

OPTIMIZACION DEL PROCESO DE DENSIFICACIÓN DE DESECHOS LIGNOCELULÓSICOS PARA LA CONFORMACION DE PELLETS ENERGÉTICOS

Optimization of densification process of lignocellulosic wastes for energetic pellets
manufactured

Segundo Seijas-Velázquez¹, Priscilla Seijas-Bernabé², Nadia Seijas-Bernabé², Alvaro Chávez- Sánchez³, Ludwig Salgado-Rodríguez³, Marco Alva- Castañeda².

Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Trujillo^{1*}
Instituto de Investigación en Ciencias e Innovación Tecnológica², Escuela de Postgrado. Universidad Nacional de Trujillo³
mabesei@yahoo.com^{1*}

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo producir *pellets* energéticos optimizando el proceso de densificación de desechos lignocelulósicos de tipo aserrín. Se conformaron 4 grupos experimentales (F1, F2, F3 y F4) considerando como parámetros: tiempo de relajación (seg) A1:0 seg.; A2: 20 seg., y presión de compactación (MPa) B1: 30 MPa; B2: 90 MPa. Se instaló el sistema experimental, estuvo conformado por un peletizador de sistema de anillo plano. Previamente, se procesó el aserrín y se determinó el contenido de humedad. Después se compactó en el peletizador, empleando un tiempo de relajación: 0 segundos y presión de compactación: 30MPa (grupo experimental F1). Se realizó el respectivo enfriado Este proceso se repite con los respectivos grupos experimentales F2, F3 y F4. Una vez que se realizó la fabricación de los pellets se procedió a determinar el respectivo índice de friabilidad y poder calorífico superior, para los pellets de cada grupo experimental. Siendo el grupo F2 el que presentó los mayores valores de 0,94 y 4098,6 kcal/kg, respectivamente. Por lo que se concluye, que las propiedades determinadas permiten una caracterización del pellet con la finalidad de optimizar los parámetros de densificación, para su aprovechamiento eficiente como producto energético sostenible.

Palabras clave: Pellets energéticos, desechos lignocelulósicos, densificación.

ABSTRACT

The present research aimed to produce energetic pellets optimizing the densification process of sawdust type lignocellulosic waste. It was conformed 4 experimental groups (F1, F2, F3 and F4), considering as parameters: Relaxation time of (seg) A1:0 seg.; A2: 20 seg. and compaction pressure (MPa) B1: 30 MPa; B2: 90 MPa. It was installed the experimental system, which was conformed by a peletizator of plane ring system. Previously, the sawdust was processed and the humidity content determined. Then it was compacted in the peletizator, using relaxation time: 0 seconds and compaction pressure: 30MPa (experimental group F1). It was carried out the respective cooling. This process was repeated with the groups F2, F3 and F4 respectively. Once the pellets were made, it was determined the respective friability index and superior calorific power, for each experimental group pellets.

The group F2 presented the highest values such as 0, 94 and 4098,6 kcal/kg, respectively. Therefore it is concluded that the determined properties allow a characterization of pellet with the purpose of the densification parameters optimizing, It is for their efficient progress as a sustainable energetic product.

Key words: Pellets, lignocellulosic waste, densification.

Recibido: 2 de Noviembre de 2015

Aceptado: 9 Marzo de 2015

INTRODUCCION

En la actualidad la utilización de los subproductos forestales tiene un alto grado de desaprovechamiento, considerándose muchas veces como desechos¹.

El aserrín, viruta, despuntes, entre otros, se almacenan en grandes cerros o se quema en calderas, sin poseer un mayor valor agregado o alcanzar una mayor eficiencia energética. Normalmente un aserradero produce entre 0,05 y 0,15 toneladas de residuos sólidos por tonelada de madera producida y transformada^{1,2}.

Los impactos ambientales negativos más importantes generados por el almacenamiento de este tipo de residuos son: a) Emisión de partículas, perjudicial para las vías respiratorias de personas y animales; b) Formación de lixiviados, pueden contaminar el suelo y diferentes cuerpos de agua y c) Emisiones gaseosas o de foto-oxidantes, pueden generar daños en plantaciones o bosques vecinos³.

Dada la característica de los residuos y del problema planteado ubican a la solución dentro de la biomasa residual seca⁴.

Para cualquier tipo de explotación energética de la biomasa residual seca se requiere que ésta tenga cierta preparación y homogenización. Esto se logra por medio de pretratamientos y su objetivo es permitir que los procesos de explotación sean más estables y eficientes. Los pretratamientos principales son la reducción de: tamaño de partícula y del contenido de humedad⁴.

La biomasa residual seca puede ser aprovechada básicamente después de haber sido acondicionada en procesos de combustión, co-combustión, gasificación y de pirolisis^{5,6}.

La densificación de la biomasa residual seca se presenta como una posible solución ya que permite alcanzar beneficios o mejoras en el transporte, la manipulación, la homogenización, y el almacenamiento de la misma y se podría generar un nuevo producto energético como los pellets, conocidos también como biocombustibles sólidos densificados^{5,6,7}.

Estos biocombustibles denominados pellets tienen forma cilíndrica con diámetros normalmente comprendidos entre 7 y 22 mm y longitudes de 3,5 a 6,5 cm, cuya fabricación se realiza a alta presión, sin necesidad de utilizar algún tipo de adhesivo pues sirve como aglomerante de fibras. Al fabricar y comercializar este tipo de combustibles, se disminuye considerablemente la cantidad de residuos, se reduce el volumen transportado, así como también se logra una combustión más limpia y eficiente^{8,9}. Debido a que reduce las emanaciones de CO₂ en un 50% comparado con la combustión de leña o astillas, además, posee bajas concentraciones de azufre y nitrógeno entre 0.004 - 0.007 % y 0.05 - 0.16 % del peso seco final de cada pellet respectivamente. La materia prima tiene un contenido de humedad entre 8 a 12 %, obteniendo una eficiencia energética de 4500 kcal/kg como poder calorífico superior. En consecuencia la combustión de pellets contribuye a disminuir las concentraciones de CO₂, SOx y NOx causantes del “efecto invernadero” y el cambio climático^{8,9}.

Con respecto al proceso de densificación para obtención de *pellets*, éste se denomina peletizado y se realiza mediante prensado; es la propia lignina de la madera la que actúa de aglomerante. El mismo se puede aplicar en cualquier proceso industrial o doméstico que requiera calor, así como en procesos de secado industriales, polideportivos, hoteles, calefacción^{9,10,11}.

Como referencia para establecer el potencial energético de estos productos, véase que dos kilos de *pellets* producen tanto calor como un litro de gasoil, un metro cúbico de gas natural o 10 Kwh. de electricidad, con el valor añadido de que su almacenaje no presenta riesgo de explosión y su precio no fluctúa, ya que no depende ni del petróleo ni del gas natural¹².

Dentro de otro contexto, uno de los requerimientos para diseñar, construir y mejorar los diseños en los sistemas de densificación de tipo peletizado, se basa en el conocimiento de los niveles adecuados

de las variables de proceso: geometría, tiempo de retención, y temperatura del dado, el material, la magnitud y forma de aplicación de la carga¹³. Así como de las variables del material: cantidad y distribución del tamaño de partículas, distribución de la humedad, tamaño y forma de partículas y las características bioquímicas y mecánicas del material. Estas variables permitirán alcanzar la más alta densidad, el más alto rendimiento, la mejor consistencia y los menores consumos de energía¹³. Dentro de las tecnologías más frecuentes en lo que a peletización se refiere, están: Sistemas de anillo plano - (Flat Type Die), Sistemas de anillo cilíndrico (Ring Type Die) y por extrusión^{12,13,14}. Las características que presentan los *pellets* relacionados con su reducido tamaño y

homogeneidad, permite su uso como combustible casi fluido, es decir, se adapta a diversos sistemas de alimentación automáticos controlados electrónicamente y sistemas de almacenamiento y recarga similares a los de combustibles líquidos. Estos facilitan la adopción de tales sistemas en reemplazo de los tradicionales basados en GLP o Gasoil^{13,14}.

Tomando en cuenta lo anteriormente expuesto, se propuso la presente investigación. Ésta planteó la producción de *pellets* energéticos y la posibilidad de determinar los parámetros óptimos, tiempo de relajación y presión de compactación en el proceso de densificación o peletización a través de la evaluación del índice de friabilidad y eficiencia energética (poder calorífico).

MATERIAL Y MÉTODOS

Instalación del sistema experimental para la realización del proceso de densificación de desechos lignocelulósicos

El sistema experimental para hacer los ensayos respectivos, estuvo conformado por un secador y un peletizador. Ambos aparatos constituyeron el equipo encargado de densificar los desechos lignocelulósicos para conformar los *pellets*. Previamente se diseñó el peletizador de sistema de anillo plano, teniendo en cuenta en su diseño la geometría de la matriz tipo plana, la cual permitió fabricar pellets de 2 cm de diámetro y 6 cm de longitud.

Antes de realizar la experimentación relacionada con la optimización del proceso de densificación, el primer procedimiento fue el calcular el contenido de humedad de los desechos de tipo aserrín y viruta, donde luego se procedió a pesar 4 g de cada muestra. Estas se secaron en una estufa a 100 ± 5 ° C por aproximadamente 24 horas. Luego de dos a tres pesadas en donde se mantuvo el peso constante, se calculó el contenido de humedad por medio de la fórmula de diferencia de peso. Siendo CH el

contenido de humedad de las materias primas.

$$CH = \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{seco}}}{P_{\text{seco}}} * 100$$

De acuerdo al contenido de humedad se procedió a realizar el proceso de secado de la materia prima antes de que ingresase al equipo peletizador.

Procedimiento experimental

Se procedió a colocar la materia prima (aserrín de Tornillo) en el secador. Al finalizar el proceso se determinó el contenido de la humedad. Luego se procedió a la trituración o molienda del aserrín empleando un triturador de rodillos.

Después, se procedió a densificar o compactar el aserrín molido. Luego se empleó el peletizador, introduciendo el material en la matriz perforada y con la acción de unos rodillos se lo obligó a pasar a través de los agujeros que posee. Por otro lado, se tuvo en cuenta, paralelamente, el tiempo de relajación como la presión de

compactación según los grupos experimentales formados. (tabla 1)

La temperatura del aserrín triturado, aumentó en la máquina peletizadora y el material natural aglutinante, la lignina, derrite y aglutina el *pellet* cuando éste se enfría. Cabe resaltar que el *pellet* no obtiene su dureza hasta enfriarse completamente. Después de la compactación, la temperatura del *pellet* fue alta (cercana a los 90°C); por lo que se realizó el respectivo enfriado empleando un ventilador de aire forzado. Esto estabilizó los *pellets* y endureció la lignina derretida en la superficie de ellos. Finalmente, se procedió a tamizar la materia prima mezclada entre los *pellets* para separarla y devolverla al proceso de compactado o densificación. Este proceso se repitió con los respectivos grupos experimentales F2, F3 y F4, tomando en cuenta los parámetros de tiempo de relajación y presión de compactación que se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Conformación de los grupos experimentales empleados en la investigación

	B1	B2
A1	A1B1 (F1)	A1B2 (F2)
A2	A2B1 (F3)	A2B2 (F4)

Dónde:

A= Tiempo de relajación: A1:0 seg.; A2: 20 seg.

B= Presión de compactación: B1: 30 MPa; B2: 90 MPa.



Fig. 1. Materia prima conformada por aserrín de *Cedrelinga catanaeformis* “tornillo” empleada para la producción de pellets energéticos por proceso de densificación.

Determinación de los parámetros óptimos del proceso de densificación: Evaluación de las propiedades índice de friabilidad y poder calorífico superior

Una vez que se realizó la fabricación de los *pellets* energéticos se procedió a determinar el respectivo índice de friabilidad para los *pellets* de cada grupo experimental.

Ensayos de friabilidad

Los ensayos de friabilidad se realizaron simultáneamente cada vez que se terminara de fabricar 100 pellets por cada grupo experimental.

Este ensayo consistió en arrojar uno a uno cada *pellet* de una altura de 1m., hacia un suelo cerámico y observar en cuántas partes se rompe cada uno (2, 3 o más partes). Después de ensayados una cantidad igual a 100 *pellets*, se calculó una proporción entre los *pellets* iniciales y los resultantes al final de cada ensayo. La fórmula utilizada para los cálculos de friabilidad se presenta a continuación:

$$FR = \frac{N_i}{N_f}$$

Siendo FR la friabilidad resultante (adimensional), Ni el número de pellets al inicio

del ensayo y Nf el número de pellets al final del ensayo (enteros y fraccionados)¹⁵.

Ensayos de Poder Calorífico Superior

Para el desarrollo de este ensayo fue necesaria la utilización de una Bomba Calorimétrica Parr Co, siguiendo un protocolo de medición y la norma alemana DIN 51900-1: 2000. Se seleccionaron 3 pellets de cada una de las proporciones más resistentes al golpeo, según los ensayos previos de friabilidad. Las actividades se ejecutaron en dos etapas:

1. Calibración de la Bomba Calorimétrica Parr Co, utilizando pastillas de ácido benzoico.

2. Determinación del poder calorífico superior de los pellets, mediante la siguiente fórmula, puesto que la cantidad de Azufre y Nitrógeno están en bajas concentraciones:

$$H_x = \frac{C_{bomba} * \Delta t - (Q_z)}{m_{comb.}}$$

Siendo Hx la potencia calorífica del combustible (kcal/kg), C_{bomba} la capacidad calorífica de la bomba (kcal/kg), Δt la variación de temperatura del agua (°C), m_{comb.}, la masa del combustible (g) y Q z el calor de oxidación del alambre fusible (kcal)¹⁶.

RESULTADOS

En la Tabla 2, se presentan las propiedades físicas determinadas en la materia prima empleada (aserrín) para la producción de pellets energéticos. Los resultados obtenidos sobre el índice promedio de friabilidad, se muestran en la tabla 3, siendo el mayor índice de friabilidad el que se determinó en el grupo F2

(0,94), esto indica que al arrojar 100 pellets al suelo cerámico se obtienen sólo 6 pellets rotos en 2 partes. Con respecto al poder calorífico que se evaluó en los cuatro grupos experimentales, el valor más alto también los presentó el grupo experimental F2 que fue 4098,6 kcal/kg (tabla 4).

Tabla 2. Propiedades físicas de residuos madereros (aserrín*)

LONGITUD (mm)	MASA (g)	DENSIDAD (kg/m ³)	HUMEDAD DE LOS RESIDUOS (%)	PODER CALORÍFICO (kcal/kg)
14,22	0,58	0,52	9,9	3980,5

*Especia botánica *Cedrelinga catanaeformis*.

Tabla 3. Índice promedio de friabilidad de los pellets pertenecientes a los diferentes grupos experimentales.

GRUPO EXPERIMENTAL	INDICE DE FRIABILIDAD
F1	0,86
F2	0,94
F3	0,89
F4	0,92

¹⁵Densidad promedio de pellets de los grupos experimentales: 1,12 Kg/m³.

Tabla 4. Poder calorífico promedio de los pellets pertenecientes a los diferentes grupos experimentales.

GRUPO EXPERIMENTAL	PODER CALORÍFICO (kcal/kg)
F1	3960,4
F2	4098,6
F3	3970,2
F4	4071,4

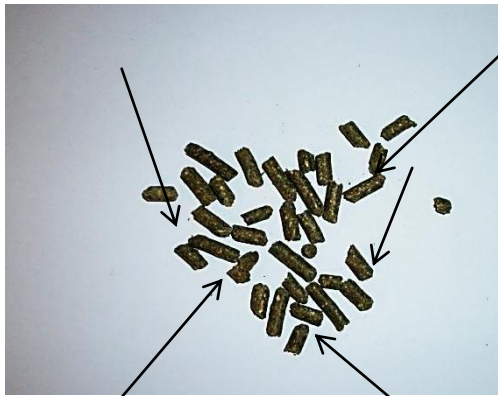


Fig.2 Muestra de pellets pertenecientes al grupo F1 después del ensayo de friabilidad, señalándose la ruptura de varios pellets hasta en tres partes, por lo que este grupo mostró un bajo índice de friabilidad



Fig. 3. Pellets enteros pertenecientes al grupo F2, después de realizar el ensayo de friabilidad, en este grupo se obtuvo un mayor índice de friabilidad

DISCUSIÓN

La presentación de los resultados se inicia con la caracterización de las propiedades de la materia prima, seguida por la evaluación de la friabilidad y poder calorífico de los *pellets*.

Una de las propiedades físico-químicas de mayor importancia en la fabricación de *pellets* de aserrín, es el contenido de humedad de la materia prima. El agua es necesaria en el proceso de peletización porque asegura el desarrollo de las fuerzas intermoleculares; de esta manera, actuaría como función de selladora y como un lubricante. Sin embargo, un alto contenido de humedad puede ser adverso ya que afecta la calidad de los *pellets* (disminución de poder caorífico)¹⁰. Además, el contenido óptimo de humedad de la materia prima para la fabricación de *pellets*, dependerá del tipo de biomasa. Diversas investigaciones postulan que el contenido óptimo de humedad para la densificación de biomasa tipo aserrín es entre 6 y 12%¹⁶, por lo cual la materia prima empleada en el presente estudio está dentro del

rango permisible (Tabla 2). Los desechos lignocelulósicos como maíz seco, tienen un rango de humedad entre 10 -15%, mientras que en la pajilla de trigo se identificó que su rango óptimo del contenido de humedad oscila, para la conformación de *pellets* energéticos¹⁷, entre un 10 -20 %.

Otro aspecto relacionado a la materia prima empleada en la conformación de *pellets* energéticos, es el contenido de lignina. Los altos niveles de lignina conllevan una mayor durabilidad del *pellet*; de hecho, la lignina actúa como una especie de “pegamento” que junta o enlaza a todo el producto^{16,17}.

Diversos estudios reportan una correlación ligera entre el contenido de lignina y la durabilidad del *pellet*. Generalmente, un almacenamiento largo en volumen (granel) deriva a una degradación microbiana de las fracciones de hemicelulosa y celulosa de la materia prima, quedando por lo tanto en mayor concentración la lignina. Es por ello que a un mayor tiempo de

almacenamiento existe un alto porcentaje de este componente¹⁴.

Con respecto a la evaluación del índice de friabilidad y poder calorífico, éstos se tomaron en cuenta para la respectiva medición pues son factores que indican, principalmente, la calidad de los *pellets*. El primero está relacionado con la durabilidad de los *pellets* mientras que el poder calorífico, es la cantidad de energía capaz de producirse a través del proceso de combustión¹⁵.

La prueba de friabilidad se realizó adoptando el método ETSI de Montes, el cual, según los autores, consiste en arrojar los *pellets* a una superficie cerámica, registrando la cantidad de fragmentos que se generen por el impacto¹⁵.

Como se puede apreciar en la Tabla 2, la friabilidad se presentó entre un rango de 0,86- 0,94. Ésta se mantuvo, estableciendo así resultados máximos y mínimos de friabilidad, respectivamente. Se acepta como “buena” una resistencia al golpeteo (friabilidad) con un valor de 0,93 o superior; esto solo se presentó en el grupo F2 cuyos parámetros de proceso de densificación fueron tiempo de relajación 0 segundos y presión de compactación 90 MPa, obteniendo un valor o índice de friabilidad de 0,94. Esto indica que al arrojar 100 *pellets* al suelo cerámico se obtienen sólo 6 *pellets* rotos en 2 partes. Tales resultados, pueden catalogarse como índices mayores de friabilidad en contraste con otros trabajos reportados donde se empleó *pellets* mixtos, es decir, se utilizaron como materias primas: aserrín y carbonilla. Dichos elementos alcanzaron un máximo de friabilidad de 0,93 solo cuando los *pellets* estuvieron conformados por un 47,5 % de carbonilla. A medida que el porcentaje de este material iba en aumento, disminuía el índice de friabilidad, debido a que es el

aserrín quien posee la propiedad ligante o adhesiva (por entrelazamiento de las fibras), lo cual torna a los *pellets* que posean mayor concentración de este material, significativamente, más resistentes al golpeteo^{14,15,17}.

En relación al poder calorífico, los *pellets* están en función del material de procedencia. Si estos están compuestos por restos de madera y corteza sin aditivos, el poder calorífico será el de la madera que proviene (Tabla 2 y 4). Si el *pellet* incluye restos de lijado, el poder calorífico es menor pues aparecen los áridos de la lijadora¹³.

Por otro lado, algunos autores señalan que es posible fabricar *pellets* mezclando 50% de carbón vegetal y 50% de aserrín, para obtener, así, un poder calorífico de 5700 kcal/kg aproximadamente¹². Otros estudios reportan valores de 5381,2 kcal/kg cuando utilizan mezclas de carbonilla y aserrín (proporción 1: 1). Sin embargo, los *pellets* producidos de manera mixta que no sean de origen lignocelulósico presentan bajos índices de friabilidad (menos resistentes al golpeteo)¹⁵. Finalmente, el proceso de densificación de la madera, al constituir un procedimiento de compactación o compresión de la biomasa residual (aserrín, virutas, leñas), permitió aumentar la densidad y modificar las propiedades físico-químicas estudiadas porque las altas temperaturas experimentadas en los procesos de densificación, causaron la fusión parcial de los constituyentes de la materia prima¹⁷. Esta fusión de los constituyentes facilitó la difusión molecular entre partículas a temperaturas elevadas. Además, los constituyentes solidificados fusionados, lograron formar puentes sólidos. Estos puentes sólidos son los que determinan, principalmente, algunas diferencias en las propiedades de los productos finales¹⁷.

CONCLUSIONES

Los parámetros óptimos en el proceso de densificación de material lignocelulósico fueron: Tiempo de relajación: 0 segundos y presión de compactación 90 MPa, obtenido un índice de friabilidad de 0,94 y poder calorífico superior de 4098,6 Kcal/Kg.

La densidad promedio de los *pellets* de los diferentes grupos experimentales fue mayor que el de la materia prima (1,12 y 0,52 Kg/m³ respectivamente).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Callaghan TV, Lawson GJ, Scott R. The potential of natural vegetation as a source of biomass energy. Comision of the European Communities X. *Energy from Biomass*. 2005. pp. 3-11.
2. Bartolelli V, Schenone G, Chiara A. Caldaia a biomasse per impianti di riscaldamento domestic. Progetto RES & RUE dissemination. *Italian Biomass Association*. 2006. 40pp.
3. Coratella C, Riva G. Nuovo ruolo delle fonti rinnovabile e potenziale dell agricoltura nazionale. Associazione Italiana de Ingegneria Agraria. In: VI *convegno nazionale de Ingegneria Agraria*, 2004. pp. 3-11.
4. Berndes G, Hoogwijk M, Van Den Broek R. The contribution of biomass in the future global energy supply. *Biomass and Bioenergy*. 2005. 25(1): 1-28.
5. Comunita Europee: Verso una strategia europea di sicurezza dell aprovvigionamento energetico. Libro Verde. Disponibili en: http://europa.eu.int/comm/energy_transport/it/lpi_lv_it1.html, 2003.
6. Comitato Termotecnico Italiano. Progetto Energia dall'agricoltura – Pellet. Programma Nazionale Biocombustibili - PROBIO. *Energia e Ambiente*. 2004.
7. Comitato Termotecnico Italiano. Biocombustibili solidi caratterizzazione del pellet a fini energetici. *Energia e ambiente*, 2004.
8. Moran JC, Granata E, Porteiro J, Míguez JL. Experimental modelling of a pilot lignocellulosic pellets stove plant. *Biomass and Bioenergy*. 2004, 27(69): 577-583.
9. Balsari P, Bodria L, Castelli P. Sistemi energetici integrati in agricoltura: tre esempi di studio di realta diverse, *Progetto finalizzato meccanizzazione agricola*. 2003. 44pp.
10. Benvenuti L, Cavalli R. Metodologia per la determinazione rapida dell umidita del foraggio in un centro consortile di essiccazione. *Rivista de Ingegneria Agraria*, 2003. 25(1): 50-55.
11. Kjällstrand J , Olsson M. Chimney emissions from small-scale burning of pellets and fuelwood—examples referring to different combustion appliances. *Biomass and Bioenergy*. 2006, 27(6): 557-561.
12. Eskilsson D, Rönnbäck M; Samuelsson J, Tullin, C. Optimisation of efficiency and emissions in pellet burners. *Biomass and Bioenergy*. 2006, 27(6): 541-546
13. Henning A. Social anthropological and interdisciplinary research on the conversion of electrically heated single family houses to heating by combined pellet–solar systems. *Biomass and Bioenergy*. 2006 ,27 (6): 547-555.
14. Días J, Costa M, Azevedo JLT. Test of a small domestic boiler using different pellets. *Biomass and Bioenergy*. 2005, 27(6): 531-539.
15. Soto G, Núñez M. Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrín de *Pinus radiata* (D. Don), como material aglomerante. *Maderas. Ciencia y tecnología*. 2008. 10(2): 129-137.
16. DIN. Pruebas en combustibles sólidos y líquidos. Determinación del poder calorífico superior mediante bomba calorimétrica y cálculo del poder calorífico inferior. Parte 1: principios, aparatos, métodos. **DIN 51900-1**. 2000.
17. Marcos F, Camps M. Biocombustibles Sólidos Densificados. Madrid, España. Mundi-prensa. 2003. 154p.