



Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en *pellets* y briquetas

Granulometric distribution in timber byproducts for potential use in *pellets* and briquettes

Fermín Correa-Méndez¹, Artemio Carrillo-Parra², José Guadalupe Rutiaga-Quiñones³,
Francisco Márquez-Montesino⁴, Humberto González-Rodríguez²,
Enrique Jurado Ybarra² y Fortunato Garza-Ocañas²

Resumen

Con el fin de dar mayor valor agregado a subproductos forestales a partir de la posible elaboración de *pellets* y briquetas. Se analizó la distribución granulométrica en aserrín, corteza y viruta de *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus*, así como en la mezcla de corteza-madera de *Quercus candicans*, *Q. laurina* y *Q. rugosa* en Nuevo Parangaricutiro, Michoacán. La distribución del tamaño de partícula se determinó según las normas europeas, UNE-EN 15149-2 y UNE-EN 15149-1. Los resultados indicaron que para producir *pellets* podría utilizarse 76.91 % de las partículas de aserrín, 25.49 % de corteza, 16.89 % de viruta y 61.67 % de corteza-madera; en el caso de las briquetas, tienen potencial 49.60 % de la corteza, 56.29 % de la viruta y 0.77 % de corteza-madera. A nivel industria, 58.67 % de los subproductos de aserradero, 66.82 % del Taller de Secundarios de la Comunidad (TSC) y 58.45 % del Taller de Secundarios Externo (TSE), son aptos para su utilización en *pellets*, mientras que 29.90 % de los provenientes de aserradero, 19.70 % del TSC y 28.14 % del TSE resultaron adecuados para su uso en briquetas. El tamaño de las partículas analizadas tuvo variación, aunque fue similar entre especies y en industrias de generación. La mayoría de las partículas de aserrín pueden ser aprovechadas para fabricar *pellets* y las de corteza, corteza-madera y viruta para elaborar briquetas.

Palabras clave: Aserrín, biocombustibles densificados, corteza, granulometría, partícula, viruta.

Abstract

The granulometric distributions of sawdust, bark, and shavings from *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* and *P. pseudostrobus* and bark-wood mixture of *Quercus candicans*, *Q. laurina* and *Q. rugosa* were analyzed. To determine particle size distribution, the standard UNE-EN 15149-2 and the UNE-EN 15149-1 were used. The results showed that 76.91 % of sawdust particles, 25.49 % of bark, 16.89 % of shavings and 61.67 % of bark-sawdust could be used in the production of pellets. The percentages for the production of briquettes would be 49.60 % bark, 56.29 % shavings, and 0.77 % bark-wood. At an industrial level, 58.67 % of the sawmill byproducts, 66.82 % from Community Secondary Materials Shop (TSC) and 58.45 % from the External Secondary Materials Shop (TSE) are suitable for use in pellets, while 29.90 % of the sawmill byproducts, 19.70 % of the byproducts from the TSC and 28.14 % from those of the TSE were suitable for use in briquettes. The particle size of these products differed, but values were similar between species and in power generation industries. Most sawdust particles may be used to produce pellets, while those of the bark, bark-wood and shavings may be transformed into briquettes.

Key words: Sawdust, densified biofuels, bark, granulometry, particle, shavings.

Fecha de recepción/date of receipt: 27 de julio de 2013. Date of acceptance/fecha de aceptación: 11 de julio de 2014.

¹ Desarrollo Sustentable, Tecnologías Alternativas, Universidad Intercultural Indígena de Michoacán.

² Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Correo-e: artemio.carrillopr@uanl.edu.mx.

³ Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

⁴ Centro de Estudios de Energía y Tecnologías Sostenibles, Universidad de Pinar del Río.

Introducción

Los subproductos que se generan en la industria de transformación y elaboración secundaria de la madera pueden constituir de 20 a 60 % de la materia prima (Antolín, 2006). En la cabecera municipal "Nuevo San Juan Parangaricutiro" y en la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP), ambas en el estado de Michoacán, se obtienen anualmente 7 063 m³ (Cuadro 1).

Introduction

The byproducts generated in the industry of transformation and secondary processing of timber may amount to 20 to 60 % of the raw materials (Antolín, 2006). 7 063 m³ are obtained each year in the municipal seat of *Nuevo San Juan Parangaricutiro* and in the Indigenous Community of *Nuevo San Juan Parangaricutiro* (CINSJP), both in the state of *Michoacán* (Table 1).

Cuadro 1. Distribución de subproductos forestales (m³ año⁻¹) en Nuevo San Juan Parangaricutiro y en la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Mich.

Origen	Industria	Volumen (m ³ año ⁻¹)				
		Corteza	Aserrín	Corteza-madera	Viruta	Total
Comunidad Indígena	Aserradero	⁽¹⁾ 1 866.00	⁽²⁾ 1 576.00	⁽³⁾ 3 621.00	-	7 063.00
Nuevo San Juan Parangaricutiro	Talleres secundarios	654.80	375.00	-	-	1 029.80
Nuevo San Juan Parangaricutiro	⁽⁴⁾ T. secundarios	1 496.70	514.30	-	343.00	2 354.00

⁽¹⁾Descortezadora; ⁽²⁾Sierra principal; ⁽³⁾Astilladora; ⁽⁴⁾33 Talleres de secundarios.

Table 1. Distribution of forest byproducts (m³ year⁻¹) in *Nuevo San Juan Parangaricutiro* and in the Indigenous Community of *Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán*.

Origin	Industry	Volume (m ³ año ⁻¹)				
		Bark	Sawdust	Bark-wood	Shavings	Total
Indigenous Community of <i>Nuevo San Juan Parangaricutiro</i>	Shawmill	⁽¹⁾ 1 866.00	⁽²⁾ 1 576.00	⁽³⁾ 3 621.00	-	7 063.00
	Secondary materials shops	654.80	375.00	-	-	1 029.80
<i>Nuevo San Juan Parangaricutiro</i>	⁽⁴⁾ Secondary materials shops	1 496.70	514.30	-	343.00	2 354.00

⁽¹⁾Bark peeler; ⁽²⁾Main saw; ⁽³⁾Wood shredder; ⁽⁴⁾33 Secondary materials shops.

Los subproductos de la industria de aserrío se utilizan de manera local, desde la producción de compostas hasta como fuentes de energía en calderas de resinas y en hornos de ladrilleras. La alta disponibilidad y los precios relativamente económicos propician la búsqueda de proyectos productivos enfocados a la generación de bioenergía, a partir de la elaboración de diferentes productos. Estos, para ser recomendados requieren que se consideren aspectos técnicos relacionados con su calidad que incluyen la mejora de los procesos industriales de secado, métodos de trituración, homogeneización granulométrica y densificación; todo ello con el fin de disminuir los costos derivados de los tratamientos. Sin embargo, el punto de partida de tales caracterizaciones es determinar el tamaño de partícula, que sirve de parámetro para seleccionar el mejor sistema de pretratamiento (Antolín, 2006).

The byproducts of the sawmill industry are utilized locally, and their uses range from compost production to being a source of energy for resin boilers and brickworks furnaces. The high availability and relatively low prices favor the search for production projects aimed at generating bioenergy from the manufacture of various products. In order to recommend these, it is necessary to consider certain technical aspects related to their quality, including the improvement of industrial drying processes, trituration methods, and granulometric homogenization and densification; all of this in order to reduce the costs derived from the treatments. However, the point of departure for these characterizations is the determination of the particle size, which serves as a parameter to select the best pre-treatment system (Antolín, 2006).

The shape and dimensions of the fuel particles are usually significant factors in the choice of the types of furnaces and

La forma y las dimensiones de las partículas del combustible, son usualmente factores importantes en la elección de los tipos de hornos y suministro del material, ya que influyen en el transporte y en la eficiencia de la combustión; las partículas grandes requieren de equipos de alimentación más robustos y a menudo, más tiempo para lograr combustión completa (Oberberger y Thek, 2010).

La distribución de partículas permite separar fracciones con dimensiones específicas, la aplicación diferenciada de las mismas puede contribuir a mejorar la calidad de la biomasa como fuente de energía, de materiales compuestos y químicos (Silva *et al.*, 2011).

Es fundamental conocer las dimensiones y la distribución granulométrica de las partículas en los subproductos maderables antes de iniciar procesos de densificación (Miranda *et al.*, 2012). El tamaño de las partículas influye en la durabilidad mecánica de los *pellets*; las finas (<1 mm) presentan mayor durabilidad (resistencia a desmoronarse) e higroscopicidad (capacidad de adsorber agua), que las grandes (>1 mm), por lo que las primeras experimentarán un grado de acondicionamiento superior (Kaliyan y Vance, 2009). Por otra parte, la inclusión de partículas grandes puede generar fisuras y posteriores rompimientos en los *pellets* (MacBain, 1966).

Con el fin de incrementar el conocimiento de los subproductos generados en la industria forestal para su posible uso en *pellets* y briquetas, en el presente estudio se determinó la distribución granulométrica en el aserrín, la corteza y la viruta generados de tres especies de *Pinus*, en un aserradero y en un taller de secundarios, así como en la mezcla de corteza-madera de tres especies de *Quercus* proveniente de una astilladora.

Materiales y Métodos

Especies y origen de los subproductos

El aserrín, la corteza y la viruta se analizaron a partir del material obtenido de *Pinus leiophylla* Schltdl. et Cham., *P. montezumae* Lamb. y *P. pseudostrobus* Lindl.; la mezcla de corteza-madera fueron de *Quercus candicans* Née, *Q. laurina* Humb. et Bonpl. y *Q. rugosa* Née. Todas se seleccionaron por ser las que tienen mayor aprovechamiento en el área forestal del municipio Nuevo Parangaricutiro, Michoacán.

Las muestras de aserrín, corteza y la mezcla corteza-madera se recolectaron en el aserradero y en el área de astillado de la CINSJP. El aserrín se obtuvo de la sierra principal, de 5" de ancho, calibre 17, ancho de diente de 1/8" (3.175 mm), motor de 60 caballos de potencia y velocidad de corte de 34 m s⁻¹; la corteza se tomó de la banda de salida del subproducto de la descortezadora por fricción con cabezal dentado, en donde las trozas son giradas pasan a través de rodillos; la mezcla

supply of materials, as they influence the transportation and the efficiency of the combustion; large particles require more robust supply equipments, and often more time to achieve full combustion (Oberberger and Thek, 2010).

Particle distribution allows separating fractions with specific dimensions; and their differentiated application may contribute to improve the quality of the biomass as a source of energy, compound materials and chemicals (Silva *et al.*, 2011).

It is crucial to know the dimensions and the granulometric distribution of the particles in timber byproducts before starting the densification process (Miranda *et al.*, 2012). Size influences the mechanical durability of the pellets; fine particles (<1 mm) have more durability (resistance to crumbling) and hygroscopicity (the ability to absorb water) than large particles (>1 mm); therefore, the former experience a higher degree of reconditioning than the latter (Kaliyan and Vance, 2009). The inclusion of large particles may generate fissures and subsequent fractures in the pellets (MacBain, 1966).

In order to increase the knowledge of the generated byproducts of the forest industry for their potential use in pellets and briquettes, this study determined the granulometric distribution in sawdust, bark and shavings from three *Pinus* species, generated in a sawmill and in a secondary materials shop, as well as in the bark-wood mixture of three *Quercus* species from a wood shredder.

Materials and Methods

Species and origin of the byproducts

The sawdust, bark and shavings of *Pinus leiophylla* Schltdl. et Cham., *P. montezumae* Lamb. and *P. pseudostrobus* Lindl. were analyzed; the bark-wood mixture was obtained from *Quercus candicans* Née, *Q. laurina* Humb. et Bonpl. and *Q. rugosa* Née. They were all selected for being the most exploited species in the forest area of the municipality of Nuevo Parangaricutiro, Michoacán.

The sawdust samples, bark and bark-wood mixture were collected at the sawmill and in the shredding area of CINSJP. The sawdust was obtained from the main saw, which is 5" wide and whose caliber is 17, with a tooth width of 1/8" (3.175 mm), a 60 HP motor and a cutting speed of 34 m s⁻¹; the bark, ground by friction with a serrated head, was taken from the outgoing belt loaded with the byproduct of the bark peeler, in which the logs are rotated with rollers; the bark-wood mixture, from oak logs and branches, was obtained from a wood shredder (Precision American Corporation).

Furthermore, sawdust samples were obtained at the secondary materials shop of CINSJP (TSC) and at the external

corteza-madera se consiguió de árboles de encinos, desde trozas hasta ramas grandes y pequeñas en una astilladora (*Presicion American Corporation*).

Además se trabajaron muestras de aserrín del taller de secundarios de la CINSJP (TSC) y del taller externo (TSE) “Tarimas López”, procedentes de una máquina con sierra cinta de 2” de ancho y 6.27 m de longitud, colocada sobre un volante de un metro de diámetro el cual se mueve por la acción de un motor de 15 caballos de potencia. Las virutas provinieron de la máquina molduradora instalada en el TSE accionada mediante un motor SIEMENS de 10 caballos de potencia.

Para reunir el material se observó tanto el grosor como la textura de la corteza para identificar la troza, previo al proceso de aserrío o descortezado, de acuerdo con la especie. Las muestras de los subproductos se tomaron al azar en el sitio en el que son vertidos por cada equipo durante un turno de trabajo; el volumen total para cada una fue de 0.02 m³, aproximadamente.

Distribución granulométrica

La clasificación por granulometría de las partículas se realizó por separado para dos grupos de partículas como se describen a continuación:

Aserrín. El porcentaje de partículas de aserrín del aserradero de la CINSJP y TSC fueron las capaces de pasar por un tamiz vibrante, según lo establece la norma UNE-EN-15149-2 (2011); los cinco tamices utilizados en esta prueba retuvieron partículas de los siguientes tamaños: a) >0.850 mm (malla 20); b) ≤ 0.850 ; y > 0.425 mm (malla 40); c) ≤ 0.425 y > 0.250 mm (malla 60); d) ≤ 0.250 y > 0.150 mm (malla 100); y e) ≤ 0.150 mm. Para efectos de control, los porcentajes retenidos se identificaron en el presente trabajo como: a) >0.850 mm, b) 0.425 mm, c) 0.250 mm, d) 0.150 mm, y e) ≤ 0.150 mm. El tamaño mínimo repetición fue de 50 g y se conformaron dos repeticiones.

Corteza, corteza-madera y viruta. Para la distribución granulométrica de cada tipo de partícula, se consideró lo que establece la norma UNE-EN-15149-1 (2011); se emplearon cinco tamices que permitieron el paso de partículas de los siguientes tamaños: a) >10.0 mm; b) ≤ 10.0 y > 8.0 mm; c) ≤ 8.0 y > 6.5 mm; d) ≤ 6.5 y > 4.0 mm; y e) ≤ 4.0 mm; para efectos de control. Los porcentajes retenidos fueron identificados como: a) >10.0 mm; b) 8.0 mm; c) 6.5 mm; d) 4.0 mm; y e) ≤ 4.0 mm, respectivamente. Según la norma anterior, el volumen mínimo utilizado para cada repetición fue de 8 L, con dos repeticiones.



shop (TSE) of the “Tarimas López” pallet workshop, from a machine with a 2” wide and 6.27 m long band saw placed on a flywheel with a 1 m diameter moved by a 15 HP motor. The shavings were obtained from the moulder installed at the TSE and moved by a 10 HP SIEMENS motor.

When gathering the material, both the thickness and the texture of the bark were observed in order to identify the log before the sawing or bark-peeling process, according to the species. The byproduct samples were taken at random from where they are dumped by each team during a work shift; the total volume for each species was approximately 0.02 m³.

Granulometric distribution

Particle size classification by granulometry was carried out separately for the two groups of particles, as described below:

Sawdust. The percentage of sawdust from the sawmills of CINSJP and TSC comprised those particles that were able to pass through a vibrating sieve, as established by the standard UNE-EN-15149-2 (2011); the five sieves used in this test retained particles of the following sizes: a) >0.850 mm (20 mesh); b) ≤ 0.850 ; and > 0.425 mm (40 mesh); c) ≤ 0.425 and > 0.250 mm (60 mesh); d) ≤ 0.250 and > 0.150 mm (100 mesh); and e) ≤ 0.150 mm, for control purposes. The retained percentages were identified in the present study as: a) >0.850 mm, b) 0.425 mm, c) 0.250 mm, d) 0.150 mm, and e) ≤ 0.150 mm. The minimum side in each repetition was 50 g, and two repetitions were carried out.

Bark, bark-wood and shavings. The granulometric distribution of each particle type was determined according to the standard UNE-EN-15149-1 (2011); five sieves were used, which allowed passage of particles of the following sizes: a) >10.0 mm; b) ≤ 10.0 and > 8.0 mm; c) ≤ 8.0 and > 6.5 mm; d) ≤ 6.5 and > 4.0 mm; and e) ≤ 4.0 mm, for control purposes. The retained percentages were identified as a) >10.0 mm; b) 8.0 mm; c) 6.5 mm; d) 4.0 mm; and e) ≤ 4.0 mm, respectively. According to the above standard, the minimum volume used in each of two repetitions was 8 L.

Moisture content (MC)

The granulometric distribution was characterized by particles whose moisture content was less than 20 %, as determined by the standard UNE-EN14774-3 (2010).

Statistical analysis

This was performed in terms of the particle size groups of the byproducts: sawdust, bark, bark-wood and shavings. The variable sawdust was normalized with the transformation of the $\ln(x)$, and the bark, with a . A univariate unbalanced ANOVA was applied, and Tukey tests were carried out to make multiple

Contenido de humedad (CH)

La distribución granulométrica se caracterizó por partículas cuyo contenido de humedad fue menor a 20 %, el cual se determinó con base en la norma UNE-EN14774-3 (2010).

Análisis estadístico

Se hizo en función de los grupos de tamaño de partícula de los subproductos: aserrín, corteza, corteza-madera y viruta. La variable aserrín se normalizó con la transformación del $\ln(x)$ y la corteza con una . Se aplicó un ANOVA univariado desbalanceado y se utilizaron pruebas de Tukey para realizar comparaciones múltiples de las medias (Hayter, 1984). El estudio de cada subproducto entre las especies se llevó a cabo la prueba de Kruskal-Wallis (Kruskal y Wallis, 1952), excepto en el caso de la viruta, para la cual se utilizó un ANOVA univariado. También se evaluó el tipo de procedencia: aserradero, astillado, taller de secundarios de la comunidad y externo y se empleó la prueba de Kruskal-Wallis para el tamaño de las partículas en cada industria (Kruskal y Wallis, 1952). El nivel de significancia en las pruebas fue de 95 %. Los análisis estadísticos se procesaron con el programa Minitab Inc. versión 16.2.1 (Minitab Inc., 2010).

Resultados y Discusión

Aserrín de *Pinus* spp.

El porcentaje de partículas de aserrín de cada una de las tres especies de pino retenidas en los cinco tamices presentaron diferencias altamente significativas, (Cuadro 2, Figura 1). A nivel de especie no hubo diferencias estadísticas (Cuadro 2). El porcentaje de partículas incluidas en los tamices 0.250, 0.150 y ≤ 0.150 mm fue 37.18 %, denominadas polvo de madera, ya que son menores de 0.315 mm (Obernberger y Thek, 2010).

Cuadro 2. Análisis estadístico del tamaño de partículas según subproducto.
Table 2. Statistical analysis of the size of the particles by byproduct

Subproducto	Tres especies - cinco tamices			A nivel de especie		
	F	gl _e	p	H	gl	p
Aserrín de <i>Pinus</i> spp.	40.14	4.85	<0.001	0.00	2	0.998
Corteza de <i>Pinus</i> spp.	69.44	4.55	<0.001	0.16	2	0.922
Viruta de <i>Pinus</i> spp.	37.18	2.15	<0.001	0.00*	2.15*	1.0*
Corteza-madera de <i>Quercus</i> spp.	522.38	2.15	<0.001	0.11	2	0.949

F = Estadístico Fisher; gl_e = Grados de libertad del error; p = Significancia; H = Prueba de Kruskal-Wallis; gl = Grados de libertad

*Análisis estadístico en viruta de *Pinus* spp. con un ANOVA

F = Fisher statistic; gl_e = Degrees of freedom of the error; p = Significance; H = Kruskal-Wallis test; gl = Degrees of freedom

*Statistical analysis in a *Pinus* spp. core with ANOVA

comparisons of the means (Hayter, 1984). The comparative analysis of the byproducts of each species was performed using the test (Kruskal and Wallis, 1952), except for the shavings, for which a univariate ANOVA was performed. The type of origin was also assessed: sawmill, shredding, and community and external secondary materials shops, using the Kruskal-Wallis test for particle size in each industry (Kruskal and Wallis, 1952). The significance level in the tests was 95 %. The statistical analyses were processed with the Minitab Inc., version 16.2.1 (Minitab Inc., 2010).

Results and Discussion

Pinus spp. sawdust

The percentages of sawdust particles of each of the three pine species retained in the five sieves showed highly significant differences (Table 2, Figure 1). At species level, there were no statistical differences (Table 2). The percentage of particles included in the 0.250, 0.150 and ≤ 0.150 mm sieves was 37.18 %; these particles are known as wood dust, since they measure less than 0.315 mm (Obernberger and Thek, 2010).

Approximately 76.91 % of the sawdust particles were found in the 0.425, 0.250, 0.150 and ≤ 0.150 mm sieves. These values are within the limit indicated by Obernberger and Thek (2010), who, like Ortiz *et al.* (2003), point out that the adequate size for the use of these particles in pellet production is less than 5 mm. According to Turner's recommendations (1995), good quality pellets can be made with 0.6 to 0.8 mm particles, and wood dust meets this specification. The interval suggested by Franke and Rey (2006) for durable pellets is 0.5 to 0.7 mm; this agrees with the size of the wood dust particles. These authors state that particles of over 1 mm act as breaking points in the pellets. 37.18 % of the sawdust particles were retained in the 0.250, 0.150 and ≤ 0.150 mm sieves and can be used to produce high-quality pellets (Turner, 1995) that are durable as

Aproximadamente 76.91 % de las partículas de aserrín se concentraron en los tamices 0.425, 0.250, 0.150 y ≤ 0.150 mm. Estos valores se ubican del límite indicado por Obernberger y Thek (2010) quienes señalan que las dimensiones adecuadas para producir *pellets* son menores a 5 mm, lo mismo mencionan Ortiz *et al.* (2003). De acuerdo con lo recomendado por Turner (1995), los *pellets* de buena calidad pueden elaborarse con partículas de 0.6 a 0.8 mm y el polvo de madera cumple con esa especificación. El intervalo sugerido por Franke y Rey (2006) para *pellets* durables es de 0.5 a 0.7 mm, lo que concuerda con el tamaño de partículas del polvo de madera. Dichos autores consignan que las partículas mayores a 1 mm actúan como puntos de rompimiento en los *pellets*. Las partículas de aserrín retenidas en los tamices 0.250, 0.150 y ≤ 0.150 mm constituyeron 37.18 %, mismas que son factibles de usarse para obtener *pellets* de calidad (Turner, 1995) y durables (Franke y Rey, 2006). También es aconsejable una mezcla de partículas de diferentes tamaños, ya que ayuda a generar una unión fuerte entre partículas y no permite espacios (Grover y Mishra, 1996; MacBain, 1966; Payne, 1978).

En el tamiz > 0.850 mm se retuvo 23.09 % del aserrín, el cual es susceptible de utilizarse para producir *pellets*, y las partículas entre 5 y 10 mm deben ser destinadas para la elaboración de briquetas, ya que en esta industria se integran partículas de tamaño superior (Ortiz, *et al.*, 2003; Tripathi *et al.*, 1998).

Corteza de *Pinus* spp.

El porcentaje de partículas de corteza de las tres especies de *Pinus* retenidas en los cinco tamices fueron estadísticamente diferentes (Cuadro 2; Figura 2). Por otra parte, no hubo diferencias significativas en el tamaño de partículas entre las especies (Cuadro 2). De las partículas de corteza del tamiz ≤ 4.0 mm, 25.49 % podría ser aprovechado para obtener *pellets*, el mayor número de partículas de corteza (46.18 %) correspondió al tamiz 6.5 mm. Las partículas de corteza procedentes de ambas fuentes presentaron grandes dimensiones (>1 mm) y proporciones, lo cual coincide con Miranda *et al.* (2012), quienes consignan valores de 50.3 y 66 % de partículas superiores a 2 mm para corteza de pino y abeto, respectivamente.

Para elaborar briquetas es posible utilizar 49.60 % de las partículas de corteza de los tamices 6.5 mm (46.18 %) y 8 mm (3.42 %), ya que están dentro del intervalo de 6 a 8 mm que indican Tripathi *et al.* (1998), y son inferiores a 10 mm (Ortiz, *et al.*, 2003). También, se puede añadir 22.09 % de partículas con tamaño superior a 5 mm, que se retuvieron en el tamiz 4.0 mm (Ortiz, *et al.*, 2003).

Viruta de *Pinus* spp.

El porcentaje de partículas de viruta de *Pinus* que se retuvieron en los cinco tamices fueron estadísticamente diferentes (Cuadro 2,

well (Franke and Rey, 2006). Likewise, a mixture of particles of different sizes is advisable, since these contribute to generate a strong bond between particles and allows no spaces between these (Grover and Mishra, 1996; MacBain, 1966; Payne, 1978).

23.90 % of the sawdust was retained in the > 0.850 mm sieve; this sawdust can be used for producing pellets, and 5 and 10 mm particles must be destined to the manufacture of briquettes, an industry in which larger particles are used (Ortiz, *et al.*, 2003; Tripathi *et al.*, 1998).

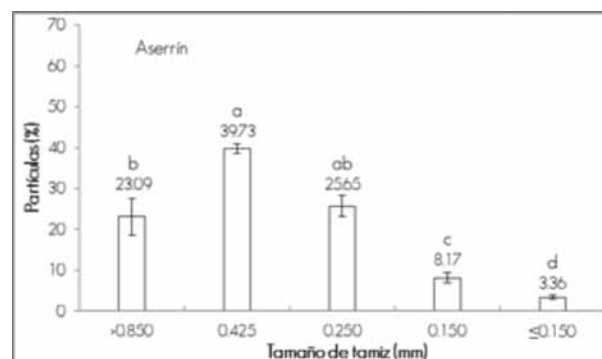


Figura 1. Distribución granulométrica del aserrín de *Pinus* spp.
Figure 1. Granulometric distribution of *Pinus* spp. sawdust.

Pinus spp. bark

The percentage of particles of bark of the three *Pinus* species retained in the five sieves were statistically different (Table 2; Figure 2). On the other hand, there were no significant differences in particle size between the species (Table 2). 25.49 % of the bark particles of the ≤ 4.0 mm sieve could be used to manufacture pellets; the largest number of bark particles (46.18 %) were retained by the 6.5 mm sieve. The bark particles from the two sources showed a large size (>1 mm) and large proportions, which agrees with the records of Miranda *et al.* (2012), whose values are 50.3 and 66 % of particles of more than 2 mm for pine and fir bark, respectively.

49.60 % of the bark particles of the 6.5 mm (46.18 %) and 8 mm (3.42 %) sieves can be utilized to make briquettes, since they are within the 6 to 8 mm interval indicated by Tripathi *et al.* (1998) and are smaller than 10 mm (Ortiz *et al.*, 2003). Furthermore, 22.09 % particles of more than 55 mm retained in the 4.0 mm sieve can be added (Ortiz *et al.*, 2003).

Pinus spp. shavings

The percentage of particles of *Pinus* shavings that were retained in the five sieves were statistically different (Table 2, Figure 2); however, there were no significant differences between the species (Table 2). Wood shavings are useful according to their

Figura 2), entre las especies no se presentaron diferencias significativas (Cuadro 2). Las virutas de madera son útiles según el tamaño y la proporción, si superan las dimensiones requeridas para formar *pellets*, deberán ser molidas, las pequeñas que provienen de máquinas de ejecución rápida son peletizadas sin necesidad de ser molidas, previamente (Obernberger y Thek, 2010).

Más de 50 % de las partículas de viruta quedaron retenidas en el tamiz 6.5 mm (Figura 2), lo que coincide con el intervalo de 5 al 12 mm que establecen Obernberger y Thek (2010). El porcentaje de virutas menores o iguales a 4 mm fue 16.89 % y son aptas para la elaboración de *pellets*. Se recomienda no usar partículas grandes porque la resistencia de los *pellets* se genera, principalmente, por las fuerzas físicas como los puentes sólidos, las fuerzas de atracción entre las partículas sólidas, uniones de enclavamiento o entrelazamiento mecánico, las fuerzas de adhesión y cohesión, las fuerzas interfaciales y la presión capilar; además de, la interacción mecánica de las partículas durante el proceso de densificación (Kaliyan y Vance, 2009).

De las partículas de viruta retenidas en el tamiz 6.5 mm, 56.29 % son adecuadas para producir briquetas, y se puede añadir 26.83 % de las partículas retenidas en el tamiz 4.0 mm y que correspondan a tamaños mayores a 5 mm.

Corteza-madera de *Quercus* spp.

Las partículas de corteza-madera de *Quercus* spp. (visualmente madera, en mayor cantidad) fueron retenidas en los cinco tamices y mostraron diferencias estadísticas (Cuadro 2; Figura 3). Entre las especies del género no hubo diferencias significativas (Cuadro 2).

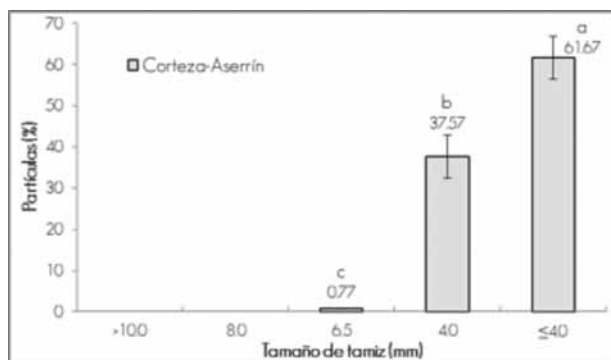


Figura 3. Distribución granulométrica de las partículas de corteza-madera de *Quercus* spp.

Figure 3. Granulometric distribution of *Quercus* spp. bark-wood particles.

size and proportion: if they are larger than those required to make pellets, they must be ground; small particles from rapidly operating machines are pelletized without any need to be previously ground (Obernberger and Thek, 2010).

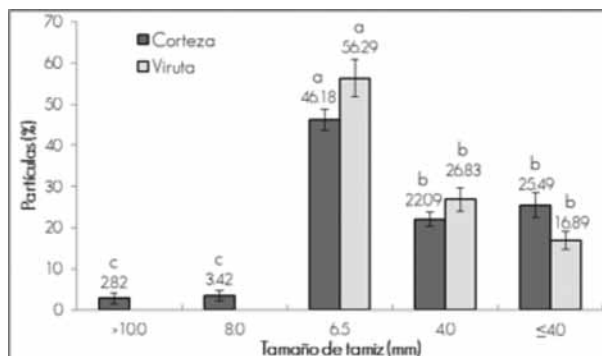


Figura 2. Distribución granulométrica de corteza y viruta de *Pinus* spp.

Figure 2. Granulometric distribution of *Pinus* spp. bark and shavings.

A percentage above 50 % of the shavings particles were retained in the 6.5 mm sieve (Figure 2); this coincides with the interval of 5 to 12 mm established by Obernberger and Thek (2010). The percentage of shavings equal to or smaller than 4 mm was 16.89 %, and they are suitable for making pellets. The use large particles is not suggested because the resistance of the pellets is generated primarily by physical forces such as solid bridges, attraction forces between solid particles, interlocking or mechanical intertwining unions; adhesion and cohesion forces, interphase forces and capillary pressure, as well as the mechanical interaction of the particles during the densification process (Kaliyan and Vance, 2009).

Of the particles of shavings retained in the 6.5 mm sieve, 56.29 % are suitable for making briquettes, and 26.83 % of the particles that do not go through the 4.0 mm sieve and have a size of more than 5 mm can be added.

Quercus spp. bark-wood

The bark-wood of *Quercus* spp. (visually wood in a larger amount) were retained in the five sieves and showed statistical differences (Table 2, Figure 3). There were no significant differences between species of this genus.

Wood particles of more than 5 mm (obtained in a shredder) must be ground before they are densified in pellets. Obernberger and Thek (2010) report that the interval for wood chips to be suitable for direct use in pellet production is 2.8 to 63 mm, corresponding to 61.67 % of the bark-wood particles from the shredder and retained in a ≤ 4.0 mm sieve.

Las partículas de madera superiores a 5 mm (obtenidas en astilladora) deben molerse antes de densificar en *pellets*, Obernberger y Thek (2010), estos autores consignan que el intervalo para que las astillas de madera sean aprovechadas para producir *pellets* de manera directa es de 2.8 a 63 mm, el cual corresponde a 61.67 % de las partículas de corteza-madera que provienen de la astilladora y que se retuvieron en el tamiz ≤ 4.0 mm.

El hecho de que se produzcan partículas grandes depende de la fuerza de tracción de la madera, de la flexibilidad del material por astillar, de la velocidad de alimentación, de las revoluciones por minuto y del número y filo de las cuchillas. Lo anterior es común en las maderas duras, como *Quercus* spp.; además algunas especies de este género, con altas cantidades de minerales (Correa *et al.*, 2014), pueden influir en el tamaño; Hakkila (1984) registra que lo anterior explica el aumento de la proporción de partículas grandes en la madera de álamos, ya que a medida que transcurre el tiempo de molido, las cuchillas se desgastan. Efecto que se observa en la Figura 3, en donde los tamices presentan mayor cantidad de material de encino que corteza y viruta de pino, aunque se hayan obtenido en otras máquinas. Por otra parte, la producción de astillas a partir de trozas, siempre contiene una proporción menor de partículas grandes, y por tanto, más astillas aceptadas (Nati *et al.*, 2010), y que coincide con las especies de *Quercus* spp. que se analizan en el presente estudio.

Según los tamaños de partículas que citan Ortiz *et al.* (2003), teóricamente, es posible elaborar briquetas con 0.77 % de las partículas de corteza-madera que se retuvieron en los tamices 6.5 mm, y añadir una cantidad de 37.57 % del material que quedó en el tamiz 4.0 mm, que concuerda con partículas superiores o iguales a 5 mm.

Aserradero

El tamaño de las partículas de aserrín y corteza obtenidas en el aserradero no presentó diferencias estadísticas significativas (Cuadro 3, Figura 4).

El mayor porcentaje de partículas en esta industria correspondió a 26.58 %, las cuales fueron retenidas en el tamiz 6.5 mm. Se considera que aproximadamente 58.67 % de ellas son menores o iguales a 4 mm y pueden aprovecharse en la producción de *pellets*. Así, mientras más pequeño sea el tamaño de partícula, mejor se desarrolla el proceso de densificación del combustible (Kaliyan y Vance, 2009).



The production of large particles depends on the traction force of the wood, the flexibility of the material to be shredded, the feed rate, the number of revolutions per minute and the number and sharpness of the blades. This is common in the case of hard woods like *Quercus* spp; furthermore, certain species of this genus with high amounts of minerals (Correa *et al.*, 2014) may influence size; Hakkila points out that this accounts for the increase in the proportion of large particles in poplar woods, because as the grinding time passes, the blades wear away. This effect may be observed in Figure 3, where the sieves show a larger amount of oak material than pine bark or shavings, even if obtained from other machines. On the other hand, the production of chips from logs always has a lower proportion of large particles, and therefore accepts more chips (Nati *et al.*, 2010), as is the case with the *Quercus* spp. species analyzed in the present study.

According to the particle sizes quoted by Ortiz *et al.* (2003), theoretically it is possible to manufacture briquettes using 0.77 % of the bark-wood particles retained in 6.5 mm sieves and add 37.57 % of the material retained in the 4.0 mm sieve, which consists of particles equal to or larger than 5 mm.

Sawmill

The size of the sawdust and bark particles obtained at the sawmill showed no statistically significant differences (Table 3, Figure 4).

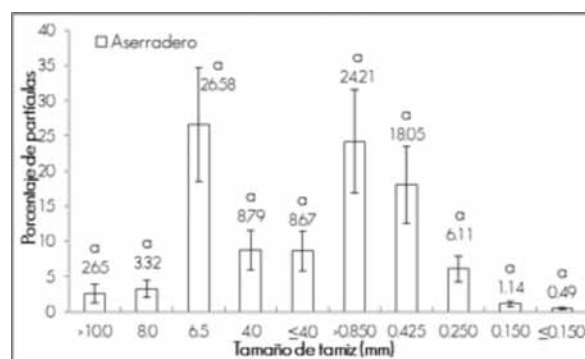


Figura 4. Distribución de tamaño de partículas en el aserradero.
Figure 4. Particle size distribution at the sawmill.

The largest percentage of particles in this industry was 26.58 %, which were retained in the 6.5 mm sieve. Approximately 58.67 % of them are considered to be equal to or smaller than 4 mm and can be utilized in the production of pellets. Thus, the smaller the particle size, the better the development of the fuel densification process (Kaliyan and Vance, 2009).

In relation to briquette production, and according to the dimensions of the particles suggested by Tripathi *et al.* (1998) and Ortiz *et al.* (2003), it is viable to use 29.90 % of the residual

Cuadro 3. Análisis estadístico del tamaño de partículas por tipo de industria.

Tipo de industria	H	gl	p
Aserradero	7.87	9	0.548
Taller de secundarios de la comunidad	14.04	9	0.121
Taller de secundarios externo	6.41	7	0.492

H = Prueba de Kruskal-Wallis; gl = Grados de libertad; p = Significancia

Table 3. Statistical analysis of particle size by type of industry.

Type of industry	H	gl	p
Sawmill	7.87	9	0.548
Community secondary materials shop	14.04	9	0.121
External secondary materials shop	6.41	7	0.492

H = Kruskal-Wallis test; gl = Degrees of freedom; p = Significance

En relación con la producción de briquetas y de acuerdo con las dimensiones de las partículas sugeridas por Tripathi *et al.* (1998) y Ortiz *et al.* (2003) es factible aprovechar 29.90 % de las partículas residuales derivadas del aserradero, las cuales quedan retenidas en los tamices 8.0 mm y 6.5 mm. Asimismo, 8.79 % de partículas retenidas en el tamiz 4.0 mm puede incluirse en la producción de briquetas, ya que corresponden a un tamaño mayor a 5 mm.

Taller de secundarios de la comunidad (TSC)

Los tamaños de partículas en el aserrín y corteza de *Pinus* spp. que se obtuvieron en el TSC no evidenciaron diferencias estadísticas significativas (Cuadro 3; Figura 5).

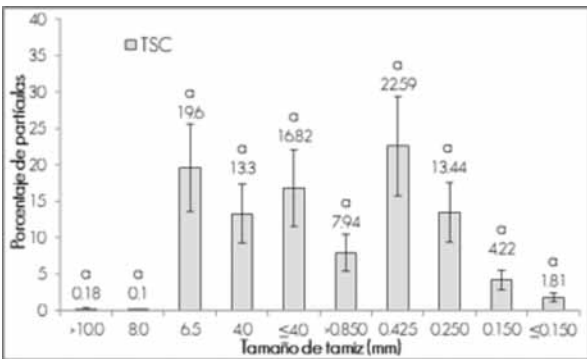


Figura 5. Distribución de tamaño de partículas en el taller de secundarios de la comunidad.

Figure 5. Particle size distribution at the community secondary materials shop.

particles from the sawmill, which are retained by the 8.0 mm and 6.5 mm sieves. Likewise, 8.79 % of the particles retained in the 4.0 mm sieve can be included in the production of briquettes, since they measure more than 5 mm.

Community secondary materials shop (TSC)

Particle sizes of *Pinus* spp. sawdust and bark obtained at the TSC showed no statistically significant differences (Table 3, Figure 5).

66.82 % of the particles equal to or smaller than 4 mm with a potential for pellet manufacture were registered at the TSC; the highest percentage of this material (22.59 %) was gathered the 0.425 mm sieve. As for the particles-durability ratio in the pellets, Lee *et al.* (2013) used *Larix kaempferi* C. (larch) wood, which proved to be more durable when small particles were used.

For the production of briquettes with subproducts from TSC, 19.70 % of the particles in the 5 to 10 mm range are susceptible to be used, according to the sizes reported by Tripathi *et al.* (1998) and Ortiz *et al.* (2003). A part of the residual matter (13.3 %) contained in the 4.0 mm sieve may also be used for this purpose.

External secondary materials shop

Particles of *Pinus* spp. sawdust, bark and shavings had statistically similar sizes (Table 3, Figure 6).



En el TSC se registró 66.82 % de las partículas con tamaños menores o iguales a 4 mm, que tienen potencial para elaborar *pellets*; el porcentaje más alto de este material (22.59 %) se concentró en el tamiz 0.425 mm. En cuanto a la relación partículas-durabilidad en los *pellets*, Lee *et al.* (2013) utilizaron madera de *Larix kaempferi* C. (ARCE), la que fue más durable con partículas pequeñas.

Para la producción de briquetas con subproductos provenientes del TSC, 19.70 % de las partículas en el intervalo de 5 a 10 mm son susceptibles de aprovechamiento, según las dimensiones consignadas por Tripathi *et al.* (1998) y Ortiz *et al.* (2003). Una parte (13.3 %) del material residual contenido en el tamiz 4.0 mm, también podría emplearse para este fin.

Taller de secundarios externo

Las partículas de aserrín, corteza y viruta de *Pinus* spp. fueron de tamaños estadísticamente similares (Cuadro 3, Figura 6).

Alrededor de 58.45 % de las partículas residuales (menores o iguales a 5 mm) de este taller podrían utilizarse en la producción de *pellets* (Oberberger y Thek, 2010; Ortiz, *et al.*, 2003); para la obtención de briquetas, se ocuparía 28.14 % de los subproductos generados en el TSE que fueron retenidos en el tamiz 6.5 mm. Según las dimensiones de la materia prima para elaborar briquetas (Ortiz, *et al.*, 2003; Tripathi, *et al.*, 1998), también se agregaría un porcentaje de las partículas que se concentraron en el tamiz 4.0 mm y representaron 13.41 %.

Conclusiones

Existieron variaciones en la distribución granulométrica de las partículas de aserrín, la corteza y la mezcla corteza-madera. Las partículas que conforman el polvo de madera (incluido el aserrín) son adecuadas para producir *pellets* de buena calidad y alta durabilidad; aproximadamente tres cuartas partes de las partículas de aserrín son aptas para elaborar *pellets*, sin embargo, para que estas sean de buena calidad y tengan alta durabilidad, se estima que sólo la mitad de ellas pueden utilizarse.

Cerca de un cuarto de la corteza puede aprovecharse para la producción de *pellets* y la mitad para elaborar briquetas. En el caso de la viruta, una quinta parte se puede usar para elaborar *pellets*, y más de la mitad de las partículas de este subproducto en briquetas.

Más de la mitad de las partículas de corteza-madera es factible de incorporarse a la producción de *pellets* y, en teoría, la elaboración de briquetas con estas partículas quedaría reducida a 1 %.

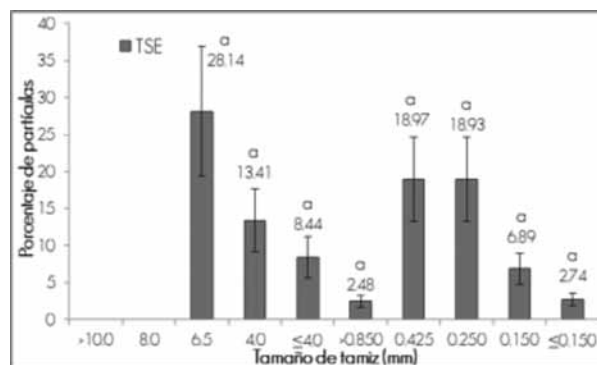


Figura 6. Distribución de tamaño de partículas en el Taller de secundarios externo.

Figure 6. Particle size distribution at the external secondary materials shop.

Around 58.45 % of the residual particles (equal to or smaller than 5 mm) from this shop may be used to produce pellets (Oberberger and Thek, 2010; Ortiz *et al.*, 2003); for the production of briquettes, 28.14 % of the byproducts generated at the TSE and retained by the 6.5 mm sieve may be used. According to the dimensions of the raw material for the manufacture of briquettes (Ortiz, *et al.*, 2003; Tripathi, *et al.*, 1998), a percentage of particles concentrated in the 4.0 mm sieve and amounting to 13.41 % should also be added.

Conclusions

There were variations in the granulometric distribution of sawdust, bark and bark-wood particles. The particles of wood dust (including sawdust) are suitable for producing good-quality and highly durable pellets; approximately three fourths of the sawdust particles are suitable for the manufacture of pellets; however, for these to be of good quality and high durability, it is estimated that only half of them can be used.

Nearly one fourth of the bark can be used for producing pellets, and half, for manufacturing briquettes. Only one fifth of the particles from the shavings can be used for making pellets, and more than one half of the particles of this byproduct can be utilized for manufacturing briquettes.

More than one half of the bark-wood particles may be incorporated into the manufacture of pellets, and, theoretically, the use of these particles for the production of briquettes would be reduced to 1 %.

At an industrial level, and with the same byproducts, more than half of the sawdust and bark particles from the sawmill can be used in pellets, and almost one third of the byproducts can be used as supplies for the production of briquettes.

A nivel industria y con los mismos subproductos, en el aserradero puede utilizarse más de la mitad de aserrín y corteza en *pellets* y abastecer la producción de briquetas con casi una tercera parte de los subproductos.

Alrededor de tres cuartas partes del aserrín y la corteza del TSC es posible utilizarse en *pellets* y una quinta parte para elaborar briquetas.

El TSE tiene más de la mitad de sus partículas disponibles para *pellets*, adicionalmente, tiene posibilidades para suministrar podría suministrar aserrín, corteza y viruta en una tercera parte, para producir briquetas.

La distribución granulométrica de las partículas generadas en las diferentes industrias fue similar; finalmente, la mayor parte de las partículas de aserrín se podrían utilizar en la producción de *pellets* y las partículas de corteza, corteza-madera y viruta en la producción de briquetas. 

Agradecimientos

Se agradece el apoyo otorgado por personal de la CINSJP, del taller "Tarimas López", del Departamento de Madera, Celulosa y Papel de la Universidad de Guadalajara, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (FITECMA), de la Universidad Autónoma de Nuevo León (Facultad de Ciencias Forestales), de la Universidad de Pinar del Río (CEETES-Cuba) y del CONACYT por el proyecto No. 166444.

Referencias

Antolín, G. 2006. La gestión y el aprovechamiento de los residuos en la industria de la madera. Maderas. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Buenos Aires, Argentina. Cuaderno Tecnológico Núm. 2. 29 p.

Correa, F., A. Carrillo, J. G. Rutiga, F. Márquez, H. González, E. Jurado y F. Garza. 2014. Contenido de Humedad y Sustancias Inorgánicas en Subproductos Maderables de Pino para su Uso en Pélets y Briquetas. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 20(1): 77-88.

Franke, M. and A. Rey. 2006. Pelleting quality. World Grain 2006. University of Georgia. Athens, GA, USA. Vol. 4. pp. 78-79.

Grover, P. and S. Mishra. 1996. Biomass briquetting: technology and practices. Regional Wood Energy Development Programme in Asia. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Bangkok, Tailandia. Field Document 46. 43 p.

Hakkila, P. 1984. Forest chips as fuel for heating plants in Finland. Finnish Forest Research Institute. Helsinki, Finlandia. Folia Forestalia 586. 62 p.

Hayter, A. J. 1984. A Proof of the Conjecture that the Tukey-Kramer Multiple Comparisons Procedure is Conservative. The Annals of Statistics 12(1): 61-75.

Kaliyan, N. and M. R. Vance. 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. Biomass Bioenergy 33 (3): 337-359.

Kruskal, W. H. and W. A. Wallis. 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. Journal of the American Statistical Association 260 (47): 583-621.

Lee, S. M., B. J. Ahn, D. H. Choi, G. S. Han, H. S. Jeong, S. H. Ahn and I. Yang. 2013. Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. Biomass and Bioenergy 48: 1-9.

It is possible to use approximately three fourths of the sawdust and bark particles from the TSC in pellets, and one fifth in briquettes.

More than one half of the particles from the TSE are available for the production of pellets; additionally, TSEs can supply one third of sawdust, bark and shavings for the manufacture of briquettes.

The granulometric distribution of particles generated in the various industries was similar; eventually, most sawdust particles may be used in the production of pellets, and particles of bark, bark-wood and shavings can be utilized to produce briquettes. 

Acknowledgments

The authors would like to express their gratitude to the staff of CINSJP, of the "Tarimas López" workshop, del Departamento de Madera, Celulosa y Papel of the Universidad de Guadalajara, of the 'San Nicolás de Hidalgo' de la Universidad de Michoacán (FITECMA), de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, de la Universidad de Pinar del Río (CEETES-Cuba) and of CONACYT for Project No. 166444.

End of the English version

MacBain, R. 1966. Pelleting animal feed. American Feed Manufacturing Association. Chicago, United States of America: American Feed Manufacturing Association. Arlington, VA, USA. pp. 1-28.

Minitab Inc. 2010. Minitab statistical software. Minitab Release, 16.2.1. State College, PA, USA. s/p.

Miranda, I., J. Gominho, I. Mirra and H. Pereira. 2012. Chemical characterization of barks from *Picea abies* and *Pinus sylvestris* after fractioning into different particle sizes. Industrial Crops and Products 36 (1): 395-400.

Nati, C., R. Spinelli and P. Fabbri. 2010. Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. Biomass and Bioenergy 34 (5): 583-587.

Norma Española - Normalización Europea 14774-3 (UNE-EN14774-3). 2010. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. Humedad de la muestra para análisis general. Grupo 9. Asociación Española de Normalización y Certificación/ Comité Europeo de Normalización 164. Biocombustibles sólidos. CONFEMADERA-AENOR. Madrid, España. 9 p.

Norma Española - Normalización Europea 15149-1 (UNE-EN-15149-1). 2011. Biocombustibles sólidos. Determinación de la distribución de tamaño de partícula. Parte 1: Método del tamiz oscilante con abertura de malla igual o superior a 1 mm. Grupo 11. Asociación Española de Normalización y Certificación/ Comité Europeo de Normalización 164. Biocombustibles sólidos. CONFEMADERA-AENOR. Madrid, España. 14 p.

- Norma Española - Normalización Europea 15149-2 (UNE-EN-15149-2). 2011. Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación de la distribución de tamaño de partícula. Parte 2: Método del tamiz vibrante con apertura de malla inferior o igual a 3,15 mm. Grupo 12. Asociación Española de Normalización y Certificación/Comité Europeo de Normalización 164 Biocombustibles sólidos. CONFEMADERA-AENOR. Madrid, España. 15 p.
- Obernberger, I. and G. Thek. 2010. The Pellet Handbook. Bios Bioenergiesysteme GmbH. London, UK. 549 p.
- Ortiz, L., A. Tejada, A. Vázquez y G. Piñeiro. 2003. Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la cadena monte-industria III: Producción de elementos densificados. Revista del Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la Madera de Galicia CIS-Madera 11: 17-32.
- Payne, J. 1978. Improving quality of pellet feeds. *Milling Feed Fertilizers* 162: 34-41.
- Silva G. G. D., S. Guilbert and X. Rouau. 2011. Successive centrifugal grinding and sieving of wheat straw. *Powder Technology* 208 (2): 266-270.
- Tripathi, A. K., P. V. R. Iyer and T. C. Kandpal. 1998. A techno-economic evaluation of biomass briquetting in India. *Biomass and Bioenergy* 14 (5-6): 479-488.
- Turner, R. 1995. Bottomline in feed processing: achieving optimum pellet quality. *Feed Management* 46: 30-33.

