

Evaluación físico-mecánica de la madera de *pinus greggii* y elaboración de pellets

Physical-mechanical evaluation of the wood of *pinus greggii* and elaboration of pellets

José Manuel Moreno Santillán¹, Julio César Ríos-Saucedo², Jesús Manuel Rascón Ayala¹, José de Jesús Graciano Luna³, Artemio Carrillo Parra⁴, Luis Manuel Valenzuela Nuñez^{5*}.

¹ Universidad Tecnológica De La Tarahumara. Belisario Domínguez 23, Centro, 33180 Guachochi, Chih.

² INIFAP- Campo Experimental Valle del Guadiana. km 4.5 Carr. Durango-El Mezquital, Durango, Dgo. México. C. P. 34170.

³ Tecnológico Nacional de México – Campus Instituto Tecnológico de El Salto. Mesa del Tecnológico S/N, Forestal, 34942 El Salto, Dgo.

⁴ UJED ISIMA. Boulevard del Guadiana 501, Ciudad Universitaria, 34120 Durango, Dgo.

⁵ UJED Facultad de Ciencias Biológicas. Laboratorio de Biología y Ecología Forestal. Av. Universidad S/N. Fracc. Filadelfia. 35010 Gómez Palacio, Dgo.

*Autor para correspondencia: luisvn70@hotmail.com

RESUMEN

El fomento al desarrollo de plantaciones forestales comerciales, se ha identificado como una estrategia fundamental para incrementar la producción forestal del país y contribuir a reducir el déficit del abasto del consumo aparente de materias primas forestales, al mismo tiempo que se generan alternativas de desarrollo sustentable en las regiones rurales del país. Según el listado arrojado por SEMARNAT las plantaciones forestales comerciales que más se están utilizando en el estado de Durango son las del *Pinus greggii*. Con el propósito de evaluar las propiedades físico-mecánicas de la madera de *Pinus greggii* y utilización de los residuos para la elaboración de pellets de una plantación de 25 años en el municipio de Durango, se seleccionaron 3 individuos para retirar residuos de ramas, con el fin de elaborar pellets, se evaluó el contenido de humedad, contenido de cenizas, contenido de material volátil, carbón fijo y poder calorífico, se tomaron 4 muestras a distintas alturas del fuste de cada árbol, en estas muestras se determinó la flexión estática, compresión paralela, compresión perpendicular, tensión perpendicular, desgarre, cizalla y dureza. Los análisis inmediatos del *Pinus greggii* presenta características físico-químicas ideales para la elaboración de pellets y briquetas. Después de su acondicionamiento, el contenido de humedad fue inferior al 10%, el contenido de cenizas <0.55 %, el material volátil de la biomasa inferior al 90%, y el poder calorífico superior a 20.00 MJ kg⁻¹.

Palabras clave: Bioenergía, biocombustible, briquetas, pellets, plantaciones forestales.

SUMMARY

The promotion of the development of commercial forest plantations has been identified as a key strategy to increase the country's forest production and contribute to reducing the shortfall in the supply of apparent consumption of forest raw materials, at the same time that sustainable development alternatives are generated in the rural regions of the country. According to the list released by SEMARNAT the commercial forest plantations that are most used in the state of Durango are those of the *Pinus greggii*. In order to evaluate the physical-mechanical properties of *Pinus greggii* wood and to use the residues for the production of pellets from a 25-year plantation in the municipality of Durango, three individuals were selected to remove residues from branches, for the purpose of producing pellets, the moisture content, ash content, volatile material content, fixed carbon and calorific value were assessed, four samples were taken at different shaft heights from each tree, static bending was determined in these samples, parallel compression, perpendicular compression, perpendicular tension, tear, shear and hardness. The immediate analyses of *Pinus greggii* have physico-chemical characteristics ideal for the production of

pellets and briquettes. After conditioning, the moisture content was less than 10%, the ash content <0.55%, the volatile biomass material less than 90%, and the calorific value greater than 20.00 MJ kg⁻¹.

Key words: bioenergía, biofuel, briquets, pellet, forest plantations.

INTRODUCCIÓN

La superficie forestal mundial se reduce cada año en 13 millones de hectáreas a causa de la deforestación, aunque el ritmo de pérdida neta disminuye gracias a las plantaciones y la expansión natural de los bosques. Su evaluación proporciona una actualización completa sobre el uso y la gestión de los bosques y demuestra que mientras hay lugares que experimentan progreso, en muchos otros los recursos forestales están siendo destruidos o degradados a un ritmo alarmante (Cruz, 2018)

En la entidad se han establecido plantaciones forestales a partir de 1960, por diferentes dependencias oficiales y con especies del género *Pinus*, *Eucalyptus* y *Cupressus* entre los más importantes, con objetivos que van desde la recuperación hasta la protección de áreas con suelos degradados, en lugares donde se han abandonado los cultivos agrícolas, zonas de bosques empobrecidos, lugares de esparcimiento cercanos a la población y en cuencas con fines de protección (Soto & Núñez, 2008). El fomento al desarrollo de plantaciones forestales comerciales, se ha identificado como una estrategia fundamental para incrementar la producción forestal del país y contribuir a reducir el déficit del abasto del consumo aparente de materias primas forestales, al mismo tiempo que se generan alternativas de desarrollo sustentable en las regiones rurales del país (Cruz, 2018).

Según el listado arrojado por SEMARNAT las plantaciones forestales comerciales que más se están utilizando en el estado de Durango son las del *Pinus greggii* (Cruz, 2018). El estado de Durango, como entidad forestal posee el potencial necesario para cumplir con los requerimientos que sus actividades de industria forestal le demandan, además cuenta

con suelos de alto índice de sitio; cabe mencionar que se cuenta con más de 50,000 ha con potencial para establecer plantaciones comerciales, y aunado a las prácticas de manejo forestal más convenientes para PFC, se logrará disminuir turnos de los bosques duranguenses destinados al aprovechamiento maderable (Cruz, 2018).

El término biocombustibles hace referencia a aquellas fuentes de energía obtenidas de la biomasa. La biomasa se refiere al material orgánico de origen biológico, como plantas o desechos metabólicos (estiércol), este concepto por ende incluye productos de origen vegetal y animal. El aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales para la producción de bioenergía es una opción interesante, sin embargo la biomasa como tal presenta características que la hacen poco competitiva contra los combustibles fósiles como más bajos rendimientos energéticos, mayores costos de producción, contenidos de humedad muy variados, baja densidad energética y las necesidades de acondicionamiento o transformación para su utilización, por lo que una de las opciones más favorables es su transformación a biocombustibles sólidos densificados como lo son los pellets o las briquetas (Herguedas, 2012).

Los pellets son pequeños cilindros elaborados de biomasa de origen natural, principalmente aserrín, virutas y otros agrocombustibles, sometida a un proceso de compactación. Los pellets se caracterizan por presentar un contenido de humedad no superior al 10% y un poder calorífico cercano a 4,300 kcal/kg.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle del Guadiana, ubicado en carretera El Mezquital, Durango Km 4, Camino Real, C.P. 34170 Durango, Dgo.

Recopilación de información de plantaciones comerciales en Durango.

Se realizó una visita a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) delegación Durango, donde se revisaron las bases de datos de los registros de todas las plantaciones forestales comerciales en el estado de Durango.

Material vegetal utilizado.

Se estudió una plantación de 25 años de edad de la especie de *Pinus greggii* ubicada en el INIFAP, Campo Experimental Valle del Guadiana de la cual se seleccionó tres individuos para realizar las pruebas físicas y mecánicas.

Selección de material del arbolado.

Para realizar el seleccionado del árbol se cortaron trozas de 1.8 metros a lo largo del fuste, también se separaron ramas gruesas, medianas y finas con hojas, por último, se sacaron rodajas de cada troza seleccionada.

Secado de la biomasa.

Para el secado de la biomasa se realizaron pequeños tercios de ramas y follaje, estos se metieron a estufa de secado hasta llegar a un contenido de humedad del 10%, para la preparación de la biomasa, se llevaron al laboratorio del ISIMA, donde se realizó la molienda, se trituraron en un molino de laboratorio de la marca Retsch modelo As 200 Basic a 1500 revoluciones por minuto, después se tamizaron haciendo uso de una malla del calibre 100,60 y 40, el material se guardó en bolsas plásticas para evitar la absorción de humedad.

Pre tratamientos de biomasa.

Para las Briquetas de 80 °C, se utilizó 40 gramos de aserrín para este proceso, posteriormente se introdujeron en la briquetadora a una temperatura de 80 °C

durante 15 minutos donde la presión era de 200 bares, la presión siempre tiene que ser constante ya que las briquetas se pueden reventar. Después se realizó la caracterización de las briquetas que consiste en sacar el diámetro, longitud y peso de cada una de estas en cuanto salen de la briquetadora. Se caracterizaron de nuevo a los siete días, obteniendo su diámetro longitud y peso, secándose a temperatura ambiente esto para saber cuánto se contrae. En las Briquetas a 100 °C, se utilizó 40 gramos de aserrín para este proceso, posteriormente se introdujeron en la briquetadora a una temperatura de 100 °C durante 15 minutos donde la presión era de 200 bares, después se categorizaron, obteniendo el diámetro, longitud y peso en cuanto salen de la briquetadora. Se caracterizaron de nuevo las briquetas obteniendo su diámetro longitud y peso después de siete días secándose a temperatura ambiente.

Dureza de las briquetas.

Se eligieron 5 briquetas de cada una de las temperaturas para determinar su dureza, se lanzaron tres veces de una altura de 1.80 metros, por último, se registró su longitud y su peso.

Pellets

Los pellets se elaboraron en la Peletizadora Mill modelo ZSLP – R300 con capacidad de 250 – 350 kg/h de matriz plana mediante un proceso de densificación y auto aglomeración. Para determinar la dureza de los pellets se eligieron 20, estas se lanzaron tres veces de una altura de 1.80 metros, cada lanzamiento se hacía con la briqueta más grande, por último, se registró su longitud y su peso. Se utilizó un vernier digital para medir el diámetro y longitud de 20 muestras de pellets, también se registró el peso de cada pellet haciendo uso de una balanza digital Ohaus.

La densidad a granel se determinó con un vaso de aluminio de un volumen de 600 ml, se llena el vaso hasta el tope después se le dan tres golpes se pesa y se registra el peso esto se realiza tres veces por cada tratamiento

Análisis inmediatos de biomasa a granel, briquetas y pellets.

El contenido de humedad se determinó de acuerdo a la norma UNE-EN14774-3, siguiendo los pasos de la norma (UNE-EN14774-3, 2009). En este proceso se utilizaron tres muestras del aserrín del *Pinus greggii*, el peso inicial de los crisoles se determinó a una temperatura de $105 \pm 2^\circ\text{C}$ durante dos horas en una estufa de secado. El contenido de humedad de la biomasa se determinó colocando un gramo de la muestra sobre un crisol en una estufa de secado a una temperatura de $105 \pm 2^\circ\text{C}$ en un tiempo de tres horas y se dejó reposar el material en un desecador a temperatura ambiente durante cinco minutos, después se registró el peso, para finalizar el crisol se colocó en la estufa a la misma temperatura durante una hora y se registró su peso.

El contenido de volátiles se determinó de acuerdo a la norma UNE-EN15148. El primer paso fue colocar los crisoles con tapas en la mufla a una temperatura de $900 \pm 10^\circ\text{C}$ durante siete minutos. Se quitaron los crisoles de la mufla y se dejaron enfriar a temperatura ambiente en un desecador para registrar el peso (crisol + tapa). Se añadió un gramo de muestra en cada crisol con tapa y se colocaron en la mufla a una temperatura de $900 \pm 10^\circ\text{C}$ durante siete minutos, para finalizar se dejaron enfriar y se registró el peso total de acuerdo a (europea, 2010).

El contenido de cenizas se determinó de acuerdo a la norma UNE-EN 14775. Se colocaron crisoles vacíos en una mufla a una temperatura de $550 \pm 10^\circ\text{C}$ durante una hora. Después se colocaron en un desecador para enfriarlos a temperatura ambiente, una vez fríos se registró su peso. Posteriormente se colocó un gramo de muestra en cada crisol y se ingresaron a la mufla a una temperatura de $250 \pm 10^\circ\text{C}$ durante una hora, enseguida la temperatura de la mufla se elevó a $550 \pm 10^\circ\text{C}$ durante dos horas, para finalizar los crisoles se dejaron enfriar y se registró su peso.

La determinación del poder calorífico superior se realizó en un calorímetro Isoperibólico semiautomático LECO AC-600. Para este proceso se utilizó la criba del número 100 (0.1498 mm) para obtener el tamaño de partícula adecuado. El material obtenido se guardó en bolsas plásticas para evitar la absorción de humedad. El calorímetro se calibró con pastillas de ácido benzoico (poder calorífico conocido), después se colocaron tres muestras de 0.10 g en crisoles de níquel, se introdujeron en la bomba calorimétrica, este proceso dura aproximadamente 15 minutos con cada crisol.

La flexión estática es la que ofrece las maderas al romperse, cuando son sometidas a cargas que actúan perpendicularmente a su eje de apoyo. Para obtener dicha prueba las probetas tienen que tener las siguientes dimensiones: largo 30 cm, altura 8.05 cm y base 8.05 cm, posteriormente se colocan los aditamentos para poder realizar el ensayo, ya que se tienen los aditamentos de la maquina se pasa a medir la base y la altura de la probeta (cm), así mismo también se mide la separación entre apoyos donde se colocara la probeta, después se pasa a colocar la separación entre apoyos es decir donde descansara la probeta ya que está todo listo se coloca la probeta y se calibra la velocidad del ensayo por medio de una computadora que está conectada a la maquina a una velocidad de 2.5 mm/min, ya que se realiza el ensayo se pasa a registrar la carga máxima del ensayo.

La compresión paralela ocurre cuando una fuerza actúa de manera paralela a las fibras y corresponde a la resistencia que opone una viga a una carga aplicada en el mismo sentido de la dirección de la fibra. Las dimensiones que tiene que tener la probeta para realizar este ensayo son 20.32 cm de largo 8.05 cm de altura y 8.05 cm de base. Los pasos para realizar esta prueba son colocar los aditamentos, ya que están colocados volver a medir la probeta y medir el aditamiento donde ira colocada la probeta despues se calibra la maquina a una velocidad de 0.6 mm/min dar

inicio al ensayo y posteriormente registrar la carga maxima del ensayo.

Consiste en determinar la capacidad de sustentar las fuerzas que tienden a aplastar las fibras, unas contra otras; es un ensayo que no presenta carga máxima, Este ensayo es importante porque nos proporciona los valores que determina la aplicación de la madera en durmientes y tijerales de construcción. Las medidas de a probeta para realizar este ensayo son de 15.24 cm de largo, 8.05 cm de altura y 8.05 cm de base. Para poder realizar estos ensayo es necesario colocar los aditamientos, ya que los aditamientos son colocados se mide de nuevo las partes de la probeta, despues se coloca la placa (aditamiento) enseguida la probeta ya que esta listo se pasa a calibrar la maquina a una velocidad de 0.3 mm/min, se inicia el ensayo y despues se registra la carga maxima.

Cuando se habla de tensión perpendicular a las fibras, sucede todo lo contrario de la tensión paralela, esto es, que a este esfuerzo la madera presenta su menor resistencia (de 20 a 30 veces menor) ya que aquí se produce una separación de fibras, mientras que en la tensión paralela se requiere el rompimiento de ellas.

Las dimensiones de la probeta son de 8.05 cm de largo 8.05 cm de altura y 8.05 cm de base. Cuando se tienen esas dimensiones, se colocan los aditamientos para realizar tension perpendicular ya que tienes los aditamientos (mordazas) coloca la probeta en las mordazas, se calibra la maquina a una velocidad de 2.5 mm/min se da inicio al ensayo y ya que se termine, se registra su carga maxima.

La prueba consiste en separar las fibras de la madera aplicando fuerzas de tensión perpendicular en un extremo de la pieza. Para este caso se calcula únicamente el módulo de ruptura, sólo que en vez de utilizar el área en la relación se substituye por el ancho de la pieza en donde se pretende producir la falla o rajado. Las dimenciones de la probeta para

realizar esta prueba son 8.05 cm de ancho, 8.05 cm de altura y 8.05 cm de base, ya que tienes las medidas se colocan los aditamientos para desgarre (mordazas), se coloca la probeta en las mordazas, ya que esta la probeta en la mordaza se calibra la maquina a una velocidad de 2.5 mm/min se da inicia al ensayo y para finalizar se registra la carga maxima.

Consiste en medir la capacidad que tiene la madera para resistir fuerzas que tienden a producir deslizamiento de un plano interno de la madera, sobre su adyacente. Los esfuerzos de corte tienen lugar en la mayoría de los usos de la madera y se clasifican de acuerdo a la dirección en que la fuerza actúa con respecto a los planos estructurales. Los resultados de este ensayo pueden ser utilizados en uniones de vigas de soporte, travesaños, tijerales, etc. Las dimensiones de la probeta son base 5.08 cm de altura 5.08 cm, enseguida se colocan los aditamientos para el ensayo de cizalla, ya que esta los aditamientos se vuelve a medir la probeta se registra y se coloca en el aditamiento, enseguida se calibra la maquina a una velocidad 0.6 mm/min, se da inicio al ensayo y al finalizar se registra la carga maxima.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según el Padrón de Plantaciones forestales comerciales de *Pinus greggii* en el estado de Durango, del periodo 2010-2018, Nuevo Ideal es el municipio que cuenta con mayor superficie de *Pinus greggii* con 10078.00 ha y un volumen estimado de 2283456.65 m³, seguido de Canatlán con una superficie de 10047.53 ha y 2226796.33 m³. El municipio con menor superficie y volumen estimado es El oro con 18.95 ha y un volumen de 45875 m³, Guanaceví con 4.00 ha y 2416 m³.

Tabla 3. Padrón de Plantaciones forestales comerciales de *Pinus greggii* en el estado de Durango, del periodo 2010-2018.

Municipio	Superficie (ha)	Volumen estimado (m3)	Nombre de la especie
Canatlán	10047.53	2226796.33	<i>Pinus greggii</i>
Coneto de comonfort	258.96	100079.90	<i>Pinus greggii</i>
Durango	9674.52	2055747.82	<i>Pinus greggii</i>
El Oro	18.95	45875	<i>Pinus greggii</i>
Guanaceví	4.00	2416	<i>Pinus greggii</i>
Nombre de Dios	9015.27	1294664.19	<i>Pinus greggii</i>
Nuevo Ideal	10078.00	2283456.65	<i>Pinus greggii</i>
Poanas	195.6	79538.52	<i>Pinus greggii</i>
Santiago Papasquiaro	8449.7478	971412.432	<i>Pinus greggii</i>

La friabilidad de los pellets presento un promedio de 40.25 % siendo este más bajo que el de las briquetas, en comparación con el estudio de elaborados de carbonilla utilizando aserrín de pino como aglutinante (Soto & Núñez, 2008), mencionan que la friabilidad de los pellets se mantuvo constante en las proporciones de 10% a 45% de carbonilla, indican que se puede considerar buena la resistencia al golpeo aquella con un valor de 0.93 o superior. Indicando que de 100 pellets arrojados al suelo solo 7 se rompieron en dos partes. Otro estudio similar al nuestro produjo pellets a partir de aserrín de *Cedrelinga catanaeformis* (Seijas-Velásquez, 2014) encontrando índices de friabilidad de 86 a 94%, determinaron que al arrojar 100 pellets al suelo se obtienen 6 pellets rotos en dos partes.

La densidad básica encontrada en los pellets es de 0.0012 g/cm³, En otro estudio de (Atuesta & Sierra, 2015), encontraron que los pellets elaborados con una porción de 50/50 carbón bituminoso/madera, tienen grandes ventajas en cuanto a densidad a granel (933 kg/m³), mencionan que las mezclas de biomasa lignocelulósica con carbones pobres permite combinar las propiedades positivas de aglomeración de la madera y el buen poder calorífico del carbón, sin embargo, consideran que se debe tomar en cuenta el impacto

ambiental causado por los altos contenidos de azufre y nitrógeno en las cenizas. Los resultados muestran que los pellets más pequeños tienen la mayor resistencia al desgaste por el flujo de aire (Correa-Méndez, y otros, 2014).

Los análisis realizados al aserrín de la biomasa a granel muestran un bajo contenido de humedad y cenizas de 5.75 y 5.08% respectivamente, el carbón fijo presente es de 18.15 %, el material volátil del aserrín se presenta muy elevado 76.76 %, de acuerdo con los análisis proximales (contenido de humedad, volátiles, carbono fijo y poder calorífico). Los resultados arrojados de este estudio muestra que el promedio del contenido de humedad de las briquetas fue de 6.86 siendo mayor al de los pellets de este mismo estudio que fue de 5.82, así mismo el promedio más alto de contenido de cenizas es de las briquetas de 5.13 % y el de los pellets de 4.55 %, en los elementos volátiles hubo una diferencia ya que el que se presentó superior fue los pellets con un 64.49 % y las briquetas 39.08 %, también en el carbón fijo se encontró diferencia ya que el que acumula más son las briquetas con un 55.78 % y los pellets un 30.94 %.

Los resultados de los análisis proximales indican que la biomasa del *Pinus greggi* es ideal para la fabricación de pellets y briquetas por su bajo contenido de humedad lo que favorece la combustión de los pellets y briquetas. El combustible ideal es el que presenta un bajo contenido de humedad ya que este afecta de manera negativa el poder calorífico y se requiere más cantidad de energía para evaporar el agua. Según estudio de contenido de humedad en pellets de paja de cebada aglomerada con aserrín de pino. (Serrano, Monedero, Lapuerta, & Portero, 2011) menciona que la mayor durabilidad de los pellets fue de aquellos que presentaron una humedad de 6-8%, el grado de aglomeración de los pellets y el contenido de humedad aumentaron la durabilidad mecánica y la longitud de los pellets. En relaciones a las mezclas, estos autores reportaron que al 2, 7 y 12% (en peso) con una humedad del 12% se mejora la durabilidad mecánica de los pellets.

En relación a los resultados observados se puede apreciar que las cenizas en la especie estudiada son bajas con un 5.08 % de concentración, estos valores pueden ser favorables a las calderas incrementado su vida útil, estudios relacionados como (Correa-Méndez, y otros, 2014), estudiaron y evaluaron las características fisicoquímicas de aserrín y viruta de *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus*, reportaron valores de contenido de cenizas de $0.26 \pm 0.3\%$ y $0.34 \pm 0.3\%$ los cuales cumplen con los estándares para fabricar pellets y briquetas, mencionan que el bajo contenido de cenizas y los altos contenidos de Ca y Mg favorecen el punto de fusión de la misma, adicionalmente señalan que un alto contenido de cenizas puede afectar el equipo de combustión y a los usuarios de uso residencial por aumentar los procesos de limpieza.

Los resultados de los análisis proximales a la biomasa de *Pinus greggi* presenta un alto porcentaje de elementos volátiles con un promedio de 76.76 %. Este alto porcentaje de volátiles proporciona una mayor capacidad térmica en los procesos de combustión y que el tiempo de duración de la quema del combustible se ve influenciado por el valor de los materiales inorgánicos, por esto es importante considerar que altos porcentajes de materiales volátiles favorecen una combustión de rápido encendido, pero con poca duración. En estudios similares de elaboración de pellets con aserrín de *Quercus pirenaica* de ramas de diferentes diámetros reportaron valores medios de 77.45% a 81.75%, estos autores encontraron una tendencia en el aumento de la cantidad de material volátil cuando el diámetro de las ramas era mayor. El alto contenido de volátiles lo consideran adecuado debido a la facilidad para encenderse y por mejorar el proceso de combustión. (Miranda, Arranz, Rojas, & Montero, 2009).

Los resultados arrojados por los análisis proximales de la biomasa a granel presentan un poder calorífico de 21.2348 Mg/kg, las briquetas presentan de 23.14 Mg/Kg y 21.41 Mg/Kg los pellets presentan un poder calorífico de 21.73 Mg/Kg, siendo el de las briquetas el más alto y favorable ya que la cantidad de energía desprendida al momento de la combustión es buena, Comparando con otros valores de residuos agrícolas registrados por (Higman & Burgt, 2013) los valores de este estudio fueron mayores e ideales para la elaboración de pellets, en la investigación reportan valores para pellets de aserrín 20.50 MJ/kg.

Las briquetas presentan el dato más alto de poder calorífico siendo de 23.14 Mg/Kg esto se debe a que se utilizaron temperaturas no muy altas, pero si eliminaron el contenido de

humedad siendo este un factor para que el poder calorífico no se vea afectado negativamente. El poder calorífico de las briquetas fue superior al de los pellets, la diferencia es el resultado de la pérdida de material volátil que presentan los pellets durante la densificación a las altas temperaturas. Según (Trejo, 2005), evaluó palma de aceite donde se reporta el mejor valor de 18.42 MJ/kg, se piensa que el mayor valor del poder calorífico de las muestras evaluadas en esta investigación fue por el contenido de humedad más bajo y por la mezcla con aserrín de pino.

El promedio que arrojo de poder calorífico fue de 21.73 Mg/Kg. Para incrementar el poder calorífico de los pellets de aserrín, se ha considerado la combinación con residuos de más alto poder calorífico, a la fecha se han investigado los siguientes: Carbón mineral y vegetal, residuos agrícolas, residuos de podas de jardines, residuos industriales. La mezcla de residuos maderables de la industria alimenticia, con residuos forestales puede ser considerada para aumentar el poder calorífico de los pellets (Atuesta & Sierra, 2015).

Los valores de flexión estática que presto cada uno de las trozas son similares siendo el de la troza número uno el que presenta un valor más alto con 747.89 Kgf/cm³ y el menor es el de la troza dos con 461.23 Kgf/cm³, estas muestras presentan un promedio de contenido de humedad del 11.83 %. Las trozas 3 y 4 presentan valores de 586.67 Kgf/cm³ y 476.84 Kgf/cm³ respectivamente (Figura 1).

La flexión estática radial que presentan las trozas 1 y 2 son similares 731.17 Kgf/cm³ y 743.06 Kgf/cm³ siendo la troza dos la más alta de las cuatro las trozas 3 y 4 presentan también poca diferencia ya que la troza 3 presenta 620.99 Kgf/cm³ siendo esta la más

baja de las cuatro y la troza 4 638.73 Kgf/cm³ (Figura 1).

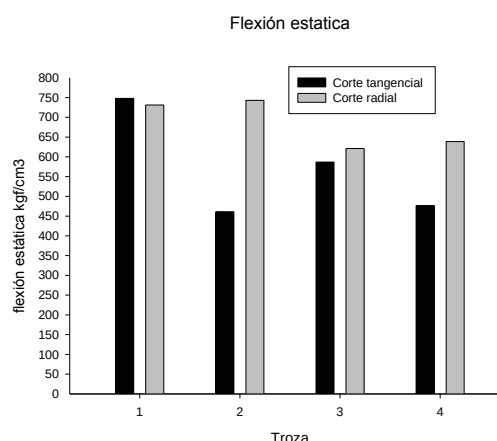


Figura 2. Flexión estática de trozas de *Pinus greggii*.

La compresión paralela más alta de las cuatro fue la de a troza 1 ya que este arrojo un valor del 431.57 kgf/cm², seguida de la troza número 4 con un valor arrojado de 392.84 kgf/cm² la troza con el valor más bajo fue la numero 2 con un valor de 309.79 kgf/cm² (Figura 2). La compresión paralela que presenta más es la de la troza número 3 con un valor de 393.56 kgf/cm² seguido de la troza número 1 con un valor de 363.97 kgf/cm² la troza que menos valor presenta es la troza 4 con 300.32 kgf/cm² todas estas con un promedio del contenido de humedad del 12.15 % (Figura 2).

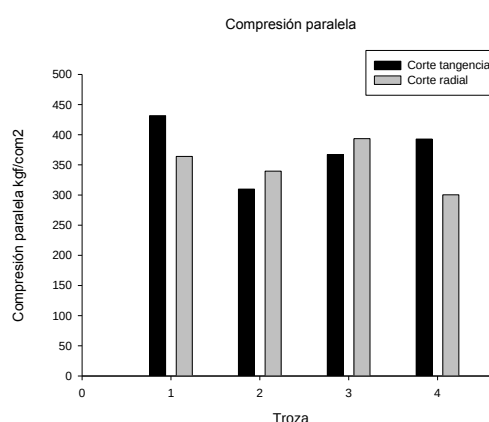


Figura 2. Compresión paralela de cuatro trozas de *Pinus greggii*.

La compresión perpendicular en el corte tangencial que presenta más es la troza número 3 con un valor de 11.6 kgf/cm² seguida de las trozas 1 y 2 con valores de 10.98 kgf/cm² y 10.49 kgf/cm² la que menos presenta es la troza 4 arrojando un valor de 10.37 kgf/cm².

Este estudio arrojó como valor más alto en Compresión perpendicular radial 11.47 kgf/cm² que lo obtuvo la troza 4 el valor con menos lo presenta la troza 2 con un valor de 10.5 kgf/cm² presentando todas las trozas un promedio del contenido de humedad del 11.80 5 %.

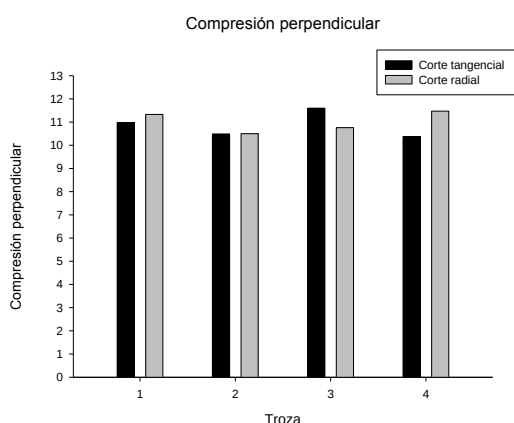


Figura 3. Compresión perpendicular de cuatro trozas de *Pinus greggii*.

La tensión tangencial que presenta las trozas 2,3 y 4 son similares con 30.52 kgf/cm², 31.61 kgf/cm² y 28.87 kgf/cm² la que más presenta en este estudio fue la de la troza 1 con un valor de 46.89 kgf/cm² la troza que más presenta es la troza 4 con un valor de 28.87 kgf/cm²

La tensión radial presente en este estudio fue similar entre las trozas con muy poca diferencia con excepción de la troza 1 que fue la que más obtuvo con un valor de 36.82 kgf/cm² y la que menos presentó fue la troza 4 con un valor de 27.08 kgf/cm².

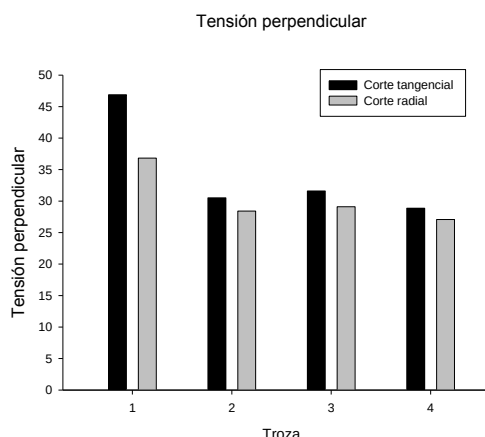


Figura 4. Tensión perpendicular de cuatro trozas de *Pinus greggii*.

El corte tangencial con mayor presencia en este estudio fue el de la troza 1 con un valor de 49.21 kgf/cm², seguido por la troza 2 con un valor de 45.18 kgf/cm², las trozas 3 y 4 fueron las que menos presenta con valores de 39.77 kgf/cm² y 37.24 kgf/cm² siendo este último el más bajo de los 4.

El corte radial que presenta estas trozas fue de 1 y 2 de 32.42 kgf/cm² y 36.19 kgf/cm² las trozas 3 y 4 35.67 kgf/cm² y 33.6 kgf/cm² siendo la troza 2 la que mayor valor presenta y 1 la que menos valor arroja.

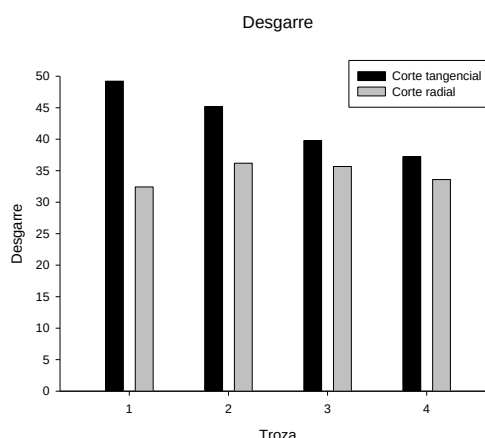


Figura 5. Desgarre de cuatro trozas de *Pinus greggii*.

En esta prueba tangencial las trozas que obtuvieron más valor fueron la troza 1 y 4 con valores de 85.82 kgf/cm² y 81.61 kgf/cm² respectivamente, las que menos presentaron

fueron las trozas y 3 con valores de 47.6 kgf/cm² y 67.29 kgf/cm² siendo la troza 2 la más baja de las 4.

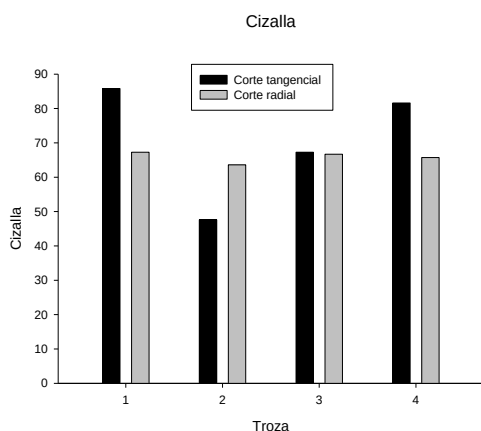


Figura 6. Cizalla de cuatro trozas de *Pinus greggii*.

El corte radial que más presencia tuvo de las 4 trozas evaluadas fue el de la 4 presentando un valor de 261.99 kgf/cm², el corte con más valor fue el de la troza 1 con un valor de 414.32 kgf/cm².

El corte tangencial con mayor valor es el de la troza 1 con 519.18 kgf/cm², seguido de la troza 4 con un valor de 326.76 kgf/cm², las trozas con menor valor fueron la 3 y 2 con valores de 230.71 kgf/cm² y 308.73 kgf/cm², siendo la troza 2 con menor valor.

El corte trasversal con mayor valor es de la troza 1 con un valor de 658.10 kgf/cm², seguido de la troza 3 con 534.11 kgf/cm², las trozas con menor valor fueron la 4 y 2 ya que reportan valores de 350.58 kgf/cm² y 435.65 kgf/cm² siendo la troza 4 la que menos presenta.

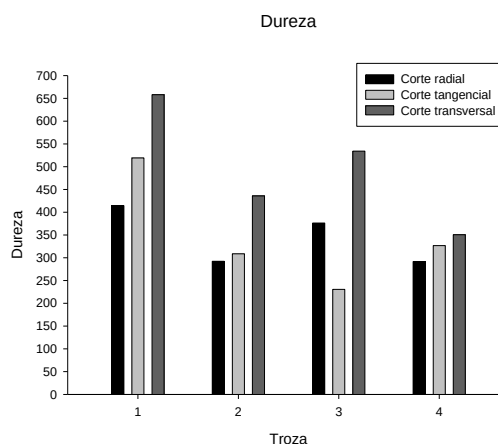


Figura 7. Dureza de cuatro trozas de *Pinus greggii*.

CONCLUSIONES

Los análisis inmediatos del *Pinus greggii*, presenta características físico-químicas ideales para la elaboración de pellets y briquetas. Después de su acondicionamiento, el contenido de humedad fue inferior al 10%, el contenido de cenizas <0.55 %, el material volátil de la biomasa inferior al 90%, y el poder calorífico superior a 20.00 MJ/kg.

Los resultados obtenidos dentro del estudio, muestran que los pellets y briquetas son de buena calidad ya que el valor de humedad fue de 5.8236 y 6.8683% respectivamente, el material volátil 64.4998 y 35.5035 %, carbón fijo 30.9457 y 59.7199 %, los pellets presentan una densidad básica 0.0011 g/cm³ y poder calorífico de 21.73 MJ/kg.

Por otra parte, el contenido de humedad de la biomasa disminuyo después de la peletización, posiblemente por las altas temperaturas de la maquina Peletizadora, es importante considerar que entre más humedad tenga la biomasa la calidad del pellet se verá afectada.

El material volátil podría presentar un problema ya que los pellets al tener altas concentraciones podrían facilitar el proceso de encendido, pero se consumirían muy rápido.

Los pellets elaborados a partir de residuos de la industria forestal pueden ser una fuente importante para la producción de energía, además por ser productos de origen natural contribuyen a la reducción de gases de efecto invernadero y mediante la transformación de residuos de aprovechamiento se reducen los restos en los sitios y así se previene la propagación de incendios forestales.

Los métodos empleados para determinar las propiedades físicas y mecánicas en condiciones de aserradero no se pueden utilizar para clasificar la madera aserrada de *Pinus greggii*,

Las pruebas en el laboratorio permitieron establecer algunas diferencias que existen entre cada sección del árbol, ya que estas presentan poca diferencia entre ellas excepto la troza 1 que es la más cerca del suelo.

Higman, C., & Burgt, M. d. (2013). Gasification. Burlington Massachusetts. British. Data. Elsevier Science.

Miranda, M., Arranz, J., Rojas, S., & Montero, I. (2009). Miranda, MT; Arr Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest. Fuel.

Seijas-Velásquez. (2014). Optimización del proceso de densificación de desechos lignocelulósicos para la conformación de pellets energéticos.

Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., & Portero, H. (2011). Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of braley straw pellets.

Soto, G., & Núñez, M. (2008). Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrín de *Pinus radiata* (D. Don), como material aglomerante. Maderas ciencia y tecnología. .

LITERATURA CITADA

Cruz, P. R. (2018). Actualización de base de datos de Plantaciones Forestales Comerciales Maderables autorizadas por SEMARNAT en el Estado de Durango. El salto Pueblo Nuevo Durango.: Instituto Tecnológico del Salto.

Europea, n. (2010). determinación del contenido en materia volátiles. biocombustibles sólidos. asociación española de normalización y científicos.

González Irene, E. (2014). González Análisis y caracterización de la combustión de pellets en una caldera Solarfocus TII30 de llama invertida.

Trejo, J. C. (2005). DE PELETS DE *Elaeis guineensis* Jacq UTILIZANDO ASERRÍN DE *Pinus* sp. COMO ADITIVO. En J. C. Trejo, DE PELETS DE *Elaeis guineensis* Jacq UTILIZANDO ASERRÍN DE *Pinus* sp. COMO ADITIVO (págs. pag 25-27). Durango, Durango: no publicada.

UNE-EN14774-3. (20 de OCTUBRE de 2009). biocombustibles sólidos. Europa: CEN el 2009-09-20.