



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA
EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA



T E S I S

“Composición química de la biomasa lignocelulósica, procedente de cuatro regiones de México”

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

Presenta
JULIA MONTZERRAT GUTIÉRREZ ACOSTA

Director de tesis: Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones
Co-director: M.C. Luis Fernando Pintor Ibarra

Morelia, Michoacán, México, abril 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. 0703/2020

Morelia, Mich., a 19 de noviembre de 2020

P. ING. JULIA MONTZERRAT GUTIÉRREZ ACOSTA
EGRESADA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍA DE LA MADERA.

PRESENTE.

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 LIGNOCELULÓSICA, PROCEDENTE DE CUATRO REGIONES DE MÉXICO**", bajo la dirección del **Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones**, Tel. 4431.871679, E-mail: rutiaga@umich.mx, y como Coasesor, el **M.C. Luis Fernando Pintor Ibarra**, Tel: 4431. 049267, E-mail: pintoribarra@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. D. Bucio
M.C. FABIOLA EUGENIA PEDRAZA BUCIO

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

FEPB/aaa

DEDICATORIA

A mi madre, por el apoyo incondicional que me brinda día a día.

AGRADECIMIENTOS

Primero, agradezco a mis profesores, quienes me ayudaron a llegar al punto en el que me encuentro; agradezco a mi familia, por el esfuerzo que realizaron para que cumpliera mis objetivos, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico que me brindaron para la realización de este proyecto; a Jonathan por recorrer conmigo este camino, a mis compañeros y amigos, por todos los momentos que vivimos, y finalmente, a mis Asesores Fernando Pintor y José Guadalupe Rutiaga, por todo el apoyo que me han brindado.

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 lignocelulósica, procedente de cuatro regiones de México

ÍNDICE

	Página
1. Introducción	9
2. Antecedentes	11
3. Justificación	13
4. Objetivos	14
4.1. Objetivo general	14
4.2. Objetivos específicos	14
5. Metodología	15
5.1. Colecta y preparación del material de estudio	15
5.2. Análisis químico	16
5.2.1. pH	16
5.2.2. Cenizas	17
5.2.3. Sustancias extraíbles	18
5.2.4. Holocelulosa	19
5.2.5. Lignina Runkel	20
5.3. Cálculo del poder calorífico	21
6. Resultados y discusión	22
6.1. Análisis químico	22
6.1.1. pH	22
6.1.2. Cenizas	24
6.1.3. Sustancias extraíbles	25
6.1.4. Holocelulosa	28
6.1.5. Lignina Runkel	29
6.2. Poder calorífico	31
7. Conclusiones	35
8. Bibliografía	36

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
1. Procedencia de la biomasa y su humedad inicial	6
2. Sustancias extraíbles de la biomasa de cuatro zonas de México	27

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Distribución geográfica de la colecta de muestras	16
Figura 2. Determinación de pH	17
Figura 3. Determinación de cenizas	18
Figura 4. Obtención de sustancias extraíbles	19
Figura 5. Obtención de holocelulosa	20
Figura 6. Obtención de lignina	21
Figura 7. Relación del pH y el contenido total de sustancias extraíbles	23
Figura 8. Valores de pH de las muestras lignocelulósicas	23
Figura 9. Contenido de cenizas en las muestras lignocelulósicas	25
Figura 10. Total de sustancias extraíbles en las muestras lignocelulósicas	28
Figura 11. Porcentajes de holocelulosa en las muestras lignocelulósicas	29
Figura 12. Porcentaje de lignina Runkel en las muestras lignocelulósicas	32
Figura 13. Valor calorífico en las muestras lignocelulósicas	33
Figura 14. Relación del poder calorífico y el contenido de sustancias inorgánicas	34
Figura 15. Relación del poder calorífico y el contenido de sustancias extraíbles	34
Figura 16. Relación del poder calorífico y el contenido de holocelulosa	35
Figura 17. Relación del poder calorífico y el contenido de lignina	35

RESUMEN

La presente investigación contribuye al conocimiento químico de trece muestras lignocelulósicas (*Swartzia cubensis*, *Lysiloma latisiliquum*, *Caesalpinia platyloba*, *Manilkara zapota*, *Swartzia cubensis*, *Swietenia macrophylla*, *Quercus* spp.), ramas de lima persa, hojas de lima persa, ramas de naranja, cáscaras de limón y *Olneya tesota*), procedentes de cuatro estados de la república mexicana (Quintana Roo, Durango, Veracruz y Sonora). Los resultados variaron de la siguiente manera: pH de 5.1 (*Swartzia cubensis*) a 7.3 (ramas de naranja), cenizas de 0.4% (ramas de naranja) a 6.3% (cáscaras de limón), extractos totales de 8.2% (*Quercus* spp.) a 35.0% (hojas de lima), holocelulosa de 45.4% (hojas de lima) a 70.6% (*Lysiloma latisiliquum*), lignina de 3.9% (cáscaras de limón) a 25.4% (*Caesalpinia platyloba*), y valor calorífico de 19.8 MJ/kg (*Lysiloma latisiliquum* y *Quercus* spp.) a 21.7 MJ/kg (*Olneya tesota*). Con la excepción de las muestras de encino, en todas las muestras de biomasa el contenido de extractos es relativamente alto y podría representar un potencial para futuros estudios y aplicaciones en el campo de los antioxidantes. Por las propiedades químicas y el poder calorífico, las muestras de biomasa estudiadas presentan potencial para uso local como biocombustibles densificados.

Palabras clave: Madera, celulosa, latifoliadas, biomasa, biocombustibles, extraíbles

ABSTRACT

The present research contributes to the chemical knowledge of thirteen lignocellulosic samples (*Swartzia cubensis*, *Lysiloma latisiliquum*, *Caesalpinia platyloba*, *Manilkara zapota*, *Swartzia cubensis*, *Swietenia macrophylla*, *Quercus* spp., Persian lime branches, Persian lime leaves, orange branches, Persian lime peels, and *Olneya tesota*), from four states of the Mexican Republic (Quintana Roo, Durango, Veracruz, and Sonora). The results varied as follows: pH value of 5.1 (*Swartzia cubensis*) to 7.3 (orange branches), ash of 0.4% (orange branches) to 6.3% (Persian lime peels), total of extractives of 8.2% (*Quercus* spp.) to 35.0% (Persian lime leaves), holocelulosa of 45.4% (Persian lime leaves) to 70.6% (*Lysiloma latisiliquum*), Runkel lignin of 3.9% (Persian lime peels) to 25.4% (*Caesalpinia platyloba*), and calorific value of 19.8 MJ/kg (*Lysiloma latisiliquum* y *Quercus* spp.) to 21.7 MJ/kg (*Olneya tesota*). With the exception of the oak samples, in all the biomass samples the extractives content is relatively high and could represent a potential for future study and applications in the field of antioxidants. Due to the chemical properties and calorific value, the biomass samples studied present potential for local use as densified biofuels.

Keywords: Wood, cellulose, broadleaf, biomass, biofuels

1. INTRODUCCIÓN

El agotamiento de las materias primas no renovables, así como la creciente conciencia ambiental, ha motivado la valorización de la biomasa para la producción de energía. Aunque los primeros esfuerzos se centraron en el desarrollo de los biocombustibles de primera generación (bioetanol, biodiesel y biogas) -según la materia prima con que se producen-, la tendencia actual es hacia la investigación en los biocombustibles de segunda generación, que permiten la transformación de la biomasa lignocelulósica (obtenida a partir de residuos forestales o de cultivos, maderas de bajo precio o serrín) en energía (Faba *et al.*, 2014; Reyes-Rodríguez *et al.* 2016).

La biomasa para la producción de energía puede provenir de muchas fuentes, las más comunes son los aprovechamientos forestales, cultivos agrícolas, residuos de aprovechamientos forestales, de granjas de animales y de industrias (Kiss y Alexa, 2014). La biomasa que principalmente se emplea para elaborar biocombustibles sólidos son los residuos agrícolas (paja, estiércol de animales, cáscaras de todo tipo), madera y residuos de esta (Carrillo-Parra *et al.*, 2016).

Los biocombustibles son una fuente de energía renovable, procesada por el hombre a partir de materia orgánica o biomasa, pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos, y su propósito final es liberar la energía contenida en sus componentes químicos, mediante una reacción de combustión (Reyes-Rodríguez *et al.*, 2016). La bioenergía a partir de materiales forestales puede producirse mediante diversos procesos que van desde la quema de trozos y ramas para proporcionar calor, hasta la gasificación de astilla de madera para producir combustible para el transporte (Velázquez, 2018). Ejemplo de estos procesos son la combustión, pirolisis, licuefacción y gasificación.

La biomasa supone una fuente de energía, ya que se puede transformar en productos combustibles, conocidos como biocombustibles (Velázquez, 2018). Los biocombustibles sólidos (leña, astillas de madera, pellets, briquetas y carbón vegetal) son importantes vectores energéticos derivados de la biomasa lignocelulósica (Riegelhaupt, 2016). Las emisiones y los residuos del proceso de combustión de los biocombustibles a partir de biomasa contaminan menos que los combustibles derivados del petróleo o carbón, por lo que son considerados como fuente de energía más limpia (Velázquez, 2018).

Es conocido que el proceso de transformación de la madera grandes cantidades de biomasa lignocelulósica es generada (Zavala y Hernández, 2000) y en ocasiones con algunos o pocos usos locales (Correa-Méndez *et al.*, 2014). Estos residuos lignocelulósicos son importantes para la generación de energía (Karinkanta *et al.*, 2018), pero debido a la variación de la composición química de los diferentes tipos de biomasa (Werkelin *et al.*, 2005; Spinelli *et al.*, 2011), resulta necesario llevar a cabo la evaluación de sus propiedades con miras a usarlos como biocombustibles con fines domésticos o aplicaciones industriales (Mitchual *et al.*, 2014). En este sentido, se propone el presente trabajo para conocer la composición química de la biomasa de maderas latifoliadas generada en proceso de transformación primaria de la madera, así como de residuos de cítricos, con la finalidad de proponer su uso como biocombustibles densificados y aportar datos de referencia para comparación con otros tipos de biomasa.

2. ANTECEDENTES

Rutiaga-Quiñones *et al.* (2010) realizaron un estudio de las maderas tropicales de *Dalbergia granadillo* Pittier y de *Platymiscium lasiocarpum* Sandw, en donde reportan cantidades de los componentes químicos de las especies, tales como cenizas, extraíbles, lignina y holocelulosa.

Martínez-Pérez *et al.* (2012) realizaron una investigación acerca del poder calorífico y material inorgánico en la corteza de seis árboles frutales (*Annona cherimola* Mill., *Citrus aurantifolia* Swingle, *Malus domestica* Borkh., *Psidium guajava* L., *Prunus dulcis* [Mill.] D. A. Webb y *Tamarindus indica* L.).

Honorato-Salazar *et al.* (2015) determinaron la composición química de madera de *Ceiba pentandra*, *Hevea brasiliensis* y *Ochroma pyramidale*, teniendo como principal objetivo compartir información para explorar posibles aplicaciones químicas de especies tropicales.

Ngangyo-Heya *et al.* (2016) determinaron el poder calorífico y la composición química de 5 especies de latifoliadas del semi-desierto mexicano: (*Helietta parvifolia* (Gray) Benth., *Ebenopsis ebano* (Berl.) Barneby, *Acacia berlandieri* (Benth.), *Havardia pallens* (Benth.) Britton & Rose y *Acacia wrightii* (Benth.), para proponer estas especies como biocombustibles sólidos.

Herrera-Fernández *et al.* (2017) realizaron estudio acerca de la densidad, composición química y poder calorífico de la madera de tres especies de encino del Estado de Michoacán.

Cárdenas-Gutiérrez *et al.* (2018) realizaron una investigación de la composición química de las ramas de 6 especies de madera y su corteza (*Alnus acuminata*, *A. jorullensis*, *Quercus candicans*, *Q. laurina*, *Q. rugosa*, *Symplocos citrea*).

Ruiz-Aquino *et al.* (2019) determinaron la composición química (extraíbles totales, cenizas, lignina y holocelulosa) de 5 especies latifoliadas del estado de Oaxaca (*Alnus acuminata*, *Arbutus xalapensis*, *Myrsine juergensenii*, *Persea longipes* y *Prunus serótina*)

Ruiz-Aquino *et al.* (2020) reportan la composición química básica (porcentajes de cenizas, extraíbles, holocelulosa y lignina) de *Quercus macdougalii* Martínez.

Recientemente Rutiaga-Quiñones *et al.* (2020) publicaron la humedad inicial, la distribución granulométrica, el análisis proximal, el análisis elemental y el microanálisis de las cenizas de las muestras de biomasa estudiadas en este trabajo.

3. JUSTIFICACIÓN

Un 70 % del territorio en México está cubierto de vegetación forestal, de las cuales 15 millones de hectáreas pueden ser aprovechadas forestalmente (CONAFOR, 2017). Por otro lado, se estima que el 28% de la producción total de industria primaria de la madera pertenecen a residuos (SEMARNAT, 2006), que por lo general no tienen uso, sólo en algunas comunidades indígenas estos subproductos tienen uso local (Correa *et al.*, 2014). Por lo tanto, el bajo costo y alta disponibilidad de esta biomasa ha llamado la atención del sector productivo y de los investigadores a proponer nuevas alternativas productivas, un caso reciente es la caracterización de humedad, distribución granulométrica, análisis elemental y proximal, y el microanálisis de las cenizas de estas muestras lignocelulósicas (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020). El presente trabajo, podrá aportar datos para evaluar la posible calidad que tendrían los biocombustibles densificados elaborados con dicha biomasa.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar la composición química de los residuos maderables de siete empresas de la transformación primaria forestal y de la biomasa de dos huertas de árboles frutales de México, para su posible aprovechamiento en la elaboración biocombustibles sólidos.

4.2 Objetivos específicos

- Conocer el pH
- Conocer el contenido de cenizas
- Conocer la cantidad de sustancias 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

Las muestras fueron otorgadas de las colectas del proyecto de investigación del clúster de biocombustibles sólidos para la generación térmica y eléctrica, de la Línea 2: “caracterización y estandarización de biocombustibles sólidos”. La biomasa analizada se colectó en cuatro estados de la república, siendo estos Quintana Roo, Durango, Veracruz y Sonora.

Las muestras de madera se tomaron de la parte baja, media y alta de los montículos de aserrín; las ramas y hojas de los cítricos se tomaron de las podas realizadas en diferentes huertas y las cáscaras de limón se tomaron de una empresa procesadora de frutas, ubicadas en Martínez de la Torres, Veracruz. Las muestras fueron transportadas por paquetería, avión y por el transporte oficial de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera y se recibieron aproximadamente 50 kg de cada una. En la Figura 1 se muestran la distribución geográfica de las especies recolectadas en cada uno de los estados antes mencionados. La Tabla 1 contiene datos sobre la humedad inicial de cada material recolectado (Rutiaga-Quiñones *et al.* 2020).

La biomasa de los residuos cítricos colectados en el Estado de Veracruz, se secaron bajo sombra, después se astillaron y se molieron en un molino Wiley. Los residuos maderables derivados de la transformación primaria de la madera se secaron bajo sombra, una vez que la biomasa se equilibró con la humedad ambiente se tamizaron usando cuatro fracciones malla número: 20, 40 y 60. La harina de madera obtenida de malla 40 se utilizó para los análisis químicos.

Tabla 1. Procedencia de la biomasa y su humedad inicial.

Muestra	Estado	Nombre	Contenido de humedad inicial (%)
1	Quintana Roo	<i>Swartzia cubensis</i> (Britt. y Wilson) Standl.	35.58 ±0.23
2		<i>Lysiloma latisiliquum</i> (L.) Benth.	52.38 ±0.46
3		<i>Caesalpinia platyloba</i> S. Watson	47.68 ±0.06

4		<i>Manilkara zapota</i> (L.) v. Royen	44.13 ±0.21
5		<i>Swartzia cubensis</i> (Britt. y Wilson) Standl.	25.11 ±0.26
6		<i>Swietenia macrophylla</i> G. King.	25.83 ±0.31
7	Durango	<i>Quercus</i> spp.	46.30 ±0.18
8		<i>Quercus</i> spp.	33.59 ±0.66
9	Veracruz	Ramas de lima persa	41.76 ±0.24
10		Hojas de lima persa	70.89 ±0.52
11		Ramas de naranja	29.05 ±0.65
12		Cáscaras de limón	19.23 ±0.78
13	Sonora	<i>Olneya tesota</i> A. Gray.	6.04 ±0.22

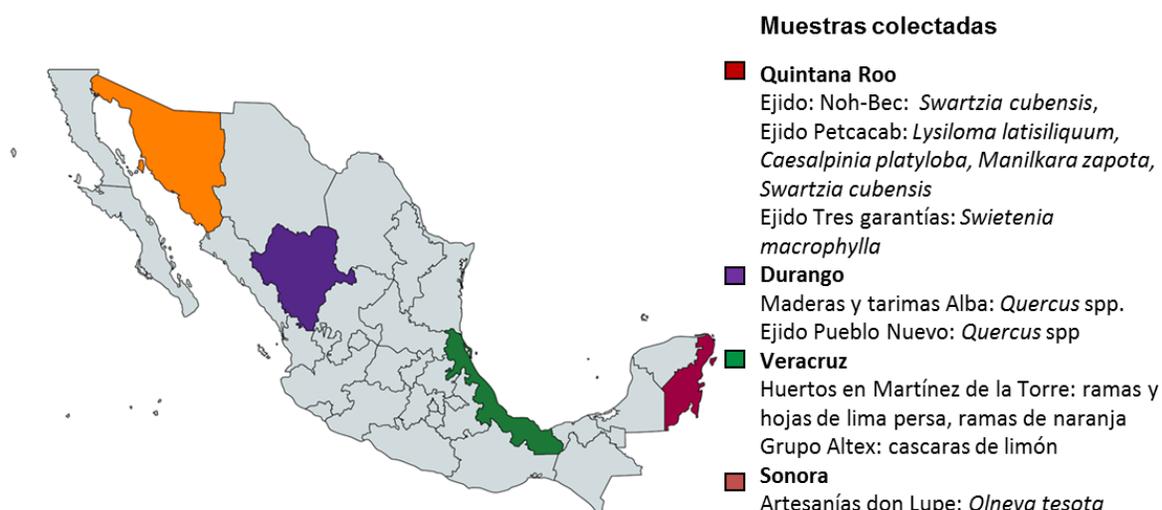


Figura 1. Distribución geográfica de la colecta de las muestras

5.2. Análisis químico

5.2.1. pH.

Para la determinación del pH se pesó 1 gramo de harina en un vaso de precipitado de 50 mL y se agregaron 10 mL de agua destilada, el proceso se repitió 3 veces por cada muestra. Con la ayuda de un potenciómetro por inmersión del electrodo (Figura 2), se determinó el pH al momento de agregar el agua destilada, de igual manera se determinó al paso de 5 minutos, 4 horas, 24 horas y finalmente 48 horas. Lo anterior se realizó

siguiendo los pasos descritos en un método definido por Sandermann y Rothkamm (1959).



Figura 2. Determinación de pH. (A, B) Se observa la preparación de las muestras (A, B), la determinación del pH (C), así como también el equipo con el que se realizó el análisis (D).

5.2.2. Cenizas.

El contenido de cenizas se realizó por medio de un método gravimétrico, en el cual se colocó 1 g de muestra de harina de madera dentro de un crisol de níquel con su peso constante conocido, para posteriormente colocarlas en una placa de calentamiento para eliminar la fracción volátil y finalmente, en una mufla a 550 ± 5 °C durante 4 horas (Figura 3). Todo el procedimiento se llevó a cabo de acuerdo con la norma UNE- EN 14775 (2010).



Figura 3. Determinación de cenizas. Se muestra en el orden siguiente: peso conocido de la muestra (A), muestra sometida a calor en placa de calentamiento para eliminar material volátil (B), muestra sometida a calor vía mufla a 550 °C (C) y finalmente, peso final de la muestra (D).

5.2.3. Sustancias extraíbles.

Las sustancias extraíbles se obtuvieron utilizando los siguientes disolventes; ciclohexano, acetona, metanol en equipo soxhlet y finalmente, agua caliente a reflujo (Mejía-Díaz y Rutiaga-quiñones, 2008). Se pesaron 7 gramos de harina en un dedal de celulosa y se colocó dentro del porta muestras del equipo Soxhlet, este mismo se ensambla a un matraz (pesado con anterioridad) en el cual se agregaron 150 mL del solvente en turno, el tiempo de extracción para cada uno de los solventes fue de 6 horas cada uno. Posteriormente los solventes fueron recuperados en un rotavapor con ayuda de vacío excepción del agua a caliente a reflujo, en este caso, el agua fue evaporada con ayuda de una placa de calentamiento. Finalmente, cada matraz que contenían los extractos se colocó en un desecador hasta peso constante y fueron pesados para

obtener su rendimiento en base a peso anhidro, los extraíbles fueron almacenados para su posterior estudio (Figura 4).

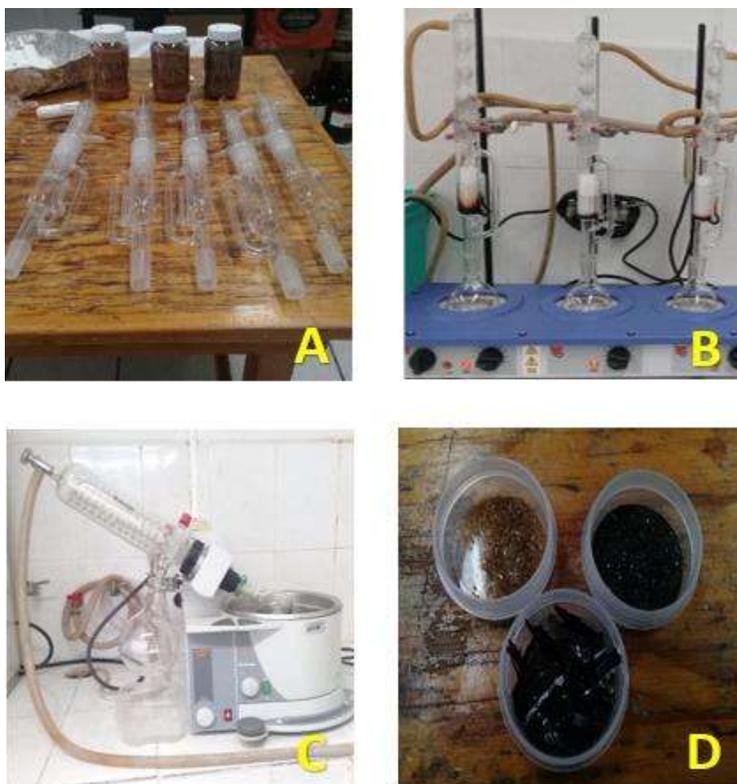


Figura 4. Obtención de sustancias extraíbles. Equipo Soxhlet (A), extracción con disolventes (B), recuperación de solventes (C), extraíbles almacenados (D).

5.2.4. Holocelulosa.

El porcentaje de holocelulosa se determinó pesando 1 g de harina de madera libre de extraíbles y se colocó en un matraz Erlenmeyer, además para llevar a cabo la deslignificación se agregaron 0.3 g de clorito de sodio más 32 mL de agua destilada y 2 gotas de ácido acético glacial. La incorporación de clorito de sodio y ácido acético glacial, en las cantidades ya indicadas, se repitió cíclicamente cada hora, por un periodo total de 4 horas. La deslignificación anterior se realizó en un baño María a 75 ± 3 °C, cabe mencionar que el método se desarrolló dentro de una campana de extracción. La muestra se dejó enfriar y seguidamente se vertió sobre un papel filtro de porosidad media

(deshidratado con anterioridad), el cual se colocó dentro de un embudo Buchner y se filtró con ayuda de vacío, el residuo se lavó con abundante agua fría y se vertieron 20 ml de acetona. Por último, el papel filtro con la holocelulosa fue llevado a una estufa de secado a 40 °C durante hasta peso constante, al término de este periodo la muestra se llevó a un desecador, se pesó y se almacenó (Figura 5). El procedimiento fue realizado de acuerdo con Wise *et al.* (1946).



Figura 5. Obtención de holocelulosa. Se muestra el proceso de deslignificación de la muestra (A), filtrado y lavado de holocelulosa (B), holocelulosa (C), holocelulosa almacenada (D).

5.2.5. Lignina Runkel.

El porcentaje de lignina se determinó según la metodología de Runkel y Wilke (1951), que consistió en pesar 1 g de harina libre de extraíbles y se colocó en un vaso de precipitado, se agregaron 50 mL de ácido sulfúrico al 72% y 5.0 ml de ácido bromhídrico al 40 %, se dejó reposar por 2 horas. Una vez transcurrido el tiempo de reposo, se agregaron 200 mL de agua destilada y se llevó a ebullición durante 5 minutos agitando vigorosamente, todo el procedimiento se llevó a cabo en una campana de extracción y utilizando los equipos de protección requeridos en el laboratorio de química. Posteriormente se filtró en papel filtro de porosidad media con ayuda de un embudo

Buchner aplicando vacío y finalmente se lavó con abundante agua caliente hasta neutralizar la muestra. La lignina obtenida se secó en una estufa de secado hasta peso constante a 105 ± 3 °C, después se dejó enfriar en un desecador, se pesó, almacenó y se realizaron los cálculos correspondientes.



Figura 6. Obtención de lignina Runkel. Hidrólisis ácida de la holocelulosa usando ácido sulfúrico al 72% y ácido bromhídrico al 40% (A), filtrado y lavado de lignina (B), lignina deshidratada (C), lignina almacenada (D).

5.3. Cálculo del poder calorífico

El poder calorífico de las muestras se calculó utilizando el modelo matemático basado en la composición química según White (1987), el cual consistió en la sustitución de los valores porcentuales de lignina (L) y total de extraíbles (E) con la siguiente ecuación: $HHV = 0.07444 * L + 0.0661 * E + 17.9017$ Adicionalmente, con los resultados obtenidos se llevaron a cabo relaciones lineales para conocer la existencia del efecto del pH y contenido de sustancias extraíbles, y conocer la influencia del contenido de sustancias inorgánicas, 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.

Es conocido que el pH está influenciado por la cantidad y tipo de sustancias extraíbles presentes en la madera, específicamente por la presencia de ácidos libres y grupos de ácidos, como ácidos resínicos, siendo en general más ácido el duramen que la albura (Fengel y Wegener, 1989; Choon y Roffael, 1990), efecto que aquí puede ser observado, aun cuando las muestras de biomasa aquí estudiadas no contienen ácidos resínicos, como es el caso de las maderas de coníferas.

Las muestras colectadas en el Estado de Veracruz presentaron valores cercanos al pH neutro, en particular las ramas de naranja procedentes del Estado de Veracruz (muestra 11) presentan un pH neutro (Figura 8). En otro estudio sobre especies de latifoliadas se encontró el pH ligeramente alcalino (8.7) en madera de *Pseudobombax ellipticum* (Ávila-Calderón y Rutiaga-Quiñones, 2015). En relación a los residuos de *Quercus* spp. los valores obtenidos en este trabajo son ligeramente mayores al rango 4.54 a 5.14 en maderas de *Q. candicans*, *Q. laurina* y *Q. rugosa* (Herrera-Fernández *et al.*, 2017). Por otro lado, la biomasa obtenida a partir de maderas tropicales y de *Quercus* spp. presentaron un pH moderadamente ácido, lo que podría afectar en el contacto con ciertos metales, por ejemplo, en el hierro podrían causar corrosión (Fengel y Wegener, 1989), lo anterior, si los equipos de combustión de biomasa están fabricados con estos materiales requerirán mantenimiento constante.

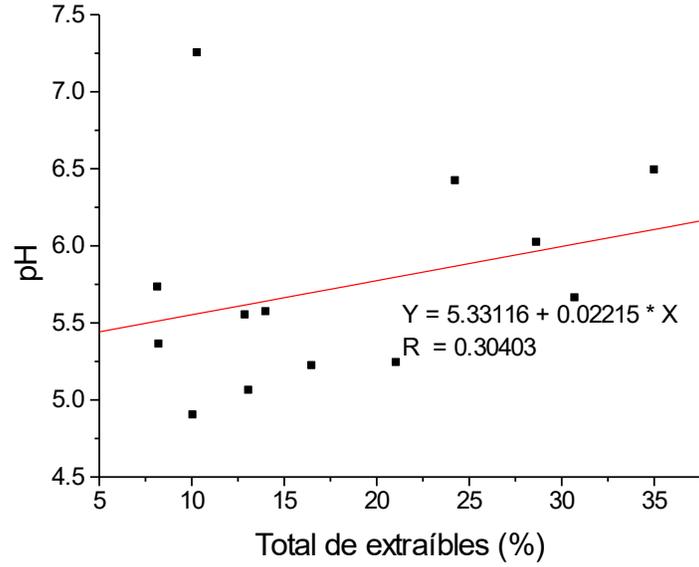


Figura 7. Relación del pH y el contenido total de sustancias extraíbles.

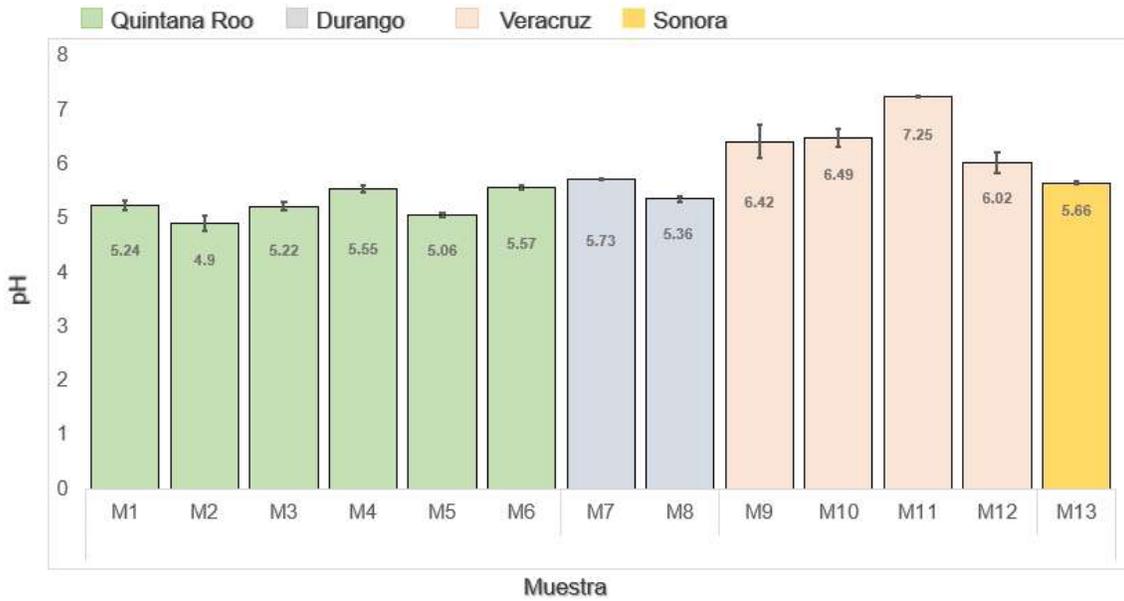


Figura 8. Valores de pH de las muestras lignocelulósicas.

6.1.2. Cenizas.

El contenido de cenizas es una medida aproximada de las sales minerales y otras materias inorgánicas en la fibra después de la combustión (Rowell, 2013). El contenido inorgánico puede ser bastante alto en maderas que contienen grandes cantidades de sílice; sin embargo, en la mayoría de los casos, el contenido inorgánico es inferior al 0.5% (Browning, 1955; Rowell 2013).

Como se muestra en la Figura 9, la especie con más contenido de ceniza fue la cáscara de limón correspondiente a la muestra 12, por otro lado, las ramas de naranja (muestra 11) presentaron el porcentaje más bajo de las especies estudiadas. Con respecto a la biomasa de las maderas latifoliadas colectadas en el Estado de Quintana Roo y Sonora (muestras 1-6 y 13) presentaron valores altos de cenizas mayores a comparación de la biomasa derivada de especies de pinos, donde se han publicado valores que oscilan entre 0.13% a 0.3% (Bernabé-Santiago *et al.* 2013; Pintor-Ibarra *et al.* 2017), sin embargo, según Rodríguez-Jiménez *et al.* (2019) reportan resultados superiores a comparación de las muestras aquí estudiadas, con valores entre 4.77% a 7.22% en maderas de seis especies tropicales. También, se ha reportado en literatura que las maderas tropicales son ricas en sustancias inorgánicas (Fengel y Wegener, 1989). Las especies de encinos muestran una variación entre ellas, los residuos de *Quercus* spp. de la muestra ocho se encuentran dentro del rango de 0.87% a 1.38% reportadas especies de encinos mexicanos (Honorato *et al.*, 1998; Ruiz-Aquino *et al.* 2015; Cárdenas-Gutiérrez *et al.* 2018), mientras que la muestra número siete, es mayor al rango citado anteriormente.

En general la biomasa caracterizada en este trabajo presentó porcentajes altos de cenizas, lo que pudiera tener efectos negativos para su uso como biocombustibles sólidos ya que, según reportes a mayor contenido de cenizas el poder calorífico tiende a disminuir (Fengel y Wegener, 1989; Martínez-Pérez *et al.*, 2012), pero este efecto no fue observado claramente en los resultados obtenidos. También, se ha reportado que alto contenido de cenizas del combustible puede afectar el equipo de combustión y a los usuarios del sector residencial por aumentar los procesos de limpieza (Oberberger y Thek, 2010). Con respecto a los estándares internacionales, sólo la biomasa derivada de las ramas de lima persa y naranja (muestras 9 y 11) se encuentran por debajo de valor

límite para la fabricación de pélets 0.70% (Oberberger y Thek, 2010), y del valor límite para briquetas 0.5% (ÖNORM M 7135, 2000), el resto de las muestras se encuentran por encima de lo valores recomendados.

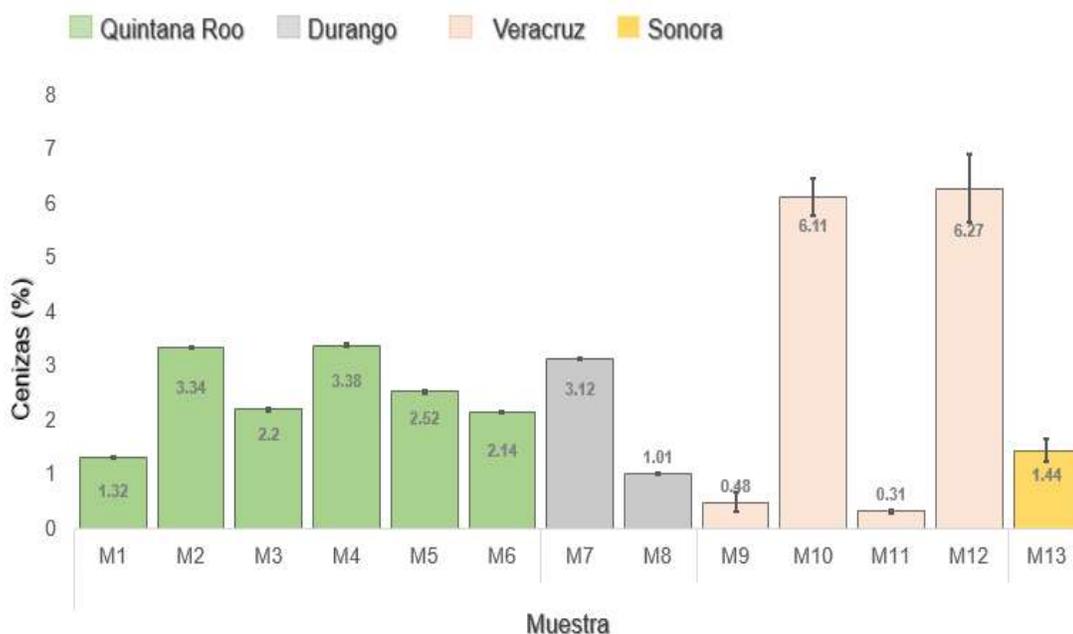


Figura 9. Contenido de cenizas en las muestras lignocelulósicas.

6.1.3. Sustancias extraíbles.

Los extraíbles son sustancias orgánicas de baja masa molecular, que no forman parte de la pared celular de la madera, comúnmente son llamados también sustancias accesorias o componentes extraños (Fengel y Wegener, 1989).

El mayor rendimiento de extraíbles totales se obtuvo de las hojas de lima persa (muestra 10) procedentes del Estado de Veracruz, los menores rendimientos se obtuvieron a partir de las muestras de *Quercus* spp. (muestras 7 y 8) colectadas en el Estado de Durango (Tabla 2, Figura 10). Los residuos maderables obtenidos a partir de las maderas tropicales colectadas en los estados de Quintana Roo (muestras 1 a la 6) y Sonora (muestra 13) presentaron la siguiente tendencia de solubilidad acetona > metanol > agua caliente > ciclohexano (Tabla 2). Los valores de extraíbles totales obtenidos en los

residuos de las maderas tropicales en esta investigación se encuentran dentro del rango 10.19% a 33.35% obtenidos en la madera de *Dalbergia granadillo* y *Platymiscium lasiocarpum* (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2010). Recientemente Rodríguez-Jiménez *et al.* (2019) publicaron el rendimiento de sustancias extraíbles en seis especies de maderas tropicales colectadas en el Estado de Yucatán reportando un rango de entre 15.4% a 28.5%, dentro de este intervalo se encuentran los residuos maderables de *S. cubensis* (muestra 1) y *C. platyloba* (muestra 3). Con respecto a los subproductos maderables de *Quercus* spp. colectados en el Estado de Durango, los rendimientos obtenidos en este trabajo (Figura 9), son similares a los obtenidos en albura (7.24%) y duramen (8.35%) de *Q. macdougalii* (Ruiz-Aquino *et al.*, 2020), también concuerdan con el intervalo 6.94% a 9.95% en albura y duramen de *Q. candicans*, *Q. laurina* y *Q. rugosa*, según Herrera-Fernández *et al.* (2017). La biomasa obtenida a partir de los residuos de los cítricos, colectados en el Estado de Veracruz son ricos en extraíbles (Figura 10). El mejor porcentaje se obtuvo de las hojas de limas persa y los valores concuerdan con el valor 34.39% obtenido usando la misma secuencia de solubilidad en hojas de otro árbol frutal de *Psidium guajava* según Camarena-Tello *et al.* (2015). En cuanto a las ramas de lima persa y de naranja se encuentran dentro de rango 9.16% a 32.08 % reportado en ramas de cinco especies de latifoliadas del semi desierto mexicano (Ngangyo-Heya *et al.*, 2016). Los residuos maderables tropicales y la biomasa de los cítricos son muy ricos en extraíbles, de acuerdo, a fuentes citadas, estas sustancias incrementan el poder calorífico en los biocombustibles sólidos (Ngangyo-Heya *et al.*, 2016; Pintor-Ibarra *et al.*, 2017), lo que se observa en los resultados aquí obtenidos. Además, se atribuye a que maderas con alto porcentaje de extraíbles presentan alta densidad, lo que podría favorecer al reducir la fricción durante el prensado de biocombustibles sólidos, esto genera más movilidad de las partículas y mejor acomodo (Carrillo-Parra *et al.*, 2018).

Tabla 2. Sustancias extraíbles de la biomasa de cuatro zonas de México.

Muestra	Origen	Nombre	Solubilidad (%)				
			Ciclohexano	Acetona	Metanol	Agua Caliente	Total de extraíbles
1	Quintana Roo	<i>Swartzia cubensis</i>	0.43 ±0.10	14.79 ±0.74	4.27 ±0.18	1.57 ±0.14	21.08 ±0.97
2		<i>Lysiloma latisiliquum</i>	0.30 ±0.12	4.31 ±0.85	2.10 ±0.30	3.37 ±0.04	10.09 ±0.46
3		<i>Caesalpinia platyloba</i>	5.48 ±1.08	6.47 ±0.74	2.35 ±0.18	2.22 ±0.25	16.52 ±0.78
4		<i>Manilkara zapota</i>	1.86 ±0.03	5.90 ±0.28	3.20 ±0.51	1.94 ±0.01	12.91 ±0.85
5		<i>Swartzia cubensis</i>	2.45 ±0.04	6.03 ±0.63	2.89 ±0.08	1.72 ±0.33	13.10 ±0.83
6		<i>Swietenia macrophylla</i>	1.09 ±0.006	7.14 ±0.37	2.98 ±0.13	2.82 ±0.07	14.04 ±0.44
7	Durango	<i>Quercus</i> spp.	0.15 ±0.05	3.57 ±0.56	1.38 ±0.19	3.07 ±0.26	8.18 ±0.68
8		<i>Quercus</i> spp.	0.25 ±0.01	3.43 ±0.21	1.62 ±0.20	2.94 ±0.01	8.25 ±0.42
9	Veracruz	Ramas de lima persa	4.67 ±0.21	14.76 ±0.36	1.55 ±0.15	3.29 ±0.21	24.28 ±0.51
10		Hojas de lima persa	7.99 ±0.65	3.96 ±1.2	1.78 ±0.37	21.29 ±0.96	35.04 ±1.95
11		Ramas de naranja	0.45 ±0.08	4.52 ±0.67	1.12 ±0.23	4.21 ±0.82	10.32 ±0.30
12		Cáscaras de limón	1.63 ±0.59	2.98 ±0.58	0.99 ±0.25	23.06 ±0.83	28.67 ±1.75
13	Sonora	<i>Olneya tesota</i>	0.64 ±0.04	22.04 ±0.39	4.75 ±0.13	3.30 ±0.07	30.74 ±0.55

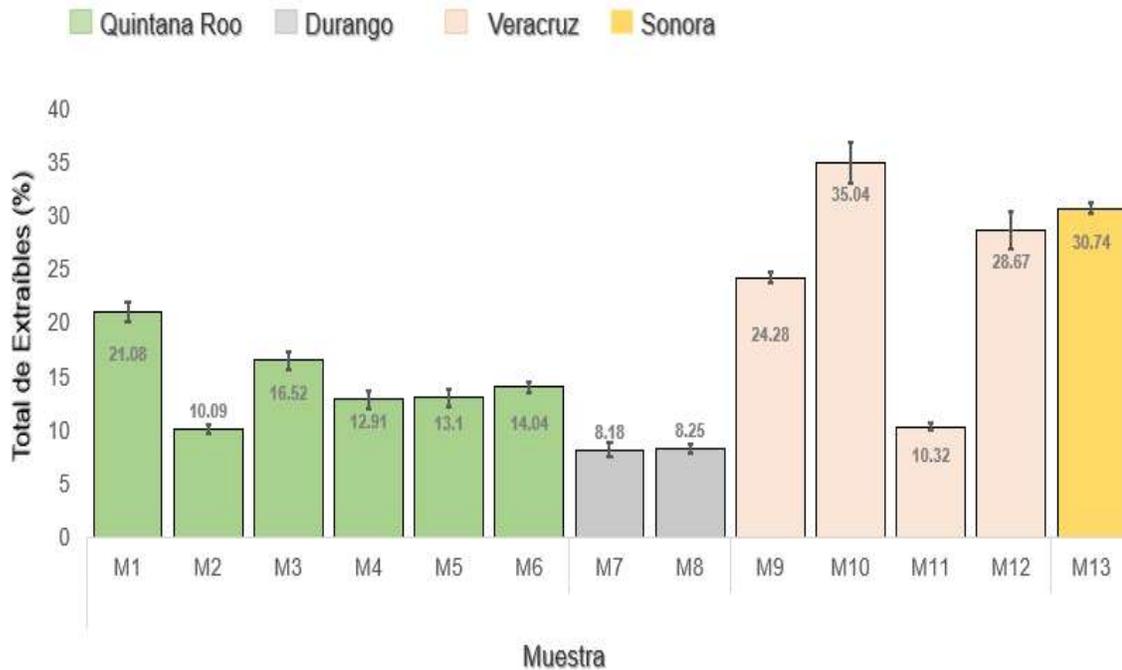


Figura 10. Total de sustancias extraíbles en las muestras lignocelulósicas.

6.1.4. Holocelulosa

La holocelulosa representa la fracción total de polisacáridos, es decir celulosa más hemicelulosas, la presencia de estos carbohidratos generalmente son mucho más elevados en maderas duras que en maderas blandas. (Fengel y Wegener, 1989).

En la figura 11 se muestra que el valor más alto obtenido en este estudio corresponde a la muestra 8 (*Quercus* spp.) mientras que el más bajo es el de las hojas de lima persa correspondiente a la muestra 10. Con respecto a la biomasa derivada de las maderas tropicales; de la especie de *S. cubensis* colectada en el Estado de Quintana Roo se obtuvieron valores muy similares (Figura 10) a las maderas de las siguientes especies tropicales: *Havardia albicans* (61.88%), *Croton glabellus* (61.22%), y a *Lonchocarpus yucatanensis* (62.84%) reportados por Rodríguez-Jiménez *et al.* (2019). El porcentaje de holocelulosa de la muestra 13 derivada de *O. tesota* es muy similar al valor 49.24% obtenido en madera de *Dalbergia granadillo* (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2010), del resto de

las especies tropicales se obtuvieron valores mayores de holocelulosa. La biomasa obtenida de la transformación primaria de las maderas de *Quercus* spp. colectas en el Estado de Durango, concuerdan con los siguientes valores 69.7% a 70.8% obtenidos en madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia* por Ruiz-Aquino *et al.* (2015). Las ramas colectadas en las huertas de árboles frutales del Estado de Veracruz (muestras 9 y 11) resultaron con porcentajes de holocelulosa muy similares a valores 64.80% a 69.49% reportados en ramas derivas de huertas de *Psidium guajava* por Camarena-Tello *et al.* (2015).



Figura 11. Porcentajes de holocelulosa en las muestras lignocelulósicas.

6.1.5 Lignina Runkel

La lignina es uno de los polímeros estructurales que componen la pared celular; proporciona el soporte mecánico a las plantas y las protege contra el ataque de microorganismos, además de impermeabilizar la pared celular (Vanholme *et al.*, 2010). En figura 12 se presentan los porcentajes obtenidos de lignina Runkel, las cáscaras de limón (muestra 12) presentaron el valor inferior, en contraparte, generalmente los

residuos maderables obtenidos de las maderas tropicales fueron los que presentaron los valores más altos, así mismo, las muestras número 1, 4, 5, 6 y 13, se encuentran dentro de rango 17.64% a 23.95% de lignina Klason en madera de especies tropicales (Rodríguez-Jiménez *et al.*, 2019), a excepción de la biomasa de *L. latisiliquum* que presentó un porcentaje menor y a *C. platyloba* que rindió un dato mayor y es muy similar al valor de 25.24% reportado en la madera tropical de *Platymiscium lasiocarpum* (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2010).

Los resultados de lignina Runkel de las muestras de *Quercus* spp. se encuentran dentro los valores 16.16% a 19.37% de lignina Runkel obtenidos en diversas especies de encinos mexicanos (Herrera-Fernández *et al.*, 2017; Ruiz-Aquino *et al.*, 2020).

En cuanto a la biomasa colectada en las huertas del Estado de Veracruz, las ramas de lima persa se encuentran dentro de los datos 17.87% a 19.43% de lignina Runkel obtenidas ramas de *Psidium guajava* (Camarena-Tello *et al.*, 2015). El porcentaje de lignina Runkel de las ramas de naranja analizadas en esta investigación son comparables con los valores encontrados en ramas de las siguientes latifoliadas: *Havardia pallens* (20.18%), *Acacia berlandieri* (21.04%) usando el mismo método (Ngangyo-Heya *et al.*, 2016).

Ahora bien, se ha reportado en la literatura que el alto contenido de lignina en los materiales lignocelulósicos influye positivamente en su poder calorífico y su calidad como biocombustible (Jara, 1989; Francescato *et al.*, 2008; Ngangyo-Heya *et al.*, 2016; Pintor-Ibarra *et al.*, 2017), por lo anterior, a partir de los residuos maderables de las maderas tropicales se pueden obtener biocombustibles sólidos con alto poder calorífico.

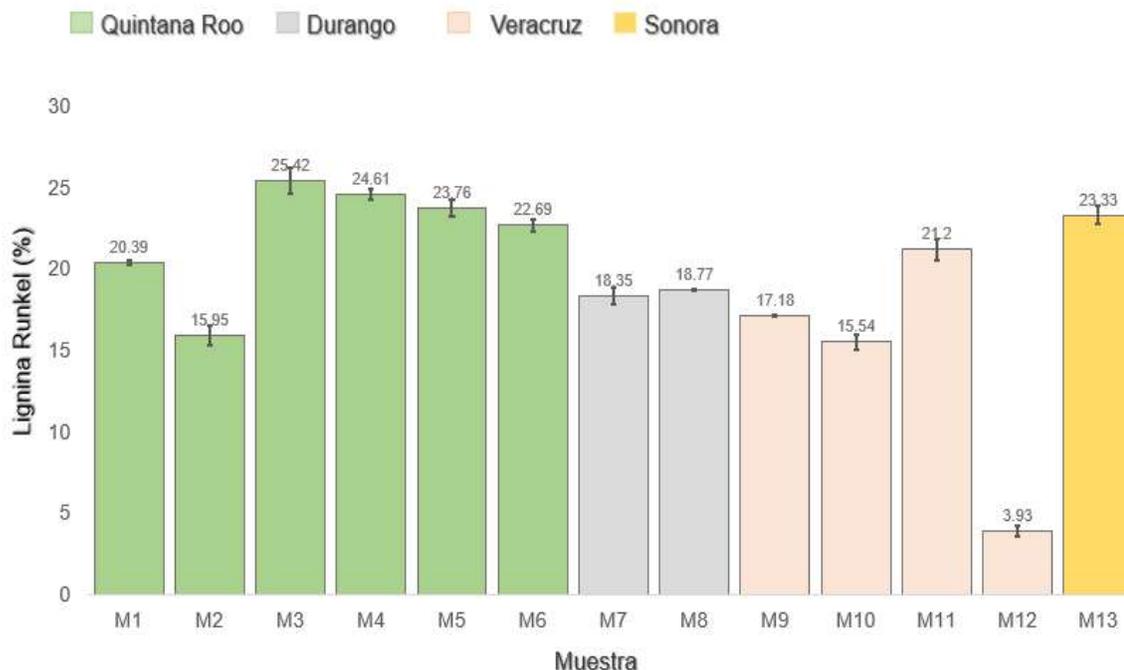


Figura 12. Porcentaje de lignina Runkel en las muestras lignocelulósicas.

6.2 Poder calorífico

Los valores caloríficos se encuentran reportados en la Figura 13 y son mayores al promedio 18.85 MJ/kg calculado a partir del análisis elemental y al valor 19.33 MJ/kg en base al análisis proximal, en ambos casos de las mismas muestras según Rutiaga-Quiñones *et al.* (2020). Los valores de los residuos maderables de las especies tropicales oscilan entre 19.75 MJ/kg y 21.67 MJ/kg, estos datos son mayores al rango 16.20 MJ/kg a 18.45 MJ/kg, reportado para seis especies de maderas tropicales (*Senegalia gaumeri*, *Havardia albicans*, *Lysiloma latisiliquum*, *Croton glabellus*, *Lonchocarpus yucatanensis*, y *Neomillspaughia emarginata*) por Rodríguez-Jiménez *et al.* (2019). Con respecto a la biomasa de *Quercus* spp. el poder calorífico es mayor a los valores 17.48 MJ/kg a 17.92 MJ/kg reportados en madera de *Q. candicans* *Q. laurina* y *Q. rugosa* (Herrera-Fernández *et al.*, 2017). La misma tendencia presentaron la biomasa de las ramas de lima persa y de naranja, en contraste a valores de 17.29 MJ/kg a 17.92 MJ/kg publicados para ramas de cinco especies del semi-desierto mexicano (*Helietta parvifolia*, *Ebenopsis ebano*, *Acacia berlandieri*, *Havardia pallens* y *Acacia wrightii* por Ngangyo-Heya *et al.* (2016).

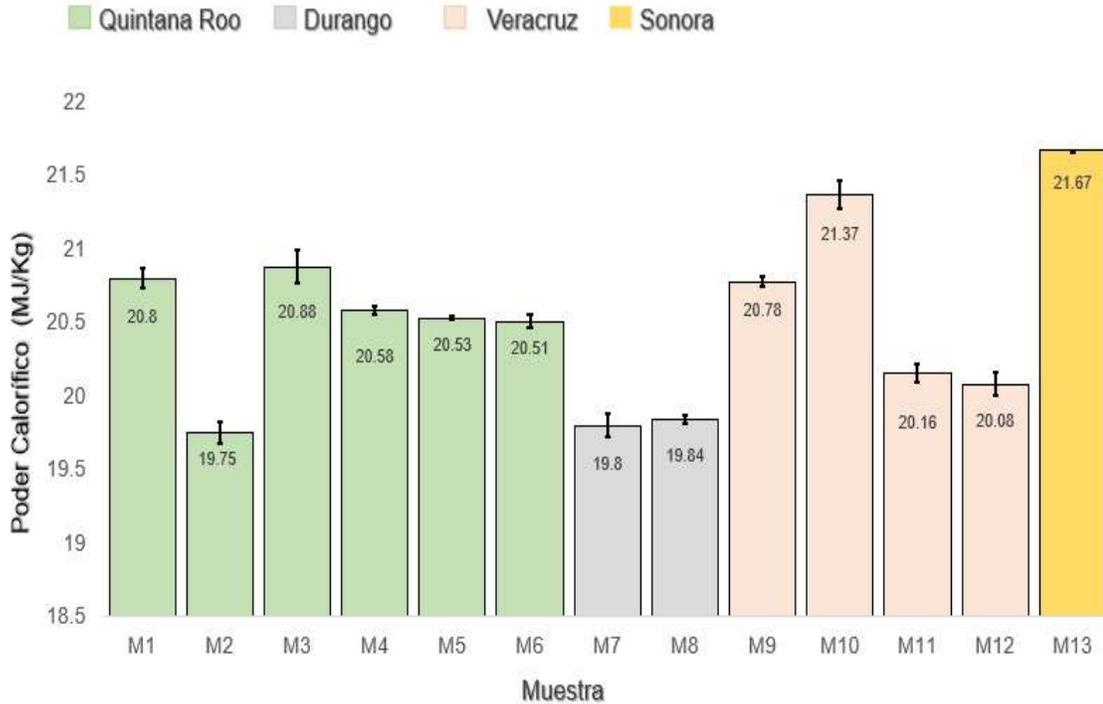


Figura 13. Valor calorífico en las muestras lignocelulósicas.

Es conocido que el contenido de sustancias inorgánicas presentes en la biomasa lignocelulósica afecta negativamente su poder calorífico, como se discutió en el apartado 6.1.12., pero en estos resultados este hecho no se observa claramente como se muestra en la Figura 14 y con un pésimo coeficiente de correlación. Por otra parte, sí se aprecia el efecto positivo del contenido total de las sustancias extraíbles de las muestras lignocelulósicas estudiadas sobre su poder calorífico (Figura 15), como se abordó en el apartado 6.1.3.

En relación a los componentes de la pared celular, es conocida la baja influencia de los polisacáridos sobre el poder calorífico, como se trató en el apartado 6.1.4. y se observa en la figura 16. En cambio, si se puede apreciar el efecto del contenido de lignina sobre el poder calorífico de las muestras estudiadas, como se señaló en el apartado 6.1.5. y lo muestra la figura 17, aunque el coeficiente de correlación es bajo.

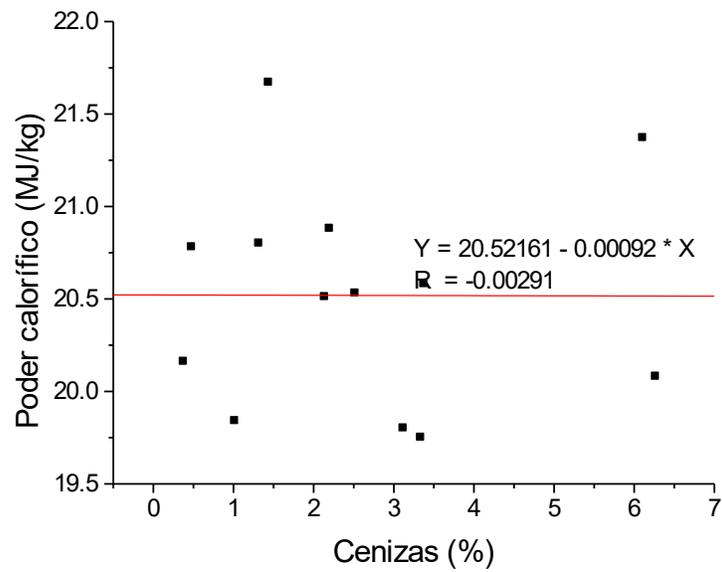


Figura 14. Relación del poder calorífico y el contenido de sustancias inorgánicas.

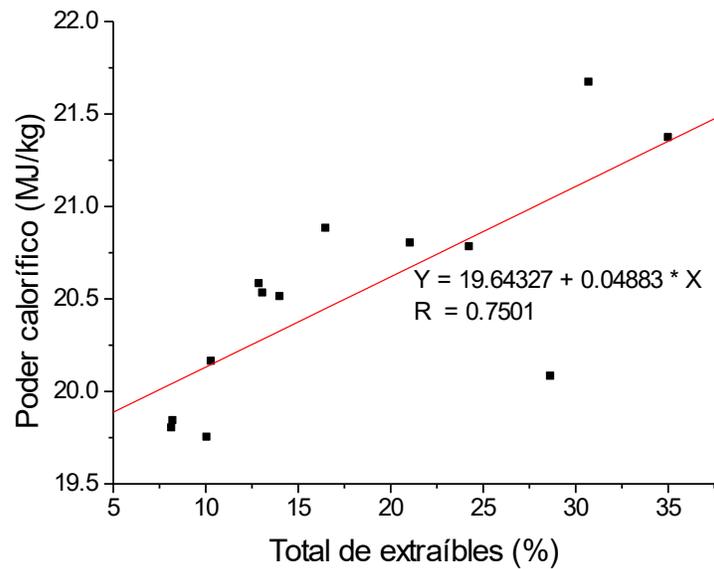


Figura 15. Relación del poder calorífico y el contenido de sustancias extraíbles.

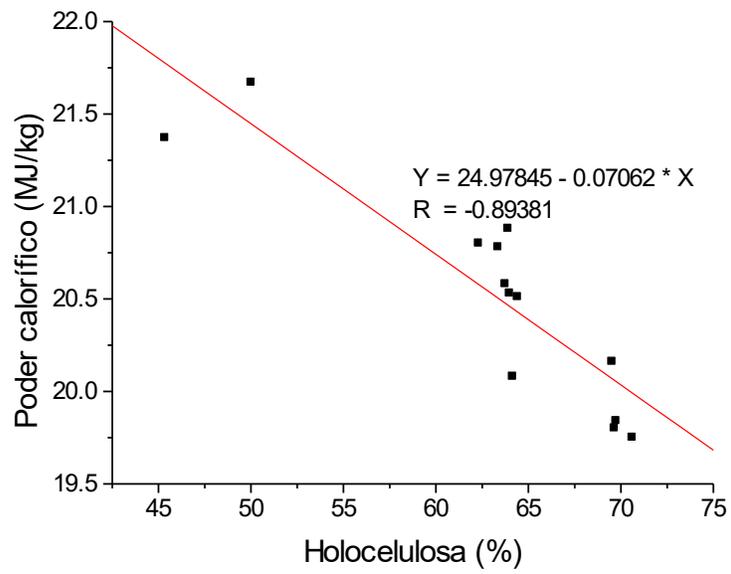


Figura 16. Relación del poder calorífico y el contenido de holocelulosa.

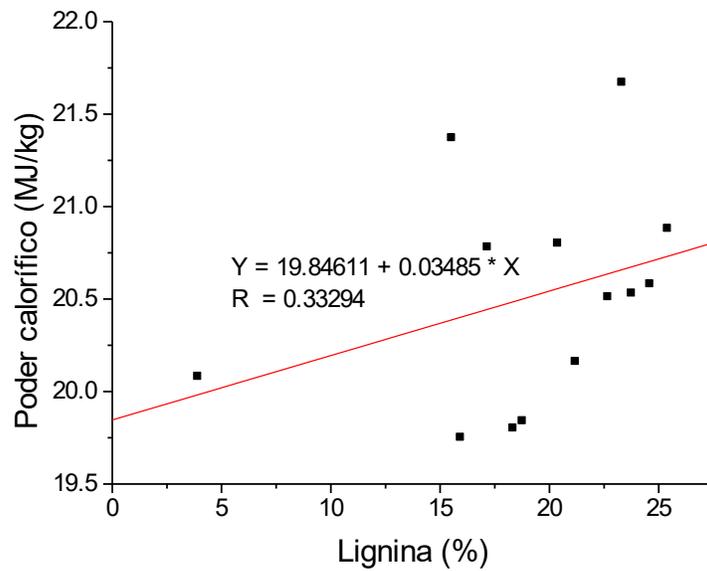


Figura 17. Relación del poder calorífico y el contenido de lignina.

7. CONCLUSIONES

La biomasa colectada en las huertas del Estado de Veracruz presentó pH cercano al valor neutro y los residuos derivados de la transformación primaria de maderas latifoliadas son moderadamente ácidos.

El bajo contenido de cenizas en las ramas de lima persa y naranja les permiten cumplir con los estándares internacionales para la fabricación de pélets y briquetas, el resto de las muestras caracterizadas superan los valores recomendados por las normas.

El mejor rendimiento de sustancias extraíbles se obtuvo a partir de las hojas de lima persa, los valores más bajos los presentaron la biomasa de los *Quercus* spp. Además, se encontró que la biomasa de las maderas latifoliadas presentó la siguiente tendencia de solubilidad acetona > metanol > agua caliente > ciclohexano. Por otro lado, los residuos colectados de las maderas tropicales y de la biomasa de los cítricos son ricos en sustancias extraíbles, y concuerda con su alto poder calorífico.

En relación a la holocelulosa, la especie que presentó mayor porcentaje fue *L. latisiliquum*, y las hojas de lima persa presentaron el menor rendimiento.

Los porcentajes de lignina Runkel obtenidos en los residuos maderables de las maderas tropicales y en los *Quercus* spp. son comparables con los valores reportados en la literatura.

Finalmente, por los resultados obtenidos en esta investigación, las muestras de biomasa lignocelulósicas tienen potencial para su uso local como biocombustibles densificados.

8. BIBLIOGRAFÍA

Ávila-Calderón, L. E. A., Rutiaga-Quiñones, J. G. (2015). Wood chemical components of tree species from a medium deciduous forest. *Wood Research* 60(3): 463-470.

Bernabé-Santiago, R., Ávila-Calderón, L. E. A., y 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.

Browning, G.L. (1955). *Methods in Wood Chemistry*, Vol. 2. Wiley Interscience New York.

Camarena-Tello, J. C., Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J. A., González-Laredo, R. F., Pedraza-Bucio, F. E., López-Albarrán, P., Herrera-Bucio, R. Rutiaga-Quiñones, J.G. (2015). Chemical composition of biomass generated in the guava tree pruning. *EXCLI Journal* 14: 204-2012.

Cárdenas-Gutiérrez, M.A., Pedraza- Bucio, F.E., López- Albarrán, P., Rutiaga-Quiñones, J.G. (2018). Chemical Components of the Branches of Six Hardwood Species. *Wood Research* 63(5): 795-862.

Carrillo- Parra, A., Contreras-Ortiz, E., Pérez-Pérez, E., Bustamante-García, V., Corral-Rivas, J.J., Goche-Telles, J.R. (2016). Capítulo 6. Briquetas. In: A. Carrillo-Parra y J. G. Rutiaga-Quiñones. *Biocombustibles Sólidos*. Sierke-Verlag, Germany. pp: 139-159.

Carrillo-Parra, A., Contreras Ortiz, E., Garza-Ocañas, F., Ngangyo Heya, M., y 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.

Choon, K. K. y Roffael E. (1990). The acidity of five hardwood species. *Holzforschung* 44(1): 53–58.

CONAFOR. (2017). *Perspectivas de la industria forestal en México*, Comisión Nacional Forestal. [Internet]. Disponible en https://www.conafor.gob.mx/innovacion_forestal/?edicion=74. [Visitado el 26 de noviembre de 2020].

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.

Faba, L., Diaz, E., Ordoñez, S. (2014). Transformación de Biomasa en Biocombustibles de Segunda Generación. *Madera y Bosques* 20(3): 11-24

Fengel, D. y Wegener, G. (1989). Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Walter de Gruyter. Berlín, Germany.

Francescato, V., Antonini, E., Bergomi, L. Z., Metschina, C., Schnedl, C., Krajnc, N., Kosciak, K., Gradziuk, P., Nocentini, G., Stranieri, S. (2008). Wood Fuels Handbook; AIEL–Italian Agriforestry Energy Association. Legnaro, Italy.

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.

Honorato-Salazar, J.A., Hernandez- Perez, J. (1998). Determinación de componentes químicos de la madera de cinco especies de encino del estado de Puebla. *Madera y Bosques* 4(2): 79-93.

Honorato-Salazar, J. A., Colotl-Hernández, G., Apolinar-Hidalgo, F., Aburto, J. (2015). Principales componentes químicos de la madera de *Ceiba pentandra*, *Hevea brasiliensis* y *Ochroma piramidal*. *Madera y Bosques* 21(2): 131-146.

Jara, E. R. P. (1989). O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. IPT – Comunicação Técnica, 1797: 1-6.

Karinkanta, P., Ämmälä, A., Illikainen, M., Niinimäki, J. (2018). Fine grinding of wood – Overview from wood breakage to applications. *Biomass and Bioenergy* 113(6): 31-44.

Kiss, I., Alexa, V. (2014). Short introspections regarding the sawdust briquetting as sustainable solution for the environment. *Analecta* 8(2): 72-79.

Martínez-Pérez, R., Pedraza-Bucio, F. E., Apolinar-Cortes, J., López-Miranda, J., Rutiaga-Quiñones, J.G. (2012). Poder Calorífico y Material Inorgánico en la Corteza de Seis Árboles Frutales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18(3): 375-384.

Mejía-Díaz, L. A., Rutiaga-Quiñones, J. G. (2008). Chemical composition of *Schinus molle* L. wood and kraft pulping process. *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. *J. Sustain. Bioenergy Syst.* 4(1): 1-9.

Ngangyo-Heya, M., Foroughbahchik-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.

Obernberger, I., y Thek, G. (2010). The pellet handbook (1st ed.). Earthscan. London-Washington, DC.

ÖNORM M 7135. (2000). Compressed wood or compressed bark in natural state-pellets and briquettes, requirements and test specifications. Vienna, Austria: Österreichisches Normungsinstitut.

Pintor-Ibarra, L. F., Carrillo-Parra, A., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2017). Physical and chemical properties of timber by-products from *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* and *P. pseudostrabus* for a bioenergetic use. *Wood Research* 62(6): 849-861.

Reyes-Rodríguez, L.A., Orihuela- Equihua, R., Aviña- Berumen L.J., Pérez- Canales, E., Carrillo- Parra, A., Rutiaga- Quiñones, J.G. (2016), Capítulo 2. Generalidades sobre los biocombustibles. In: A. Carrillo-Parra y J. G. Rutiaga-Quiñones. Biocombustibles Sólidos. Sierke-Verlag, Germany. pp: 33-62.

Riegelhaupt, E. (2016). Biocombustibles sólidos, In: Estado del Arte de la Bioenergía en México. Red Temática de Bioenergía (RTB) del CONACYT., García Bustamante C., Maserá O. (eds.), Imagia Comunicación, Guadalajara, México, pp. 23-33.

Rodríguez-Jiménez, S., Duarte-Aranda, S., Canché-Escamilla, G. (2019). Chemical composition and thermal properties of tropical wood from the Yucatán dry forests, *BioResources* 14(2): 2651-2666.

Rowell, R. M. (2013). Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. CRC Press. Boca Raton.

Ruiz-Aquino, F., González-Peña, M. M., Valdez, J. I. Revilla, U. S., y Romero, A. (2015). Chemical characterization and fuel properties of wood and bark of two oaks from Oaxaca, Mexico. *Industrial Crops and Products* 65: 90-95.

Ruiz-Aquino, F., Ruiz-Ángel, S., Feria-Reyes, R., Santiago-García, W., Suárez-Mota, M. E., Rutiaga-Quiñones, J. G. (2019). Wood chemical composition of five tree species from Oaxaca, Mexico. *BioResources* 14(4): 9826-9839.

Ruiz-Aquino F., Luna-Bautista L., Luna-Bautista A. E., Santiago-García W., Pintor-Ibarra L. F. y Rutiaga-Quiñones J. G. (2020). Anatomical characterization, physical, and chemical properties of wood of *Quercus macdougalii* Martínez, endemic species of the sierra Juárez of Oaxaca, Mexico. *BioResources* 15(3): 5975-5998.

Rutiaga-Quiñones J. G., Pedraza-Bucio F. E., López-Albarrán P. (2010). Componentes químicos principales de la madera de *Dalbergia granadillo* Pittier y de *Platymiscium lasiocarpum* Sandw. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16(2): 179-186.

Rutiaga-Quiñones J. G., Pintor-Ibarra, L. F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Avila, N., Carrillo-Parra, A., Navarrete-García, M. A., Ruiz-Aquino, F., Rangel-Méndez, J. R., Hernández-Solís, J. J., Luján-Álvarez, C. (2020).

Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *BioResources* 15(4): 8529-8553.

Runkel, R.O.H. y K.D. Wilke. (1951). Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. *Holz Roh Werkst.* 9(7): 260-270.

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

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2006). Anuario Estadístico de la Producción Forestal. [Internet]. Disponible en [https:// www.cnf.gob.mx](https://www.cnf.gob.mx). [Visitada el 19 de octubre del 2020]

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

UNE-EN 14775. (2010). Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas. AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos COFEMADERA, AENOR, Grupo 9, Madrid, España. 10p.

Vanholme, R., B. Demedts, K. Morreel, J. Ralph y W. Boerjan. (2010). Lignin biosynthesis and structure. *Plant Physiology* 153: 895-905.

Velázquez Martí, B. (2018). Aprovechamiento de la Biomasa para uso Energético. Editorial Reverté. Barcelona, España.

Werkelin, J., Skrifvars, B.-J., Hupa, M. (2005). Ash-forming elements in four Scandinavian wood species. Part 1: summer harvest. *Biomass and Bioenergy* 29(6): 451-456.

Wise, L. E., Murphy, M. y D'Addieco, A. A. (1946). Chlorite holocellulose: its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. *Paper Trade Journal* 122(2): 35-43.

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

Zavala-Zavala, D., Hernández-Cortés, R. (2000). Análisis del rendimiento y utilidad del proceso de aserrío de trocería de pino. *Madera y Bosques* 6(2): 41-55.