

CALIDAD DE PÉLETS A PARTIR DE BIOMASA DE OCHO ESPECIES DENDROENERGÉTICAS DE CRECIMIENTO RÁPIDO

PELLET QUALITY FROM BIOMASS OF EIGHT FAST-GROWING DENDROENERGETIC SPECIES

Julio César Ríos-Saucedo¹, Rigoberto Rosales-Serna¹, Rafael Jiménez-Ocampo¹, Pablo Alfredo Domínguez-Martínez¹, Artemio Carrillo-Parra², Luis Manuel Valenzuela-Nuñez^{3*}

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Valle del Guadiana. km 4.5, Carretera Durango-El Mezquital, Durango, Durango. México. C.P. 34170. ²Universidad Juárez del Estado de Durango-Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera. Boulevard del Guadiana Núm. 501. Ciudad Universitaria. Durango, Durango. México. C.P. 34120. ³Universidad Juárez del Estado de Durango. Facultad de Ciencias Biológicas. Laboratorio de Biología y Ecología Forestal. Avenida Universidad S/N. Fraccionamiento Filadelfia. Gómez Palacio, Durango. C.P. 35010. (luisvn70@hotmail.com)

RESUMEN

La productividad de biomasa en especies de crecimiento rápido es una de las mejores alternativas para la elaboración de biocombustibles dendroenergéticos. Uno de los pretratamientos de la biomasa más importantes es el pelletizado y con esto aumenta el poder calorífico. El objetivo de este estudio fue evaluar la calidad de pélets de ocho especies dendroenergéticas de crecimiento rápido. Las especies evaluadas fueron *Eucalyptus globulus*, *Pinus greggii*, *Populus alba*, *Acacia retinoides*, *Ricinus communis*, *Populus deltoides*, *Pennisetum sp.* y *Salix sp.* El diseño experimental fue completamente aleatorio; las especies analizadas como tratamientos. Con los datos se realizó un ANDEVA y las medias de los tratamientos se compararon con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las variables evaluadas fueron: contenido de humedad (CH), cenizas, material volátil (CV), carbón fijo (CF) y poder calorífico superior (PCS); diámetro, longitud, peso, volumen, densidad a granel (DG) y densidad básica (DP); índice de resistencia, pérdida de biomasa y friabilidad (F). Las diferencias entre especies fueron significativas ($p \leq 0.05$), para todas las variables. Ocho de las nueve especies cumplieron con valores mínimos del PCS (19.2 MJ kg⁻¹ y 20.1 MJ kg⁻¹) requerido en normas internacionales de calidad en pélets (18.0 MJ kg⁻¹). Los pélets de ocho especies mostraron las dimensiones solicitadas en las normas de calidad. Todas las especies presentaron densidad aceptable, con base en la norma internacional. En la densidad básica se observaron valores

ABSTRACT

The productivity of biomass in fast-growing species is one of the best alternatives for the elaboration of dendroenergetic biofuels. One of the most important pre-treatments of the biomass is pelletizing, with which calorific value is increased. The objective of the present study was to evaluate the quality of pellets of eight fast-growing dendroenergetic species. The species evaluated were *Eucalyptus globulus*, *Pinus greggii*, *Populus alba*, *Acacia retinoides*, *Ricinus communis*, *Populus deltoides*, *Pennisetum sp.* and *Salix sp.* The experimental design was completely randomized; the species were analysed as treatments. The data was used for an ANOVA and the means of the treatments were compared with the Tukey test ($p \leq 0.05$) The variables evaluated were: moisture content (CH), ash content, volatile material (CV), fixed carbon (FC) and gross calorific value (PCS); diameter, length, weight, volume, bulk density, specific density (DP), resistance index, biomass loss, and friability (F). The differences among species were significant ($p \leq 0.05$) for all of the variables. Eight out of nine species complied with minimum values of PCS (19.2 MJ kg⁻¹ and 20.1 MJ kg⁻¹) required in international norms of quality in pellets (18.0 MJ kg⁻¹). The pellets of eight species presented the dimensions required in the norms of quality. All of the species showed acceptable density, based on the international norm. In specific density high and significant values were observed in *Pennisetum sp.* (1.4 g cm⁻³) and *Pinus greggii* (1.4 g cm⁻³), while *P. deltoides* registered the lowest value (1.0 g cm⁻³). In the resistance tests, the pellets of *P. greggii* presented high values for the number of parts at breakage (2.4) and loss of biomass (41.6 %); as well as low values of friability (0.45). Pellets obtained from the biomass of the evaluated species satisfied the international standards of quality.

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3385-3005>

Recibido: agosto, 2020. Aprobado: julio, 2021.

Publicado en *Agrociencia* 55: 557-568. 2021.

altos y significativos en *Pennisetum sp* (1.4 g cm^{-3}) y *Pinus greggii* (1.4 g cm^{-3}), mientras que *P. deltooides* registró el valor más bajo (1.0 g cm^{-3}). En las pruebas de resistencia, los pélets de *P. greggii* mostraron valores altos para el número de partes al rompimiento (2.4) y pérdida de biomasa (41.6 %); así como valores bajos de friabilidad (0.45). Los pélets obtenidos a partir de la biomasa de las especies evaluadas cumplieron con los estándares internacionales de calidad.

Palabras clave: bioenergía, industria insumos, normas sostenibilidad, dendroenergía.

INTRODUCCIÓN

Los biocombustibles son una alternativa eficaz para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y complementar el uso de carburantes de origen fósil (CEC, 2007). La producción de biocombustibles debe promoverse en lo posible, sin descuidar la seguridad alimentaria; a través del aprovechamiento eficiente de la biomasa derivada de las actividades forestales y agropecuarias (Li *et al.*, 2010). La fuente más común de biomasa dendroenergética son los bosques templados, áreas de matorral y selvas; los cuales son ecosistemas que muestran grado de perturbación alto. Para reducir el impacto ambiental se recomienda seleccionar las especies vegetales que utilicen el medio de manera eficiente, que produzcan cantidades altas de biomasa, que sirvan para la elaboración de biocombustibles y que favorezcan la sostenibilidad de la producción agropecuaria y forestal (Romero, 2010).

La deforestación y el cambio en el uso del suelo para actividades agrícolas y pecuarias son problemas graves por su relación con el calentamiento global (López-Feldman, 2015). En México alrededor de 55.9 millones ha de vegetación natural (29% del territorio) están sometidas a procesos de degradación (SEMARNAT, 2016). Esto disminuye el rendimiento de los sistemas productivos en los sectores agropecuario y forestal, además de afectar a la biodiversidad. Las plantaciones con fines dendroenergéticos en áreas degradadas representan una opción adecuada para proveer energía a los habitantes de estas zonas.

En Durango se evalúa la producción de biomasa de especies endémicas e introducidas para seleccionar aquellas que muestren mayor eficiencia. Según Rosales-Serna *et al.* (2018) las especies higuierilla (*Ricinus communis*), maralfalfa (*Pennisetum sp.*), acacia

Key words: bioenergy, industrial inputs, sustainability norms, dendroenergy.

INTRODUCTION

Biofuels are an effective alternative for reducing greenhouse gases and complementing the use of fossil fuels (CEC, 2007). The production of biofuels should be promoted whenever possible, without jeopardizing food safety; through the efficient use of the biomass derived from forest and agricultural activities (Li *et al.*, 2010). The most common source of dendroenergetic biomass are the temperate forests, shrublands and rain forests; which are ecosystems with a high degree of disturbance. To reduce the environmental impact, it is recommendable to select plant species that use their medium resources efficiently, that produce high amounts of biomass, that serve for the elaboration of biofuels and that favour the sustainability of agricultural and forest production (Romero, 2010).

Deforestation and the use of the soil for agricultural activities are serious problems due to their relationship with global warming (López-Feldman, 2015). In Mexico, an approximate of 55.9 million ha of natural vegetation (29% of the territory) are subjected to degradation processes (SEMARNAT, 2016). This reduces the yield of productive systems in the agricultural and forest sectors, as well as it affects biodiversity. The plantations with dendroenergetic purposes in degradable areas represent an adequate option for providing energy to the inhabitants of those zones.

In Durango an evaluation was made of the production of biomass from endemic and introduced species in order to select those that present highest efficiency. According to Rosales-Serna *et al.* (2018), castor bean (*Ricinus communis*), an exotic grass (*Pennisetum sp.*), acacia (*Acacia retinoides*), Eastern cottonwood (*Populus deltooides*), white poplar (*Populus alba*), willow (*Salix sp.*), and eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) have high possibilities of use in the generation of biomass to be used as biofuel.

In addition to the production of dendroenergetic biomass, the productive level, industrial utility and calorific value should be evaluated. This latter characteristic is related to the content of ash, volatile compounds and fixed carbon, as well as the densification capacity. The identification of plant

(*Acacia retinoides*), álamo (*Populus deltoides*), álamo blanco (*Populus alba*), sauce (*Salix* sp.) y eucalipto (*Eucalyptus globulus*) tienen posibilidades altas de uso en la generación de biomasa para utilizarlas como biocombustible.

Además de evaluar la producción de biomasa dendroenergética se deben evaluar el nivel productivo, la utilidad industrial y el valor calorífico. Esta última característica se relaciona con el contenido de cenizas, compuestos volátiles y carbón fijo, así como la capacidad de compactación (densificación). La identificación de especies vegetales con rendimiento alto y útiles en la elaboración de biocombustibles puede reducir la presión ejercida sobre los ecosistemas (Rosales-Serna *et al.*, 2018).

Con este estudio se contribuirá a la generación sostenible de energía, conservación ambiental y al incremento del ingreso de los productores en áreas marginales. Aunque en dependencia de la integración de un mercado cautivo y de que los costos de producción sean competitivos. Bajo la hipótesis de que especies evaluadas en sus características como opción dendroenergética mostrarían igualdad estadística en la calidad de pélets a partir de biomasa lignocelulósica; el objetivo del estudio fue evaluar la calidad de pélets elaborados con biomasa de ocho especies vegetales de crecimiento rápido establecidas como cultivos dendroenergéticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La biomasa de eucalipto (*Eucalyptus globulus*), pino (*Pinus greggii*), álamo blanco (*Populus alba*), acacia (*Acacia retinoides*), higuerilla (*Ricinus communis*), álamo (*Populus deltoides*), maralfalfa (*Pennisetum* sp.) y sauce (*Salix* sp.) se obtuvo de un área de plantación establecida (7 julio, 2015, con reposición de plantas perdidas el 2 septiembre, 2016) dentro de las instalaciones del Campo Experimental Valle del Guadiana, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Dichas instalaciones se ubican en el km 4.5 de la carretera Durango-El Mezquital (23° 59' 21" N, 104° 37' 33" O; 1880 m). El suelo predominante en el sitio es de tipo franco (arenoso y arcilloso), el cual tiene capacidad intermedia para la retención de humedad, profundidad media, pendiente de 0 a 2%, pH 7.9 y es pobre en contenido de materia orgánica, fósforo y nitrógeno. El clima de la región es templado, semiárido, con régimen de lluvias en verano; [BS₁ Kw (w) (e)] la temperatura media anual para es 17.4 °C con variación fuerte a lo largo del año (García, 2004). La lluvia acumulada durante el año alcanza un promedio de 476 mm,

species with high yield, useful for the elaboration of biofuels can reduce the pressure exerted on ecosystems (Rosales-Serna *et al.*, 2018).

This study will contribute to the sustainable generation of energy, environmental conservation and to income increase of producers in marginal areas. Although this is dependent on the integration of a captive market and on competitiveness of production costs. Under the hypothesis that species evaluated in their characteristics as dendroenergetic option would be statistically equal regarding the quality of pellets from lignocellulosic biomass; the objective of this study was to evaluate the quality of pellets produced with biomass of eight fast-growing plant species established as dendroenergetic plantations.

MATERIALS AND METHODS

The biomass of eucalyptus (*Eucalyptus globulus*), Gregg pine (*Pinus greggii*), white poplar (*Populus alba*), acacia (*Acacia retinoides*), castor bean (*Ricinus communis*), Eastern cottonwood (*Populus deltoides*), an exotic grass (*Pennisetum* sp.) and willow (*Salix* sp.) was obtained from an area of plantation established (July 7, 2015, with a replacement of lost plants on September 2, 2016) within the area of the Campo Experimental Valle del Guadiana, under the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). These facilities are located at the 4.5 km of the highway Durango-El Mezquital (23° 59' 21" N, 104° 37' 33" W; 1880 m). The predominant soil in the site is loam (sandy and clay), which has intermediate water retention capacity, medium depth, 0 to 2% slope, pH 7.9 and it is poor in organic matter, phosphorus and nitrogen. The climate of the region is temperate, semi-arid, with rains in summer [BS₁ Kw (w) (e)], the mean annual temperature is 17.4 °C with strong variation throughout the year (García, 2004). Rainfall accumulated during the year reaches an average of 476 mm, with higher values between June and September (Medina-García *et al.*, 2005).

The area of plantation is 180 m long and 30 m wide (5400 m²). The experimental plot consisted of 25 plants and the internal nucleus consisting of nine plants was considered the useful plot.

The replacement of plants was carried out (September 2, 2016) in rows separated by 3 m and with 3 m of distance between plants. The plantation was established under irrigated conditions and received irrigations during the year according to the species requirements, relative to the seasonal conditions of rainfall and temperature in order to avoid drastic water stress. Weeds control was made with a tractor and complemented with (3) manual weeding. At the end of the 2017 Spring-Summer

con valores altos entre junio y septiembre (Medina-García *et al.*, 2005).

El área de plantación tiene 180 m de longitud y 30 m de ancho (5400 m²). La parcela experimental consistió en 25 plantas y se consideró como parcela útil el núcleo interno consistente en nueve plantas.

La reposición de plantas se realizó (2 septiembre, 2016) en hileras a 3 m de separación y con 3 m de distancia entre plantas. La plantación se estableció en condiciones de riego y recibió riegos durante el año conforme al requerimiento de las especies, relativos a la condición estacional de lluvia y temperatura, para evitar el estrés drástico de humedad. El control de las arvenses se realizó con tractor y se complementó con tres deshierbes manuales. Al término del ciclo primavera-verano 2017 (octubre-noviembre) se cosechó en forma manual la biomasa de todas las especies, las cuales tenían entre 8 y 28 meses de edad en dicha fecha. La biomasa cosechada se dejó secar al sol, separada por especie, durante ocho semanas antes de su almacenamiento. El acondicionamiento y pelletizado de la biomasa se realizó en el primer semestre de 2018.

Acondicionamiento y pelletizado de la biomasa

La biomasa se trituró en un molino de martillos (TFS 420, XKJ®, China) hasta obtener un tamaño básico promedio de 3.15 mm. La humedad de los lotes de biomasa se midió para ajustar al 10% y después se pelletizó mecánicamente en un equipo comercial (ZLSP-R400, GEMCO, China) en el aserradero San Mateo (Maderas y Materiales San Mateo S. A. de C. V.). La pelletizadora utilizada funciona con un disco plano con canales de 8 mm de longitud y 6 mm de ancho que produce pélets a una tasa de 350-450 kg h⁻¹ (Núñez-Retana *et al.*, 2020).

Variables evaluadas

Los pélets se caracterizaron química, física y mecánicamente en el laboratorio del Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera (ISIMA-UJED). En las pruebas químicas se hizo el análisis inmediato en el cual se determinó el contenido de humedad según la norma UNE-EN 14774-3 (UNE, 2010), el contenido de cenizas con el método de UNE-EN 14775 (UNE, 2010), y compuestos volátiles y carbono fijo con base en la norma ASTM D 1762-84 (ASTM, 2001). Para evaluar el poder calorífico se utilizó una bomba calorimétrica de acuerdo con la norma ASTM D 5865 11^a (ASTM, 2011).

En las pruebas físicas se analizó el volumen con el diámetro y longitud de 20 pélets de cada especie. La densidad a granel se determinó con base en la norma ÖNORM M7135 (Österreichisches Normungsinstitut, 2018). La densidad básica se evaluó con el método de desplazamiento de agua, según la norma NCh

cycle (October–November, the biomass of all the species was harvested manually; plants were between 8 and 28 months of age at that time. The harvested biomass was left to dry in the sun, separated by species, during eight months before storage. The conditioning and pelletizing of the biomass were made in the first semester of 2018.

Conditioning and pelletizing of the biomass

Biomass was sheared in a hammer crusher (TFS 420, XKJ®, China) until obtaining an average particle size of 3.15 mm. Water content of the biomass lots was measured to be adjusted at 10% and was later pelletized with a commercial pellet mill (ZLSP-R400, GEMCO, China) at the San Mateo wood sawmill (Maderas y Materiales San Mateo S. A. de C. V.). This pellet mill operates with a plain saw blade with channels 8 × 6 mm (length × width) that produce pellets in a rate of 350–450 kg h⁻¹ (Núñez-Retana *et al.*, 2020).

Variables evaluated

The pellets were chemically, physically and mechanically characterized in the laboratory of the Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera (ISIMA-UJED). In the chemical tests the immediate analyses were made; water content was determined based on the UNE-EN 14774-3 standard (UNE, 2010), ash content with the UNE-EN 14775 method (UNE, 2010), volatile compounds and fixed carbon determinations based on the ASTM D 1762-84 standard (ASTM, 2001). To estimate the calorific value a calorimetric bomb was used according to the ASTM D 5865 11^a standard (ASTM, 2011).

Regarding the physical tests, volume was calculated through the average of length and diameter of 20 pellets from each species. Bulk density was determined based on the ÖNORM M7135 standard (Österreichisches Normungsinstitut, 2018). The specific density was evaluated with the water displacement method, according to the norm NCh 176/2 (INN, 1986). Thus, the specific density corresponded to the quotient between the dry weight (anhydrous) and saturated volume of each sample of pellets, with the following equation:

$$Db = PS / Vb ;$$

where,

Db: specific density (g cm⁻³);

PS: dry weight (g);

Vb: saturated volume (cm⁻³)

The friability test was made by dropping twice 20 pellets from a height of 1.8 m onto a ceramic floor and observing into

176/2 (INN, 1986). Así, la densidad básica correspondió al cociente entre el peso seco (anhidro) y volumen saturado de cada muestra de pélets, con la ecuación siguiente:

$$Db = PS / Vb;$$

donde,

Db: densidad básica (g cm⁻³);

PS: peso seco (g);

Vb: volumen saturado (cm³)

La prueba de friabilidad se realizó al dejar caer dos veces 20 pélets desde una altura de 1.8 m hasta un suelo cerámico y se observó en cuántas partes se rompieron (dos, tres, o más partes) de acuerdo con el método ASTM D440-86 (ASTM, 2002). Después se calculó el valor de la friabilidad con la ecuación.

$$FR = N_i / N_f$$

donde:

FR = Friabilidad resultante (adimensional);

N_i = Número de pélets al inicio del experimento;

N_f = Número de pélets enteros al final del experimento.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron con un ANDEVA en un diseño completamente aleatorio. El número de repeticiones varió según la variable analizada. Seis repeticiones para las variables del análisis inmediato y densidad a granel; 20 repeticiones para las dimensiones del pélet y 40 repeticiones para las pruebas de resistencia (número de partes al quiebre, pérdida de biomasa y friabilidad). La biomasa de *P. greggii* se utilizó como testigo porque es una especie de interés probado en plantaciones comerciales en México; para además compararla como alternativa en el uso de residuos. Cuando se observaron por variable diferencias significativas entre especies se aplicó la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para la comparación múltiple de medias. Para el ANDEVA y la comparación de medias se utilizó SAS® v. 9.4 (SAS Institute, Inc., 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las especies presentaron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) en todas las variables evaluadas (Cuadro 1). El contenido humedad fue menor (≤ 0.05) en los pélets de *Acacia retinoides* (4.3%), en relación con *Populus deltoides* (9.0%) y *Salix sp.* (8.9%) que presentaron los valores mayores. En todas las especies, los

how many pieces they broke (two, three or more parts) according to the ASTM D440-86 method (ASTM, 2002). Next, the value of friability was calculated with the following equation:

$$FR = N_i / N_f$$

where,

FR = resulting friability (unitless);

N_i = number of pellets at the start of the experiment;

N_f = Number of whole pellets at the end of the experiment.

Statistical analysis

The data obtained were analysed with an ANOVA in a completely randomized design. The number of replications varied according to the variable analysed. Six replicates for the variables of the immediate analysis and bulk density; 20 replicates for the pellet dimensions; and 40 replicates for resistance tests (number of parts in breakage, loss of biomass and friability). The biomass of *P. greggii* was considered the control because it is a species of proved interest in commercial plantations in Mexico; in order to now compare it as an alternative in the use of residues. When significant differences were observed by variable among species, the Tukey's multiple comparison test was performed ($p \leq 0.05$) for the comparison of means. Both ANOVA and the Tukey's test, was done with SAS® v. 9.4 (SAS Institute Inc., 2013).

RESULTS AND DISCUSSION

The species presented statistical differences ($p \leq 0.05$) in all of the variables evaluated (Table 1). The moisture content was lower ($p \leq 0.05$) in the pellets of acacia (*A. retinoides*) (4.3%), compared to Eastern cottonwood (*P. deltoides*) (9.0%) and willow (*Salix sp.*) (8.9%), which presented the highest values. In all of the species, the results of moisture content were high compared with the values observed in *Pennisetum purpureum* (3.2%) (Wibowo *et al.*, 2017), although the low moisture content caused difficulty in the compression, moulding and quality of the pellets. The customary values of water content in Durango are within the limits established for the better use of the physical properties of biomass, facilitating the elaboration of pellets and obtaining quality products with longer duration (Ungureanu *et al.*, 2018).

Ash content was lower ($p \leq 0.05$) in the pellets of *Salix sp.* (2.9%) in regard to *P. greggii* (3.5%) and *P. deltoides* (3.7%). In both cases, ash content was lower

Cuadro 1. Análisis inmediato de pélets de especies dendroenergéticas evaluadas en Durango (2017).
Table 1. Immediate analysis of pellets of dendroenergetic species evaluated in Durango (2017).

Especie	Humedad (%)	Cenizas (%)	Material volátil (%)	Carbono fijo (%)	[†] PCS (MJ kg ⁻¹)
<i>Eucalyptus globulus</i>	5.6±0.48 c	3.1±0.03 bc	80.0±0.51 cd	16.9±0.50 ab	20.1±0.07 a
<i>Pinus greggii</i> [‡]	7.2±0.02 b	3.5±0.04 ab	91.9±0.92 a	4.6±0.97 d	19.5±0.02 bc
<i>Populus alba</i>	7.1±0.04 b	3.5±0.04 ab	82.3±0.36 bc	14.2±0.36 bc	19.2±0.06 cd
<i>Acacia retinoides</i>	4.3±0.21 d	3.5±0.04 ab	80.6±0.27 cd	16.0±0.24 ab	19.3±0.02 bcd
<i>Ricinus communis</i>	6.4±0.08 bc	3.6±0.04 a	84.3±0.59 b	12.1±0.59 c	19.5±0.03 bc
<i>Populus deltoides</i>	9.0±0.15 a	3.7±0.20 a	79.7±0.28 cd	16.6±0.33 ab	19.1±0.08 d
<i>Pennisetum sp.</i>	6.6±0.10 bc	3.1±0.06 bc	77.7±1.02 d	19.2±1.07 a	16.6±0.05 e
<i>Salix sp.</i>	8.9±0.10 a	2.9±0.04 c	81.7±0.98 bc	15.4±0.98 bc	19.8±0.08 a

[†]PCS = Poder Calorífico Superior. a,b Literales diferentes en cada columna representan diferencias significativas (Tukey; $p \leq 0.05$) entre especies. [‡] = control. [♦] [†]PCS = higher calorific value. a,b Different letters within each column indicate significant differences (Tukey; $p \leq 0.05$) among species. [‡] = control.

resultados del contenido de humedad fueron altos en comparación con los valores observados en *Pennisetum purpureum* (3.2%) (Wibowo *et al.*, 2017), aunque el contenido de humedad bajo dificultó compresión, moldeado y calidad de los pélets. Los valores de humedad utilizados en Durango están dentro de los límites establecidos para aprovechar las propiedades físicas de la biomasa, facilitar la elaboración de pélets y obtener productos de calidad con duración prolongada (Ungureanu *et al.*, 2018).

La proporción de cenizas fue inferior ($p \leq 0.05$) en los pélets de *Salix sp.* (2.9%), en relación con *P. greggii* (3.5%) y *P. deltoides* (3.7%). En ambos casos, la proporción de cenizas fue inferior a la registrada en estudios con *P. purpureum*, en los cuales el valor fue 17.5% (Wibowo *et al.*, 2017). Los pélets de todas las especies mostraron valores menores a lo establecido (<7%) en las normas internacionales (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Pradhan *et al.* (2018) indicaron que el contenido de ceniza bajo mejora el poder calorífico, reduce los problemas de formación de escoria, elementos corrosivos y producción de emisiones. La ceniza de los pélets depende de los minerales presentes en el combustible, origen de la biomasa (edad de plantación), manejo de la biomasa en el patio de concentración y durante el peletizado, y eficiencia en el proceso de combustión (Liu *et al.*, 2014).

La proporción de material volátil fue diferente ($p \leq 0.05$) entre especies. Los pélets de *Pennisetum sp.* mostraron una proporción de 77.3%, valor inferior al observado en los pélets del resto de las especies;

than that registered in studies with *P. purpureum*, in which the value was 17.5% (Wibowo *et al.*, 2017). The pellets of all the species showed values lower than those established (<7%) in the international standards (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Pradhan *et al.* (2018) indicated that low ash content improves the calorific value, reducing problems due to production of waste, corrosive elements, and emissions. The ash content of pellets depends on the minerals present in the fuel, biomass origin (age of plantation), management of the biomass at the sawmill facility and while pelletizing, and efficiency in the combustion process (Liu *et al.*, 2014).

The proportion of volatile material was different ($p \leq 0.05$) among species. The pellets of *Pennisetum sp.* had a proportion of 77.3%, a value lower than those observed in the pellets of the other species; *P. greggii* presented the highest value (91.9%). In all of the cases the values were high compared to the pellets of *Pennisetum purpureum*. In this species the values were 25.2 to 26.9% of volatile material (Wibowo *et al.*, 2017). This is probably due to the low moisture level used during the process of elaboration of the pellets of *P. purpureum*; which caused difficulties in the process of compression and moulding. The species with high growth rates such as *Pennisetum sp.* show low levels of volatile material due to the accelerated process of lignification observed in Gramineae (Tsuyama *et al.*, 2017).

The fixed carbon content in pellets of *Pennisetum sp.* (19.2%) was the highest ($p \leq 0.05$). In the second

P. greggii presentó el valor mayor (91.9%). En todos los casos los valores fueron altos respecto a los pélets de *Pennisetum purpureum*. En esta especie los valores fueron 25.2 a 26.9% de material volátil (Wibowo *et al.*, 2017). Lo anterior se debe al nivel de humedad bajo que se usó durante el proceso de elaboración de los pélets de *P. purpureum*; el cual dificultó el proceso de compresión y moldeado. Las especies con tasas de crecimiento altas como *Pennisetum sp.* muestran niveles bajos de material volátil debido al proceso acelerado de lignificación observado en gramíneas (Tsuyama *et al.*, 2017).

El contenido de carbono fijo en los pélets de *Pennisetum sp.* (19.2%) fue el mayor ($p \leq 0.05$). En el segundo grupo estadístico estuvieron los pélets de *E. globulus* (16.9%), *P. deltooides* (16.6%) y *A. retinoides* (16.0%); *P. greggii* (el control) tuvo el valor más bajo (4.6%). El carbón fijo de algunas especies fue similar al obtenido en *E. globulus* (15.9%); aunque fueron bajos en todas las especies evaluadas en comparación con los obtenidos con gramíneas, en las cuales el contenido de carbón fijo varía de 55.6 a 66.9% (Wibowo *et al.*, 2017). Las especies con contenido alto de carbono fijo se considera que son útiles para producir carbón y las especies con niveles altos de compuestos volátiles pueden usarse para producir biomasa para generación de biogás.

El acondicionamiento de la biomasa antes de su densificación, así como la determinación de las propiedades de la madera en cada una de las especies, influyó con magnitud considerable en los contenidos de compuestos volátiles y carbón fijo registrados en los pélets evaluados en este estudio. *Pennisetum sp.* y *R. communis* mostraron valores aceptables de material volátil y carbón fijo, aunque debe cuidarse la calidad de pélets, porque el aumento en la proporción de compuestos volátiles favorece el poder calorífico, pero también aumenta la fragilidad del combustible (Carrillo-Parra *et al.*, 2018).

El poder calorífico de los pélets de *E. globulus* (20.1 MJ kg⁻¹) y *Salix sp.* (19.8 MJ kg⁻¹) fue mayor ($p \leq 0.05$) respecto al valor en *P. greggii* (19.5 MJ kg⁻¹) y *Pennisetum sp.* (16.6 MJ kg⁻¹). El poder calorífico se situó en el intervalo obtenido en otro estudio con *Pennisetum sp.*, en los cuales los valores fueron de 15.2 a 22.9 MJ kg⁻¹ (5468.6–6258.9 kcal kg⁻¹) (Wibowo *et al.*, 2017). El proceso de elaboración de pélets a partir de la mayoría de las especies, con excepción de *Pennisetum sp.*, cumplió con la norma Ö-

statistically discriminated group there were the pellets of *E. globulus* (16.9%), *P. deltooides* (16.6%) y *A. retinoides* (16.0%). *P. greggii* (the control) had the lowest value (4.6%). Fixed carbon of some of the species was similar to that obtained in *E. globulus* (15.9%); although they were lower for all the evaluated species, than those obtained in other Gramineae, in which the fixed carbon content varied from 55.6 to 66.9% (Wibowo *et al.*, 2017). The species with high fixed carbon content are considered useful for producing carbon and the species with high levels of volatile compounds can be used to produce biomass for biogas generation.

The conditioning of the biomass prior to its densification, as well as the determination of the properties of the wood in each one of the species, had an influence of considerable magnitude in the volatile compounds and fixed carbon registered in the pellets evaluated in this study. *Pennisetum sp.* and *R. communis* showed acceptable values of volatile material and fixed carbon, although care should be taken regarding pellet quality, because the increase in the proportion of volatile compounds favours the calorific value, but it also increases the fragility of the fuel (Carrillo-Parra *et al.*, 2018).

The calorific value of the pellets of *E. globulus* (20.1 MJ kg⁻¹) and *Salix sp.* (19.8 MJ kg⁻¹) was higher ($p \leq 0.05$) than in *P. greggii* (19.5 MJ kg⁻¹) and *Pennisetum sp.* (16.6 MJ kg⁻¹). The calorific value was located within the interval obtained in another study with *Pennisetum sp.*, in which the values were 15.2 to 22.9 MJ kg⁻¹ (5468.6–6258.9 kcal kg⁻¹) (Wibowo *et al.*, 2017). The process of pellet production from most of the species, with the exception of *Pennisetum sp.*, complied with the standard ÖNORM M7135 which establishes 18 MJ kg⁻¹ as minimum value of PCS (Atuesta and Sierra, 2015). The species studied are productive options of biomass apt for the elaboration of solid biofuels. Although it is necessary to select combinations and adjusting processes to increment the calorific value in some of them, such as *Pennisetum sp.*

The physical analysis of the pellets showed significant differences ($p \leq 0.05$) among species for all of the variables (Table 2). The diameter of the pellet was greater ($p \leq 0.05$) in the two species of *Populus* (6.2 mm), while it was smaller in the case of *P. greggii* (5.7 mm) and *Pennisetum sp.* (5.8 mm). In the pellets of all of the species, diameter was maintained

norma M7135 que establece 18 MJ kg⁻¹ como valor mínimo del PCS (Atuesta y Sierra, 2015). Las especies estudiadas son opciones productivas de biomasa apta para la elaboración de biocombustibles sólidos. Aunque es necesario seleccionar combinaciones y ajustar procesos para incrementar el poder calorífico en algunas de ellas, como *Pennisetum sp.*

El análisis físico de los pélets mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre especies para todas las variables (Cuadro 2). El diámetro del pélet fue mayor ($p \leq 0.05$) en las dos especies de *Populus* (6.2 mm), mientras que fue inferior en el caso de *P. greggii* (5.7 mm) y *Pennisetum sp.* (5.8 mm). En los pélets de todas las especies, el diámetro se mantuvo dentro del intervalo (4-10 mm) recomendado en la norma M7135-Ö, aunque para pino y *Pennisetum sp.* la norma establece valores de 6 a 8 mm; el resto de las especies se mantuvieron cerca del límite inferior. La longitud del pélet fue mayor ($p \leq 0.05$) en *Salix sp.* (34.0 mm), *R. communis* (33.6 mm) y *Eucalyptus globulus* (33.8 mm), mientras que en la especie control (*P. greggii*) fue 26.7 mm; este es el valor más bajo en la norma de calidad (Atuesta y Sierra, 2015). Todas las especies superaron los valores de 13.2 a 17.4 mm de los pélets elaborados con biomasa de especies tropicales en México (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). La mayoría de las especies mostraron cualidades físicas para la producción de pélets y cumplieron con las dimensiones solicitadas en normas de calidad internacionales. La excepción fue *P. greggii* porque se trata de una conífera, una especie con rapidez de crecimiento

within the interval (4-10 mm) recommended in the standard ÖNORM M7135, although for *Pinus* and *Pennisetum sp.* the standard establishes values from 6 to 8 mm; the remaining species values were close to the lower limit. The length of the pellet was greater ($p \leq 0.05$) in *Salix sp.* (34.0 mm), *R. communis* (33.6 mm) and *Eucalyptus globulus* (33.8 mm), while in the control species (*P. greggii*) it was 26.7 mm; this is the lowest value in the quality standard (Atuesta and Sierra, 2015). All of the species surpassed the values from 13.2 to 17.4 mm common in pellets made with biomass of tropical species in Mexico (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). Most of the species showed physical qualities for the production of pellets and complied with the dimensions required in international quality standards. The exception was *P. greggii* because it is a coniferous tree, a species with slower growth-speed than the rest. Therefore, the growth stage in which cutting was made for this study is different in regard to the rapid-growth species.

Pellet weight was higher ($p \leq 0.05$) in *Pennisetum sp.*, *Salix sp.* and *R. communis* (1.2 g), while the lowest value was registered in *P. deltooides* (0.9 g) (Table 2). The volume of the pellets showed considerable variation among species, and that of *P. greggii* was significantly lower (688.5 mm³) compared to the species that presented greater volume, *Salix sp.* (975.9 mm³) and *E. globulus* (975.7 mm³). *P. alba* (929.7 mm³) and *R. communis* (966.5 mm³) presented intermediate values. The bulk density was higher ($p \leq 0.05$) in *A. retinoides* (0.71 g cm⁻³), while

Cuadro 2. Diámetro, longitud, peso, volumen y densidad de pélets elaborados a partir de especies evaluadas para dendroenergía en Durango (2017).

Table 2. Diameter, length, weight, volume and density of pellets produced with species evaluated for dendroenergy in Durango (2017).

Especie	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Peso (g)	Volumen (mm ³)	Densidad Granel (g cm ⁻³)	Densidad Básica (g cm ⁻³)
<i>Eucalyptus globulus</i>	6.1±0.01 b	33.8±0.62 a	1.1±0.02 b	975.7±17.9 a	0.62±0.01 d	1.2±0.01 bc
<i>Pinus greggii</i> (†)	5.7±0.01 c	26.7±0.63 c	1.0±0.02 c	688.5±16.2 e	0.67±0.01 c	1.4±0.03 a
<i>Populus alba</i>	6.2±0.02 a	31.0±0.52 b	1.1±0.02 b	929.7±15.7 abc	0.63±0.01 d	1.2±0.01 bc
<i>Acacia retinoides</i>	6.0±0.01 b	30.9±0.69 b	1.1±0.03 b	883.3±21.4 c	0.71±0.01 a	1.3±0.01 b
<i>Ricinus communis</i>	6.1±0.01 b	33.6±0.44 a	1.2±0.02 a	966.5±13.1 b	0.67±0.01 c	1.2±0.01 bc
<i>Populus deltooides</i>	6.2±0.03 a	29.7±0.64 b	0.9±0.02 c	902.1±18.3 bc	–	1.0±0.02 d
<i>Pennisetum sp.</i>	5.8±0.10 c	30.9±0.62 b	1.2±0.02 a	808.8±16.7 d	0.69±0.01 b	1.4±0.04 a
<i>Salix sp.</i>	6.0±0.01 b	34.0±0.44 a	1.2±0.02 a	975.9±12.8 a	0.61±0.01 d	1.2±0.02 c

a,b Literales diferentes en cada columna indican diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre especies. †control. ♦ a,b Different letters within each column indicate statistical differences ($p \leq 0.05$) among species. †control.

menor a todas las demás. De modo que la etapa de crecimiento en la cual se realizó el corte para este estudio es distinta respecto a especies de crecimiento rápido.

El peso de pélets fue mayor ($p \leq 0.05$) en *Pennisetum sp.*, *Salix sp.* y *R. communis* (1.2 g), mientras que el valor más bajo se registró en *P. deltoides* (0.9 g) (Cuadro 2). El volumen de los pélets mostró variación considerable entre especies y el de *P. greggii* fue significativamente inferior (688.5 mm³), respecto a las especies que presentaron los niveles más altos, *Salix sp.* (975.9 mm³) y *E. globulus* (975.7 mm³). *P. alba* (929.7 mm³) y *R. communis* (966.5 mm³) presentaron valores intermedios. La densidad a granel fue mayor ($p \leq 0.05$) en *A. retinoides* (0.71 g cm⁻³), mientras que *Salix sp.* (0.61 g cm⁻³), *E. globulus* (0.62 g cm⁻³) y *P. alba* (0.63 g cm⁻³) presentaron los valores más bajos. Todas las especies presentaron valores de densidad de pélets aceptable (>0.6 g cm⁻³) con base en la norma internacional (Atuesta y Sierra, 2015); así como respecto a los niveles observados en estudios con gramíneas (Wibowo *et al.*, 2017).

Respecto a la densidad básica, los valores fueron altos ($p \leq 0.05$) en *Pennisetum sp.* (1.4 g cm⁻³) y *P. greggii* (1.4 g cm⁻³), mientras que en *P. deltoides* (1.0 g cm⁻³) fue inferior y significativo respecto a las otras especies. Con excepción de *P. deltoides*, todas las especies mostraron valores que superaron el mínimo requerido en la norma internacional (1.12 g cm⁻³). Los valores fueron similares a los obtenidos (1.10 y 1.18 g cm⁻³) con pélets elaborados a partir de especies tropicales de México (Carrillo-Parra *et al.*, 2018). El procesamiento de la biomasa incrementó la densidad básica al pasar de valores de 0.295 g cm⁻³ (cedro) a 0.502 g cm⁻³ (pino). El proceso de elaboración de pélets en todas las especies debe ajustarse para asegurar el cumplimiento de los parámetros internacionales de calidad.

El número medio de partes en las que se desintegraron los pélets fue diferente ($p \leq 0.05$) entre especies, en *Pinus greggii* el valor fue de 2.4 (Cuadro 3); mientras que en las otras especies fluctuó de 1.6 a 2.0. La pérdida de biomasa durante la prueba de friabilidad fue mayor ($p \leq 0.05$) en los pélets de *Pinus greggii* (41.6%) y *Populus alba* (29.9%), en comparación con el valor en las otras especies evaluadas desde 18.1% (*Pennisetum sp.*) a 22.7% (*P. deltoides*). Los valores superaron con amplitud los resultados obtenidos con algunas especies vegetales del trópico,

Salix sp. (0.61 g cm⁻³), *E. globulus* (0.62 g cm⁻³) and *P. alba* (0.63 g cm⁻³) presented the lowest values. All of the species presented acceptable values of pellet bulk density (>0.6 g cm⁻³), according to the international standards (Atuesta y Sierra, 2015); and also regarding the values observed in other studies with Gramineae (Wibowo *et al.*, 2017).

In regard to specific density, values were high ($p \leq 0.05$) in *Pennisetum sp.* (1.4 g cm⁻³) y *P. greggii* (1.4 g cm⁻³), while in *P. deltoides* (1.0 g cm⁻³) it was lower and significant compared to the other species. With the exception of *P. deltoides*, all of the species showed values that surpassed the minimum required in the international norm (1.12 g cm⁻³). The values were similar to those obtained (1.10 and 1.18 g cm⁻³) with pellets made with tropical species of Mexico (Carrillo *et al.*, 2018). The processing of the biomass increased the specific density from values of 0.295 g cm⁻³ (cedar) to 0.502 g cm⁻³ (pine). The production process of pellets in all of the species should be adjusted to ensure the compliance to international quality standards.

The mean number of parts into which the pellets disintegrated was different ($p \leq 0.05$) among species, in *Pinus greggii* the value was 2.4 (Table 3); while in the other species it fluctuated from 1.6 to 2.0. The loss of biomass during the friability test was higher ($p \leq 0.05$) in the pellets of *Pinus greggii* (41.6%) and *Populus alba* (29.9%), in comparison to the value in the other species evaluated from 18.1% (*Pennisetum sp.*) to 22.7% (*P. deltoides*). The values widely surpassed the results obtained with some plant species of the tropics, whose biomass retention was 61.7 to 66.3%; that is, biomass losses fluctuated between 33.7 and 38.3% (Carrillo-Parra *et al.*, 2018).

The friability was low in *P. greggii* (0.45), a small number of pellets disintegrated during the test, compared with *R. communis* (0.64) and *P. deltoides* (0.63). In general, the results of friability were low in regard to pellets obtained from mixed materials, in which values above 0.93 were obtained (Tenorio *et al.*, 2016). In this study, out of 100 pellets evaluated, only seven broke in two parts, and there was no difference among species except with the control. Most of the species evaluated showed potential to be used in the production of pellets of acceptable quality, although it is necessary to make adjustments to optimize the productive process and complying with international quality standards.

Cuadro 3. Friabilidad evaluada en pélets de especies cultivadas para dendroenergía en Durango (2017).**Table 3. Friability evaluated in pellets of species cultivated for dendroenergy in Durango (2017).**

Especie	Núm. Partes	Pérdida de biomasa (%)	Friabilidad
<i>Eucalyptus globulus</i>	1.6±0.62 b	18.9±20.4 b	0.62±0.01
<i>Pinus greggii</i> †	2.4±0.66 a	41.7±14.3 a	0.45±0.15
<i>Populus alba</i>	1.8±0.54 b	29.9±21.7 ab	0.57±0.01
<i>Acacia retinoides</i>	2.0±0.84 b	18.9±18.0 b	0.51±0.01
<i>Ricinus communis</i>	1.6±0.59 b	19.6±20.7 b	0.64±0.03
<i>Populus deltoides</i>	1.6±0.55 b	22.7±21.1 b	0.63±0.05
<i>Pennisetum sp.</i>	1.6±0.66 b	18.1±19.8 b	0.62±0.03
<i>Salix sp.</i>	1.6±0.53 b	22.9±20.6 b	0.62±0.03

a,b Literales diferentes en cada columna representan diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre especies. †control. ♦ a,b Different letters within each column indicate statistical differences ($p \leq 0.05$) among species. †control.

cuya retención de biomasa fue de 61.7 a 66.3%; es decir, las pérdidas de biomasa fluctuaron entre 33.7 y 38.3% (Carrillo-Parra *et al.*, 2018).

La friabilidad fue baja en *P. greggii* (0.45), una cantidad reducida de pélets se desintegraron durante la prueba, comparado con *R. communis* (0.64) y *P. deltoides* (0.63). En general, los resultados de friabilidad fueron bajos respecto a pélets obtenidos a partir de materiales mixtos, en los cuales se obtuvieron valores superiores a 0.93 (Tenorio *et al.*, 2016). En este estudio, de 100 pélets evaluados solo siete se rompieron en dos partes; no existió diferencia entre especies, excepto con el control. La mayoría de las especies evaluadas mostraron un uso posible en la elaboración de pélets de calidad aceptable, aunque es necesario realizar ajustes para optimizar el proceso productivo y cumplir con estándares internacionales de calidad.

CONCLUSIONES

La biomasa de las especies vegetales con hábito herbáceo, arbustivo y arbóreo *Acacia retinoides*, *Populus deltoides*, *Populus alba*, *Eucalyptus globulus*, *Ricinus communis*, *Salix sp.*, *Pennisetum sp.* y *Pinus greggii* se puede usar en la elaboración de pélets de calidad. Los pélets elaborados con estas especies cumplieron con los estándares establecidos por normas internacionales. La variación en los resultados de los criterios de calidad de los pélets permite considerar la optimización de procesos por especie, para obtener productos de calidad internacional.

CONCLUSIONS

The biomass of plant species with herbaceous, shrubby and arboreal habit *Acacia retinoides*, *Populus deltoides*, *Populus alba*, *Eucalyptus globulus*, *Ricinus communis*, *Salix sp.*, *Pennisetum sp.* and *Pinus greggii* can be used in the elaboration of international quality pellets. Pellets produced with these species complied with international quality standards. Variation among each species results regarding quality criteria allow to consider optimization processes per species, in order to obtain international quality products.

Ricinus communis, *Acacia retinoides* and *Pennisetum sp.* are thermophilic species. Since they grow during Spring-Summer, they are options in the sustainable production of biomass for the elaboration of pellets useful in agriculture and industry. *Eucalyptus globulus*, *Populus alba*, *P. deltoides* and *Salix sp.* are tree species with medium growth rate; they can be useful as a source of biomass for the generation of bioenergy in two or three years. *Pinus greggii* is a coniferous tree species with slow growth, it usually produces biomass (wood debris) for diverse purposes in periods longer than 10 years.

—End of the English version—

-----*

Ricinus communis, *Acacia retinoides* y *Pennisetum sp.* son especies termófilas. Ya que crecen en primavera-verano son opciones en la producción sostenible de la biomasa para elaborar pélets útiles en el ámbito industrial y agrícola. *Eucalyptus globulus*, *Populus alba*, *P. deltooides* y *Salix sp.* son especies arbóreas con crecimiento medio y pueden ser útiles como fuente de biomasa para la generación de bioenergía en dos o tres años. *Pinus greggii* es una especie arbórea de crecimiento lento que produce biomasa (astilla) para fines diversos en plazos mayores que 10 años.

LITERATURA CITADA

- ASTM (American Society for Testing and Materials). 2001. Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA 2 p. https://www.academia.edu/33739293/Standard_Test_Method_for_Chemical_Analysis_of_Wood_Charcoal_1 (Consultado: abril 2019).
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 2002. Standard test method of drop shatter test for coal. Philadelphia, USA. 4 p. <http://file.yizimg.com/175706/2011090909394804.pdf>. (Consultado: abril 2019).
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 2011. Standard Test Method For Gross Calorific Value Of Coal And Coke. Philadelphia, PA. USA. 19 p.
- Atuesta, B., L. E., y B. F. Sierra. 2015. Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual. *Informador Técnico* 79: 18-25 DOI: 10.23850/22565035.133.
- Carrillo-Parra, A., M. Ngangyo-Heya, S. Colín-Urieta, R. Foughbakhch-Pournavab, J. G. Rutiaga-Quiñones, and F. Correa-Méndez. 2018. Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species. *Peer J* 6:e5504. DOI: 10.7717/peerj.5504
- CEC (Commission of the European Communities). 2007. Communication from the commission to the European council and the European parliament: An energy policy for Europe. Commission of the European Communities. Brussels, Belgium. http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2004_2009/documents/com/com_com0001_/com_com0001_en.pdf (Consultado: septiembre 2018).
- García, E. 2004 Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Libro No. 6. 5ª Edición. Instituto de Geografía UNAM. 90 p.
- INN (Instituto Nacional de Normalización). 1986. CCh 176/2. Madera. Parte 2: Determinación de la densidad. INN. Santiago, Chile. 11 p.
- Li, F., L. Zeng, and L.-S. Fan. 2010. Biomass direct chemical looping process: process simulation. *Fuel* 89: 3773-3784. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.07.018
- Liu, Z., B. Fei, Z. Jiang, Z. Cai, and X. Liu. 2014. Important properties of bamboo pellets to be used as commercial solid fuel in China. *Wood Sci. Technol.* 48: 903-917. DOI 10.1007/s00226-014-0648-x
- López-Feldman, A. J. 2015. Cambio climático y actividades agropecuarias en América Latina. Naciones Unidas-Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)-Unión Europea. Santiago, Chile. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39824/1/S1501286_es.pdf (Consultado: noviembre 2018).
- Medina-García, G., G. Díaz-Padilla, J. López-Hernández, J. A. Ruiz-Corral, M. Marín. 2005. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Durango (Periodo 1961-2003). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. C. E. Valle del Guadiana. Durango, México. <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/handle/123456789/3410>. (Consultado: agosto 2019).
- Núñez-Retana, V. D., R. Rosales-Serna, J. A. Prieto-Ruiz, C. Wehenkel, and A. Carrillo-Parra. 2020. Improving the physical, mechanical and energetic properties of *Quercus* spp. wood pellets by adding pine sawdust. *Peer J* 8:e9766: 1-20. DOI 10.7717/peerj.9766
- Österreichisches Normungsinstitut. 2018. Pellets nach ÖNORM M7135. ON Österreichisches Normungsinstitut, Austria. <https://www.pelletshome.com/pellets-oenorm>. (Consultado: julio 2019).
- Pradhan, P., S. M. Mahajani, and A. Arora. 2018. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Process. Technol.* 181: 215-232. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>
- Romero S., A. 2010. Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Rev. Real Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat.* 104: 331-345. <http://www.rac.es/ficheros/doc/00979.pdf> (Consultado: octubre 2019).
- Rosales-Serna, R., J. C. Ríos-Saucedo, R. Jiménez-Ocampo, A. Carrillo-Parra, C. A. Nava-Berumen, y P. A. Domínguez-Martínez. 2018. Rendimiento y calidad de biomasa en especies cultivadas para obtención de energía y abonos en Durango. *AGROFAZ (CELALA)*: 139-153.
- SAS Institute, Inc. 2013. SAS 9.4. 9.4th. Edition. SAS Institute Inc. Cary, U.S.A.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2016. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/161446/Cap_CC_completo.pdf (Consultado: julio 2019).
- Tenorio, C., R. Moya, J. Valaert, M. Tomazello-Filho. 2016. Potencial de fabricación de pellets de residuos forestales de *Cupressus lusitanica* y *Tectona grandis* en Costa Rica. *Tecnol. en marcha*. 29: 95-109.
- Tsuyama, T., N. Shimada, T. Motoda, Y. Matsushita, Y. Kijidani, K. Fukushima, and I. Kamei. 2017. Lignification in developing culms of bamboo *Sinobambusa tootsik*. *J. Wood Sci.* 63: 551-559. DOI <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1651-2>
- UNE (Asociación Española de Normalización). 2010. UNE-EN 14774-3. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. Humedad de la muestra para análisis general. Asociación Española de Normalización (UNE), Madrid, España. <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma>.

- asp?tipo=N&codigo=N0045728#.WH_EN7GZNsM. (Consultado: agosto 2019).
- Ungureanu, N., V. Vladut, G. Voicu, M. N. Dinca, and B. S. Zabava. 2018. Influence of biomass moisture content on pellet properties-Review. https://www.researchgate.net/publication/325313502_Influence_of_biomass_moisture_content_on_pellet_properties_-_review. (Consultado: septiembre 2019).
- Wibowo, S., D. P. O. Laia, M. Khotib, and G. Pari. 2017. Characterization of carbon pellets made from elephant grass (*Pennisetum purpureum* Scumach) mixed with Nyamplung Shell (*Calophyllum inophyllum* Linn.). *J. Penelitian Hasil Hutan* 35: 73-82. https://pdfs.semanticscholar.org/f57c/31f3167c94ccfca7f2cb3ecb569fc3e4ddff.pdf?_ga=2.155338235.1101456487.1568300776-1235411453.1555089547 (Consultado: julio 2019).