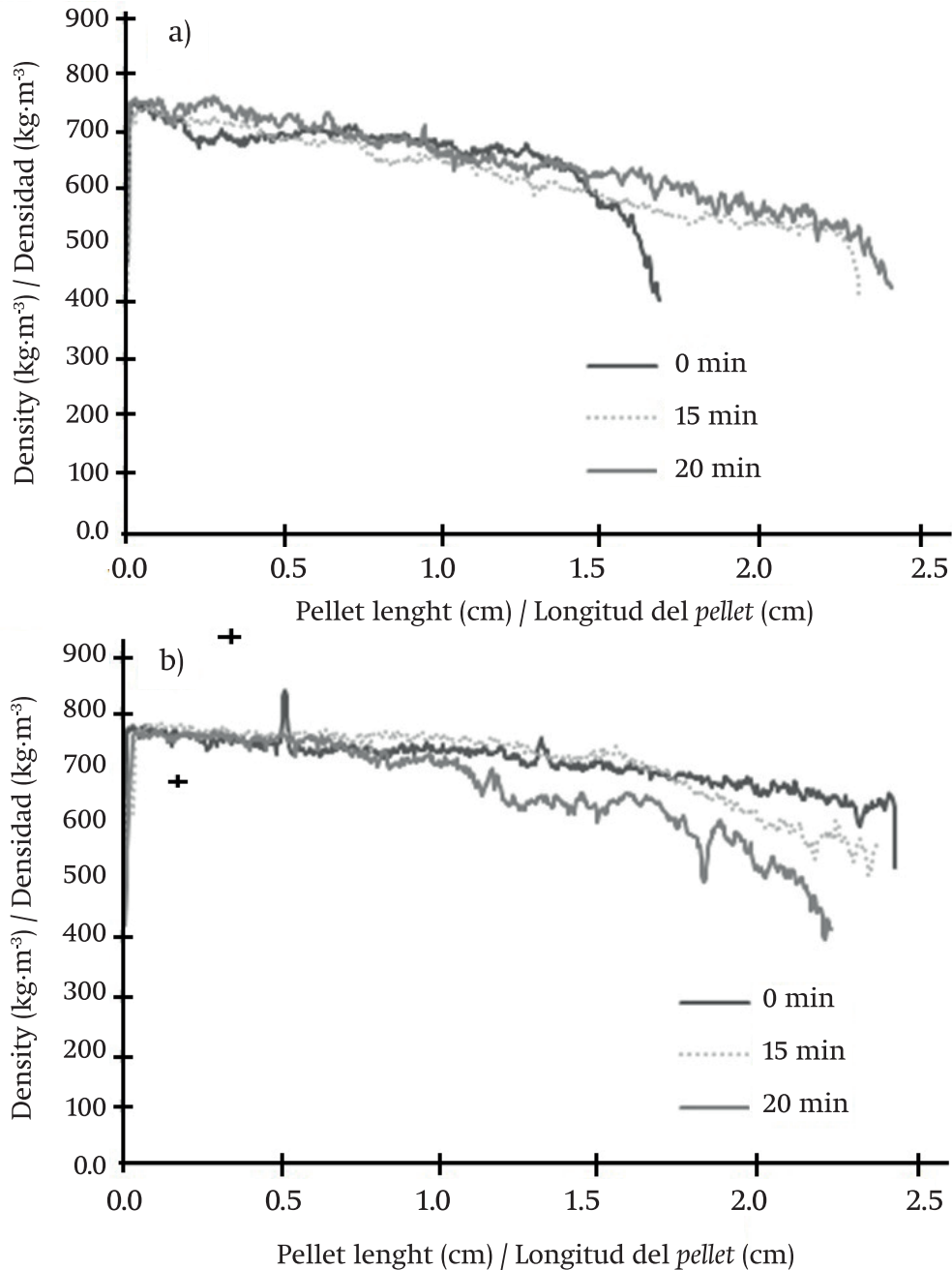


Figure 2. Variation of the density of pellets from *Gmelina arborea* (a) and *Dipteryx panamensis* (b) in longitudinal direction, at 0, 15 and 20 minutes of torrefaction at 200 °C.

Figura 2. Variación de la densidad de los pellets de *Gmelina arborea* (a) y *Dipteryx panamensis* (b) en dirección longitudinal, a temperaturas de 0, 15 y 20 minutos de torrefacción a 200 °C.

not uniform, there may be considerable variations in density (Tenorio et al., 2015), as occurred in the present study with the two species studied.

Compression force of pellets from *G. arborea* and *D. panamensis*

Figure 3 shows the behavior of the maximum compression force with regard to deformation. The species *D. panamensis* is the one that resists greater compression force of the pellets (90.43 to 224.39 N); the control resisted greater force followed by treatment at 15 and 20 min. In the case of the species *G. arborea*, the forces ranged from 28.04 to 32.35 N, being the three treatments similar statistically ($P > 0.05$).

Pellets with torrefied biomass of *D. panamensis* had higher force compression than those of *G. arborea* (Figure 3). This resistance is important because it establishes the effort that can undergo the pellets during storage or during their performance (Tenorio et al., 2015). The differences found in the compression of these two species is attributed to differences in wood

Tenorio et al. (2015), quienes reportan densidades de 1,200 a 1,400 kg·m⁻³. No obstante, esta baja densidad puede corregirse en la biomasa de *G. arborea* y *D. panamensis*, mejorando las condiciones de prensado de la biomasa y, específicamente, el aditivo utilizado en este estudio.

La Figura 2 muestra los patrones de variación de densidad de los pellets en sentido longitudinal. En ambas especies se presentó el mismo comportamiento, evidenciando que la densidad del pellet decrece al final de la longitud. Los tratamientos con mayor variación en la densidad fueron los de 20 min; en el caso de los tratamientos de 0 y 15 min se presenta una variación aceptable (menor de 3 %). En los perfiles de variación en sentido longitudinal se observa que los pellets presentan irregularidades (Figura 2) que pueden estar relacionadas con el tamaño de partículas (Mani, Tabil, & Sokhansanj, 2003) y los problemas que la biomasa presenta al momento de someterla a presión. Un menor tamaño de las partículas produce mayor densidad de los pellets, debido a la mayor facilidad en la compresión de la biomasa (Quirino, de Oliveira, de Souza, & Tomazello,

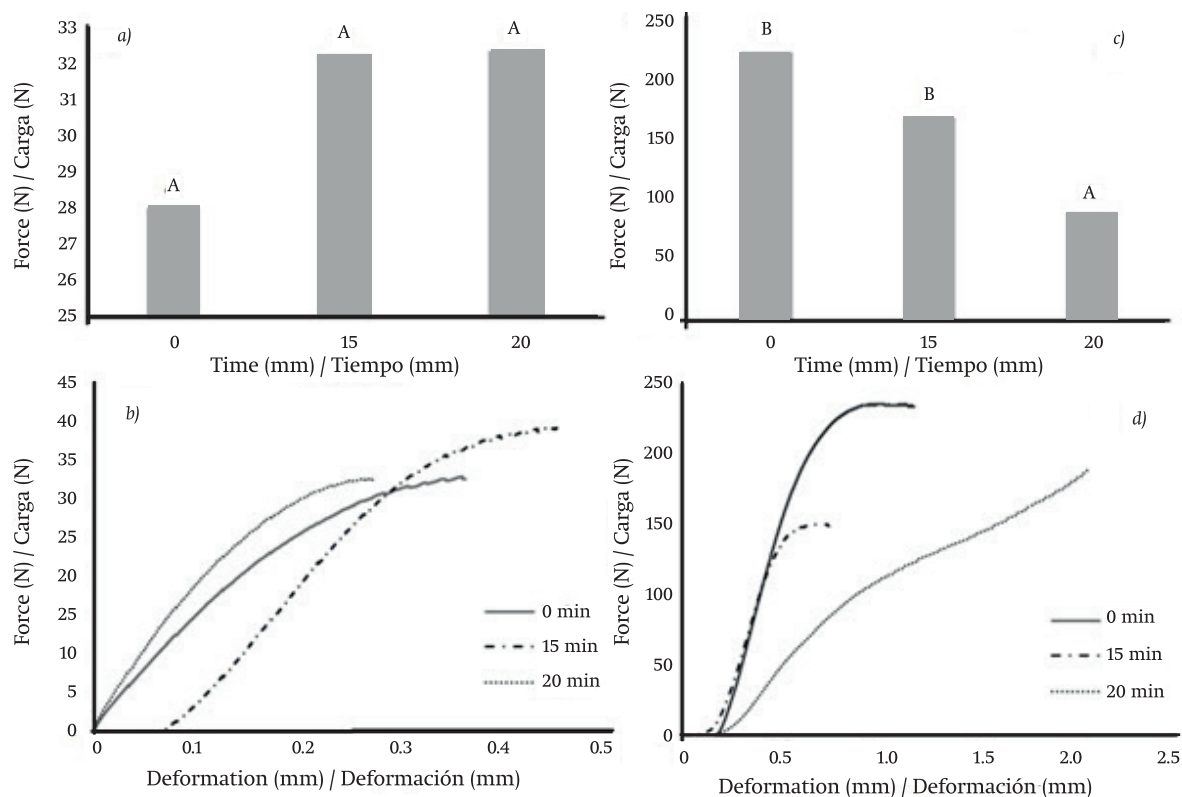


Figure 3. Compression force and deformation behavior in pellets from *Gmelina arborea* (a and b) and *Dipteryx panamensis* (c and d). Different letters above the bars represent statistical difference between treatments for each species, according to the Tukey test ($P = 0.05$).

Figura 3. Carga de compresión y comportamiento de la deformación en pellets de *Gmelina arborea* (a y b) y *Dipteryx panamensis* (c y d). Letras diferentes sobre las barras significan diferencias estadísticas entre los tratamientos de cada especie, de acuerdo con la prueba de Tukey ($P = 0.05$).

density and chemical composition (Stelte et al., 2012); for example, Tenorio, Moya, Salas, and Berrocal (2016) indicate that the amount of extractives in *D. panamensis* varies from 10 to 20 % in different solvents, whereas in *G. arborea* is less than 10 % (Moya & Tenorio, 2013).

Dipteryx panamensis pellets manufactured with torrefied material showed a decrease in compression force with respect to non-torrefied biomass (Figure 3). This behavior may be due to several reasons: i) decomposition of lignin, hemicellulose and extractives during torrefaction (Cao et al., 2015), ii) decrease in humidity, which has an important role in the attraction and cohesion of the adjacent particles (Arias et al., 2008) and iii) the grindability of biomass is improved during torrefaction, making the torrefied material to be susceptible to granulation (Ahn et al., 2014).

Relationship between compression force and density of pellets

Figure 4 shows that there is linear relationship between the variable density of the pellets and breaking force compression. In the case of the species *G. arborea*, the non-torrefied treatment (control) had a low coefficient of determination of 0.59, followed by the treatment of 20 min with 0.74; the highest coefficient was 0.85 for the treatment of 15 min. The species *D. panamensis* had determination coefficients of 0.74, 0.90 and 0.83 for treatments of 0, 15 and 20 min, respectively. In both species, the highest correlation between density

2012). No obstante, cuando el tamaño de las partículas no es uniforme, es posible que existan variaciones de densidad considerables (Tenorio et al., 2015), tal como ocurrió en el presente trabajo con las dos especies estudiadas.

Resistencia a la compresión de pellets de *G. arborea* y *D. panamensis*

La Figura 3 muestra el comportamiento de la carga máxima a la compresión con respecto a la deformación. La especie *D. panamensis* es la que soporta mayor carga de compresión de los pellets (90.43 a 224.39 N); el testigo soportó mayor carga seguido de los tratamientos de 15 y 20 min. En el caso de *G. arborea*, las cargas variaron de 28.04 a 32.35 N, siendo los tres tratamientos similares estadísticamente ($P > 0.05$).

Los pellets con biomasa torrefaccionada de *D. panamensis* presentaron mayor resistencia a la compresión que los de *G. arborea* (Figura 3). Esta resistencia es importante porque establece el esfuerzo al que pueden someterse los pellets durante su almacenamiento o durante su desempeño (Tenorio et al., 2015). Las diferencias encontradas en la compresión de estas dos especies se atribuyen a diferencias en la densidad de la madera y composición química (Stelte et al., 2012); por ejemplo, Tenorio, Moya, Salas, y Berrocal (2016) señalan que la cantidad de extractivos en *D. panamensis* varía de 10 a 20 % en diferentes solventes, mientras que en *G. arborea* es menor de 10 % (Moya & Tenorio, 2013).

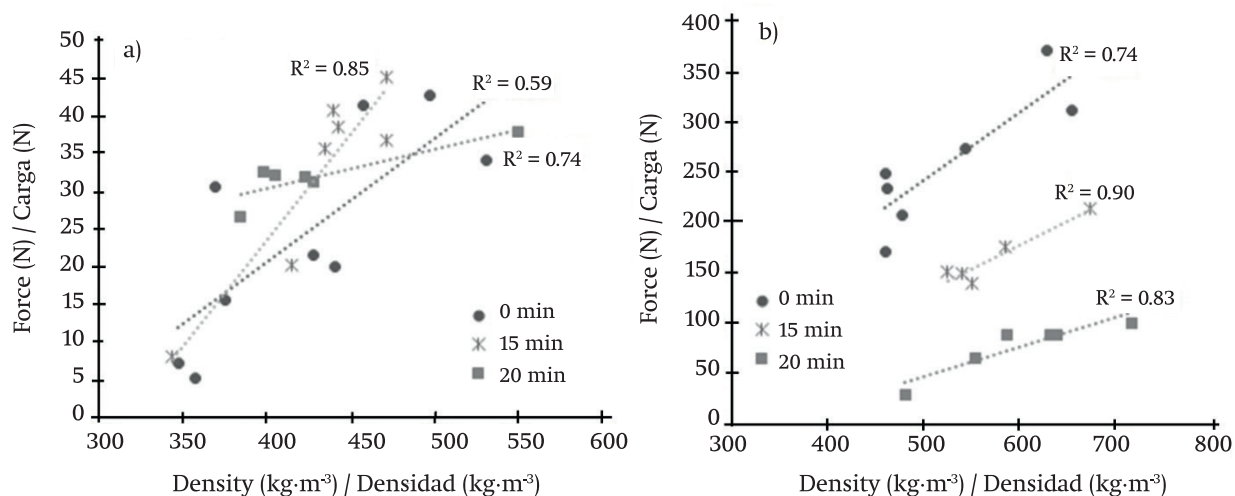


Figure 4. Linear regression between the values of density and compression force in pellets from *Gmelina arborea* (a) and *Dipteryx panamensis* (b) at different times of torrefaction at 200 °C.

Figura 4. Regresión lineal entre los valores de densidad y fuerza de compresión en pellets de *Gmelina arborea* (a) y *Dipteryx panamensis* (b) a diferentes tiempos de torrefacción a 200 °C.

and breaking force of the pellet was observed in 15 min treatments. The positive relationship between the compression force and density of the pellets (Figure 4) of *D. panamensis* and *G. arborea* indicates that when density increases, compression force also increases (Carone, Pantaleo, & Pellerano, 2011) but in the case that the variation of the density increases, the compression force decreases; that is, the breaking force that the pellet can resist will be less.

Conclusions

Pellets manufactured with torrefied biomass of *G. arborea* and *D. panamensis* had similar physical characteristics in diameter, but not in length and percentage of absorption. The calorific value of both species increased with torrefaction temperature, while the density decreased with increasing the time of exposure of the material to torrefaction. Density profiles lengthwise show that, in both species, this parameter decreases at the end of the pellet. Lower compression force was obtained for pellets from torrefied *G. arborea* compared to pellets of torrefied biomass from *D. panamensis*. For the latter case, there is a decrease in compression force with time exposing the material to torrefaction. In both species, there was positive correlation between density of pellets and mechanical strength of compression. In conclusion, it is possible torrefy woods of *G. arborea* and *D. panamensis* at temperatures of 200 °C and preferably, with a duration of 20 min, achieving adequate properties and high calorific value; the species *D. panamensis* has better behavior to torrefaction and pelletizing compared to the wood of *G. arborea*.

Acknowledgements

To the Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Tecnológico of Costa Rica for financing the research project.

End of English version

References / Referencias

- Aarseth, K. A., & Prestlokken, E. (2003). Mechanical properties of feed pellets: Weibull analysis. *Biosystems Engineering*, 84, 349-361. doi: 10.1016/S1537-5110(02)00264-7
- Ahn, B. J., Chang, H. S., Lee, S. M., Choi, D. H., Cho, S. T., Han, G. S., & Yang, I. (2014). Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from *Larix kaemferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. *Renewable Energy*, 62, 18-23. doi: 10.1016/j.renene.2013.06.038
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2003). D 5865-04 Standard test method for gross calorific

Los pellets de *D. panamensis* elaborados con material torrefaccionado evidenciaron una disminución en la resistencia a la compresión con relación a la biomasa no torrefaccionada (Figura 3). Este comportamiento puede deberse a varias razones: i) descomposición de lignina, hemicelulosa y extractivos durante la torrefacción (Cao et al., 2015), ii) disminución de la humedad, la cual tiene un papel importante para la atracción y cohesión de las partículas adyacentes (Arias et al., 2008) y iii) la capacidad de molienda de la biomasa se mejora durante la torrefacción, lo que hace que el material torrefaccionado sea propenso a la granulación (Ahn et al., 2014).

Relación entre carga de compresión y densidad de los pellets

En la Figura 4 se observa que existe relación lineal entre la variable densidad de los pellets y carga de ruptura a la compresión. Para el caso de la especie *G. arborea*, el tratamiento sin torrefaccionar (testigo) presentó un coeficiente de determinación bajo de 0.59, seguido del de 20 min con 0.74; el coeficiente más alto fue de 0.85 en el tratamiento de 15 min. En *D. panamensis* se obtuvieron coeficientes de determinación de 0.74, 0.90 y 0.83 para los tratamientos de 0, 15 y 20 min, respectivamente. En ambas especies, la correlación más alta entre la densidad y la carga de ruptura del pellet se presentó en los tratamientos de 15 min. La relación positiva entre la resistencia a la compresión y la densidad de los pellets (Figura 4) de *D. panamensis* y *G. arborea* indica que cuando la densidad aumenta, la resistencia de compresión también incrementa (Carone, Pantaleo, & Pellerano, 2011), pero en el caso de que la variación de la densidad aumente, la resistencia a la compresión disminuye; es decir, la carga de ruptura que el pellet pueda soportar será menor.

Conclusiones

Los pellets fabricados con biomasa torrefaccionada de *G. arborea* y *D. panamensis* presentaron características físicas similares en diámetro, pero no en longitud y porcentaje de absorción. El poder calórico de ambas especies aumentó con la temperatura de torrefacción, mientras que la densidad disminuyó al aumentar el tiempo de exposición del material a la torrefacción. Los perfiles de densidad en sentido longitudinal evidencian que, en ambas especies, dicho parámetro decrece al final del pellet. En el caso de los pellets de *G. arborea* torrefaccionada se obtuvieron cargas de resistencia a la compresión menores que en los pellets de la biomasa torrefaccionada de *D. panamensis*. Para esta última ocurre una disminución de la resistencia en compresión con el tiempo de exposición del material a la torrefacción. En ambas especies hubo correlación positiva entre la densidad de los pellets con la resistencia

- value of coal and coke. Philadelphia, USA: ASTM International.
- Aragón-Garita, S., Moya, R., Bond, B., Valaert, J., & Tomazello, F. M. (2016). Production and quality analysis of pellets manufactured from five potential energy crops in the Northern Region of Costa Rica. *Biomass and Bioenergy*, 87, 84-95. doi: 10.1016/j.biombioe.2016.02.006
- Arias, B., Pevida, C., Feroso, J., Plaza, M. G., Rubiera, F., & Pis, J. J. (2008). Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. *Fuel Processing Technology*, 89(2), 169-175. doi: 10.1016/j.fuproc.2007.09.002
- Bahng, M., Mukarakate, C., Robichaud, D., & Nimlos, M. (2009). Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing. *Analytica Chimica Acta*, 651, 117-138. doi: 10.1016/j.aca.2009.08.016
- Cao, L., Yuan, X., Li, H., Li, C., Xiao, Z., Jiang, L., & Zeng, G. (2015). Complementary effects of torrefaction and co-pelletization: Energy consumption and characteristics of pellets. *Bioresource Technology*, 185, 254-262. doi: 10.1016/j.biortech.2015.02.045
- Carone, M. T., Pantaleo, A., & Pellerano, A. (2011). Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 402-410. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.08.052
- Castellano, J. M., Gómez, M., Fernández, M., Esteban, L. S., & Carrasco, J. E. (2015). Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. *Fuel*, 139, 629-636. doi: 10.1016/j.fuel.2014.09.033
- Chen, W., Peng, J., & Bi, X. (2015). A state-of-the art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 847-866. doi: 10.1016/j.rser.2014.12.039
- Fasina, O. (2008). Physical properties of peanut hull pellets. *Bioresource Technology*, 99(5), 1259-1266. doi: 10.1016/j.biortech.2007.02.041
- Ferro, D., Beatón, P., & Zanzi, R. (2009). Torrefacción de biomasa densificada. *Tecnología Química*, 29, 180-186. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543761022>
- Filbakk, T., Skjevraak, G., Høibø, O., Dibdiakova, J., & Jirjis, R. (2011). The influence of storage and drying methods for Scots pine raw material on mechanical pellet properties and production parameters. *Fuel Processing Technology*, 92, 871-878. doi: 10.1016/j.fuproc.2010.12.001
- InfoStat (2014). *Manual del usuario*. Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.
- Li, H., Liu, X., Legros, R., Bi, X. T., Lim, C., & Sokhansanj, S. (2012). Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets. *Applied Energy*, 93, 680-685. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.01.002
- Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2003). An overview of compaction of biomass grinds. *Powder Handling & Processing*, 15, 160-168. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/230704670_An_overview_of_compaction_of_biomass_grinds
- Moya, R., & Tenorio, C. (2013). Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast growth species in Costa Rica. *Biomass and Bioenergy*, 56, 14-21. doi: 10.1016/j.biombioe.2013.04.013
- Peng, J. H., Bi, H. T., Jim, C. L., & Sokhansanj, S. (2013). Study on density, hardness, and moisture uptake of torrefied wood pellets. *Energy & Fuels*, 27(2), 967-974. doi: 10.1021/ef301928q
- Petit, B., & Montagnini, F. (2004). Growth equations and rotation ages of ten native tree species in mixed and pure plantations in the humid neotropics. *Forest Ecology and Management*, 199(2), 243-257. doi: 10.1016/j.foreco.2004.05.039
- Quirino, W. F., de Oliveira, P. I. V., de Oliveira, M. A. C., de Souza, F., & Tomazello, F. M. (2012). Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira X Ray densitometry for waste wood briquettes analysis. *Scientia Forestalis*, 40(96), 525-536. Retrieved from <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr96/cap11.pdf>
- Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2012). Recent developments in biomass pelletization—A review. *BioResources*, 7(3), 4451-4490. doi: 10.15376/biores.7.3.4451-4490
- Tenorio, C., & Moya, R. (2012). Evaluation of different approaches for the drying of lignocellulose residues. *BioResources*, 7(3), 3500-3514. doi:10.15376/biores.7.3.3500-3514
- Tenorio, C., Moya, R., Salas, C., & Berrocal, A. (2016). Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica. *Bosque*, 37(1), 71-84. doi: 10.4067/S0717-92002016000100008
- Tenorio, C., Moya, R., Tomazello, F. M., & Valaert, J. (2015). Application of the X-ray densitometry in the evaluation of the quality and mechanical properties of biomass pellets. *Fuel Processing Technology*, 132, 62-83. doi: 10.1016/j.fuproc.2014.12.040

Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Tecnológico de Costa Rica por el financiamiento del proyecto de investigación.

Fin de la versión en español

- Van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., & Ptasinski, K. J. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass Bioenergy*, 35, 3748-3762. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.06.023
- Wang, C., Peng, J., Li, H., Bi, X., Legros, R., Lim, C., & Sokhansanj, C. (2013). Oxidative torrefaction of biomass residues and densification of torrefied sawdust to pellets. *Bioresource Technology*, 127, 318-325. doi: 10.1016/j.biortech.2012.09.092
- Wu, M. R., Schott, D. L., & Lodewijks, G. (2011). Physical properties of solid biomass. *Biomass Bioenergy*, 35, 2093-2105. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.02.020