

Composición química de mezclas de aserrín; y, de madera y corteza de cuatro especies de *Pinus* spp. de Durango, México

Chemical composition of sawdust mixtures, and wood and bark from four *Pinus* spp. species from Durango, Mexico

José Guadalupe Rutiaga-Quiñones¹, Rubén Francisco González-Laredo², Melissa Bocanegra-Salazar³, Jorge Armando Chávez-Simental⁴, Jesús Noel Fregoso-Madueño³ y José Rodolfo Goche-Télles^{3*}

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Av. Fco. J. Múgica s/n, Col. Felicitas del Río, Morelia, Michoacán, C.P. 58040, México.

² Instituto Tecnológico de Durango, Blvd. Felipe Pescador 1830, Col. Nueva Vizcaya, Durango, Durango, C.P. 34080, México.

³ Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Río Papaloapan s/n, Col. Valle del Sur, Durango, Durango, C.P. 34120, México.

⁴ Universidad Juárez del Estado de Durango, Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, González de la Vega, Torre de Institutos, Circuito Universitario, Durango, Durango, C.P. 34120, México.

*Correspondencia: jgoche@ujed.mx (José Rodolfo Goche Télles)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i2.1912>

Recibido: 23 de abril de 2025; Aceptado: 18 de agosto de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. Humberto González Rodríguez

Resumen

El propósito del trabajo fue determinar la composición química básica de mezclas de aserrín procedentes de aserraderos de tres municipios del Estado de Durango (Pueblo Nuevo, Santiago Papasquiario y Tepehuanes), así como, madera y corteza de cuatro especies de pino de importancia económica forestal (*Pinus arizonica*, *P. cooperi*, *P. durangensis* y *P. engelmannii*) para evaluar su potencial para elaboración de biocombustibles densificados. En este material se determinó el pH, contenido de cenizas, sustancias extraíbles, lignina y holocelulosa. En las cenizas se realizó un microanálisis. En la mezcla de aserrín procedentes de los tres municipios se encontraron diferencias estadísticas significativas en el contenido de lignina siendo mayor en Pueblo Nuevo (35.53 %) y menor en Tepehuanes (27.57 %), mientras que el contenido de holocelulosa fue similar en los tres municipios. En las cenizas se identificaron nueve elementos químicos, en mayor concentración el Calcio (40.61 %), Potasio (25.94 %) y Magnesio (19.30 %); la muestra procedente de Santiago Papasquiario presentó alto contenido de Silicio (22.33 %). En la madera de los cuatro pinos se

encontraron diferencias estadísticas significativas en el pH y contenido total de sustancias extraíbles, con un valor de 5.34 y 14.64 %, respectivamente, ambas en *P. arizonica*; en cenizas el valor más alto (35 %) lo presentó *P. durangensis*. En las cenizas de madera se identificaron nueve elementos químicos, los más representativos, Calcio (42.91 %) y Potasio (21.89 %) encontrados en *P. arizonica*; en las cenizas de corteza once elementos, el más alto fue Silicio (43.17 %) en *P. arizonica* y Calcio (42.90 %) en *P. cooperi*. No se detectaron metales pesados. El resultado del análisis químico indica que los materiales estudiados tienen potencial de uso como biocombustibles densificados.

Palabras clave: aserrín, cenizas, corteza, extraíbles, holocelulosa, lignina.

Abstract

The purpose of this work was to determine the basic chemical composition of wood sawdust mixtures coming from the sawmills of three municipalities in the state of Durango (Pueblo Nuevo, Santiago Papasquiaro and Tepehuanes), as well as wood and bark of four pine species with important economic value in forestry (*Pinus arizonica*, *P. cooperi*, *P. durangensis* and *P. engelmannii*) in order to assess its potential for the production of densified biofuels. The pH, ash content, extractable substances, lignin and holocellulose contents were determined through the study and analysis of the mentioned materials. A microanalysis was performed on the ashes. In the sawdust samples from the three municipalities, significant statistical differences were found in the content of lignin being higher in Pueblo Nuevo (35.53 %) and lower in Tepehuanes (27.57 %), meanwhile the content of holocellulose was similar across the three municipalities. In the ash samples, nine chemical elements were identified and those with the highest concentration were Calcium (40.61 %), Potassium (25.94 %), and Magnesium (19.30 %); only samples from Santiago Papasquiaro had a high content of Silicon (22.33 %). In the wood and bark of the four pine species, significant statistical differences were found only in pH and the total content of extractable substances, with a value of 5.34 % and 14.64 %, respectively, both from *P. arizonica*; in the ashes the highest value (35 %) was presented by *P. durangensis*. Nine chemical elements were identified in wood ashes, the most representatives being Calcium (42.91 %) and Potassium (21.89 %) found on *P. arizonica*; and eleven chemical elements in bark ashes, the highest being Silicon (43.17 %) on *P. arizonica* and Calcium (42.90 %) on *P. cooperi*. Heavy metals were not detected. Results of the chemical analysis indicate that the samples studied have potential as raw materials for densified biofuels.

Keywords: sawdust, ash, bark, extractives, holocellulose, lignin

1. Introducción

En México se han reportado 46 especies, tres subespecies y 22 variedades de pinos (Sánchez, 2016), representando el 42 % de las especies del mundo. En el Estado de Durango se encuentran 24 especies de pino y es considerado el principal productor de madera en México; las especies más aprovechadas, debido a su calidad y abundancia son: *Pinus durangensis*, *P. arizonica*, *P. engelmannii* y *P. cooperi*, otras especies representativas son *P. leiophylla*, *P. strobiformis* y *P. chihuahuana* (González-Elizondo et al., 2012).

La industria de aserrío es la actividad forestal orientada a la transformación de madera en rollo a

madera aserrada (i.e., tablas, tablones y vigas), se encarga de procesar anualmente alrededor del 70 % de la producción forestal maderable de México. En este proceso de transformación, los coeficientes de aserrío (i.e., porcentaje de conversión de madera en rollo a tabla) oscilan entre 45 y 60 %, lo que origina que cerca del 40 % se convierta en residuos de escaso a nulo valor económico (Ortiz et al., 2016). Existen otros estudios enfocados al análisis de rendimientos y productividad en especies de bosque templado, especialmente para coníferas encontrando valores similares (García et al., 2009; Esteves-Magalhaes et al., 2010; Nájera-Luna et al., 2011; Fuentes-López et al., 2018).

Estos residuos generados en la industria y otros desechos urbanos generalmente son utilizados en procesos químicos modernos de conversión para generar energías alternas, que pudieran sustituir el uso de combustibles fósiles. Además, estos desechos también son susceptibles como materia prima para la producción de múltiples sustancias químicas de gran valor comercial (Cortés-Ortiz, 2011). El aserrín de pino se ha utilizado en la elaboración de dietas para animales (Guerra-Medina et al., 2010), también puede utilizarse como materia prima en industrias de tableros de madera, materiales de construcción ligeros como estantes y techos para casas móviles, como aislante en el sistema de refrigeración y conservación del frío en industrias energéticas, como combustible para producir gas de madera, briquetas, pellets, etc. (Rominiyi et al., 2017). En Durango, existen esfuerzos iniciales para el aprovechamiento de aserrín de madera y corteza, como sustrato en la producción forestal y agrícola, bajo condiciones de invernadero y como material energético menos contaminante, como pellets y briquetas (Fragoso-Madueño et al., 2017).

Dada la poca información que se tiene de los componentes químicos de las maderas mexicanas de pino (Bernabé-Santiago et al., 2013), es preciso incrementar investigaciones sobre el tema. En Durango, a pesar de contar con una gran cantidad de pinos de importancia económica, los trabajos sobre composición química de esta especie es un área poco estudiada, como lo muestran los escasos trabajos reportados en la literatura. En la búsqueda de azúcares fermentables, se realizó un estudio con aserrín de pino proveniente de tres aserraderos de la ciudad de Durango, con los siguientes resultados: carbohidratos totales (55.23 %), lignina (26.58 %), extraíbles (24.41 %) y cenizas (0.68 %) (López-Miranda et al., 2009). También, se determinó la composición química de la madera de tres pinos (*Pinus ayacahuite*, *P. leiophylla* y *P. herrerae*) procedentes de la región de Pueblo Nuevo, Durango (Honorato-Salazar et al., 2016). Otros trabajos reportan información sobre el contenido de sustancias fenólicas, como taninos condensados y sustancia flavonoides, en la corteza de ocho especies de pino, incluidas las de la presente contribución (Rosales-Castro y González-Laredo, 2003). Asimismo, existen reportes sobre la actividad antioxidante de extractos de la corteza (Rosales-Castro et al., 2016; Rosales-Castro et al., 2017) y de las acículas de *Pinus cooperi*, *P. durangensis*, *P. engelmannii*, *P. leiophylla* y *P. teocote* (Sáenz-Esqueda et al., 2010). Así, para contribuir al conocimiento químico de los pinos de Durango, en este estudio se ha determinado la composición química básica de mezclas de aserrín procedentes de aserraderos de tres municipios, y de madera y corteza de cuatro especies de pinos de importancia económica forestal (*Pinus arizonica*, *P. cooperi*, *P. durangensis* y *P. engelmannii*) para evaluar su potencial para elaboración de biocombustibles densificados.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

El material utilizado en la presente investigación se obtuvo de tres aserraderos ubicados en tres municipios del Estado de Durango. El primero en el municipio de Santiago Papasquiaro, localidad de Nuevo San Diego de Tenzaens en las coordenadas 24°57'17" N y 105°58'28" O; el segundo en el municipio de Pueblo Nuevo, ejido El Brillante, en las coordenadas 23°47'14" N y 105°20'57" O; el tercero en el municipio de Tepehuanes, en la localidad Santa Catarina de Tepehuanes en las coordenadas 25°20'57" N y 105°43'15" O, en el Estado de Durango, México, en los cuales existe una importante actividad industrial forestal.

El material lignocelulósico se recolectó de dos maneras. Por un lado, se tomaron muestras de mezclas de aserrín (madera) de diferentes especies de pino de la tolva del área de procesamiento de un aserradero por cada municipio mencionado. Por otra parte, de un aserradero del municipio de Santiago Papasquiaro, se tomaron muestras de aserrín (madera) y de corteza de especies de pino que fueron previamente identificadas en campo (*Pinus arizonica*, *P. cooperi*, *P. durangensis* y *P. engelmannii*), y cuyas trozas fueron marcadas para identificar cada especie durante el proceso de aserrío. De la sierra principal se tomaron 500 g de aserrín de cada especie de pino y la misma cantidad de corteza fue tomada de la descortezadora.

2.2 Análisis químico

Las muestras recolectadas se dejaron secar al aire libre bajo la sombra, posteriormente fueron molidas en un equipo Wiley y tamizadas. Para el análisis químico se determinó el pH (Sandermann y Rothkamm, 1959), que consistió en medir este valor usando un potenciómetro (marca HANNA, modelo pH 211, Portugal). El contenido de cenizas se determinó mediante calcinación a 550 °C en una mufla (Thermo Scientific, modelo FB1415M, EUA) (UNE-EN 14775, 2010). Las cenizas se analizaron mediante energía dispersiva de rayos X, usando un Microscopio Electrónico de Barrido (marca Jeol, modelo JSM-6400), con 20 kV y 8.5 s de exposición (Téllez-Sánchez et al., 2010). La solubilidad total se determinó mediante extracción Soxhlet con solventes de polaridad creciente (ciclohexano, acetona y metanol; finalmente agua caliente a reflujo), usando en cada caso 6 h de extracción (Mejía-Díaz y Rutiaga-Quiñones, 2008); los solventes de recuperaron en un rotavapor (Heidolph, tipo Laborota 4000, Alemania). En el material libre de sustancias extraíbles se determinó lignina, llevando a cabo una hidrólisis con ácido sulfúrico y ácido bromhídrico (Runkel y Wilke, 1951). Para conocer la cantidad de holocelulosa (celulosas y hemicelulosas) en las muestras libre de extraíbles, se empleó el método Wise (Wise et al., 1946), que brevemente consiste en tratar la muestra con clorito de sodio y ácido acético a 75 °C en baño María. Todos los análisis se realizaron por duplicado, con tres repeticiones, debido a que las normas sugieren que se realicen dos veces los análisis (Rutiaga-Quiñones, et al., 2010).

2.3 Análisis estadístico

Los datos obtenidos se capturaron en hoja de cálculo Microsoft Excel® versión 2016. Se empleó el software XLSTAT para realizar el análisis de varianza correspondiente de acuerdo al diseño experimental de diseño completamente al azar, de igual manera, se realizó la prueba de comparación de medias por el método de Tukey ($\alpha = .05$) para las propiedades químicas, tomándose como criterio las comparaciones entre municipios para el aserrín únicamente y entre especies para aserrín y corteza.

3. Resultados y discusión

3.1. Composición química del aserrín proveniente de tres municipios

pH

En la Tabla 1, se presentan los valores promedio del pH del aserrín de coníferas procedentes de los tres municipios del Estado de Durango, cuyos valores variaron de 4.78 en Santiago Papasquiario a 5.10 en Pueblo Nuevo, con diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$) entre las tres localidades.

El pH del aserrín procedente de las tres localidades (Tabla 1) corresponde a un pH ligeramente ácido (Kollmann, 1959), lo cual coincide con valores de pH previamente reportados para aserrín de diferentes especies de pino (Rutiaga-Quñones, 2001; Bernabé-Santiago et al., 2013; Pintor-Ibarra et al., 2017). Por otro lado, Honorato y Hernández (1998), mencionan que valores bajos de pH en la madera tienen un efecto negativo en los procesos de acabado y en la aplicación de adhesivos; no obstante, Albin (1975), menciona que valores de pH entre 4.0 y 5.5 no influyen en el fraguado de los adhesivos para elaboración de tableros de madera.

Tabla 1. Valores de pH y cenizas para madera de tres municipios del Estado de Durango, México.

Table 1. pH and ash values for wood from three municipalities in the state of Durango, Mexico.

Municipio	pH	Cenizas (%)
Pueblo Nuevo	5.10 ± 0.04 ^a	0.40 ± 0.003 ^b
Santiago Papasquiario	4.78 ± 0.02 ^c	0.90 ± 0.01 ^a
Tepehuanes	4.97 ± 0.03 ^b	0.16 ± 0.001 ^c

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$).

Sustancias inorgánicas (cenizas)

El contenido de sustancias inorgánicas (cenizas) en las muestras de madera es menor del 1.0 %, con una variación entre 0.16 y 0.90 %, con diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$) entre los

municipios estudiados, en Pueblo Nuevo se presentaron los valores más bajos y en Santiago Papasquiari los valores más altos (Tabla 1). Los resultados se encuentran dentro del rango reportado para maderas de especies de coníferas (Fengel y Wegener, 1984; UNE-EN 14961-1 2011). En general, el rango aquí encontrado está en concordancia con los valores reportados para aserrín de pino (0.27 a 0.95 %) procedente de diferentes sitios del Estado de Durango (Chávez-Rosales et al., 2021). Difieren de los valores entre 0.25 a 0.30 % reportados por Honorato-Salazar et al. (2016), y de los valores entre 0.5 y 2.0 % encontrados en aserrín por Serret-Guach y Giralt-Ortega (2016); lo anterior muestra una gran variabilidad de contenido de cenizas en coníferas.

Microanálisis de las cenizas

En la Tabla 2 se presentan los resultados del microanálisis de las cenizas de la madera. Se detectaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$) por elemento químico. El resultado del microanálisis de las cenizas, indica la presencia de nueve elementos químicos, de los cuales destaca la alta concentración de Calcio, Magnesio y Potasio, lo cual coincide cualitativamente con reportes previos que han utilizado la misma técnica (Bernabé-Santiago et al., 2013; Pintor-Ibarra et al., 2017) y corresponden a los elementos químicos principales presentes en la madera (Fengel y Wegener, 1984). Las muestras procedentes del municipio de Santiago Papasquiari presentaron valores relativamente altos de Silicio (Tabla 2); este elemento químico fue detectado en un rango de 1 181 a 4 182 ppm en muestras de aserrín de pino recolectado en diferentes sitios en el Estado de Durango (Rutiaga-Quiñones et al., 2020).

Tabla 2. Microanálisis de cenizas en muestras de madera por municipio (%).

Table 2. Microanalysis of ash in wood samples by municipality (%).

Elemento	Municipios		
	Pueblo Nuevo	Santiago Papasquiari	Tepehuanes
Sodio	2.90 ± 0.60 ^a	2.08 ± 0.44 ^a	2.21 ± 0.85 ^a
Magnesio	18.57 ± 1.96 ^a	11.05 ± 2.20 ^b	19.30 ± 2.65 ^a
Fósforo	3.81 ± 0.58 ^b	2.88 ± 0.39 ^b	5.40 ± 1.48 ^a
Potasio	12.95 ± 1.95 ^b	11.73 ± 0.720 ^b	25.94 ± 1.08 ^a
Calcio	40.61 ± 1.16 ^a	30.72 ± 4.37 ^b	33.00 ± 4.48 ^b
Manganeso	3.86 ± 0.32 ^a	2.42 ± 0.77 ^b	2.28 ± 0.45 ^b
Aluminio	6.21 ± 0.16 ^a	8.61 ± 0.66 ^a	3.51 ± 0.48 ^b
Azufre	1.68 ± 0.71 ^a	1.79 ± 0.20 ^a	2.45 ± 0.26 ^a
Silicio	8.94 ± 0.98 ^b	22.23 ± 8.05 ^a	5.20 ± 0.60 ^b

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma fila indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$).

Sustancias extraíbles

Los valores obtenidos de las sustancias extraíbles para madera no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$) entre las localidades de procedencia, a excepción de la extracción acuosa y en el valor total (Tabla 3).

Tabla 3. Valores del rendimiento (%) obtenido de sustancias extraíbles en madera por municipio.

Table 3. Obtained yields (%) of extractable substances in wood by municipality.

Municipio	CH	ACE	MET	AC	T
Pueblo Nuevo	2.50 ± 0.10 ^b	5.28 ± 0.19 ^b	1.01 ± 0.03 ^a	2.44 ± 0.15 ^a	11.23 ± 0.45 ^b
Santiago Papasquiaro	5.43 ± 0.20 ^a	3.46 ± 0.22 ^a	1.28 ± 0.16 ^a	3.49 ± 0.20 ^b	13.66 ± 0.53 ^a
Tepehuanes	5.29 ± 0.36 ^a	3.63 ± 0.36 ^a	1.21 ± 0.10 ^a	2.62 ± 0.17 ^a	13.74 ± 0.38 ^a

CH: ciclohexano, ACE: acetona, MET: metanol, AC: agua caliente, T: rendimiento total.

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$)

Mediante la secuencia de extracción aplicada se obtuvieron los rendimientos de sustancias extraíbles en las muestras de madera procedentes de las tres localidades (Tabla 3). La suma total varió de 11.23 % (Pueblo Nuevo) a 13.74 % (Tepehuanes). El valor obtenido en las muestras de Pueblo Nuevo es cercano al obtenido en muestras de aserrín de esa misma región (10.3 %); así mismo, el rendimiento obtenido en las muestras de Santiago Papasquiaro es menor al rango reportado para muestras de aserrín de esa misma región (15.1 a 23.4 %), utilizando la misma secuencia de extracción (Chávez-Rosales et al., 2021). Para maderas de pino del municipio de Pueblo Nuevo, se reporta un rendimiento de extractos en etanol-benceno de 3.5 % (*Pinus herrerae*), 4.6 % (*P. leiophylla*) y 12.0 % (*P. ayacahuite*) (Honorato-Salazar et al., 2016).

En relación con los solventes empleados, en general los resultados están dentro del rango reportado para muestras de aserrín del Estado de Durango: para ciclohexano (2.1 a 9.7 %), acetona (3.5 a 8.7 %), metanol (0.5 a 1.6 %) y para agua caliente (1.4 a 4.0 %) (Chávez-Rosales et al., 2021). El rendimiento total de sustancias extraíbles de las muestras de aserrín estudiadas, se encuentran dentro del rango reportado (6.1 a 23.4 %), utilizando la misma extracción secuencial, para muestras de aserrín de pino colectado en diferentes regiones de México (Chávez-Rosales et al., 2021), lo cual coincide con los valores de 1.2 a 18 % reportados por Park et al. (2021) en *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus radiata*, respectivamente.

Lignina y holocelulosa

En la Tabla 4 se muestran los porcentajes de lignina y holocelulosa obtenidos en las muestras de madera de los tres municipios, con diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$) solamente para la lignina.

Tabla 4. Contenido (%) de holocelulosa y lignina en las muestras de madera de los tres municipios.**Table 4.** Holocellulose and lignin content in the wood samples from the three municipalities

Municipio	Lignina	Holocelulosa
Pueblo Nuevo	35.53 ± 0.03 ^b	61.62 ± 0.02 ^a
Santiago Papasquiaro	31.53 ± 0.01 ^a	62.38 ± 0.06 ^a
Tepehuanes	27.57 ± 0.02 ^c	62.57 ± 0.001 ^a

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$).

Contenido de lignina

El resultado de la concentración de lignina en las muestras de madera procedentes de las tres localidades (Tabla 4) se ubica dentro del rango reportado para maderas de coníferas, que es de 25.6 a 39.4 % (Fengel y Wegener, 1984). En un trabajo reciente se reportan valores de lignina que oscilan de 20.5 a 25.8 % para aserrín de pino recolectado en diferentes localidades del Estado de Durango (Chávez-Rosales et al., 2021); coincide con lo reportado por Park et al. (2021), en *Pinus radiata* y *Pseudotsuga menziesii* quienes encuentran valores de 23 a 39 %, respectivamente. Otro estudio con aserrín recolectado en aserraderos de la ciudad de Durango reporta 26.6 % (López-Miranda et al., 2009), valores menores a los encontrados en el presente trabajo, que concuerdan con los valores de 26.4 a 28.3 % mostrados por Mertoglu y Yilgor (2020), en *Pinus sylvestris* y *P. pinaster*, respectivamente.

Contenido de holocelulosa

El contenido de holocelulosa en las muestras de madera de las tres localidades (Tabla 4), coincide con los resultados de un estudio reciente que reporta valores de 60.1 a 68.7 % en muestras de aserrín de pino recolectadas en diferentes localidades del Estado de Durango (Chávez-Rosales et al., 2021), y de 66.7 a 70.0 % para algunas maderas de pino de la región de Pueblo Nuevo, Durango (Honorato-Salazar et al., 2016). Los resultados obtenidos en las mezclas de aserrín sugieren la aplicación en usos industriales derivados de lignina y holocelulosa (Apolinar et al., 2024).

3.2. Composición química de la madera (aserrín) y corteza de cuatro especies de pino

Valores de pH

En la Tabla 5 se presentan los valores promedio para pH en las muestras de madera y corteza, donde se observaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$) entre las especies estudiadas. En la madera, el pH más alto (5.34) se presentó en *Pinus arizonica*, mientras que en *P. engelmannii*, se ubicó el valor más bajo (4.74). En la corteza, *P. engelmannii*, mostró el valor más alto (5.07), mientras que el más bajo (3.48), se encontró en *P. arizonica*.

Tabla 5. Valores de pH, ceniza en madera y corteza de las especies de *Pinus* estudiadas.**Table 5.** pH values, ash in wood and bark from the *Pinus* species studied.

Especie	Madera		Corteza	
	pH	Cenizas (%)	pH	Cenizas (%)
<i>P. arizonica</i>	5.34 ± 0.01 ^a	0.29 ± 0.01 ^a	3.48 ± 0.01 ^b	0.21 ± 0.001 ^a
<i>P. cooperi</i>	5.15 ± 0.04 ^b	0.24 ± 0.003 ^a	4.07 ± 0.12 ^b	0.39 ± 0.03 ^a
<i>P. durangensis</i>	5.12 ± 0.06 ^b	0.35 ± 0.001 ^a	4.95 ± 0.05 ^a	0.48 ± 0.002 ^a
<i>P. engelmannii</i>	4.74 ± 0.06 ^c	0.34 ± 0.001 ^a	5.07 ± 0.01 ^a	0.27 ± 0.01 ^a

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$).

Los resultados del pH (Tabla 5) para el aserrín de las cuatro especies de pino son ligeramente mayores a los valores encontrados en las tres localidades (Tabla 1), pero también corresponden a pH ligeramente ácido (Kollmann, 1959); en cambio, los valores de pH para la corteza de estas especies de pino (Tabla 5), son ligeramente más bajos que los resultados obtenidos para aserrín, lo que coincide con la literatura (Fengel y Wegener, 1984).

Estudios previos han reportado valores de pH en madera para algunas especies de pino procedentes del estado de Michoacán: *Pinus leiophylla* (4.2), *P. michoacana* (4.0), *P. montezumae* (4.4), *P. oocarpa* (4.0), *P. teocote* (4.1) (Bernabé-Santiago et al., 2013), y *Pinus leiophylla* (4.09), *P. montezumae* (4.06), *P. pseudostrobus* (4.04) (Pintor-Ibarra et al., 2017); estos resultados son ligeramente más bajos a los obtenidos en este estudio, pero igualmente se trata de maderas con pH ligeramente ácido. Es conocido que la variación del pH entre especies de coníferas se debe principalmente a la presencia de grupos ácidos y ácidos libres (Choon y Roffael, 1990). La acidez de la madera es una característica que pudiera limitar su uso, debido a que el pH podría afectar las interacciones entre ciertos metales ya que causan corrosión (Bernabé-Santiago et al., 2013). Se sabe que el pH también puede contribuir a varios problemas en diferentes procesos: adhesión durante el proceso de engomado; fijación de sustancias preservantes; fabricación de aglomerados y durante el proceso de pulpeo (Ávila-Calderón y Rutiaga-Quñones, 2015).

Sustancias inorgánicas (cenizas)

El contenido de sustancias inorgánicas en madera varió de 0.24 % en *Pinus cooperi* a 0.35 % en *P. durangensis* (Tabla 5), mientras que en corteza los valores oscilaron de 0.21 % en *P. arizonica* a 0.48 % en *P. durangensis*; en ambos materiales los valores fueron menores a 1.0 %. No se encontraron diferencias significativas ($p \leq .05$) entre especies. El contenido de cenizas encontrado para tres pinos del municipio de Pueblo Nuevo, Durango es el siguiente: *Pinus ayacahuite* (0.27 %), *P. herrerae* (0.30 %) y *P. leiophylla* (0.25 %) (Honorato-Salazar et al., 2016). Para maderas procedentes del Estado de Michoacán, reportan los siguientes valores de material inorgánico: *Pinus leiophylla* (0.30 %), *P. montezumae* (0.22 %) y *P. pseudostrobus* (0.24 %) (Correa-Méndez et al., 2014), coincide también con aserrín de pino proveniente de Cuba, con valores entre 0.22 y 0.40 % (Pérez-Vinent et al., 2022). La cantidad de cenizas influye en la calidad de los biocombustibles densificados (Obemberger y Thek, 2004). Los pellets y las briquetas se clasifican considerando la cantidad de cenizas (Gutiérrez-Acosta et al., 2021), mediante la norma ISO 17225-2 (ISO 2014) para pellets que incluye las siguientes clases clase A1 (≤ 0.70 %); clase A2 (≤ 1.5 %) y clase B (≤ 3.0 %) y la norma ÖNORM 7135 (ÖNORM, 2000)

para briquetas, en la cual se requiere un contenido menor a 0.50 %. Con lo anterior, se puede sugerir que la madera y la corteza de las cuatro especies estudiadas podrían producir pellets de clase A1 y briquetas, coincidiendo con el estudio donde se reportan las características y propiedades de briquetas elaboradas con aserrín de *Pinus* spp. procedente de cinco regiones de México (Ramírez-Ramírez et al., 2021).

Por otra parte, es conocido que en la corteza suele ser mayor la concentración de sustancias inorgánicas en comparación con la madera (Fengel y Wegener, 1984), sin embargo, en el presente trabajo correspondiente a las cuatro especies de pino, no se aprecia este comportamiento, a excepción de *Pinus cooperi* y *P. durangensis* (Tabla 5).

Microanálisis de las cenizas

La Tabla 6 muestra los resultados del microanálisis de las cenizas de madera y de corteza para las cuatro especies de pino, observando diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$) por elemento químico. El resultado del microanálisis de las cenizas del aserrín proveniente de las cuatro especies de pino indica la presencia de nueve elementos químicos, de los cuales, Calcio, Potasio y Magnesio son los que se presentan en mayor proporción (Tabla 6). Utilizando la misma técnica, se han reportado resultados cualitativos similares para aserrín y viruta de especies de pinos procedentes del Estado de Michoacán (*Pinus leiophylla*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus*) (Correa-Méndez et al., 2014), y para madera de *Pinus leiophylla*, *P. michoacana*, *P. montezumae*, *P. oocarpa* y *P. teocote* (Bernabé-Santiago et al., 2013), y de *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pintor-Ibarra et al., 2017).

En las muestras de corteza de las cuatro especies de pino, se identificaron los mismos elementos químicos detectados en las muestras de aserrín, y adicionalmente se detectaron Hierro y Titanio; por este mismo método se detectó Hierro en la corteza de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus*, y el Titanio sólo se identificó en la corteza de *Pinus pseudostrobus* (Pintor-Ibarra et al., 2017). Los resultados del microanálisis en las muestras de cenizas de las cortezas coinciden cualitativamente, usando la misma técnica, con datos reportados previamente para cortezas de diferentes especies de pino (Correa-Méndez et al., 2013; Pintor-Ibarra et al., 2017).

Sustancias extraíbles

En la Tabla 7 se presentan los resultados del contenido de sustancias extraíbles en madera de las cuatro especies de pino, por la secuencia de extracción aplicada; y al final se da la suma total. Los resultados para la corteza aparecen en la Tabla 8. En ambos casos se observan diferencias estadísticas significativas ($p \leq .05$).

Tabla 6. Microanálisis elemental de cenizas en madera y corteza de las cuatro especies de pino (%).
Table 6. Elemental microanalysis of ash in wood and bark of the four pine species (%).

Elemento	Madera				Corteza			
	<i>P. arizonica</i>	<i>P. cooperi</i>	<i>P. durangensis</i>	<i>P. engelmannii</i>	<i>P. arizonica</i>	<i>P. cooperi</i>	<i>P. durangensis</i>	<i>P. engelmannii</i>
Sodio	3.76 ± 0.37 ^a	2.37 ± 0.66 ^a	2.81 ± 0.99 ^a	2.66 ± 0.51 ^a	2.84 ± 0.78 ^a	1.78 ± 0.54 ^b	1.49 ± 0.23 ^b	1.42 ± 0.38 ^b
Magnesio	16.85 ± 1.31 ^a	17.57 ± 1.04 ^a	17.73 ± 1.64 ^a	15.00 ± 1.68 ^a	2.12 ± 0.29 ^b	8.23 ± 0.99 ^a	2.43 ± 0.39 ^b	2.66 ± 0.64 ^b
Fósforo	2.56 ± 0.12 ^c	2.76 ± 0.12 ^b	3.44 ± 0.46 ^a	3.29 ± 0.12 ^a	1.87 ± 0.07 ^b	2.34 ± 0.06 ^b	2.15 ± 0.30 ^b	3.19 ± 0.52 ^a
Potasio	21.89 ± 1.08 ^a	19.93 ± 2.85 ^a	16.87 ± 0.92 ^a	17.10 ± 1.62 ^a	5.84 ± 0.36 ^b	10.31 ± 0.84 ^a	5.52 ± 1.07 ^b	5.92 ± 0.41 ^b
Calcio	42.91 ± 3.08 ^a	37.67 ± 1.25 ^a	41.77 ± 4.49 ^a	37.90 ± 2.35 ^a	20.23 ± 1.88 ^b	42.90 ± 2.13 ^a	35.42 ± 8.88 ^a	38.07 ± 4.18 ^a
Manganeso	6.48 ± 0.29 ^a	5.02 ± 0.51 ^b	4.71 ± 0.55 ^b	3.72 ± 0.32 ^c	Nd	0.62 ± 0.03	Nd	Nd
Aluminio	2.23 ± 0.70 ^c	7.52 ± 1.37 ^a	5.22 ± 0.49 ^b	6.41 ± 0.89 ^a	17.85 ± 0.48 ^a	14.05 ± 0.80 ^c	15.76 ± 0.84 ^b	12.57 ± 1.02 ^c
Azufre	1.71 ± 0.81 ^b	1.83 ± 0.28 ^b	3.14 ± 0.19 ^a	3.52 ± 1.02 ^a	0.96 ± 0.14 ^b	2.33 ± 0.353 ^a	1.15 ± 0.21 ^b	2.44 ± 0.25 ^a
Silicio	2.08 ± 0.28 ^c	4.44 ± 0.87 ^b	4.27 ± 0.67 ^b	8.92 ± 0.68 ^a	43.17 ± 1.84 ^a	13.70 ± 1.282 ^c	32.05 ± 6.80 ^b	29.96 ± 4.39 ^b
Titanio	Nd	Nd	Nd	Nd	0.57 ± 0.05 ^a	0.78 ± 0.355 ^a	0.47 ± 0.12 ^a	0.48 ± 0.05 ^a
Hierro	Nd	Nd	Nd	Nd	4.52 ± 0.23 ^a	2.58 ± 0.333 ^b	3.39 ± 0.48 ^b	3.26 ± 0.28 ^b

Nd=no detectado

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma fila para madera y corteza por separado indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$)

Tabla 7. Contenido (%) de sustancias extraíbles en madera de las cuatro especies de pino.

Table 7. Yields (%) of extractable substances in wood of the four species of pine.

Especie	Madera				
	CH	ACE	MET	AC	T
<i>P. arizonica</i>	5.38 ± 0.25 ^b	2.99 ± 0.03 ^b	1.83 ± 0.15 ^a	4.43 ± 0.36 ^b	14.64 ± 0.44 ^a
<i>P. cooperi</i>	4.50 ± 0.10 ^b	5.49 ± 0.31 ^a	1.09 ± 0.07 ^b	2.44 ± 0.15 ^a	13.51 ± 0.02 ^b
<i>P. durangensis</i>	3.29 ± 0.37 ^a	6.41 ± 0.09 ^c	0.98 ± 0.03 ^b	1.62 ± 0.17 ^c	12.30 ± 0.24 ^b
<i>P. engelmannii</i>	2.32 ± 0.42 ^a	5.63 ± 0.23 ^a	1.08 ± 0.05 ^b	2.62 ± 0.17 ^a	11.65 ± 0.55 ^c

CH: ciclohexano, ACE: acetona, MET: metanol, AC: agua caliente, T: total.

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$)

Para el caso de las muestras de madera de las cuatro especies de pino (Tabla 7), el rendimiento total de sustancias extraíbles varió de 11.65 % (*P. engelmannii*) a 14.64 % (*P. arizonica*). Estos valores son mayores a los encontrados en algunas maderas de pino procedentes del Estado de Michoacán: *Pinus leiophylla* (8.2 %), *P. michoacana* (8.1 %), *P. montezumae* (7.6 %), *P. oocarpa* (8.0 %) y *P. teocote* (8.2 %) (Bernabé-Santiago et al., 2013), *Pinus leiophylla* (7.1 %), *P. montezumae* (6.7 %) y *P. pseudostrobus* (6.6 %) (Pintor-Ibarra et al., 2017). Es conocido que factores como localización geográfica, condiciones de crecimiento, material utilizado, así como la edad de los árboles, entre otros, pueden afectar la concentración de sustancias extraíbles (Fengel y Wegener, 1984), además del método de extracción y solvente empleado (Trugilho et al., 2020). El alto contenido de sustancias extraíbles que presenta la madera de *Pinus arizonica* es probable que muestre una alta durabilidad natural (Rutiaga-Quñones, et al., 2010).

Tabla 8. Contenido (%) de sustancias extraíbles en corteza de las cuatro especies de pino.

Table 8. Yields (%) of extractable substances in bark of the four pine species.

Especie	Corteza				
	CH	ACE	MET	AC	T
<i>P. arizonica</i>	1.38 ± 0.25 ^a	2.77 ± 0.25 ^a	8.51 ± 0.10 ^a	4.84 ± 0.10 ^a	17.50 ± 0.38 ^a
<i>P. cooperi</i>	1.37 ± 0.15 ^a	3.04 ± 0.07 ^b	8.30 ± 0.05 ^a	1.60 ± 0.38 ^b	14.31 ± 0.49 ^b
<i>P. durangensis</i>	1.79 ± 0.15 ^a	2.60 ± 0.27 ^a	8.31 ± 0.23 ^a	4.87 ± 0.17 ^a	17.57 ± 0.47 ^a
<i>P. engelmannii</i>	1.57 ± 0.23 ^a	2.46 ± 0.31 ^a	6.38 ± 0.47 ^b	3.43 ± 0.15 ^c	13.85 ± 0.70 ^b

CH: ciclohexano, ACE: acetona, MET: metanol, AC: agua caliente, T: total.

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$)

En cuanto al rendimiento de sustancias extraíbles en las muestras de corteza de los pinos, los valores encontrados variaron de 13.85 % (*P. engelmannii*) a 17.57 % (*P. durangensis*) (Tabla 8). Los valores en corteza (Tabla 8) fueron mayores a los obtenidos en madera para las mismas especies de pino (Tabla 7), lo que coincide con la literatura, en el sentido de que la corteza contiene mayor concentración de sustancias extraíbles en comparación con la madera (Fengel y Wegener, 1984). Los resultados de este

trabajo se ubican dentro de los valores obtenidos en cortezas de pinos michoacanos: *Pinus leiophylla* (9.7 %), *P. montezumae* (10.3 %) y *P. pseudostrobus* (17.1 %), utilizando la misma secuencia de extracción (Pintor-Ibarra et al., 2017).

La corteza destaca por la presencia de metabolitos secundarios, siendo los principales compuestos fenólicos y terpenos, en comparación con la madera (Alonso-Esteban et al., 2022). En las cortezas de las especies de pino aquí estudiadas, se ha reportado la presencia de compuestos fenólicos, con valores de 13 al 16 % de taninos condensados y con potencial de uso en biomedicina (Rosales-Castro y González-Laredo, 2003). También, se han realizado estudios sobre la capacidad antioxidante de los extractos polifenólicos de las cortezas de *Pinus cooperi*, *P. engelmannii*, *P. leiophylla* y *P. teocote*, con alto potencial fitoquímico (Rosales-Castro et al., 2016).

Lignina y holocelulosa

La Tabla 9 resume los resultados del contenido de lignina y de holocelulosa en las muestras de aserrín y de corteza de las cuatro especies de pino estudiadas, sin diferencia estadística significativa entre especies, para madera y corteza. La corteza presenta resultados porcentuales de lignina, ligeramente por debajo de la holocelulosa, coincidiendo con lo reportado en coníferas europeas por Fengel y Wegener (1984), holocelulosa de 51.6 a 65.3 % y lignina, de 37.8 a 44.7 %. Miranda et al. (2012), reportan valores en *Picea abies* y *Pinus silvestris* para lignina (27.9 y 33.7 %) y holocelulosa (42.7 y 37.6 %), respectivamente. Sin embargo, difieren de lo encontrado por Barros et al. (2023) en *Pinus pinaster*, quienes reportan 46.09 % para holocelulosa y 51.15 % para lignina. La diferencia entre los resultados de contenido de holocelulosa y lignina pueden ser atribuidos a que los métodos estándar utilizados para analizar la madera pueden no ser los adecuados para la corteza debido a la interferencia cruzada entre sus componentes, como los polifenoles y la suberina (Miranda et al., 2012).

Tabla 9. Contenido (%) de holocelulosa y de lignina de las cuatro especies de *Pinus*.

Table 9. Holocellulose and lignin content (%) of the four *Pinus* species.

Especie	Madera		Corteza	
	Lignina	Holocelulosa	Lignina	Holocelulosa
<i>P. arizonica</i>	29.82 ± 0.01 ^a	66.16 ± 0.01 ^a	42.74 ± 0.01 ^a	48.87 ± 0.02 ^a
<i>P. cooperi</i>	31.53 ± 0.003 ^a	63.61 ± 0.002 ^a	43.66 ± 0.06 ^a	45.71 ± 0.08 ^a
<i>P. durangensis</i>	34.72 ± 0.01 ^a	60.93 ± 0.002 ^a	43.28 ± 0.09 ^a	41.38 ± 0.13 ^a
<i>P. engelmannii</i>	33.73 ± 0.04 ^a	62.65 ± 0.02 ^a	46.60 ± 0.001 ^a	46.74 ± 0.004 ^a

Media ± desviación estándar, n=3.

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq .05$).

Contenido de lignina

El resultado del contenido de lignina en las muestras de madera de las cuatro especies de pino (Tabla 9), se ubica dentro del rango reportado para maderas de coníferas, que es de 25.6 a 39.4

% (Fengel y Wegener, 1984). Investigaciones previas dan a conocer contenidos de lignina para diferentes especies de pino, que van de 24.0 a 28.5 % (Bernabé-Santiago et al., 2013), de 26.3 a 28.6 % (Honorato-Salazar et al., 2016), de 29.6 a 32.5 % (Pintor-Ibarra et al., 2017) y de 25.61 a 31.89 % en *Pinus patula* (Apolinar, 2024). Es conocido que la variación existente en la composición química puede estar influenciada por factores geográficos, condiciones de crecimiento, edad de los árboles, entre otros (Hon y Shiraishi, 2001; Mevanarivo, 2020), además del método de extracción (Chávez-Sifontes y Domine, 2013; Wang et al., 2022).

Los resultados de las cortezas indican valores mayores a los obtenidos para madera (Tabla 9), y están en el límite inferior del rango estimado para coníferas europeas (37.8 a 44.7 %) (Fengel y Wegener, 1984). Es conocido que en la corteza hay alta concentración de taninos condensados (Alonso-Esteban, et al., 2022). Alta concentración de estos fenólicos en la corteza representa un atractivo potencial como agente bioactivos y antioxidantes (Rosales-Castro y González-Laredo, 2003), además, los compuestos tánicos condensables a partir de residuos de corteza de *Pinus spp* se utilizan en la producción de adhesivo (Gonçalves et al., 2021).

Contenido de holocelulosa

La cantidad de holocelulosa en las muestras de las cuatro especies de pino (Tabla 9), coincide con los resultados de un estudio reciente que reporta valores de 60.1 a 68.7 % en muestras de aserrín de pino recolectadas en diferentes localidades del Estado de Durango (Chávez-Rosales et al., 2021). En general, los resultados aquí obtenidos concuerdan con datos previamente reportados de 64.5 a 67.3 % para maderas de pino del Estado de Michoacán (Morales-Máximo et al., 2021), de 63.6 a 67.4 % para maderas mexicanas de pino de la subsección cembroides (Revilla-González, 2011) y de 65.43 a 71.08 % en *Pinus patula* (Apolinar, 2024).

Con relación al contenido de holocelulosa en la corteza de las cuatro especies de pino (Tabla 9), los resultados obtenidos son claramente menores a los valores encontrados para la madera de estas especies (Tabla 9), y esto coincide con el hecho de que la corteza tiene baja concentración de polisacáridos en comparación con la madera (Fengel y Wegener, 1984). Valores de holocelulosa encontrados en la corteza de *Pinus leiophylla* (47.7 %), *P. montezumae* (48.3 %) y *P. pseudostrobus* (45.8 %) procedentes del Estado de Michoacán (Pintor-Ibarra et al., 2017), son cercanos a los resultados obtenidos en el presente estudio y para *Pinus sylvestris* se ha dado a conocer un valor de 54.6 % (Fengel y Wegener, 1984), ligeramente mayor a los aquí obtenidos.

4. Conclusiones

En la mezcla de aserrín procedente de los tres municipios del Estado de Durango, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < .05$) en contenido de lignina, con los valores más altos en Pueblo Nuevo (35.53 %) y los más bajos en Tepehuanes (27.57 %). Con respecto a la holocelulosa, no presentó diferencias significativas entre los municipios. En las muestras de cenizas se identificaron nueve elementos químicos, los de mayor concentración fueron Calcio (30.72 a 40.61 %), Potasio (11.73 a 25.94 %) y Magnesio (11.05 a 19.30 %), sólo la muestra procedente de Santiago Papasquiaro presentó alto contenido de Silicio (22.23 %). En madera y corteza de las cuatro especies de pino estudiadas se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < .05$) solamente en el pH,

microanálisis y contenido total de sustancias extraíbles. En las cenizas de madera se identificaron nueve elementos químicos y once en las de corteza. No se detectaron metales pesados. Los resultados del análisis químico en particular el contenido de cenizas en la mezcla proveniente de Tepehuanes y Pueblo Nuevo, indican que son aceptables para producir pellets clase A1, al igual que las cuatro especies de pino, mientras que la mezcla de Santiago Papasquiaro genera pellets clase A2. En general, el material analizado en este trabajo, pueden ser utilizado como biocombustibles densificados (pellets y briquetas). Por último, se recomienda para futuras investigaciones incluir el poder calorífico.

Contribuciones de los autores

"Conceptualización J.N.F.M. y J.R.G.T.; metodología, J.R.G.T., J.G.R.Q., y R.F.G.L.; análisis formal, J.N.F.M., J.A.Ch. S., y J.G.R.Q.; investigación, J.N.F.M., J.R.G.T., J.G.R.Q., y M.B.S.; recursos, J.N.F.M., J.R.G.T., J.G.R.Q. y J.A.Ch. S.; conservación de datos, J.R.G.T. y J.G.R.Q.; redacción-redacción del borrador original, J.N.F.M. y J.R.G.T.; redacción-revisión y edición, J.G.R.Q., R.F.G.L. y J.R.G.T.; visualización, M.B.S. R.F.G.L., J.A.Ch. S., J.G.R.Q. y J.R.G.T.; supervisión, J.G.R.Q. y J.R.G.T.; administración del proyecto, J.N.F.M. y J.R.G.T. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito".

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal de los aserraderos de los ejidos y empresas forestales visitados por la donación del aserrín y corteza utilizados en esta investigación.

Conflicto de interés

Este documento se elaboró con fines académicos y científicos, por lo que no existe ningún conflicto de intereses por parte de los autores, en la publicación de estos resultados.

5. Referencias

- Albin, A., R. (1975). Determinación del pH en diversas especies de los renovales de la provincia de Valdivia. *Bosque*, 1(1), 3-5. <https://doi.org/10.4206/bosque.1975.v1n1-02>
- Alonso-Esteban, J. I., Caroch, M., Barros, D., Vaz Velho, M., Heleno, S., & Barros, L. (2022). Chemical composition and industrial applications of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) bark and other non-wood parts. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 21, 583-633. <https://doi.org/10.1007/s11157-022-09624-1>
- Apolinar, H., F., Honorato-Salazar, J.A., & Colotl, H., G. (2024). Lignocellulosic characterization of *Pinus patula* wood from Oaxaca, Mexico. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(4): e73759. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n4-004>

- Ávila-Calderón, L. E., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2015). Wood chemical components of three species from a medium deciduous forest. *Wood Research*, 60(3), 463-469. <http://www.woodresearch.sk/wr/201503/12.pdf>
- Barros, D., Fernandes, E., Jesus, M., Barros, L., Alonso-Esteban, J. I., Pires, P., & Vaz Velho, M. (2023). The chemical characterisation of the maritime pine bark cultivated in Northern Portugal. *Plants*, 12(23): 3940. <https://doi.org/10.3390/plants12233940>
- Bernabé-Santiago, R., Ávila-Calderón, L. E., & 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. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192338>
- Chávez-Rosales, J. S., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Ruiz-Aquino, F., Luján-Álvarez, C., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). Basic chemical composition of *Pinus spp.* sawdust from five regions of Mexico, for bioenergetic purposes. *BioResources*, 16(1): 816-824. <https://doi.org/10.15376/biores.16.1.816-824>
- Chávez-Sifontes, M., & Domine, M. E. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(4), 15-46. <https://www.executivebs.org/publishing.cl/avances-en-ciencias-e-ingenieria-vol-4-nro-4-ano-2013-articulo-3/>
- Choon, K. K., & Roffael, E. (1990). The acidity of five hardwood species. *Holzforschung*, 44(1): 53-58. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1990.44.1.53>
- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., González-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2013). Humedad, ceniza e inorgánicos en corteza industrial de tres pinos para bioenergía. *Revista Forestal Baracoa*, 32(2): 77-83.
- 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. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.04.012>
- Cortés-Ortiz, W. G. (2011). Materiales lignocelulósicos como fuente de biocombustibles y productos químicos. *Revista de Ciencia y Tecnología Aeronáutica*, 16: 41-46. <https://es.scribd.com/document/408543377/Materiales-Lignocelulosicos>
- Esteves-Magalhaes, W. L., Bolzon de Muniz, G. I., Lomeli-Ramírez, M. G., & Cesar-Batista, D. (2010). Estudio de la productividad de corte en madera de *Pinus elliottii* utilizando un prototipo de aserradero portátil. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 12(1): 43-52. <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/MCT/article/view/1380>
- Fragoso-Madueño, J. N., Goche-Télles, J. R., Rutiaga-Quiñones, J. G., González-Laredo, R. F., Bocanegra-Salazar, M., & Chávez-Simental, J. A. (2017). Usos alternativos de los desechos de la industria del aserrío. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(2): 243-260. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.06.040>
- Fengel, D., & Wegener, G. (Eds.) (1984). Wood chemistry, ultrastructure, reactions. Germany: Walter de Gruyter & Co., Berlín. 626 pp.

- Fuentes-López, M. E., Suárez-Patlán, E. E., Carrillo-Ávila, N., & Flores-Velázquez, R. (2018). Coeficiente de aprovechamiento en un aserradero ejidal del estado de Puebla. *Revista de Investigación y Desarrollo*, 4(14), 32-38. https://www.researchgate.net/publication/390463937_Coeficiente_de_aprovechamiento_en_un_aserradero_ejidal_del_estado_de_Puebla
- García Delgado, J. M., Izquierdo Chala, O., Henry Torriente, P. P., & Domínguez Goizueta, A. (2009). Algunos aspectos relacionados con la calidad de la madera aserrada de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea*. *Revista Ra Ximhai*, 5(3): 259–270. <https://doi.org/10.35197/rx.05.03.2009.01.jg>
- Gonçalves, F. G., Chaves, I. L. S., Fassarella, M. V., Brito, A. S., Silva, E. S. G. da, López, Y. M., & Oliveira, R. E. G. de. (2021). Extracción de taninos de la corteza de *Pinus spp* tratada térmicamente – aplicación como adhesivo. *Madera y Bosques*: 27(1), e2712041. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712041>
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: Una síntesis. *Acta Botánica Mexicana*, (100): 351-403. <https://doi.org/10.21829/abm100.2012.40>
- Guerra-Medina, C. E., Cobos-Peralta, M. A., Montañez-Valdez, O. D., & Pérez-Sato, M. (2010). Uso de aserrín de pino (*Pinus patula*) como fuente de fibra en dietas para borregos en cebo. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12(3): 667-673. <https://www.revista.coba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/426>
- Gutiérrez-Acosta, J. M., Orihuela-Equihua, R., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Hernández-Solís, J. J., Ruíz-Aquino, F., Navarrete-García, M. A., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). On the basic chemical composition of selected biomass types from four regiones of Mexico, for bioenergetic purposes. *BioResources*, 16(3): 5694-5705. <https://doi.org/10.15376/biores.16.3.5694-5705>
- Honorato-Salazar, J. A., Apolinar-Hidalgo, F., & Colotl-Hernández, G. (2016). Composición lignocelulósica de *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *P. leiophylla* Schlecht. & Cham. y *P. herrerae* Martínez. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(34): 47-56. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i34.82>
- Honorato-Salazar, J. A., & Hernández-Pérez, 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. <https://doi.org/10.21829/myb.1998.421361>
- Hon, D. N.-S., & Shiraishi, N. (Eds) (2001). *Wood and Cellulose Chemistry*, Marcel Dekker, New York, USA. 928 pp. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00147-1](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00147-1)
- ISO 17225-2 2014. Solid biofuels – Fuel specifications and classes, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Kollmann, F. (1959). *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*. Madrid, España: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera.
- López-Miranda, J., Soto-Cruz, N. O., Rutiaga-Quiñones, O. M., Medrano-Roldán, H., & Arévalo-Niño, K. (2009). Optimización del proceso de obtención enzimática de azúcares fermentables a partir de aserrín de pino. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(2): 95-102. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/21586>

- 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. http://www.rmiq.org/iqfvp/Pdfs/Vol%207%20no%202/RMIQ_6.pdf
- Mertoglu Elmas, G., & Yilgor, N. (2020). Chemical and thermal characterizations of *Pinus sylvestris* and *Pinus pinaster*. *BioResources*, 15(2), 3604-3620. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/chemical-and-thermal-characterizations-of-pinus-sylvestris-and-pinus-pinaster/>
- Mevanarivo, Z. E., Ramanantoandro, T., Tomazello-Filho, M., Napoli, A., Razafimahatratra R, A., Razakamanarivo, H. R., & Chaix, G. (2020). Variability in the physic-chemical properties of wood from *Eucalyptus robusta* depending on ecological growing conditions and forestry practices: the case of Smallholdings in the highlands of Madagascar. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 22(4): 425–438. <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/MCT/article/view/4136>
- Miranda, I., Gaminho, J., Mirra, I., & Pereira, H. (2012). Chemical characterization of barks from *Picea abies* and *Pinus sylvestris* into different particle sizes. *Industrial Crops and Products*, 36(1): 395-400. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.10.035>
- Morales-Máximo, M., García, C. A., Pintor-Ibarra, L. F., Alvarado-Flores, J. J., Velázquez-Martí, B., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). Evaluation and characterization of timber residues of *Pinus spp.* as an energy resource for the production of solid biofuels in an Indigenous Community in Mexico. *Forests*, 12(8): 977. <https://doi.org/10.3390/f12080977>
- Nájera-Luna, J. A., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Jurado-Ybarra, E., Corral-Rivas J. J., & Vargas-Larreta, B. (2011). Tiempos y rendimientos del aserrío en la región de El Salto, Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2): 199-213. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.05.034>
- Obenberg, I., & Thek, G. (2004). Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6): 653-669. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006>
- ÖNORM M 7135. (2000). Compressed Wood or compressed bark in natural state pellets and briquettes, requirements and test specification, Österreichisches Normungsinstitut [Austrian Standard Institute], Vienna, Austria. <https://www.austrian-standards.at/en/shop/onorm-c-4006-2013-02-15-p1989414>
- Ortiz B., R., Martínez, S., Vázquez R., D., & Juárez, W. (2016). Determinación del coeficiente y calidad de aserrío del género *Pinus* en la región Sierra Sur, Oaxaca, México. *Colombia Forestal*, 19(1): 79-94. <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.1.a06>
- Park, S. Y., Kim, J. H., Kim, J. C., Yang, S. Y., Yeo, H., & Choi, I. G. (2021). Classification of softwoods using wood extract information and near infrared spectroscopy. *BioResources*, 16(3): 5301-5312. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.16.3.5301-5312>
- Pérez-Vinent, A. R., Serret-Guasch, N., & Penedo-Medina, M. (2022). Caracterización de la biomasa vegetal aserrín de pino. *Tecnología Química*, 42(3): 556-573. <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/5279>
- Pintor-Ibarra, L. F., Carrillo-Parra, A., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2017). Physical and chemical properties of timber by-products from *Pinus leiophylla*, P.

- montezumae* and *P. pseudostrobus* for a bioenergetics use. *Wood Research*, 62(6): 849-862. <https://www.woodresearch.sk/cms/physical-and-chemical-properties-of-timber-by-products-from-pinus-leiophylla-p-montezumae-and-p-pseudostrobus-for-a-bioenergetics-use/>
- Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., Ruíz-Aquino, F., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Orihuela-Equihua, R., Carrillo-Ávila, N., Luján-Álvarez, C., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). Valorization of briquettes fuel using *Pinus spp.* sawdust from five regions of Mexico. *BioResources*, 16(2), 2249-2263. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.16.2.2249-2263>
- Revilla-González, E. (2011). Química de la madera de cuatro pinos mexicanos de la subsección cembroides. (Tesis Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo).
- Rominiyi, O., Adaramola, B., Ikumapayi, O., Oginni, O., & Akinola, S. (2017) Potential utilization of sawdust in energy, manufacturing and agricultural industry; waste to wealth. *World Journal of Engineering and Technology*, 5(3): 526-539. <https://doi.org/10.4236/wjet.2017.53045>
- Rosales-Castro, M., & González-Laredo, R. F. (2003). Comparación del contenido de compuestos fenólicos en la corteza de ocho especies de pino. *Madera y Bosques*, 9(2): 41-49. <https://doi.org/10.21829/myb.2003.921285>
- Rosales-Castro, M., González-Laredo, R. F., Rivas-Arreola, M. J., & Karchesy, J. (2017). Chemical analysis of polyphenols with antioxidant capacity from *Pinus durangensis* bark. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 37(5): 393–404. <http://dx.doi.org/10.1080/02773813.2017.1310898>
- Rosales-Castro, M., González-Laredo, R. F., Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J.A., Peralta-Cruz, J., & Karchesy, J. J. (2016). Evaluación química y capacidad antioxidante de extractos polifenólicos de cortezas de *Pinus cooperi*, *P. engelmannii*, *P. leiophylla* y *P. teocote*. *Madera y Bosques*, 15(3): 87-105. <https://doi.org/10.21829/myb.2009.1531187>
- Runkel, R. O. H., & Wilke, K. D. (1951). Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 9: 260-270. <https://doi.org/10.1007/BF02617370>
- Rutiaga-Quiñones, J. G. (2001). Chemische und biologische Untersuchungen zum Verhalten dauerhafter Holzarten und ihrer Extrakte gegenüber holzabbauenden Pilzen. Technische Universität München, 210 pp. Buchverlag Gräffelfing, Germany.
- Rutiaga-Quiñones, J. G., Pintor-Ibarra, L. F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., Carrillo-Ávila, N., Navarrete-García, M. A., Ruíz-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. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.15.4.8529-8553>
- 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. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.04.023>
- Sáenz-Esqueda, M. A., Rosales-Castro, M., Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J. A., & González-Laredo, R. F. (2010). Contenido fenólico y acción antioxidante de extractos de acículas de *Pinus cooperi*, *P. durangensis*, *P. engelmannii* y *P. teocote*. *Madera y Bosques*, 16(3): 37-48. <https://doi.org/10.21829/myb.2010.1631165>

- Sánchez-González, A. (2016). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos en México. *Madera y Bosques*, 14(1): 107-12. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1411222>
- Sandermann, W., & Rothkamm, M. (1959). Über die Bedeutung der pH-Werte von Handelshölzern und deren Bedeutung für die Praxis. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 17: 433-440. <https://doi.org/10.1007/BF02605386>
- Serret-Guasch, N., Giralt-Ortega, G., & Quintero-Ríos, M. (2016). Caracterización de aserrín de diferentes maderas. *Tecnología Química*, 36(3): 468-479. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445546669012>
- Téllez-Sánchez, C., Ochoa-Ruiz, H. G., Sanjuán-Dueñas, R., & Rutiaga-Quñones J. G. (2010). Componentes químicos del duramen de *Andira inermis* (W. Wright) DC. (Leguminosae). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(1): 87-93. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2009.11.046>
- Trugilho, P. F., Assis, M. R. de, Loureiro, B. A., Simetti, R., Lima, L. V. L., Rodrigues, T. A. F., & Mendes, F. M. (2020). Effect of genetic material and solvent type on the quantification of soluble wood compounds in Eucalyptus clones. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 3(2): 785-792. <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/12398>
- UNE-EN 14775: 2010. Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas. Asociación Española de Normalización UNE-Normalización Española. Madrid, España. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0045971>
- UNE-EN 14961-1: 2011. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 1: Requisitos generales. Asociación Española de Normalización UNE-Normalización Española. Madrid, España. <https://en.tienda.aenor.com/norma-une-en-14961-1-2011-n0046855>
- Wang, N., Xu, B., Wang, X., Lang, J., & Zhang, H. (2022). Chemical and structural elucidation of lignin and cellulose isolated using DES from bagasse based on alkaline and hydrothermal pretreatment. *Polymers*, 14(14): 2756. <https://doi.org/10.3390/polym14142756>
- Wise, L. E., Murphy, M., & d'Addieco, A. A. (1946). A chlorite holocellulose, its fraction and bearing on summative wood analysis and on studies on hemicelluloses. *Paper Trade Journal*, 122(2), 35-43. <https://www.sid.ir/paper/567136/en>

2025 TECNOCENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>