



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA
EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA



TESIS DE LICENCIATURA

“Composición química de la biomasa de maderas de coníferas derivada de la transformación primaria de la madera, procedente de diferentes regiones de México”

Que para obtener el título de
INGENIERO EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA

Presenta
Jonathan Sergio Chávez Rosales

Director de tesis: Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones.
Co Director: M. C. Rocío Orihuela Equihua.

Morelia, Michoacán, México. Marzo de 2021.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA

COMITÉ DE TITULACIÓN

Edificio "D", planta alta, Tel. 3 22 35 00 Ext. 3056 y 3057
Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán



Of. No. 0705/2020

Morelia, Mich., a 19 de noviembre de 2020

P. ING. JONATHAN SERGIO CHÁVEZ ROSALES

EGRESADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍA DE LA MADERA.

P R E S E N T E .

Para su debido cumplimiento, me permito informar a usted, que ha sido aceptada por el Comité de Titulación de esta Dependencia Educativa, con fecha 13 de octubre de 2020, la modalidad de titulación: **TESIS**, con el Título: "**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA BIOMASA DE MADERAS DE CONÍFERAS DERIVADAS DE LA TRANSFORMACIÓN PRIMARIA DE LA MADERA, PROCEDENTE DE DIFERENTES REGIONES DE MÉXICO**", bajo la dirección del **Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones**, Tel. 4431.871679, E-mail: rutiaga@umich.mx, y como Coasesora, la **M.C. Rocío Orihuela Equihua**, Tel: 4431. 875672, E-mail: chio_oreqse@hotmail.com., Lo anterior, para que pueda continuar con sus trámites.

Sin otro particular por el momento, envío a usted un cordial saludo.

ATENTAMENTE



Pa. DMB
M.C. FABIOLA EUGENIA PEDRAZA BUCIO

Presidenta del Comité de Titulación
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera

FEPB/aaa

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mis padres, Ismael y Martha, gracias a su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años. Por haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades e inconvenientes, ha sido un orgullo y privilegio ser su hijo.

A mis hermanas Myrna y Megan, gracias por ser mi equipo, apoyo fundamental.

A Julia, mi compañera y mi aliento.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a mis docentes durante la carrera, por ser mis guías, por motivarme a desarrollarme. A las personas involucradas en este cierre, al Dr. José Rutiaga, el Mtro. Luis Fernando Pintor y la Mtra. Rocio Orihuela.

Mi profundo agradecimiento a todas las autoridades y personal de la Facultad en Ingeniería en Tecnología de la Madera por abrirme las puertas y permitirme concluir esta etapa satisfactoriamente dentro de sus instalaciones.

Gracias a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por concederme el honor de hacerme llamar Nicolaita.

Gracias al Fondo SENER-CONACYT por el apoyo recibido para realizar mi tesis.

A la música.

El presente trabajo de tesis se ha desarrollado en el marco del proyecto apoyado por el Fondo Sectorial FSE-SENER-CONACYT (CEMIE-Bio) número 246911, titulado “Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación Térmica y Eléctrica”, y se ha desarrollado en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

“Composición química de la biomasa de maderas de coníferas derivada de la transformación primaria de la madera, procedente de diferentes regiones de México”

ÍNDICE		
		Página
1.	Introducción	1
2.	Antecedentes	3
3.	Justificación	4
4.	Objetivos	5
5.	Metodología	6
	5.1. Colecta de material y reparación del material de estudio	6
	5.2. Análisis químico	8
	5.2.1. pH	8
	5.2.2. Cenizas	8
	5.2.3. Extraíbles	9
	5.2.4. Holocelulosa	10
	5.2.5. Lignina Runkel	10
	5.3. Cálculo del poder calorífico	11
	5.4. Análisis estadístico	11
6.	Resultados y discusión	12
	6.1. Análisis químico	12
	6.1.1. pH	12
	6.1.2. Cenizas	12
	6.1.3. Extraíbles	12
	6.1.4. Holocelulosa	16
	6.1.5. Lignina Runkel	16
	6.2. Cálculo del poder calorífico	16
7.	Conclusiones	20
8.	Referencias	21

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Procedencia y humedad inicial de las muestras de biomasa.

Tabla 2. Resultados de pH y cenizas.

Tabla 3. Resultados de la extracción sucesiva.

Tabla 4. Resultados del contenido de holocelulosa, lignina Runkel y poder calorífico.

Tabla 5. Resumen del análisis químico y poder calorífico por procedencia.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la colecta de los residuos de pino.

Figura 2. Imágenes de los residuos generados en la transformación primaria de maderas de *Pinus* spp.

Figura 3. Equipo ROTAP para el tamizado de las muestras de los residuos maderables, para obtener la fracción de la malla # 40.

Figura 4. Lectura del pH con ayuda del potenciómetro.

Figura 5. Determinación del contenido de ceniza.

Figura 6. Obtención de extraíbles mediante secuencia sucesiva.

Figura 7. Obtención de holocelulosa.

Figura 8. Obtención de lignina Runkel.

Figura 9. Relación del pH y el contenido total de sustancias extraíbles.

Figura 10. Relación del poder calorífico y el contenido de sustancias inorgánicas.

Figura 11. Relación del poder calorífico y el total de sustancias extraíbles.

Figura 12. Relación del poder calorífico y el contenido de holocelulosa.

Figura 13. Relación del poder calorífico y el contenido de lignina.

Resumen

El panorama actual de los combustibles fósiles, por su alto impacto ambiental y su cantidad limitada, generan la necesidad de buscar y encontrar nuevas alternativas productoras de energía. Los biocombustibles sólidos densificados son una de estas alternativas, tanto para aprovechar los residuos generados de una transformación primaria, como abastecer una posible vía generadora de bioenergía. En este estudio se determinó la composición química y el poder calorífico de 19 muestras de aserrín de pino procedentes de diferentes industrias forestales ubicadas en cinco estados de la república mexicana (Chihuahua, Michoacán, Durango, Oaxaca, and Nuevo León). Los resultados obtenidos variaron como sigue: pH (4.1 a 5.3), cenizas (0.27 a 0.95 %), total de extraíbles (6.1 a 23.4 %), holocelulosa (60.1 to 70.4 %), lignina (20.5 a 25.8 %), y poder calorífico (20.1 a 21.0 MJ/kg). A excepción del contenido de cenizas, se encontraron diferencias estadísticas significativas según la procedencia de las muestras de aserrín de pino. Con base a los resultados obtenidos, la biomasa de aserrín tiene potencial para obtener biocombustibles sólidos densificados.

Abstract

The current panorama of fossil fuels, due to their high environmental impact and their limited quantity, generates the need to search for and find new energy-producing alternatives. In this study, the chemical composition, and calorific value of 19 samples of pine sawdust from different forest industries located in five states of the Mexican Republic (Chihuahua, Michoacán, Durango, Oaxaca, and Nuevo León) were determined. The results obtained varied as follows: pH (4.1 to 5.3), ash (0.27% to 0.95%), total extractives (6.1% to 23.4%), holocellulose (60.1% to 70.4%), lignin (20.5% to 25.8%), and calorific value (20.1 MJ/kg to 21.0 MJ/kg). Except for the ash content, significant statistical differences were found according to the origin of the pine sawdust samples. Based on the results obtained, the sawdust biomass has the potential to obtain densified solid biofuels.

Palabras clave: Extractivos; Holocelulosa; Lignina; Ceniza; Biomasa.

1. INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles son un recurso limitado (Tanger *et al.*, 2013), pero existen otras fuentes de energías llamadas renovables, que son principalmente de energía eólica, solar, hidroeléctrica, geotérmica, el océano, la bioenergía, el etanol y el hidrógeno (Ghosh y Prelas, 2011). Recientemente una de las prioridades del mundo es la generación de bioenergéticos sustentables y amigables con el medio ambiente, para lo cual son necesarios cambios en los modelos de producción y utilización de energía, además, el uso de residuos forestales son una fuente de biomasa para la generación de bioenergéticos que representa una alternativa potencial, ya que genera un biocombustible menos contaminante en comparación con los de origen fósil (Ayala-Mendivil y Sandoval 2018).

Un biocombustible es un carburante obtenido mediante el tratamiento físico o químico de la materia vegetal o de residuos orgánicos. Los biocombustibles pueden obtenerse en estado sólido, gaseoso y líquido; asimismo, se clasifican en tres generaciones, de acuerdo con el tipo de materia prima empleada para producirlos. Los biocombustibles gaseosos se obtienen mediante procesos térmicos (como la pirólisis), microbianos (descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno), o de gasificación. Los biocombustibles líquidos incluyen alcoholes (bioetanol y biobutanol), ésteres (biodiésel) e hidrocarburos (diésel verde, gasolina verde, bioturbosina). Los biocombustibles sólidos se obtienen a partir de materias primas de origen vegetal. Pueden producirse mediante procesos mecánicos o térmicos, o bien emplearse directamente, como en el caso de la madera (Zamudio-Trejo *et al.*, 2019).

Existen varias formas de biocombustibles basadas en madera, la leña de madera es la más tradicional, se puede usar en estufas, chimeneas, en calderas de gasificación de madera, entre otras. La producción de astilla y aserrín ha permitido un grado de automatización, para la producción de pellets y briquetas (Matiyuk *et al.*, 2016).

Debido al panorama que se presenta hacia el uso obligatorio de energías limpias y renovables, se visualiza el aumento a la demanda de aserrín, astilla, corteza y otros residuos como biomasa para la generación de biocombustibles. Es de recalcar una de las ventajas que promueve el desarrollo y uso de biocombustibles densificados la cual recae en que no requiere la implementación de elaborada infraestructura e inversión para su elaboración. Además de cambiar la perspectiva contaminante del residuo a una alternativa energética. La meta principal de la industria forestal es incrementar el valor del material y en el proceso se obtienen subproductos o residuos, los cuales poseen un potencial para usos energéticos. La producción nacional anual de astilla puede ser de 760,000 toneladas al año, por ello, la industria forestal y de transformación es un potencial proveedor de materia prima para propósitos de biocombustibles. Como ejemplo el precio del pellet puede ser de \$5 a \$6.5 MN/kg, con lo que pudiera competir con el glp (Arias-Chalico, 2018). Debido a la variabilidad en los componentes de las diferentes biomásas (Werkelin *et al.* 2005; Spinelli *et al.* 2011) es de relevancia el poder llevar a cabo su caracterización y proponer alternativas de usos energéticos

(Mitchual *et al.* 2014). De este modo, el propósito de la presente investigación es obtener datos sobre las propiedades químicas del aserrín derivado del procesamiento primario de la madera, con la finalidad de conocer su potencial para el uso de biocombustibles densificados.

2. ANTECEDENTES

Bernabé-Santiago *et al.* (2013) determinaron los principales componentes químicos de la madera (pH, cenizas, microanálisis de las cenizas, las sustancias extraíbles, holocelulosa, lignina y taninos) de cinco especies de pino procedentes del municipio de Morelia, Michoacán (*Pinus leiophylla*, *P. michoacana*, *P. montezumae*, *P. oocarpa* y *P. teocote*).

Limas-Rojas (2013), en Linares, Nuevo León, dio a conocer los resultados de la evaluación de la composición química y física de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía (*Abies religiosa*, *P. leiophylla*, *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus*).

Correa-Méndez *et al.* (2014) reportan el porcentaje de humedad y las sustancias inorgánicas en subproductos maderables (aserrín y viruta) de pino para el uso en pelets y briquetas.

Vega-Nieva (1015) reporta la caracterización como biocombustible de las principales especies de forestales europeas, dentro de las cuales incluyeron *Pinus pinaster*, *P. radiata*, *P. sylvestris*, *Betula celtiberica*, *Acacia melano-xylon*, *Salix atrocynera*, *Prunus avium*, *Populus euramericana*, *Eucalyptus globulus*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Quercus robur* y *Acer pseudoplatanus*.

Pintor-Ibarra *et al.* (2017), caracterizaron las propiedades físicas (humedad inicial, densidad a granel, poder calorífico) y químicas (pH, cenizas, extraíbles, holocelulosa y lignina) de los residuos maderables de madera y corteza de tres especies de pinos con fines bioenergéticos.

Carrillo-Parra *et al.*, (2018) compararon las propiedades energéticas entre el aserrín fresco e intemperizado de la madera de *Pinus pseudostrobus*, y determinaron algunas propiedades físicas y mecánicas de briquetas elaboradas a partir de ellos.

Escobar-Córdoba *et al.* (2019) evaluaron tres alternativas para la generación de energía alternativa, materiales aglomerados y la fabricación de pellets de residuos de maderas colombianas.

Morales-Máximo *et al.* (2020) publican datos sobre la composición química del aserrín de especies de *Pinus* spp., en la comunidad de Pichátaro, Michoacán, además reportan resultados de la producción de briquetas elaboradas con estos residuos.

Rutiaga-Quiñones *et al.* (2020) dan a conocer los resultados sobre tamaño de partícula, análisis proximal, análisis elemental y análisis de las cenizas de las muestras lignocelulósicas aquí estudiadas.

3. JUSTIFICACIÓN

En México la producción forestal maderable nacional tuvo fluctuaciones durante el período 2008-2017, iniciando en el año 2008 con 6.3 millones de metros cúbicos rollo (m^3r) y finalizando con 9.0 millones de m^3r en el año 2017. Los principales estados productores de madera en el año 2017 fueron: Durango (28.4%), Chihuahua (18.6%), Oaxaca (8.1%), Tabasco (6.7%) y Michoacán (5.4%). El aserrío de madera de *Pinus* spp. representó el 84.2% de la producción nacional en el año 2017 (SEMARNAT 2020). Estos datos reflejan el importante rol de las especies de pino en la producción maderable nacional y es conocido que en el proceso de transformación primaria de la madera se generan grandes cantidades de residuos lignocelulósicos, que por lo general no tiene uso o éste es limitado, y son depuestos en lugares inapropiados lo que suele ser un foco de contaminación ambiental. Por otra parte, la producción de bioenergía es una opción económica y ecológicamente viable (García *et al.*, 2012), sin embargo, es necesario evaluar algunas propiedades como la composición química de los diferentes tipos de biomásas o residuos lignocelulósicos (García *et al.*, 2012; Vassilev *et al.*, 2010). Por consiguiente, la presente investigación se justifica por medio de la necesidad de conocer la composición química de los subproductos de la industria forestal primaria para evaluar su potencial como biocombustible y de esta manera proponer planes o estrategias para el aprovechamiento de los residuos lignocelulósicos.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general.

Evaluar la composición química de los residuos maderables de 15 empresas de transformación primaria de coníferas de México para proponer su uso bioenergético.

4.2 Objetivos específicos

- Conocer el pH
- Conocer el porcentaje de cenizas
- Conocer el porcentaje de extraíbles
- Conocer el porcentaje de holocelulosa
- Conocer el porcentaje de lignina Runkel
- Calcular el poder calorífico

5. METODOLOGÍA

5.1 Colecta y preparación del material de estudio

Para la presente investigación se recolectaron muestras de los residuos lignocelulósicos de empresas maderables de los estados de Chihuahua (Ejido El Largo, Ejido Agua Azul, Grupo Gazo y Multimaderas), Michoacán (Maderería Zamora, Maderas Preciosas Don Jesús y Ejido Lázaro Cárdenas), Durango (Grupo Sezarik, Maderas y Tarimas Alba, Ejido Vencedores, Ejido La Cañita y Ejido Pueblo Nuevo), Oaxaca (Unidad Comunal Forestal, Agropecuaria y de Servicios, Productora Comunal de Muebles Ixtlán y Aserradero Mapsi) y Nuevo León (Maderas Los Pérez), y que son subproducto de la transformación primaria de la madera de pino. No fue posible separar las muestras de biomasa por especie de pino, debido a que en el aprovechamiento forestal las especies maderables se mezclan y así se transportan a los aserraderos.

En cada caso se recolectaron aproximadamente 50 kg de aserrín. Las muestras se tomaron con una pala de la parte alta, media y baja de los montículos, donde se permitió la colecta. El material se envasó en arpillitas de plástico. Las muestras recolectadas en el estado de Michoacán se transportaron al laboratorio de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera en el vehículo Toyota de la Facultad, las otras fueron enviadas por el servicio de paquetería Estafeta.

En la figura 1 muestra la distribución geográfica de las colectas. La tabla 2 muestra el orden de recolección y el contenido de humedad inicial de las muestras de aserrín (Rutiaga-Quiñones *et al.* 2020). La figura dos presenta un ejemplo de los residuos lignocelulósicos generados en la industria.

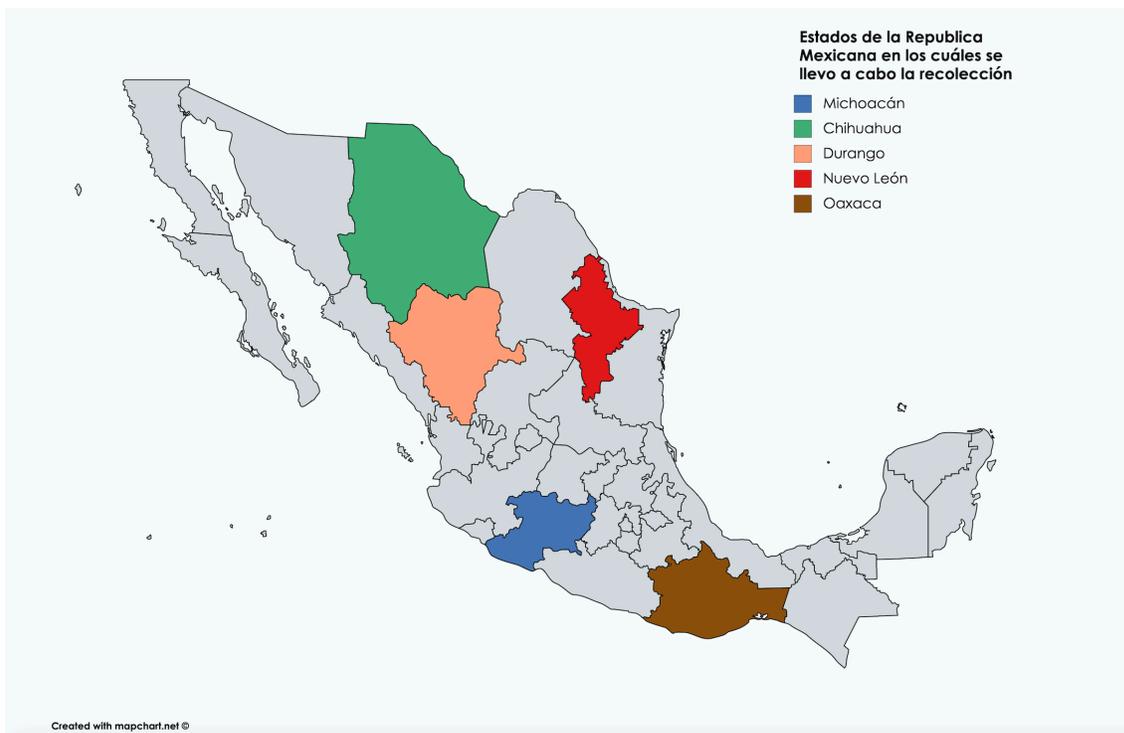


Figura 1. Ubicación geográfica de la colecta de los residuos de pino.



Figura 2. Imágenes de los residuos generados en la transformación primaria de maderas de *Pinus* spp. Izquierda: residuos generados en el estado de Michoacán. Derecha: biomasa generada en el estado de Chihuahua.

Tabla 1. Procedencia y humedad inicial de las muestras de biomasa.

Muestra	Estado	Contenido de humedad inicial (%)
1	Chihuahua	49.15 ± 0.63
2		37.40 ± 0.14
3		54.40 ± 0.35
4		54.44 ± 0.25
5	Michoacán	31.23 ± 0.58
6		12.27 ± 0.55
7		8.57 ± 0.58
8		6.60 ± 0.57
9		46.58 ± 1.35
10	Durango	39.74 ± 0.45
11		6.70 ± 0.15
12		43.12 ± 0.75
13		63.46 ± 0.40
14		56.40 ± 0.79
15		32.67 ± 0.36
16	Oaxaca	41.93 ± 0.20
17		8.50 ± 0.18
18		75.21 ± 0.38
19	Nuevo León	12.16 ± 0.37

Terminada cada colecta la biomasa de pino se secó bajo sombra, después se procedió a moler en un equipo Wiley y a tamizar cada una de las muestras usando un tamizador semi automático ROTAP con tamices malla número 20, 40, y 60. La fracción que se tamizó a través de la malla número 40 y retuvo en la malla 60 fue la que se utilizó para realizar los análisis químicos (Figura 3). Una vez obtenida la harina se almacenó en frascos y se etiquetaron para su mejor manejo.



Figura 3. Equipo ROTAP para el tamizado de las muestras de los residuos maderables, para obtener la fracción de la malla # 40.

5.2. Análisis químico

5.2.1. pH

Se determinó siguiendo la metodología propuesta por Sandermann y Rothkamm (1959). Se agregó 1 g de harina de madera a un vaso de precipitados de 50 ml, después se agregaron 10 cm³ de agua destilada, acto seguido: se procedió a la medición del pH con ayuda de un potenciómetro, tomando lecturas inicialmente, a los 15 min, 4 h, 24 h y 48 h (Figura 4).



Figura 4. Lectura del pH con ayuda del potenciómetro. Izquierda: Potenciómetro. Derecha: lectura de pH de las muestras.

5.2.2. Cenizas

Se determinó el contenido de cenizas en base a la norma UNE-EN 14775 (2010), inicialmente se llevaron a peso constante los crisoles de níquel, después de obtenida la masa en g del recipiente se agregó 1 g de harina de madera y se llevó a calcinar en una mufla convencional a 550 °C ±5 hasta eliminar por completo la materia orgánica, los cálculos para determinar su porcentaje se obtuvieron como lo indica norma.



Figura 5. Determinación del contenido de ceniza. Izquierda: calcinación de la harina de madera a 550 °C. Derecha: obtención del peso anhidro de las cenizas.

5.2.3. Extraíbles

Para determinar el contenido de sustancias extraíbles, en este trabajo se utilizó el equipo Soxhlet usando con solventes orgánicos y a reflujo con agua caliente. La secuencia de solventes se efectuó el siguiente orden: ciclohexano, acetona, metanol y agua caliente a reflujo (Mejía-Díaz y Rutiaga-Quiñones 2008). Para los primeros tres solventes se colocó el dedal dentro del equipo unido al matraz con 150 mL del solvente correspondiente y se sometió a extracción por 6 horas. Para el solvente acuoso, la harina de madera (que previamente fue solubilizada con los solventes orgánicos) se colocó directamente en el matraz con 150 mL de agua destilada para finalmente ser sometido a reflujo por 6 horas. Los solventes orgánicos fueron recuperados en un rotavapor aplicando vacío y los extraíbles acuosos fueron recuperados por evaporación en baño María, finalmente se llevaron a un desecador hasta peso constante.



Figura 6. Obtención de extraíbles mediante secuencia sucesiva. Izquierda: obtención de extraíbles en equipo Soxhlet con disolventes orgánicos. Central: recuperación de los solventes en rotavapor aplicando vacío. Derecha: obtención de extraíbles con agua caliente a reflujo.

5.2.4. Holocelulosa

Después de la extracción secuencial, la harina de madera se designó como harina libre de extraíbles, que posteriormente se utilizó para la determinación de holocelulosa (Wise *et al.*, 1946).

Para conocer la cantidad de holocelulosa, se utilizó 1g de muestra de harina libre de extraíbles, en la cual en un lapso de 4 horas se le fue adicionando a la muestra 0.3 g de hipoclorito de sodio y 2 gotas de ácido acético glacial; las porciones anteriores se agregaron cada hora. Transcurrido el tiempo se filtró con papel filtro de porosidad media, se lavó con abundante agua fría y finalmente la holocelulosa se deshidrató hasta peso constante a una temperatura de 40 °C. El porcentaje de holocelulosa se obtuvo gravimétricamente en base a peso anhidro.



Figura 7. Obtención de holocelulosa. Izquierda: muestras colocadas en un baño María. Derecha: filtrado y lavado de la holocelulosa.

5.2.5. Lignina Runkel

El contenido de lignina en la harina de madera libre de extraíbles se determinó de conformidad con la técnica Runkel y Wilke (1951). Para ello se utilizó aproximadamente 1 g de harina libre de extraíbles, se colocó en un vaso de precipitados en una solución de 50 mL de H₂SO₄ al 72% y 5.0 mL de HBr al 40 %, dejando reposar 2 h a temperatura ambiente dentro de una campana de extracción. Posteriormente se agregaron 200 mL de agua destilada e hirvió durante 5 minutos. La solución se filtró, lavo perfectamente con agua caliente y se llevó a peso constante.



Figura 8. Obtención de lignina Runkel. Izquierda: reacción para la descomposición de la celulosa y hemicelulosas. Central: filtrado. Derecha: lavado con agua caliente.

5.3. Cálculo del poder calorífico

El poder calorífico de las muestras de biomasa se calculó utilizando el modelo matemático basado en la composición química (White 1987).

5.4. Análisis estadístico

Todos los análisis se realizaron por triplicado y en los resultados se reporta el promedio y desviación estándar.

Con la finalidad de comparar los resultados obtenidos por procedencia de las muestras de aserrín de pino, se aplicó un análisis de varianza a 95 % de confianza estadística y los valores medios se compararon mediante la prueba de rangos múltiples con el método LSD (Gutiérrez y de la Vara 2004). Los resultados se analizaron mediante el programa Statgraphics Plus versión 4.0.

Adicionalmente, con los datos generados se procesaron relaciones lineales para conocer la existencia del efecto del pH y contenido de sustancias extraíbles, y determinar la influencia del contenido de sustancias minerales, el contenido de sustancias extraíbles, de holocelulosa y de lignina sobre el poder calorífico de las muestras estudiadas.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Análisis químico

6.1.1. pH

En la tabla 2 se reportan los valores obtenidos de pH, donde se puede apreciar que los valores obtenidos son ligeramente ácidos (4.07 a 5.26), sólo la muestra número nueve colectada en el Estado de Michoacán presentó el pH mayor, además los valores de pH obtenidos en este trabajo son muy similares a los valores de 4.0 a 4.4 reportados en maderas de especies de *Pinus* spp. (Bernabé-Santiago *et al.* 2013; Pintor-Ibarra *et al.* 2017).

Los residuos de maderables de los *Pinus* spp. estudiados en este trabajo son ligeramente ácidos, lo que pudiera ser un factor negativo en esta materia prima ya que en contacto con ciertos metales podrían corroer los equipos donde se lleva a cabo la combustión de los biocombustibles sólidos (Kollmann 1959; Fengel y Wegener 1984), por lo que los materiales con los que se fabrican los equipos de combustión deben ser seleccionados cuidadosamente.

6.1.2. Cenizas

En la tabla 2 se muestran los resultados del contenido de sustancias minerales, que van de 0.27% a 0.95%. Estos valores prácticamente coinciden con los resultados recientemente publicados para estas mismas muestras de biomasa (Rutiaga-Quiñones *et al.* 2020) y en general son comparables con otros datos de referencia para maderas de coníferas (Bernabé-Santiago *et al.* 2013; Correa-Méndez *et al.* 2014; Pintor-Ibarra *et al.* 2017). Por otra parte, los resultados aquí obtenidos están en concordancia y dentro del rango representativo para maderas de pino (0.1% a 1.0%) (UNE-EN 14961-1 2011). Con estos valores obtenidos, la biomasa analizada cumple con el requisito de no presentar un valor excedente de 1.5% en contenido de cenizas para la elaboración pellets clase A2, o bien (exceptuando ciertas muestras) elaborar pellets clase A1 con requerimiento de contenido de cenizas inferior al 0.7% (ISO 17225-2 2014). Estas clasificaciones que son recomendadas para calderas privadas.

6.1.3. Extraíbles

En la Tabla 3 se reportan los resultados de la solubilidad obtenidos mediante la extracción secuencial aplicada para los residuos maderables de *Pinus* ssp. En general las muestras colectadas en el estado de Durango presentan los valores más altos de extractos totales, en contraste, la biomasa colectada en el estado de Oaxaca presenta los valores más bajos. Con respecto a los solventes utilizados para su solubilidad en general con la acetona se obtuvieron los mayores rendimientos. Los extraíbles totales de la muestra número cinco colectada en el Estado de Michoacán, y las muestras número diecisiete y dieciocho colectadas en el Estado de Oaxaca se encuentran dentro del rango 6.6% a 8.2% reportado para especies de pinos Mexicanos: *Pinus leiophylla*, *P. michoacana*, *P. montezumae*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobus* y *P. teocote* (Bernabé-Santiago *et al.* 2013; Pintor-Ibarra *et al.* 2017), el resto de las muestras colectadas en los Estados de

Chihuahua, Durango, Michoacán y Nuevo León se encuentran dentro del rango 8.8% a 17.3% obtenido en *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus* (Lima, 2013). Lo anterior pudiera ser que durante la colecta se aserró madera de *Pinus* spp. con alta proporción de duramen, por otro lado, Uprichard (1991) reporta que los valores altos de extraíbles en algunas coníferas puede estar relacionado con la exudación de material resinoso, ahora bien, estos altos porcentajes de extraíbles son favorables en su uso bioenergético ya que algunos autores han publicado que alto contenido de sustancias extraíbles incrementan el poder calorífico de los biocombustibles sólidos (Ngangyo-Heya *et al.* 2016; Pintor-Ibarra *et al.* 2017), en contraste, también se ha escrito en la literatura que ciertos componentes extraíbles forman complejos con el hierro que propician la aceleración de la corrosión de los equipos de combustión y las chimeneas lo que posiblemente ocasionaría el aumento del mantenimiento de los equipos (Libby 1980; Grace *et al.* 1996). El efecto mencionado antes se puede contrarrestar con diseño de los equipos y los materiales usados.

Uno de los factores en la variabilidad de la acidez (Tabla 2) recae sobre el contenido de extraíbles presentes en la biomasa, cuya relación observada entre los valores de pH obtenidos y el contenido total de las sustancias extraíbles obtenidas mediante la secuencia de extracción aplicada se observa en la figura 9, los cuales van a variar conforme la ubicación de los especímenes aprovechados, el suelo del cual fueron extraídos, el clima y la zona (Bernabé-Santiago *et al.* 2013; Pintor-Ibarra *et al.* 2017).

Tabla 2. Resultados de pH y cenizas.

Muestra	Origen	pH	Cenizas (%)
1	Chihuahua	4.62 ±0.09	0.47 ±0.01
2		4.09 ±0.03	0.45 ±0.01
3		4.15 ±0.02	0.73 ±0.03
4		4.16 ±0.01	0.53 ±0.01
5	Michoacán	4.77 ±0.20	0.91 ±0.06
6		4.23 ±0.05	0.50 ±0.01
7		4.22 ±0.01	0.43 ±0.06
8		4.59 ±0.12	0.64 ±0.02
9		5.26 ±0.24	0.33 ±0.01
10	Durango	4.15 ±0.07	0.58 ±0.06
11		4.25 ±0.06	0.73 ±0.02
12		4.14 ±0.06	0.55 ±0.07
13		4.14 ±0.23	0.27 ±0.05
14		4.08 ±0.03	0.75 ±0.01
15		4.22 ±0.01	0.95 ±0.01
16	Oaxaca	4.07 ±0.01	0.66 ±0.10
17		4.54 ±0.03	0.34 ±0.03
18		4.59 ±0.04	0.48 ±0.04
19	Nuevo León	4.35 ±0.09	0.50 ±0.11

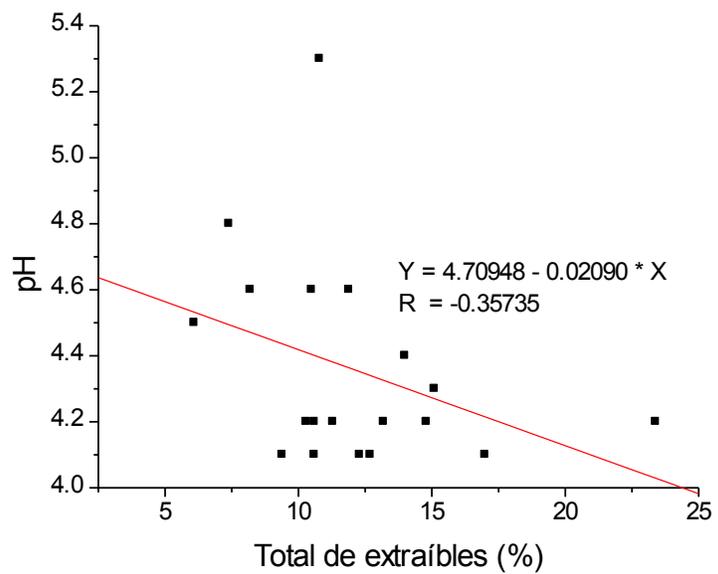


Figura 9. Relación del pH y el contenido total de sustancias extraíbles.

Tabla 3. Resultados de la extracción sucesiva.

Muestra	Origen	Solubilidad (%)				
		Ciclohexano	Acetona	Metanol	Agua caliente	Total de extraíbles
1	Chihuahua	3.84 ±0.10	5.29 ±0.03	0.71 ±0.13	2.01 ±0.06	11.9 ±0.21
2		2.12 ±0.15	5.82 ±0.41	0.93 ±0.19	1.73 ±0.08	10.6 ±0.27
3		3.38 ±0.23	5.27 ±0.66	0.55 ±0.08	2.12 ±0.18	11.3 ±0.16
4		3.35 ±0.18	8.08 ±0.65	0.60 ±0.04	2.78 ±0.07	14.8 ±0.48
5	Michoacán	1.58 ±0.19	3.91 ±0.17	0.45 ±0.05	1.49 ±0.04	7.4 ±0.08
6		3.89 ±0.10	6.27 ±0.16	0.65 ±0.01	2.42 ±0.07	13.2 ±0.02
7		2.53 ±0.09	4.77 ±0.32	0.93 ±0.16	2.32 ±0.09	10.6 ±0.04
8		3.12 ±0.49	4.31 ±0.31	0.92 ±0.08	2.10 ±0.01	10.5 ±0.88
9		2.38 ±0.10	4.44 ±0.23	0.78 ±0.05	3.16 ±0.10	10.8 ±0.08
10	Durango	9.70 ±0.04	8.72 ±0.03	0.98 ±0.07	3.98 ±0.10	23.4 ±0.04
11		6.66 ±0.38	3.46 ±0.16	1.24 ±0.05	3.77 ±0.003	15.1 ±0.16
12		8.07 ±0.99	4.69 ±0.34	1.62 ±0.17	2.63 ±0.39	17.0 ±1.91
13		4.20 ±0.36	5.71 ±0.74	0.72 ±0.33	2.07 ±0.08	12.7 ±0.12
14		3.16 ±0.43	7.31 ±0.30	0.47 ±0.11	1.38 ±0.08	12.3 ±0.17
15		2.13 ±0.10	5.03 ±0.05	0.91 ±0.06	2.22 ±0.03	10.3 ±0.12
16	Oaxaca	1.98 ±0.06	3.83 ±0.47	0.80 ±0.01	2.78 ±0.04	9.4 ±0.51
17		0.91 ±0.11	2.56 ±0.59	1.03 ±0.22	1.63 ±0.30	6.1 ±0.63
18		2.08 ±0.04	2.86 ±0.40	0.91 ±0.05	2.33 ±0.07	8.2 ±0.32
19	Nuevo León	3.99 ±0.24	6.90 ±0.06	1.23 ±0.31	1.86 ±0.19	13.9 ±0.69

6.1.4. Holocelulosa

Los resultados de holocelulosa muestran que el contenido en las muestras varía del 60.1% a 70.4%(Tabla 4), estos resultados concuerdan con reportes previos, tales como Fengel y Wegener (1983), quienes dan valores de 67.0% a 82% en madera de coníferas, y para datos específicos de maderas de pino se reportaron valores de 71.9% a 76.9% (Pintor-Ibarra *et al.* 2017), 68.1% a 74.7% (Bernabé-Santiago *et al.* 2013). Es conocido que la composición química de los materiales lignocelulósicos refleja su calidad como biocombustible, desde el punto de vista del poder calorífico, pero maderas ricas en polisacáridos suelen tener poder calorífico relativamente bajo. En un estudio en albura de maderas de encino, se reportan valores del poder calorífico para la holocelulosa de 15.9 MJ/kg a 16.3 MJ/kg, para la lignina se obtuvieron valores de 23.2 MJ/kg a 23.5 MJ/kg en las mismas muestras de holocelulosa, mientras que en la harina de albura de las mismas especies de encinos los valores variaron de 17.5 MJ/kg a 17.9 MJ/kg (Herrera-Fernández *et al.* 2017).

6.1.5. Lignina Runkel

En lo que respecta al contenido de lignina Runkel los resultados obtenidos varían del 20.5% al 25.8% (Tabla 4), y son valores inferiores al comparar con datos de referencia previos para maderas de coníferas (25.6% a 39.4 %) (Fengel and Wegener 1983) y específicamente en maderas de pinos (24.0% a 28.5 %) (Bernabé-Santiago *et al.* 2013), (29.6% a 32.5 %) (Pintor-Ibarra *et al.* 2017), (28% a 31%), (Belgacem y Gandini 2008). Los residuos maderables de *Pinus* spp. analizados en este trabajo son modestamente ricos en lignina, lo que puede representar una calidad aceptable de los biocombustibles sólidos, ya que se ha reportado en la literatura que un alto porcentaje de lignina en la biomasa aumenta su poder calorífico (Ngangyo-Heya *et al.* 2016; Pintor-Ibarra *et al.* 2017). Además, también se ha reportado que un alto contenido de lignina favorece la compresión, unión de las partículas y actúa como agente aglutinante, lo que eleva la calidad de los pellets (Bergman 2005).

6.2. Cálculo del poder calorífico

Los valores obtenidos del poder calorífico calculado mediante el modelo matemático basado en la composición química van de 20.1 a 21.0 MJ/kg (Tabla 4). Estos resultados son mayores a los reportados para las mismas muestras de aserrín (18.76 to 20.72 MJ/kg), calculados utilizando modelos matemáticos basados en ultimate analysis, proximal analysis, and the ash content (Rutiaga-Quiñones *et al.* 2020). Estos resultados son mayores a los valores típicos de 18.5 MJ/kg a 19.8 MJ/kg para maderas de coníferas (UNE-EN 14961-1 2011).

El comportamiento del poder calorífico calculado en función del contenido mineral presente en las muestras lignocelulósicas se muestra en la figura 10 y existe concordancia con reportes previos, donde se indica que la cantidad de sustancias inorgánicas influyen negativamente en el poder calorífico (Fengel y Wegener 1983; Martínez-Pérez *et al.* 2015), aunque en este caso el coeficiente de correlación es bajo.

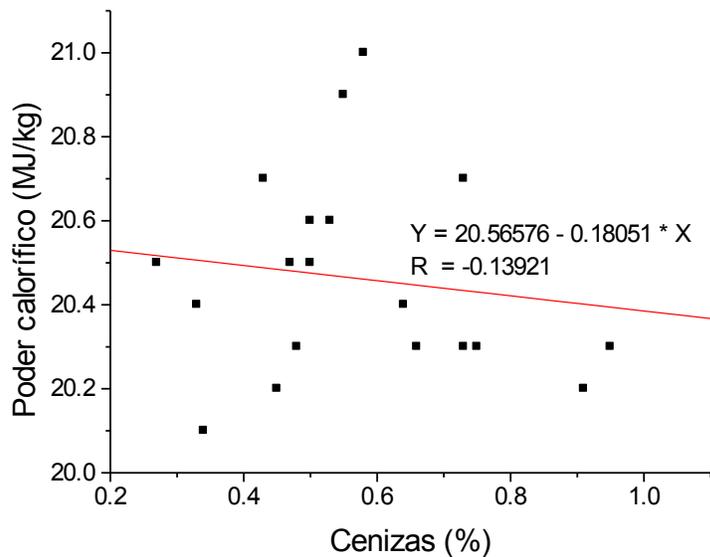


Figura 10. Relación del poder calorífico y el contenido de sustancias inorgánicas.

La figura 11 muestra la relación del poder calorífico con el contenido total de sustancias extraíbles obtenidas mediante la secuencia de extracción aplicada y corrobora lo discutido en el apartado 6.1.3.

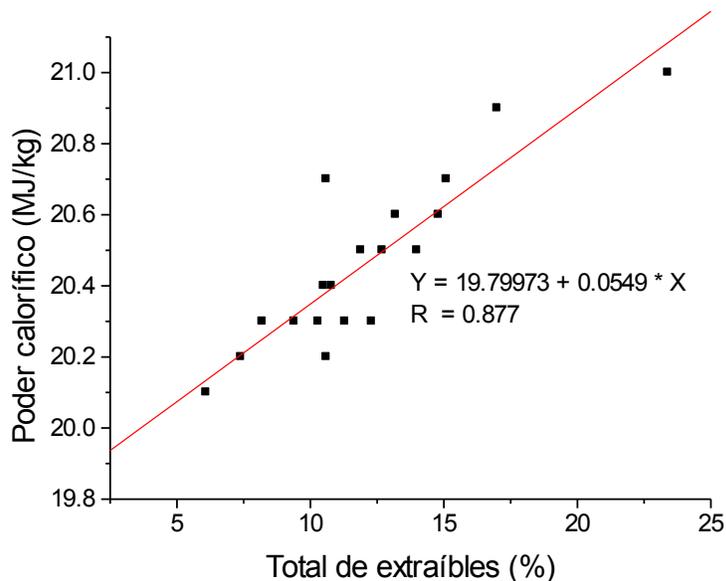


Figura 11. Relación del poder calorífico y el total de sustancias extraíbles.

Por otra parte, la influencia del contenido de polisacáridos sobre el poder calorífico se aprecia en la figura 12, y constata el hecho de que estas sustancias no influyen

directamente sobre el poder calorífico, como se discutió en el apartado 6.1.4. Para el caso de la relación de la lignina con el poder calorífico, su influencia se puede observar en la figura 13, pero con un coeficiente de correlación bajo, sin embargo, la tendencia corresponde a lo discutido en el apartado 6.1.5.

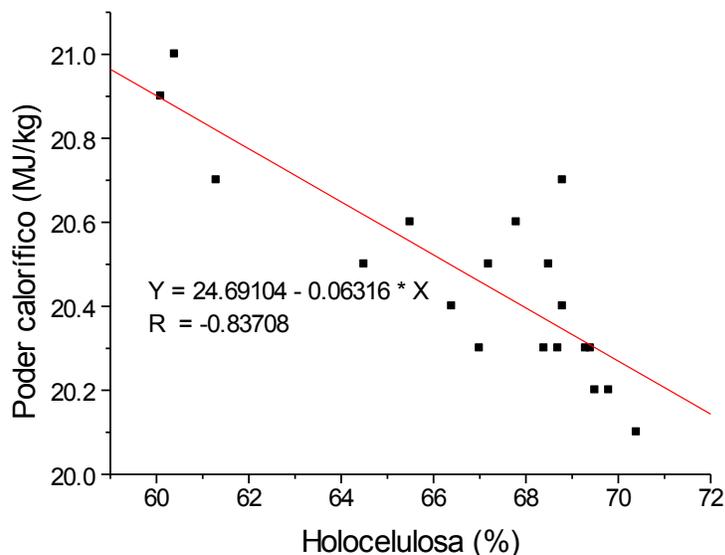


Figura 12. Relación del poder calorífico y el contenido de holocelulosa.

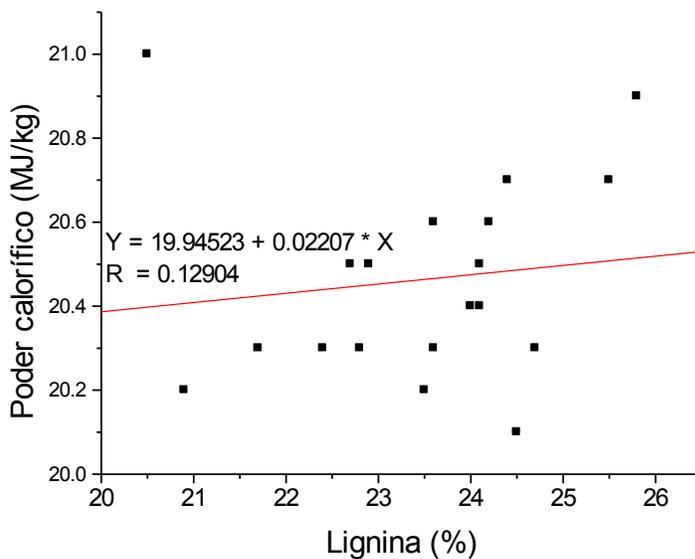


Figura 13. Relación del poder calorífico y el contenido de lignina.

Tabla 4. Resultados del contenido de holocelulosa, lignina Runkel y poder calorífico.

Muestra	Estado	Holocelulosa (%)	Lignina Runkel (%)	Poder calorífico (MJ/kg)
1	Chihuahua	64.5 ±0.58	24.1 ±0.50	20.6 ±0.05
2		69.8 ±0.51	20.9 ±0.46	20.2 ±0.05
3		67.0 ±0.74	22.4 ±0.06	20.3 ±0.02
4		65.5 ±0.61	23.6 ±0.06	20.6 ±0.03
5	Michoacán	69.5 ±0.60	23.5 ±0.12	20.1 ±0.01
6		67.8 ±0.19	24.2 ±0.08	20.6 ±0.004
7		68.8 ±0.66	25.5 ±0.49	20.5 ±0.20
8		66.4 ±0.14	24.0 ±0.08	20.4 ±0.07
9		68.8 ±0.39	24.1 ±0.79	20.4 ±0.07
10	Durango	60.4 ±0.87	20.5 ±0.15	21.0 ±0.01
11		61.3 ±0.77	24.4 ±0.37	20.7 ±0.04
12		60.1 ±0.79	25.8 ±0.50	20.9 ±0.09
13		68.5 ±0.19	22.9 ±0.53	20.4 ±0.03
14		68.7 ±0.31	21.7 ±0.84	20.3 ±0.05
15		68.4 ±0.89	22.7 ±0.21	20.3 ±0.01
16	Oaxaca	69.4 ±0.16	23.6 ±0.01	20.3 ±0.04
17		70.4 ±0.70	24.5 ±0.22	20.1 ±0.03
18		69.3 ±0.46	24.7 ±0.32	20.3 ±0.001
19	Nuevo León	67.2 ±0.62	22.7 ±0.04	20.5 ±0.05

Finalmente, la tabla 5 resume los datos obtenidos del análisis químico y poder calorífico de las muestras por procedencia. Aun cuando los resultados de las muestras de Nuevo León, deben ser tomados con reservas, por contar sólo con una muestra de aserrín de ese estado, a excepción del contenido de cenizas, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$).

Tabla 5. Resumen del análisis químico y poder calorífico por procedencia.

Origin	pH	Cenizas (%)	Total de extractivos (%)	Holocelulosa (%)	Lignina Runkel (%)	Poder calorífico (MJ/kg)
Chihuahua	4.3 a	0.55 a	12.1 a	66.7 a	22.9 a	20.4 a
Michoacán	4.6 b	0.56 a	10.5 a	68.0 a	24.3 b	20.4 a
Durango	4.2 a	0.64 a	15.1 b	64.5 b	23.0 a	20.6 b
Oaxaca	4.4 b	0.49 a	7.9 c	69.7 c	24.3 b	20.2 a
Nuevo León	4.4 b	0.64 a	14.0 b	67.2 a	22.7 a	20.5 b

7. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para los residuos lignocelulósicos se pueden categorizar y jerarquizar por su procedencia:

El comportamiento de la acidez (de mayor a menor) fue: Durango, Chihuahua, Nuevo León, Oaxaca y Michoacán.

En porcentaje de cenizas de mayor a menor fue: Durango, Nuevo León, Michoacán, Chihuahua y Oaxaca.

En cuanto al contenido total de extraíbles de mayor a menor fue: Durango, Nuevo León, Chihuahua, Michoacán y Oaxaca.

Para el contenido de holocelulosa los mayores resultados se obtuvieron en: Oaxaca, Michoacán, Durango, Chihuahua y Nuevo León.

Lo que respecta a lignina Runkel el comportamiento se dio con Oaxaca y Michoacán, con valores similares, seguidos de Durango, Chihuahua y Nuevo León.

En relación al poder calorífico de mayor a menor fue: Durango, Nuevo León, Chihuahua, Michoacán y Oaxaca.

Por otra parte, se corroboró que a mayor contenido de sustancias extraíbles menor pH, a mayor cantidad de cenizas menor poder calorífico, a mayor concentración de sustancias extraíbles mayor poder calorífico, a mayor cantidad de polisacáridos menor poder calorífico y que a mayor concentración de lignina mayor poder calorífico.

Finalmente, los resultados indican el potencial de los residuos lignocelulósicos obtenidos de la transformación primaria, para la elaboración de biocombustibles sólidos densificados, siendo una alternativa de obtención de energía desde el ámbito casero o artesanal, hasta nivel industrial.

8. REFERENCIAS

Arias-Chalico, T. (2018). Situación actual y escenarios para el desarrollo de biocombustibles sólidos en México hacia 2024 y 2030. Red Mexicana de Bioenergía. Morelia, Michoacán, México. [Internet] disponible en <https://rembio.org.mx>. (Visitada el día 04 de febrero del 2020).

Escobar-Córdoba, J. D., Cañón-Barriga, J. E., Aguilar-Lemus, Y., Asprilla-Mosquera, D. B., Maturana-Guevara, J. C. (2019). Análisis del aprovechamiento sustentable de los residuos generados en la transformación de madera en dos municipios del departamento del Chocó-Colombia. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo* 37(2), 192-211.

Ayala-Mendivil, N., Sandoval, G. (2018). Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. *Madera y Bosques* 24(Núm. esp.), e2401877.

Belgacem, M. N., Gandini, A. (Eds.). (2008). *Monomers, polymers and composites from renewable resources*. Elsevier Science.

Bergman, P. C. (2005). Combined torrefaction and pelletisation: the TOP process. Netherlands Energy Research Foundation.

Bernabé-Santiago, R., Ávila-Calderón, L. E. A., Rutiaga-Quiñones, J. G. (2013). Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán. *Madera y Bosques* 19(2), 21-35.

Carrillo-Parra, A., Contreras Ortiz, E., Garza-Ocañas, F., Ngangyo-Heya, M., Rutiaga-Quiñones, J. G. (2018). Efecto de la intemperización y proceso en las características físicas, mecánicas y energéticas de briquetas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(50), 496-513.

Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E., Garza-Ocañas, F. (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.

Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado Ybarra, E., Garza-Ocañas, F. (2014b). Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en pellets y briquetas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5(25), 52-63.

FAO. (2004). Terminología unificada sobre la bioenergía TUB. Terminología de los dendrocombustibles sólidos. [Internet] disponible en <http://www.fao.org/3/j6439s/j6439s00.htm> (Visitada el día 12 de Julio del 2020).

Fengel, D.; Wegener, G. (1984). Wood - chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter. Berlin.

García R, Pizarro C, Lavín A G, y Bueno J L (2012) Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology* 103(1), 249-258

Ghosh T K y Prelas M A (2011) Energy resources and systems: Volume 2. Renewable Resources. Springer Netherlands.

Grace, T. M., Malcolm, E. W., and Kocurek, M. J. (1996). Alkaline Pulping (*Pulp and Paper Manufacture Series, Volume 5*), TAPPI Press, Atlanta, GA, USA. pp. 23-25.

Grover, P. D., Mishra, S. K. (1996). *Biomass briquetting: technology and practices* (Vol. 46). Bangkok, Thailand: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Gutiérrez-Pulido H, de la Vara-Salazar R. (2004). Análisis y diseño de experimentos. McGrawHill. México.

Herrera-Fernández, A. C., Carrillo-Parra, A., Pedraza-Bucio, F. E., Correa-Méndez, F., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P., Rutiaga-Quiñones, J. G. (2017). Densidad, composición química y poder calorífico de la madera de tres especies de encino (*Quercus candicans*, *Q. laurina* y *Q. rugosa*). *Ciencia Nicolaita* 72:136-154.

ISO 17225-2. (2014). Solid biofuels – Fuel specifications and clases. Part 2: Graded wood pellets.

Kollmann, F. (1959). Tecnología de la madera y sus aplicaciones (Vol. Tomo I). Ministerio de Agricultura. Instituto Forestal de Investigaciones y experiencias, Madrid Madrid, España.

Libby, C. E. (1980). Ciencia y Tecnología Sobre Pulpa y Papel, Tomo 1: Pulpa C.E.C.S.A. México.

Lima, L. (2013). Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. México.

Matiyuk, L., Bobzien, M., Kraus, K. (2016). Basic requirements for the production of wood-based biofuels for heating purposes. Agency for Renewable Resources. [Internet] disponible en <https://international.fnr.de/fileadmin/BIO> (Visitada el día 16 de febrero del 2020).

Martínez-Pérez, R., Pedraza-Bucio, F. E., Orihuela-Equihua, R., López-Albarrán, P., Rutiaga-Quiñones, J. G. (2015). Calorific value and inorganic material of ten mexican wood species. *Wood Research* 60(2): 281-292.

Mejía-Díaz, L. A., Rutiaga-Quiñones, J. G. (2008). Composición química de la madera de *Schinus molle* L. y proceso de pulpeo kraft. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 7(2): 145-149.

Mitchual, S.J., Frimpong-Mensah, K., Darkwa, N. A. (2014). Evaluation of fuel properties of six tropical hardwood timber species for briquettes. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems* 4:1-9.

Morales-Máximo M., Ruíz-García V.M., López-Sosa L. B., Rutiaga-Quiñones J. G. (2020). Exploitation of wood waste of *Pinus* spp. for briquette production: a case study in the community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Applied Sciences* 10: 2933.

Ngangyo-Heya, M., Foroughbahchek-Pournavab, R., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Volker Zelinski, Pintor-Ibarra, L. F. (2016). Calorific value and chemical composition of five Semi-Arid Mexican tree species. *Forests* 7(58): 1-12.

Pintor-Ibarra, L. F., Carrillo-Parra, A., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P., Rutiaga-Quiñones, J. G. (2017). Physical and chemical properties of timber byproducts from *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* and *P. pseudostrobus* for a bioenergetic use. *Wood Research* 62(6), 849-862.

Runkel, R. O. H., Wilke, K. D. (1951). Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. *Holz Roh- Werkst.* 9: 260-270p.

Sandermann, W., Rothkamm, M. (1959). Über die Bedeutung der pH-Werte von Handelshölzern und deren Bedeutung für die Praxis. *Holz Roh- Werkst.* 17: 433-440.

SEMARNAT. (2020). Anuario estadístico de la producción forestal 2017. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 288p.

Spinelli R, Nati C, Sozzi L, Magagnotti N, Picchi G. (2011). Physical characterization of comercial woodchips on the Italian energy market. *Fuel* 90(6): 2198-2202.

Tanger, P., Field, J. L., Jahn, C. E., DeFoort, M. W., Leach, J. E. (2013). Biomass for thermochemical conversion: targets and challenges. Review article. *Frontiers in Plant Science* 4(218): 1-20.

UNE-EN 14775. (2010). Biocombustibles sólidos Método para la determinación del contenido en cenizas [Solid biofuels. Method for the ash content determination].

AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos CONFEMADERA, AENOR, Grupo 9, Madrid, España.

UNE-EN 14961-1. (2011). Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 1: Requisitos generales [Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 1: General requirements]. AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos CONFEMADERA, AENOR, Grupo 32, Madrid, España.

Uprichard, J. M. (1991). Chemistry of wood and bark. In: Properties and uses of New Zealand radiata pine, vol. 1 Wood properties. Kininmonth J.A., Whitehouse L.J. (eds.) Rotorua, N.Z., N.Z. Ministry of Forestry, Forest Research Institute Research Institute, New Zealand, pp. 4.1-4.45.

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 89: 913-933.

Vega-Nieva, D. J., Fernández Lorenzo, M., Ortiz Torres, L., y Corral-Rivas, J. J. (2015). Caracterización bioenergética de los residuos de cosecha de las principales especies forestales del noroeste de España. *Información Tecnológica* 26(4), 03-12.

Werkelin, J., Skrifvars, B-J., Hupa, M. (2005). Ash-forming elements in four Scandinavian wood species. Part 1: summer harvest. *Biomass and Bioenergy* 29: 451-456.

White, R. H. (1987). Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood and Fiber Science* 19(4):446-452.

Wise, L. E., Murphy, M., D'Addieco, A. A. (1946). Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. *Pap. Trade J.* 122 (3):35-43.

Zamudio-Trejo, D., García-Trejo, J. F., Gutiérrez-Antonio, C. (2019). Conversión de residuos a biocombustibles. *Revista Ciencia* 70(1), 65-71.