

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**EVALUACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA Y PROPIEDADES
FÍSICAS DE MADERA Y CORTEZA DE CUATRO CONÍFERAS
PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA**

POR

ING. LIZZETE LIMA ROJAS

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRA EN CIENCIAS FORESTALES

Linares, Nuevo León

Enero, 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

**EVALUACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA Y PROPIEDADES
FÍSICAS DE MADERA Y CORTEZA DE CUATRO CONIFERAS
PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA**

TESIS DE MAESTRÍA


Para obtener el grado de
MAESTRA EN CIENCIAS FORESTALES

Presentada por:
ING. LIZZETE LIMA ROJAS


COMITÉ DE TESIS



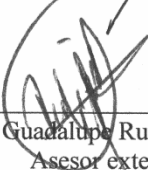
Dr. Artemio Carrillo Parra
Director



Dr. Oscar A. Aguirre Calderón
Asesor



Dr. Fortunato Garza Ocañas
Asesor



Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones
Asesor externo

Linares, Nuevo León

Enero, 2013

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León a través de la Facultad de Ciencias Forestales, por la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

A la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, por estimular el interés en el estudio de las propiedades de madera y corteza de las especies de aprovechamiento.

A la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por las facilidades otorgadas en el desarrollo experimental de esta investigación.

A los Doctores, Artemio Carrillo, José Rutiaga, Oscar Aguirre y Fortunato Garza por su disposición y orientación en el desarrollo de la investigación.

Al Ing. Ramiro Morelos y Dr. Joel Meza por el apoyo en la realización de los análisis de laboratorio y análisis estadísticos.

A Elizabeth Rojas

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1 Biomasa como fuente de energía.....	3
2.2 Residuos forestales	4
2.3 Importancia de las coníferas en la industria forestal	4
2.4 Propiedades de la biomasa forestal con fines bioenergéticos	7
2.5 Composición química de la madera y corteza	9
3. OBJETIVOS.....	13
3.1 Objetivo general.....	13
3.2 Objetivos específicos	13
4. HIPÓTESIS	14
5. METODOLOGÍA.....	15
5.1 Material de estudio	15
5.2 Obtención del material de estudio	15
5.3 Propiedades físicas.....	16
5.4 Composición química	16
5.4.1 pH y solubilidad a la sosa.....	17
5.4.2 Contenido de cenizas y microanálisis de cenizas.....	18
5.4.3 Extractos, lignina, holocelulosa y alfa-celulosa.....	19
5.6 Análisis estadístico	21
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
6.1 Propiedades físicas.....	22
6.1.1 Contenido de humedad.....	22
6.1.2 Densidad básica.....	24
6.2 Composición química	26

6.2.1 Valores de pH.....	26
6.2.2 Contenido de sustancias solubles en NaOH al 1 %.....	27
6.2.3 Contenido de cenizas.....	29
6.2.4 Contenido de minerales.....	30
6.2.5 Contenido de extractos totales	33
6.2.6 Contenido de lignina	34
6.2.7 Contenido de holocelulosa	36
6.2.8 Contenido de alfa-celulosa.....	38
6.3 Poder calorífico.....	39
6.4 Análisis de regresión y correlación para poder calorífico y extractos totales entre especies	40
7. CONCLUSIONES.....	43
8. RESUMEN	44
9. ABSTRACT	45
10. LITERATURA CITADA.....	46

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición básica de la biomasa lignocelulósica.....	3
Cuadro 2. Principales propiedades de residuos forestales como biocombustibles DIN 51731	7
Cuadro 3. Poder calorífico superior de algunos biocombustibles	9
Cuadro 4. Valores medios de contenido de humedad (%) en albura y duramen por especie.	23
Cuadro 5. Valores medios de densidad básica (g cm^{-3}) en albura y duramen por especie...	25
Cuadro 6. Valores medios de pH (%) en corteza, duramen y albura por especie.	27
Cuadro 7. Valores medios de sustancias solubles en NaOH al 1 % base seca en corteza, duramen y albura por especie.....	29
Cuadro 8. Valores medios del contenido de cenizas (%) en corteza, duramen y albura por especie.	30
Cuadro 9. Valores medios de contenido de minerales (%) en corteza, albura y duramen por especie.	32
Cuadro 10. Extractos totales (%) base seca en corteza, duramen y albura por especie.	33
Cuadro 11. Valores medios de lignina (%) base seca libre de extraíbles, en corteza, duramen y albura por especie.....	36
Cuadro 12. Contenido de holocelulosa (%) base seca libre de extraíbles, en corteza, duramen y albura por especie.....	37
Cuadro 13. Contenido de alfa-celulosa (%) base seca de holocelulosa, en corteza, duramen y albura por especie.....	39
Cuadro 14. Valores de poder calorífico (J g^{-1}) en corteza, duramen y albura por especie...	40
Cuadro 15. Coeficiente de determinación y valores de p para la relación entre el poder calorífico y el contenido de extractos totales en las especies.	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Líneas de utilización de las leñas y astillas.....	6
Figura 2. Selección de las especies por personal de la Dirección Técnica Forestal (A), derribo y corte de rodaja a 1.30 m de altura (B), rodaja de 30 cm de espesor (C).	16
Figura 3. Molino (A) y tamices utilizados para obtener la harina a tamaño de partícula malla 40 (B)	17
Figura 4. Obtención de peso para determinar la humedad (A), potenciómetro para obtener valor de pH (B), proceso para determinar solubilidad a la sosa (C)	18
Figura 5. Harina de madera en crisoles de níquel sobre placa de calentamiento (A), crisoles dentro de mufla para obtención de cenizas (B) y microscopio de barrido para microanálisis de cenizas (C).	18
Figura 6. Extracción de corteza, duramen y albura en equipo Soxhlet (A), destilación de solventes en rotavapor (B) y extractos en matraces dentro del desecador para obtención de extractos (C).	19
Figura 7. Lignina en papel filtro (A), proceso de obtención de holocelulosa (B) y filtrado al vacío de alfa-celulosa (C).	20
Figura 8. Pastilla en la bomba de oxígeno (A), tanque de oxígeno (B) y calorímetro termómetro digital (C).	20
Figura 9. Contenido de humedad (%) en albura y duramen por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones ± 1 error estándar.....	23
Figura 10. Densidad básica (g cm^{-3}) en albura y duramen por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones ± 1 error estándar.	25
Figura 11. pH en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones ± 1 error estándar.	27
Figura 12. Contenido de sustancias solubles en NaOH al 1 % en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones ± 1 error estándar.....	28
Figura 13. Contenido de cenizas en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones ± 1 error estándar.....	30
Figura 14. Contenido de minerales (%) en corteza, albura y duramen de las especies.....	32

Figura 15. Extractos totales en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones ± 1 error estándar.	34
Figura 16. Contenido de lignina en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones ± 1 error estándar.....	36
Figura 17. Contenido de holocelulosa en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones ± 1 error estándar.....	37
Figura 18. Contenido de alfa-celulosa (%) en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones ± 1 error estándar.	38
Figura 19. Poder calorífico en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones ± 1 error estándar.	40
Figura 20. Relación entre poder calorífico ($J g^{-1}$) y extractos totales (%) para <i>Pinus montezumae</i> (●), <i>Abies religiosa</i> (■), <i>Pinus pseudostrobus</i> (◆), y <i>Pinus leiophylla</i> (▼).	41
Figura 21. Valores de poder calorífico ($J g^{-1}$) contra contenido de extractos totales (%) en <i>Pinus montezumae</i> (●), <i>Abies religiosa</i> (○), <i>Pinus pseudostrobus</i> (▼), y <i>Pinus leiophylla</i> (Δ).	42

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía mundial y la incertidumbre sobre las reservas de combustibles fósiles ha propiciado el interés cada vez mayor en el desarrollo de fuentes alternativas de energía, que además ofrezcan beneficios ambientalmente sustentables (Ghosh y Prelas). El aprovechamiento de los residuos biológicos de distintas procedencias pueden ser una fuente importante de energía (Aktuell, 2007; Martínez, 2009).

La biomasa, como material originado en un proceso biológico, puede ser utilizada para producir energía. Los sistemas agrícolas y forestales son grandes productores de biomasa. Una parte de ésta es utilizada para procesos industriales (alimentarios o madereros), mientras que otra parte es considerada como residuo, el cual actualmente no es aprovechado para la generación de bioenergía (Borja, 2006).

Los residuos forestales derivados de actividades silvícolas y aprovechamientos madereros no son utilizados de forma eficaz debido a que presentan dificultades técnicas y económicas en su extracción, transporte, selección y transformación así como falta de información sobre la cantidad y calidad de estos residuos (Marcos y Núñez, 2006).

El uso de los residuos forestales y el precio que tienen en el mercado, depende en gran medida de las características que presentan. Cuando el aserrín y corteza presentan un contenido de humedad igual o mayor a 140% en base seca, propicia que en la mayoría de los casos el material sea dispersado por el área de cosecha, otras ocasiones se depositan en vertederos y eventualmente se trituran o queman para reducir el volumen (Alakangas, 2002). El abandono de estos materiales en la superficie del monte supone un alto impacto ambiental, debido a la lenta descomposición que pueda tener el elevado volumen de biomasa sobrante y en época de calor puede sufrir un secado suponiendo focos con alto riesgo de incendio (Borja, 2006).

Otro aspecto a considerar durante la comercialización de aserrín y corteza son los costos de transporte, que tiene relación con la distancia entre el productor y el centro de utilización,

en donde el costo por transporte, es mucho mayor que su precio de venta final (FAO, 1997; Rojas, 2004). La problemática del volumen del material se intenta resolver al manufacturar productos como los pellets y las briquetas, que durante su proceso densifica el aserrín para minimizar el volumen de residuos transportados (Quezada, 1999; Marcos y Núñez, 2006).

La industria forestal genera grandes volúmenes de residuos durante el proceso de aprovechamiento hasta la obtención del producto final. Se calcula que los residuos son el 28 % del volumen de la madera de los aprovechamientos forestales medidos en metros cúbicos con corteza (Martín, 2001). El estado de Michoacán es uno de los principales productores de madera, donde las especies más aprovechadas son los pinos. En el 2011 contribuyó con el 8.7 %, equivalente a 478,535 metros cúbicos rollo (m^3r) de la producción total nacional (SEMARNAT, 2011). La Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, contó con un volumen aprovechable de 74,647 m^3 de total árbol (v.t.a.) según su Programa de Manejo Forestal Maderable (2009) y destinó del volumen total el 12% a residuos.

El aprovechamiento energético de los residuos forestales derivados de actividades silvícolas como podas y aclareos, a veces no rentables económicamente, supone un manejo integral de las masas forestales (Borja, 2006). Conocer la composición química de las diferentes estructuras que conforman las especies maderables es un aspecto importante y necesario para encontrar alternativas de aprovechamiento de los beneficios económicos que los residuos proporcionan para las diferentes industrias (García *et al.*, 2004).

Para determinar las principales características energéticas de los residuos forestales se deben considerar las variables físicas y químicas que los definen. Las características químicas de la madera que más influyen en su comportamiento como biocombustible son la composición química elemental, la composición química por compuestos y el poder calorífico (Camps y Marcos, 2008). Por lo anterior, conocer las principales variables que condicionan el uso de la madera y corteza como combustibles como son; el contenido de humedad, densidad y las propiedades químicas de las especies maderables con carácter residual, es el primer paso para determinar su potencial como biocombustibles.

2. ANTECEDENTES

2.1 Biomasa como fuente de energía

Según Jiménez (1991), el término biomasa comprende a las materias hidrocarbonadas, no fósiles en las que mediante el proceso básico de la fotosíntesis se ha producido la reducción y fijación de CO₂. Las plantas almacenan energía en forma de carbohidratos (azúcares), lignina y celulosa. Durante la fotosíntesis las plantas usan la luz solar para combinar dióxido de carbono del aire y agua del suelo para formar carbohidratos los cuales son la estructura base de la biomasa. La madera y corteza están formadas químicamente por polisacáridos y lignina, además de sustancias inorgánicas (Fengel y Wegener, 1983). Aun cuando las cantidades de los componentes varían entre especies, los componentes químicos mayoritarios son los carbohidratos y lignina y, en pequeñas cantidades los extractivos (cuadro 1).

Cuadro 1. Composición básica de la biomasa lignocelulósica

Componente	Biomasa leñosa (%)
Celulosa	55-65
Hemicelulosa	10-20
Lignina	20-30
Extractivos	10-20
Cenizas	0.1-0.5

La biomasa rica en carbohidratos, principalmente glucosa, es adecuada para la generación de bioenergía. Actualmente, la combustión de biomasa es una de las principales fuentes de energía renovable, contribuyendo con casi 10.1% del suministro total de la energía primaria a nivel mundial, la cual es considerada neutral desde el punto de vista ambiental, en la emisión de CO₂ a la atmósfera (Ghosh y Prelas, 2011). Además su uso genera oportunidades para el desarrollo social y el desarrollo económico en las comunidades rurales, y mejora la gestión de los recursos y de los residuos (Gómez, 1995).

2.2 Residuos forestales

Las fuentes más importantes de biomasa son los campos forestales y agrícolas pues en ellos se producen residuos que normalmente son dejados en el campo (Camps y Martín, 2008). Los residuos forestales, procedentes de actividades silvícolas y/o industrias forestales lo constituyen las ramas, tocones (cuando no son utilizados debido a razones económicas), corteza, astillas y aserrín. Estos residuos, no están generalmente concentrados y ofrecen unas características heterogéneas muy variables de unos sistemas a otros al depender de condiciones no controladas como el clima, edafología y tipo de aprovechamiento. Por tanto, la utilización de estos residuos encarece las operaciones de obtención y abastecimiento, teniendo además que homogeneizar el material utilizable (Askew y Holmes, 2002; Andersen *et al.*, 2005). Esta concepción requiere realizar una valoración de la biomasa forestal existente que permita una adecuada utilización como fuente de energía.

2.3 Importancia de las coníferas en la industria forestal

En México, los bosques de coníferas ocupan cerca del 15 % del territorio, con importancia en cuanto a la extensión, los bosques de *Pinus*, *Pinus-Quercus*, *Juniperus* y *Abies* (Flores *et al.*, 1971; Rzedowski, 1972). Los pinares son comunidades vegetales muy características y ocupan vastas superficies del territorio nacional. Dentro de la riqueza forestal de México, constituyen un recurso de primera importancia por la demanda de su madera, por la facilidad de su aprovechamiento, por la relativa rapidez de crecimiento de muchas especies y sobre todo por la extensa distribución y buen desarrollo que presentan. La distribución geográfica de los bosques de *Abies* en México es en extremo dispersa y localizada. En la mayor parte de los casos la comunidad se presenta en forma de manchones aislados, confinada a sitios de alta montaña entre los 2,400 y 3600 m de altitud. Desde el punto de vista económico, los bosques de *Abies* son de importancia pues la madera de oyamel es la materia prima preferida por la industria de la celulosa y papel. En escala menor se emplea su madera como combustible en forma de leña y también para la construcción y para aserrar.

La industria forestal conlleva una importante generación de desechos, principalmente aserrín. Del aprovechamiento de la madera también se generan altos volúmenes de corteza,

ya que ésta representa del 10 al 15 % del peso total del árbol (Kofujita *et al.*, 1999). En México, la producción forestal maderable para el 2011 alcanzó los 5.5 millones de metros cúbicos rollo (m^3r), con una producción de madera de coníferas de 62.1 %, participando el estado de Michoacán con un 8.7 % de la producción nacional (SEMARNAT, 2011). Según ASINEL (1992) los residuos son el 28 % en volumen de la madera de los aprovechamientos forestales, medidos en metros cúbicos con corteza. Enciso (2007) calculó que de cada árbol extraído para la producción forestal maderable, solo se aprovecha el 20%, y que el 40% es dejado en campo en las ramas, puntas y raíces, el restante 40% se desperdicia en la manufactura del proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín. De acuerdo con el Programa de Manejo Forestal Maderable (2009) del predio “Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Paragarcitiro” en el estado de Michoacán, el volumen total aprovechable es de 74,647 m^3 volumen total árbol (v.t.a.). El 45% del volumen de las especies de los géneros *Pinus* y *Abies* se destina a productos primarios, 28% a secundarios, 15% a celulósicos y el 12% corresponde a residuos.

2.4 Los biocombustibles

De acuerdo con Marcos (2001), biocombustible es aquel combustible de origen biológico que no se ha fosilizado. A diferencia de los denominados combustibles fósiles, los biocombustibles se consideran como una energía renovable. Los biocombustibles han sido utilizados desde siempre por el hombre como paja y leña para calentarse, calentar su comida y obtener y transformar metales, cambiando a través del tiempo, las tecnologías de manejo y aprovechamiento. Actualmente, los biocombustibles son clasificados en función del origen de los mismos y/o según su estado físico en sólidos (leñas, astillas, pellets, carbón), líquidos (bioetanol, aceites) y gaseosos (biogás de origen muy diverso) (Martín 2001).

La biomasa forestal destinada a la obtención de energía es utilizada en dos formas diferentes, leñas o astillas. El empleo de las leñas y astillas puede tener caminos diversos. Con el desarrollo industrial se ha retomado el óptimo aprovechamiento de los recursos lignocelulósicos. La necesidad de sustituir combustibles fósiles ha llevado a utilizar los residuos lignocelulósicos, ocupándolos directamente o procesándolos como material

compactado en forma de pellets o briquetas (figura 1). Estos elementos densificados presentan una serie de ventajas con respecto al material del que provienen, ya que su mayor densidad permite disminuir el coste de transporte y almacenamiento, además de ser productos más homogéneos en características y propiedades, más limpios, y mucho más fáciles de manejar. Los pellets de madera fueron inventados como una reacción a la crisis energética a finales de los años 70's en los Estados Unidos como un combustible alternativo. El propósito principal de pellets de madera fue para ayudar a resolver la crisis energética, utilizados por los sectores industrial, comercial e institucional para la calefacción (Alakangas, 2002; FAOSTAT, 2006)

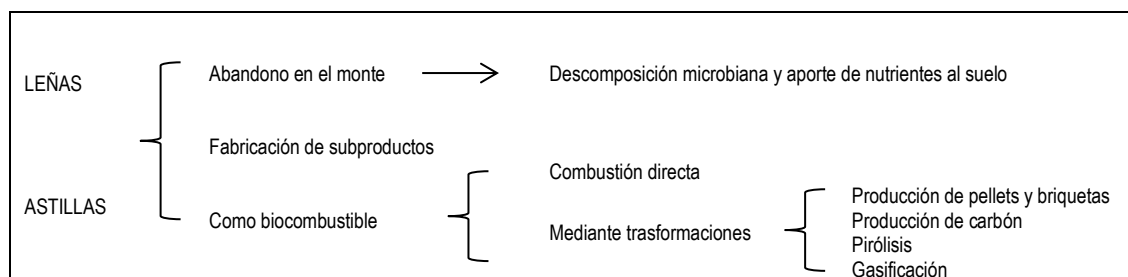


Figura 1. Líneas de utilización de las leñas y astillas

El aserrín de coníferas es el material más comúnmente usado para la producción de pellets, la experiencia, indica que las propiedades de los diferentes biomateriales tienen influencia en la calidad final del combustible. Granada *et al.* (2006), en el resultado de sus experimentos sugiere que la corteza de pino es el más sustentable producto para fabricar pellet, pero necesita de un quemador específico debido a los diferentes comportamientos de la combustión de las mezclas.

Para obtener un biocombustible las principales etapas de transformación realizables para el tratamiento de biomasa residual son fragmentación, secado y compactación, con el objetivo de facilitar la ignición y combustión del biocombustible, aumentar su poder calorífico al disminuir su humedad y aumentar la densidad y gastos de almacenaje al disminuir su volumen. Las transformaciones químicas dependen de las propiedades que contenga el material como su poder calorífico, la cantidad y composición de cenizas, composición

química ya que estas propiedades afectan la combustión, así como, el diseño y rendimiento de los sistemas de combustión (Martín 2001).

2.4 Propiedades de la biomasa forestal con fines bioenergéticos

Las fuentes y productos energéticos se pueden medir por su masa o peso, o incluso su volumen, pero el factor esencial es el contenido de energía de esas fuentes y productos. El valor de la energía se evalúa con respecto a parámetros energéticos, utilizando siempre unidades normalizadas (FAO, 1997). La estandarización de los biocombustibles está regulada por el conjunto de normas europeas CEN/TE 335, por la que se regulan terminología, descripción y especificaciones. La eficiencia de cada uno de los procesos posibles para la utilización de residuos forestales depende de ciertos parámetros característicos o propiedades clave que indican la aptitud de un combustible para un uso específico. Estas propiedades se indican en el cuadro 2 junto con sus medidas en el Sistema Internacional.

Cuadro 2. Principales propiedades de residuos forestales como biocombustibles DIN 51731

Propiedad de la biomasa	Unidad (S.I)	Requerimiento
Densidad	kg m ³	1-1.4
Humedad	%	≤12
Cenizas	%	≤1.5
Poder calorífico	J g ⁻¹	≥18,000
S	%	≤0.08
N	%	≤0.3
Cl	%	≤0.03

El poder calorífico, definido como el calor desprendido por kilogramo de combustible en combustión completa a la presión constante de 1kg cm⁻² y temperatura atmosférica normal (Kollmann, 1959). Esta es la característica fundamental que define a un combustible como tal. Altos poderes caloríficos indican buenos combustibles y bajos poderes caloríficos señalan combustibles más discretos. Esta propiedad depende de la composición química y del contenido de humedad que posea el material al momento de ser quemado, así el poder calorífico aumenta a medida que disminuye el contenido de humedad. Por cual, el aserrín es utilizado limitadamente como combustible en forma directa, debiendo ser presecado para proporcionar mayor rendimiento calórico.

En países como España, la obtención de poderes caloríficos se realiza a combustiones completas y a volumen constante, no a presión constante. Lo anterior, dado que la presión del oxígeno en la bomba calorimétrica no es de 1 kg cm^{-2} sino generalmente de 20 a 30 kg cm^{-2} . Bonfill (1985), Buatas (1982), Elvira (1982) y Martín (1989) han distinguido los conceptos de poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI). El poder calorífico superior llamado también calor de combustión superior, es el valor desprendido por un kilogramo de biomasa forestal, y su valor se mide en bomba calorimétrica. La combustión se realiza a volumen constante. El poder calorífico inferior (PCI) es el calor desprendido por un kilogramo de combustible, en una combustión en la que el agua del combustible se libera en forma de vapor. Si esta agua se condensa desprendería calor y se obtendría PCS. Por tanto el PCI es menor que el PCS (Camps y Marcos, 2008). La bomba calorimétrica se usa para determinar el poder calorífico de un combustible cuando se quema a volumen constante. Debido a que los gases producidos durante la combustión al final se encuentran a temperaturas bastante bajas y a alta presión, la mayor parte del agua presente en los productos se condensa, por lo cual el poder calorífico que se determina con el uso de la bomba calorimétrica es el superior. De los métodos de determinación del poder calorífico superior se considera que el de mayor exactitud es el de la bomba calorimétrica (Brown *et al.*, 1952; Martín, 1989). En el cuadro 3 se presentan valores caloríficos superiores de biocombustibles más comunes.

El potencial calórico a su vez, se ve afectado por diversos factores entre los cuales se puede mencionar la humedad, proporción de cenizas y la composición química (Tillman, 1981; Coronel, 1994). Kollmann, (1959) consideró para la madera anhidra y sin cenizas un poder calorífico promedio de $18,810\text{ J g}^{-1}$ para maderas latifoliadas de climas templados mientras que Brown *et al* (1952) reportó para las mismas maderas un valor promedio de $19,646\text{ J g}^{-1}$. Doat (1977) en un estudio efectuado a 111 especies de maderas tropicales encontró un poder calorífico promedio de $19,938\text{ J g}^{-1}$.

La cantidad de agua existente en el biocombustible afecta de forma decisiva a la energía disponible de cada biocombustible. Habitualmente, se utilizan dos métodos, referido al producto en seco y referido al producto en húmedo para establecer el contenido de

humedad, según el procedimiento utilizado para contabilizar la masa de agua. Es importante distinguirlos, especialmente cuando el contenido de humedad es elevado. En el caso del proceso de peletizado, se suelen utilizar partículas secas con una humedad menor del 12 % base húmeda.

Cuadro 3. Poder calorífico superior de algunos biocombustibles

Biocombustible	Poder calorífico superior (J g⁻¹)
Leñas y astillas	18,810-22,154
Pelets y briquetas de madera	18,810-22,154*
Carbón vegetal	30,090-32,604
Bioetanol	40,546-43,890
Bioaceite	40,546-43,890
Metiléster	40,546-43,890
Biogás	Variable

*El poder calorífico superior de pelets y briquetas es función de la materia prima empleada para obtener los mismos.

2.5 Composición química de la madera y corteza

La madera es un biopolímero tridimensional cuya composición química general está formada por compuestos esenciales o primarios: holocelulosa (celulosa y hemicelulosa) y lignina y compuestos extraños o secundarios: extractos (en agua, en solventes, volatilizados en vapor) y no extraíbles (compuestos inorgánicos, proteínas y sustancias pécticas). La celulosa está formada por celobiosa, es blanca, inodora e insípida y es la materia prima principal para la fabricación de pastas de disolución y paneles para construcción. Las hemicelulosas son carbohidratos no celulósicos de bajo peso molecular que ayudan en los procesos de refinación de fibras debido a que son moléculas más reactivas y se hidratan más fácilmente (Gutiérrez *et al.* 1998). La lignina es un polímero natural cuyas unidades estructurales se derivan del fenilpropano; es subproducto de los pulpeos químicos de la madera y se utiliza a nivel industrial en la producción de poliuretano. Los extractos son compuestos solubles en diferentes solventes, como ejemplo, en alcoholbenceno se solubilizan ceras, grasas y resinas; en agua fría, taninos, gomas, azúcares, materiales colorantes y en agua caliente los almidones. Pueden clasificarse en ácidos volátiles, aceites

esenciales, ácidos resinosos y polifenoles. Entre los contenidos inorgánicos de la madera se encuentran los cristales y el sílice. Los cristales son depósitos en su gran mayoría de sales de calcio, que se encuentran principalmente en células parenquemáticas. El sílice es un material cuya fórmula química y grado de dureza se asemejan al diamante, pueden encontrarse en el interior de las células en forma partículas o granos. Los cristales y depósitos de sílice tienen gran importancia en la propiedad de trabajabilidad de la madera y se conocen popularmente como cenizas, se ha informado que tanto para coníferas como para latifoliadas varían entre 0.1 y 1.0 % (D'Almeida, 1981 citado por Albarca, 2003).

La composición química de la corteza es compleja, al igual que la madera, contiene polisacáridos (celulosa y hemicelulosa) y lignina, pero a diferencia de ella tiene una mayor concentración de extraíbles. Estos extraíbles comprenden una amplia variedad de compuestos orgánicos dispersos y depositados en el lumen celular o impregnando las paredes de las células, que pueden removerse con solventes neutros de polaridad variable como hexano, éter, acetato de etilo, acetona, etanol, metanol y agua, entre otros. De la fracción lipofílica (no polar) se extraen grasas, ceras, terpenos y alcoholes alifáticos superiores, mientras que la fracción hidrofílica (polar) está constituida principalmente por sustancias polifenólicas (Fengel y Wegener, 1989).

La composición química posee una fuerte influencia en el poder calorífico, sobre todo la presencia de lignina y los extractivos totales como resinas, taninos, grasas y aceites (Cunha *et al.*, 1989). Es importante conocer la composición química elemental del material ya que esta condiciona su poder calorífico, los gases emitidos en la combustión y la composición de las cenizas. Lo ideal es conocer los porcentajes de la madera y corteza, así como la humedad a la que se manipulan estos productos. Doat (1977), encontró para la lignina aislada en ácido sulfúrico un poder calorífico de $25,498 \text{ J g}^{-1}$ en maderas resinosas.

En general, la madera en base a su peso, está compuesta de 20-40% de lignina, 30-50 % de celulosa, 9-28 % de pentosanas y 0.2-20 % de extractivos, presentándose diferencias cuantitativas entre coníferas y latifoliadas. Diversos estudios reportan información general sobre propiedades químicas de la madera y algunas posibles aplicaciones de su

transformación química. Rutiaga (2001), en un análisis químico en albura y duramen de *P. pseudostrobus*, encontró un contenido de extraíbles totales de 13.2 % en duramen y 4.4 % en albura; polisacáridos 67.2 % en duramen, 67% en albura; lignina 27.6 % en duramen y 26 % en albura; cenizas 0.08 % en duramen y .16 % en albura.

Las maderas ricas en extractivos y lignina tienen mayor poder calorífico. Los compuestos extraíbles cubren una amplia variedad de compuestos de bajo peso molecular que pueden ser aislados de los materiales lignocelulósicos mediante extracciones con solventes orgánicos polares y no polares (Hillis 1962; Fengel y Wegener 1989; Swan, 1989; Sjöström 1993). La cantidad y la composición de los compuestos extraíbles varían según la especie considerada, la parte de la planta, época del año. Sin embargo, Fonseca (2006), encontró que la concentración de celulosa, lignina, sustancias extraíbles, taninos, cenizas y contenido de humedad en *Pinus maximinoi* no varía significativamente en función de la altura en que se extrae la muestra. Lo que indica que en cualquier parte del árbol se pueden encontrar en una cantidad similar.

Según Jara (1989), el poder calorífico superior de la madera, además de la humedad, está muy influenciado por la constitución química de la madera, principalmente la lignina y extraíbles. De esta manera, las coníferas que presentan un contenido de resinas y lignina mayor que las latifoliadas ostentan por consiguiente un mayor poder calorífico superior, que varía también según la parte del árbol que esté en combustión. Browning (1963), citado por Cunha *et al.* (1989), asegura que el poder calorífico es más alto cuando mayor es el tenor de lignina y extraíbles, porque contienen menos oxígeno que los polisacáridos presentes en la holocelulosa (celulosa y hemicelulosa).

La densidad de la madera, es decir, el peso por unidad de volumen, varía ampliamente entre diferentes especies y tipos de madera. La densidad básica es uno de los parámetros para evaluar la calidad de la madera, que está directamente relacionada con las propiedades físicas, mecánicas y anatómicas, pudiendo así, caracterizar el uso final de la madera (Kollmann, 1959). Es importante observar la influencia del contenido de humedad en la densidad de la madera. Cuanto mayor sea el agua por unidad de peso menor será la

cantidad de leña. Por ello, es imperativo precisar con exactitud del contenido de humedad al establecer el peso de la madera. Para un porcentaje de humedad igual, un volumen dado de madera densa tiene un poder calorífico más elevado que una madera más liviana. Por el contrario, si no se considera las sustancias extraíbles que puedan estar presentes, un peso dado de madera a determinado contenido de humedad, dará más o menos la misma cantidad de calor en una madera densa o liviana. La diferencia es que las maderas duras se queman más lentamente (Doat, 1977).

Según Cunha *et al.* (1989), no hay correlación entre densidad básica y el poder calorífico. Sin embargo, en relación al volumen de madera que se quema la densidad se relaciona positivamente con el contenido calórico de la madera, estimulando el interés de maderas pesadas para la quema. El objetivo principal de los procesos de transformación de la materia prima a biocombustibles es obtener un producto final de mayor densidad que el producto inicial. Al tener mayor densidad el producto se transportara ocupando menos volumen (a igualdad de peso) y por lo tanto será más sencilla su manipulación.

Otro factor importante del contenido de energía del biocombustible es el contenido de cenizas, que se mide siempre con referencia al producto en seco y se refiere al residuo sólido que persiste tras una combustión total. Si bien el contenido de ceniza de la leña es generalmente del 1%, algunos combustibles de origen agrícola pueden tener un contenido de ceniza muy elevado. Esto influye en el valor energético de los biocombustibles, dado que las sustancias que forman las cenizas no tienen, por lo general, valor energético (FAO, 1997).

La importancia de evaluar la concentración de las propiedades físicas y composición química de la madera y corteza de diferentes especies forestales contribuye en el conocimiento de cuáles pueden ser las fuentes más importantes de esos compuestos. El conocimiento de los patrones de variación dentro de especies hace posible lograr el mayor y mejor aprovechamiento de estos recursos.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Determinar las propiedades físicas y la composición química de la madera y corteza que determinan el potencial como biocombustible de *Pinus montezumae* Lamb., *Abies religiosa* (Kunth) Schltdt. & Cham., *Pinus pseudostrobus* Lindl., y *Pinus leiophylla* Sch. et Cham.,

3.2 Objetivos específicos

Determinar el contenido de humedad y densidad básica de la albura y duramen de las especies.

Determinar el contenido de cenizas, componentes inorgánicos, extractivos, lignina, holocelulosa, alfa-celulosa y pH de la corteza, albura y duramen de las especies.

Determinar el poder calorífico de la corteza, albura y duramen de las especies y su relación con sus propiedades físicas y químicas.

4. HIPÓTESIS

Las propiedades físicas y químicas de la corteza, albura y duramen de *Pinus montezumae* Lamb., *Abies religiosa* (Kunth) Schltdt. & Cham., *Pinus pseudostrabus* Lindl., y *Pinus leiophylla* Sch. et Cham., determinan su capacidad bioenergética.

5. METODOLOGÍA

5.1 Material de estudio

El material de estudio proviene de la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, municipio de Nuevo Parangaricutiro, Michoacán, ubicada geográficamente entre los paralelos 19° 21' 00" y 19° 34' 45" N y 102° 08' 15" y 102° 17' 30" O. Comprende una superficie arbolada comercial de 10,870.621 ha, con existencias maderables comerciales de 257,320.446 m³ v.t.a., mismas que se encuentran actualmente bajo manejo forestal, con un volumen de cosecha total de 74,647 m³ v.t.a. (Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, 2009).

El bosque de la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro es clasificado como “bosque de pino-encino” donde existen cuatro categorías generales de vegetación: a) Bosque de *Pinus pseudostrobus* y *P. montezumae* con *Abies religiosa*, *Quercus laurina*, *Q. rugosa* y *Alnus* spp. en los sitios de mayor altitud, correspondientes a faldas y cimas de conos cineríticos. b) Bosque de *Pinus pseudostrobus* con *P. leiophylla*, *Quercus rugosa*, *Q. crassipes*, *Q. laurina* correspondientes a alturas medias y sitios relativamente más húmedos y c) Bosque de *Pinus leiophylla* y *P. michoacana* con *Quercus obtusata*, *Q. castanea*, *Q. rugosa*, correspondientes a alturas medias y sitios relativamente más secos (Resumen público de Certificación).

Las especies *Pinus montezumae* Lamb., *Abies religiosa* (Kunth) Cham. Et Schl., *Pinus pseudostrobus* Lindl., y *Pinus leiophylla* Sch. et Cham., se seleccionaron para realizar el presente estudio por ser especies con un alto porcentaje de aprovechamiento en la industria maderera de la comunidad (Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, 2009).

5.2 Obtención del material de estudio

Se colectó una rodaja de 30 cm de espesor a 1.30 m de altura de cada una de las especies. Las especies fueron identificadas y los árboles seleccionados por personal de la Dirección

Técnica Forestal encargada de los aprovechamientos forestales de la comunidad de Nuevo San Juan Parangaricutiro (Figura 2).



Figura 2. Selección de las especies por personal de la Dirección Técnica Forestal (A), derribo y corte de rodaja a 1.30 m de altura (B), rodaja de 30 cm de espesor (C).

5.3 Propiedades físicas

Para cada una de las especies se determinó del contenido de humedad (%) y densidad básica (g cm^{-3}) en albura y duramen. Las probetas se dimensionaron a $2 \times 2 \times 2$ cm en sus direcciones radial, tangencial y longitudinal con una sierra circular. Se pesaron inmediatamente después del corte para obtener el peso verde. El peso anhidro de las probetas se obtuvo después de secarlas en una estufa a $103^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ hasta peso constante de acuerdo a lo establecido con la norma DIN 52183. El cálculo de la densidad básica se realizó relacionando los valores del peso anhidro y el volumen verde de las probetas de acuerdo con lo establecido en la norma DIN 52182.

5.4 Composición química

Los análisis químicos se realizaron a partir de rodajas de 10 cm de espesor de las cuales se separó la corteza, albura y duramen, se astillaron con formón y martillo. Las astillas se secaron a ambiente y se molieron en un molino marca MICRON® MK-20, de acuerdo con la norma T 257 om-85 (TAPPI, 2000), se tamizaron con tamices Mont inox. Los análisis químicos se utilizaron únicamente con la harina que pasó por la malla 40 (abertura de 420 μm de diámetro) recolectándose la fracción que pasó por ella. La harina fue almacenada en

envases pet debidamente cerrados para evitar cualquier tipo de contaminación y absorción de humedad. Cada una de las determinaciones se realizó por triplicado (Figura 3).

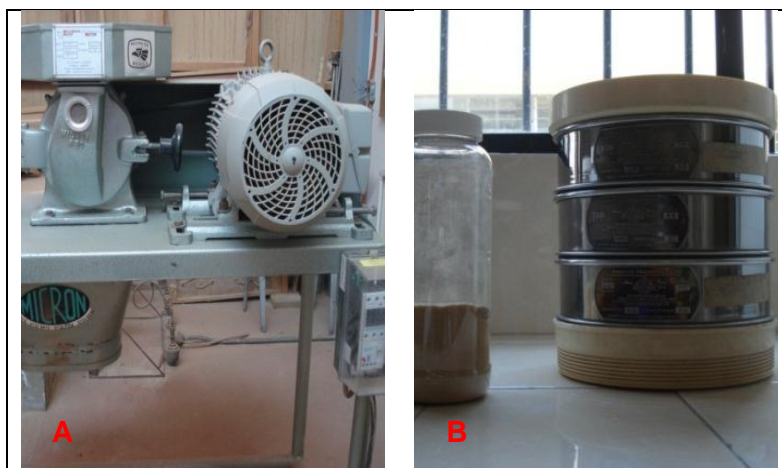


Figura 3. Molino (A) y tamices utilizados para obtener la harina a tamaño de partícula malla 40 (B)

Antes de iniciar la caracterización química se determinó la humedad de las harinas (%), según el método de deshidratación a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ y con apego a la norma T 264 cm-97 (TAPPI, 2000). La humedad de las harinas sirvió para presentar los resultados de los análisis químicos con base a su peso seco. El material empleado para determinar la humedad no fue utilizado para realizar los análisis químicos.

5.4.1 pH y solubilidad a la sosa

La determinación de pH se realizó utilizando el potenciómetro Accumet® por inmersión del electrodo en las muestras de harina en agua destilada según la metodología de Sandermann y Rothkamm (1959). La determinación de contenido de sustancias solubles a la sosa (%) se realizó con apego a la norma T 212 om-98 (TAPPI 2000), adicionando NaOH al 1% y ácido acético al 10%.

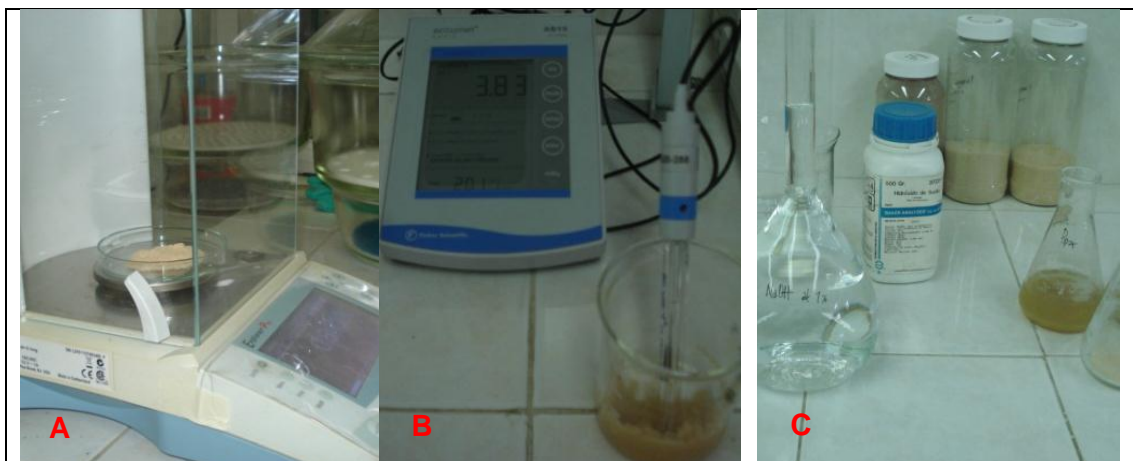


Figura 4. Obtención de peso para determinar la humedad (A), potenciómetro para obtener valor de pH (B), proceso para determinar solubilidad a la sosa (C)

5.4.2 Contenido de cenizas y microanálisis de cenizas

La determinación del contenido de cenizas (%) se llevó a cabo por método gravimétrico el cual consistió en quemar muestra de madera dentro de crisoles de níquel en placas de calentamiento y posteriormente en una mufla a 525 ± 25 °C durante un periodo de 4 horas, de acuerdo con la norma UNE-EN 14775 (2010). El microanálisis de las cenizas obtenidas se realizó mediante energía dispersiva de rayos-x, acoplado a un microscopio electrónico de barrido marca JEOL JSM 6400 (Ivaska y Harju, 1999).



Figura 5. Harina de madera en crisoles de níquel sobre placa de calentamiento (A), crisoles dentro de mufla para obtención de cenizas (B) y microscopio de barrido para microanálisis de cenizas (C).

5.4.3 Extractos, lignina, holocelulosa y alfa-celulosa

La obtención de extractos (%) a partir de harina de corteza, albura y duramen, tamizada a malla 40 se realizó pesando la harina en un dedal de extracción y colocándolo en un extractor Soxhlet con solventes de polaridad creciente: ciclohexano, acetona, metanol y agua caliente bajo reflujo durante un tiempo de extracción de 6 horas en todos los casos. Los solventes fueron destilados a vacío en un rotavapor y los extractos acuosos fueron pesados (Holmbom, 1999). La harina libre de extractos utilizó para el análisis de holocelulosa y lignina.



Figura 6. Extracción de corteza, duramen y albura en equipo Soxhlet (A), destilación de solventes en rotavapor (B) y extractos en matraces dentro del desecador para obtención de extractos (C).

Para determinar el contenido de lignina (%) se utilizó la técnica Runkel y Wilke (1951), la cual consiste en agregar a la muestra ácido sulfúrico al 72% y ácido bromhídrico al 40%. La determinación de holocelulosa (%) se llevó a cabo de acuerdo con el método Wise 1946, in: Sanjuán (1991), añadiendo a la harina libre de extractos clorito de sodio y ácido acético. El contenido de alfa-celulosa (%) se obtuvo siguiendo la norma ASTM D 1103-60 (1977), tratando la harina base seca de holocelulosa con hidróxido de sodio (17.5%) y luego con ácido acético al 10%.



Figura 7. Lignina en papel filtro (A), proceso de obtención de holocelulosa (B) y filtrado al vacío de alfa-celulosa (C).

5.5. Poder calorífico

El poder calorífico superior ($J\ g^{-1}$) se determinó en pastillas compactadas a partir de harina de corteza, duramen y albura, en base a la técnica T Parr 1341 ns-78 (TAPPI, 2000), con la bomba calorimétrica de oxígeno marca Parr 6772 Calorimetric Thermometer (Laboratorio de Ing. Ambiental, Universidad Michoacana).

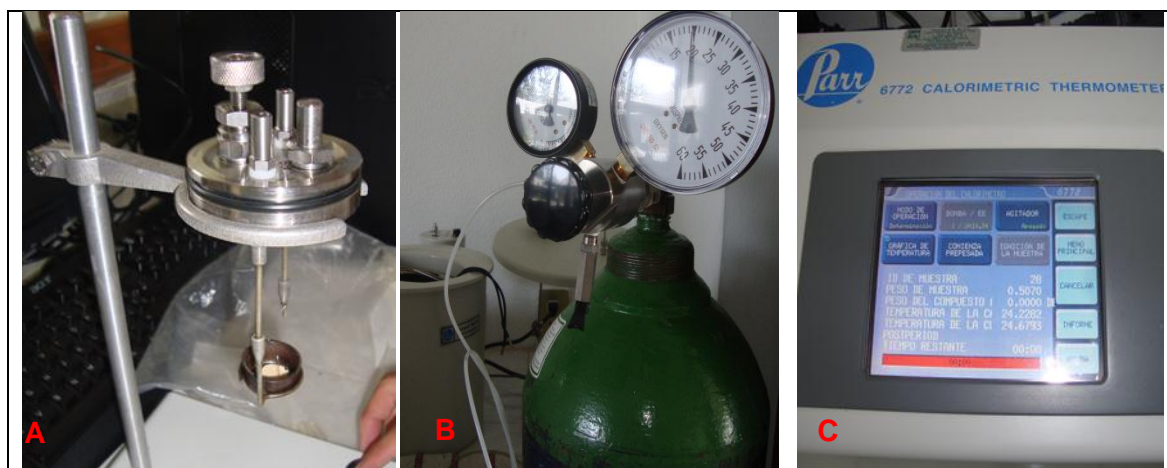


Figura 8. Pastilla en la bomba de oxígeno (A), tanque de oxígeno (B) y calorímetro termómetro digital (C).

5.6 Análisis estadístico

Con el fin de determinar si existen diferencias entre cada una de las variables evaluadas, se realizó un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias múltiples mediante el método de tukey ($p \leq 0.05$). Los análisis tomaron como criterio las especies y estructuras. Así mismo, se realizó un análisis de correlación múltiple por el método de Pearson con el fin de determinar la relación entre cada una de las variables con su capacidad calorífica. Ambos análisis se llevaron a cabo utilizando el paquete estadístico SAS versión 9.3. Finalmente se realizó un análisis de regresión y correlación mediante el programa Sigma plot (versión 10.0), obteniéndose además su estadística básica.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Propiedades físicas

6.1.1 Contenido de humedad

Los resultados de contenido de humedad de las especies colectadas del bosque en el mes de septiembre (Figura 9), indican que en iguales condiciones de humedad en el medio durante la época de aprovechamiento forestal, *P. montezumae* y *A. religiosa* no presentaron diferencia estadística significativa entre la albura y el duramen, con porcentaje mayor en ambos casos para el duramen. En tanto que *P. pseudostrobus* y *P. leiophylla*, la albura y duramen presentan contenidos de humedad estadísticamente diferente, con porcentajes más altos en la albura.

Los resultados de la prueba de comparación de medias del contenido de humedad entre especies indican una diferencia estadística significativa de *A. religiosa* con respecto a *P. montezumae* y una diferencia estadística de ambos respecto a *P. leiophylla* y *P. pseudostrobus* (Cuadro 4). Se ha encontrado que las maderas livianas por ser más porosas contienen una mayor cantidad de agua que las maderas pesadas y la albura, por estar conformada por células cuya función es la conducción de agua, presenta un contenido de humedad mayor que el duramen. La albura puede aumentar más del 100% de su masa en agua y hasta 400% en maderas livianas, la madera de pino (*Pinus* spp.) puede contener alrededor de 150% referido a su peso seco. En general, en las coníferas ocurre que el contenido de humedad de la albura es mayor que la del duramen (Frühwald, 1986; Harris y Cown, 1991) lo que coincide con los valores encontrados en *P. leiophylla* y *P. pseudostrobus*, lo que puede ser atribuido que en las traqueidas del duramen existen resinas que bloquean la conducción del agua, ocasionando una reducción en la permeabilidad de la madera, por lo que éste no presenta grandes contenidos de humedad (Wilson y White, 1989). Por el contrario, en *P. montezumae* y *A. religiosa* no se encontró el mismo comportamiento.

Existe una gran diferencia entre la cantidad de agua contenida en el árbol en pie en diferentes estaciones del año, así como, la cantidad de humedad que debe poseer la madera

para su correcto uso. La cantidad de agua presente en la madera afecta significativamente su propiedad calorífica, ya que se requiere de energía para disminuir el contenido de humedad y acondicionarla para que funcione como combustible. El resultado de contenido de humedad se encontró en un rango de 46 a 148 %, este es un parámetro muy importante y por lo tanto es indispensable conocerlo, el contenido de humedad máximo que puede tener la madera para quemar es de alrededor de 65 a 70% en base húmeda y alrededor de 10% en el proceso de transformación de biocombustibles sólidos (Cunha *et al.*, 1989; Jara, 1989).

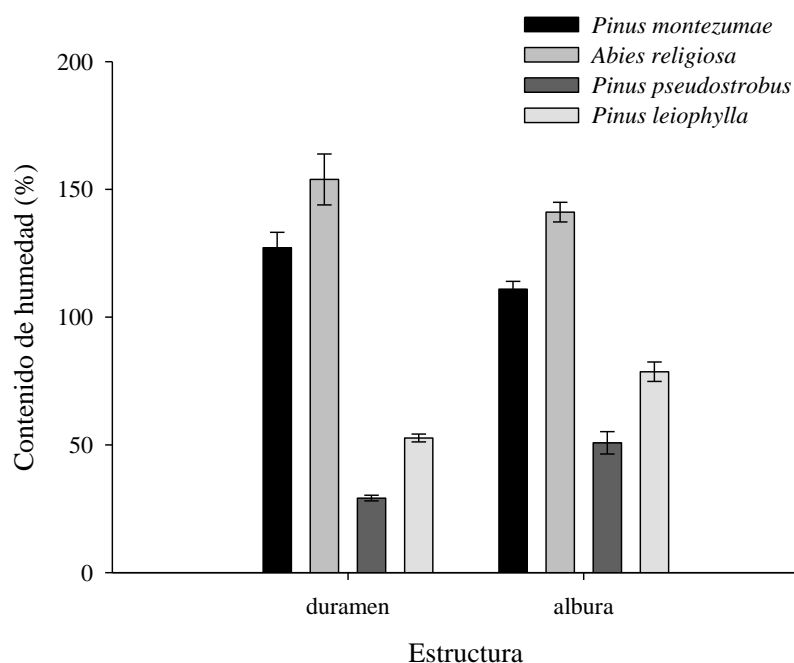


Figura 9. Contenido de humedad (%) en albur y duramen por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones \pm 1 error estándar.

Cuadro 4. Valores medios de contenido de humedad (%) en albur y duramen por especie.

	<i>P.</i> <i>montezumae</i>	<i>A.</i> <i>religiosa</i>	<i>P.</i> <i>pseudostrabus</i>	<i>P.</i> <i>leiophylla</i>
Albur	86 ^z a	141 a	62 a	74 a
Duramen	118 a	153 a	29 b	53 b
Promedio	102 ^y b	148 a	46 c	63 c
C.V. (%)	25.97	12.53	31.99	15.95

^zletras iguales en el sentido de las columnas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

^yletras iguales en el sentido de las filas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

6.1.2 Densidad básica

A excepción de *A. religiosa* se presentaron diferencias estadísticas entre los valores de densidad básica de albura y duramen para todas las especies. La albura presentó valores promedio mayores (Figura 10). La comparación de la densidad básica entre especies presentó diferencias estadísticas, excepto para *A. religiosa* y *P. leiophylla*, siendo *P. montezumae* la especie que presentó un valor promedio mayor de 0.450 g cm^{-3} , similar al obtenido por Díaz (2004) de 0.460 g cm^{-3} para esta misma especie. Los valores promedio de densidad en este estudio permiten clasificar las maderas como maderas de “densidades bajas a medias” ($0.270\text{-}0.560 \text{ g cm}^{-3}$) (Echenique y Díaz, 1972). Los valores de densidad básica para las especies de este estudio son similares a los reportados por Fuentes (1998) para las mismas especies.

La densidad básica es el indicador más usado para determinar el rendimiento y la calidad de la madera (Dickson y Walter, 1997), se considera la característica que mayor información aporta sobre la calidad de la madera, ya que existe una buena relación entre ella y la mayoría de las características físico-mecánicas (Gutiérrez y Plaza, 1967). Por otro lado, la densidad es una propiedad que muestra una amplia variación entre y dentro de las especies (Zobel y Van Buijtenen, 1989), es resultado del tamaño de los vasos y de la cantidad de los mismos, del espesor de la pared celular, del diámetro de las fibras y de la composición química de la madera, de tal forma que dos maderas con densidades similares pueden ser muy distintas en cuanto a las características anteriores. La densidad de la madera puede variar considerablemente a lo largo del radio, esto es, de la médula a la corteza (Brown *et al.*, 1952). De acuerdo con Panshin y De Zeeuw (1980), la densidad básica varía en este sentido, aumentando de la médula a la corteza. Pearson y Gilmore (1980) encontraron en *Pinus taeda* que la densidad básica aumenta de la médula a la corteza tanto en madera juvenil como en madera madura. Goche *et al.*, (2000) encontraron que la variación transversal de la densidad básica de *Abies religiosa* aumenta en dirección de la médula hacia la periferia del árbol lo que coincide con este estudio al obtener valores medios menores en el duramen y mayores en la albura de las 4 especies.

La densidad de la madera es un aspecto importante a considerar durante el proceso de combustión (Coronel, 1994). El uso de maderas con densidades bajas para la producción directa de energía en forma de calor implica una quema rápida y una menor producción de energía por unidad de volumen, a diferencia de maderas con densidades altas. Sin embargo, densidades muy altas implican dificultad para iniciar la combustión del material (Teixeira *et al.*, 2002). Según Cunha *et al.*, (1989) no hay una correlación entre densidad básica y el poder calorífico. Sin embargo, en relación al volumen de madera que se quemará la densidad se relaciona positivamente con el contenido calórico de la madera.

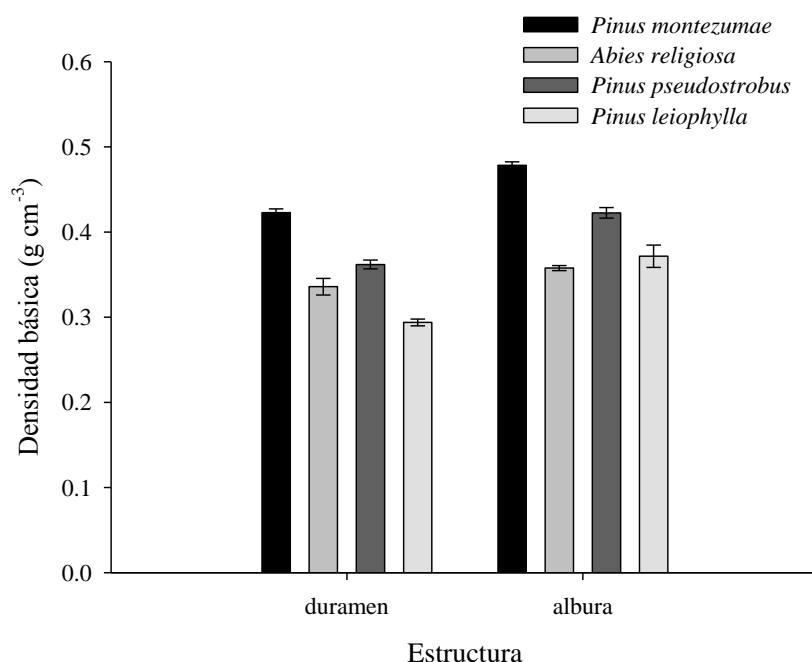


Figura 10. Densidad básica (g cm^{-3}) en albura y duramen por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones ± 1 error estándar.

Cuadro 5. Valores medios de densidad básica (g cm^{-3}) en albura y duramen por especie.

	<i>P.</i> <i>montezumae</i>	<i>A.</i> <i>religiosa</i>	<i>P.</i> <i>pseudostrobus</i>	<i>P.</i> <i>leiophylla</i>
Albura	0.478 ^z a	0.357 a	0.422 a	0.371 b
Duramen	0.422 b	0.335 a	0.362 b	0.294 a
Promedio	0.450 ^y a	0.346 c	0.392 b	0.332 c
C.V. (%)	2.32	5.04	3.52	7.12

^zletras iguales en el sentido de las columnas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

^yletras iguales en el sentido de las filas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

6.2 Composición química

6.2.1 Valores de pH

Los valores medios de pH (Cuadro 6) presentan una tendencia a ser más ácidos en todas las especies de pinos comparadas con el valor promedio en *A. religiosa*. Se presentó una diferencia estadística significativa de todas las especies de pinos comparadas con el valor promedio de pH de 5.93 en *A. religiosa*, siendo no significativa su diferencia entre ellas. Esta diferencia puede ser atribuida a una mayor cantidad de ácido acético, compuesto de acilo y la interacción entre ellos, como se ha demostrado en algunas especies de latifoliadas (Fengel y Wegener 1989; Volz, 1971). Respecto a diferencias entre valores promedio de pH entre estructuras en todas las especies se presenta una tendencia a presentarse valores más ácidos en la corteza respecto a la madera. *P. montezumae* y *P. pseudostrobus* presentaron valores medios de pH ácidos significativamente diferentes para duramen y albura, con valores de 4.81 y 4.94, respectivamente. Es decir una tendencia a ser más ácidos en el interior del fuste, lo que coincide con lo encontrado en latifoliadas por McNamara *et al.*, (1970). *P. leiophylla* no presentó diferencias estadísticas significativas entre estructuras. En forma contraria, *A. religiosa* presentó un pH más ácido (6.01) en la albura respecto a 6.65 encontrado en el duramen. En general, el pH de la corteza es más ácido que la madera (duramen y albura), debido al alto contenido de material inorgánico en la corteza comparado con la madera. Martin y Gray (1971) reportaron valores de pH de pinos del sur de Estados Unidos de 3.1 a 3.8 con un promedio de 3.4 a 3.5 comparado con el pH de 4.4 a 4.6 en albura.

El valor pH es una característica que tiene influencia en el uso de la madera, como en la corrosión de metales en contacto con ella, en la fijación de determinados preservantes químicos, entre otros. 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).

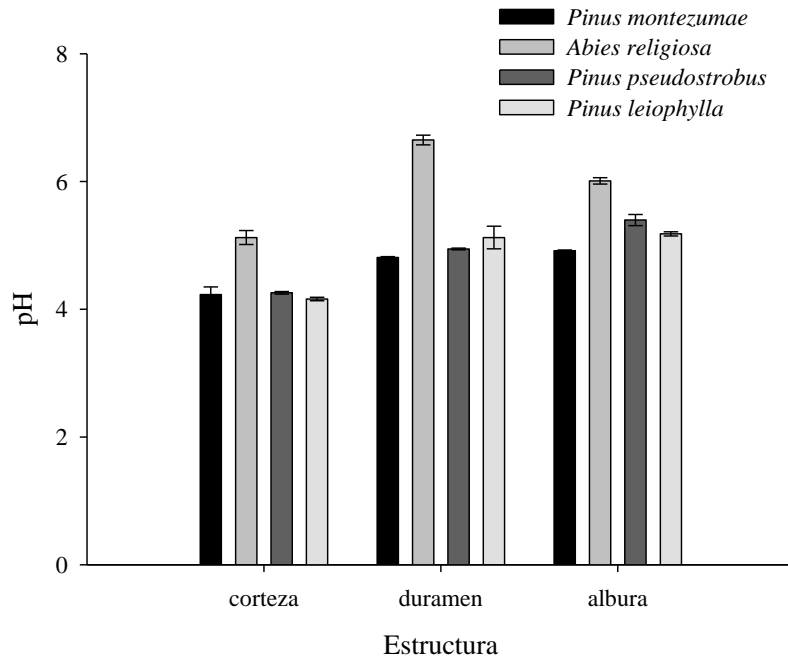


Figura 11. pH en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones \pm 1 error estándar.

Cuadro 6. Valores medios de pH (%) en corteza, duramen y albura por especie.

	<i>P.</i> <i>montezumae</i>	<i>A.</i> <i>religiosa</i>	<i>P.</i> <i>pseudostrobus</i>	<i>P.</i> <i>leiophylla</i>
Corteza	4.23 ^z a	5.12 c	4.26 c	4.16 b
Duramen	4.81 a	6.65 a	4.94 b	5.12 a
Albura	4.92 b	6.01 b	5.40 a	5.18 a
Promedio	4.65 ^y b	5.93 a	4.87 b	4.82 b
C.V. (%)	2.62	2.39	1.85	3.78

^zletras iguales en el sentido de las columnas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

^yletras iguales en el sentido de las filas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

6.2.2 Contenido de sustancias solubles en NaOH al 1 %

A excepción de *P. pseudostrobus*, se presentaron diferencias estadísticas significativas entre el contenido medio de sustancias solubles en NaOH al 1 % en la corteza respecto a la madera la albura y duramen (Cuadro 7). Sin embargo, no se observa diferencia estadística significativa entre albura y duramen para *P. montezumae*, *A. religiosa* y *P. leiophylla*; presentando *P. pseudostrobus* un valor de sustancias solubles en NaOH al 1 % en el duramen diferente a la albura. Finalmente, los valores promedio de sustancias solubles en

NaOH al 1 % por especie no presentaron diferencias estadísticas significativas comparando las 4 especies estudiadas.

Los valores de solubles en NaOH al 1 % (4.50 a 5.59 %) encontrados en el presente estudio son bajos, según la norma utilizada TAPPI (2000), se encuentran entre 10 y 17 %. Valores dentro del rango, se relacionan con la presencia de carbohidratos de bajo peso molecular, principalmente hemicelulosas, tejido parenquimático y celulosa degradada, por tanto, se considera que para la corteza y madera analizadas en el presente estudio, presentaron bajo contenido de los componentes señalados anteriormente.

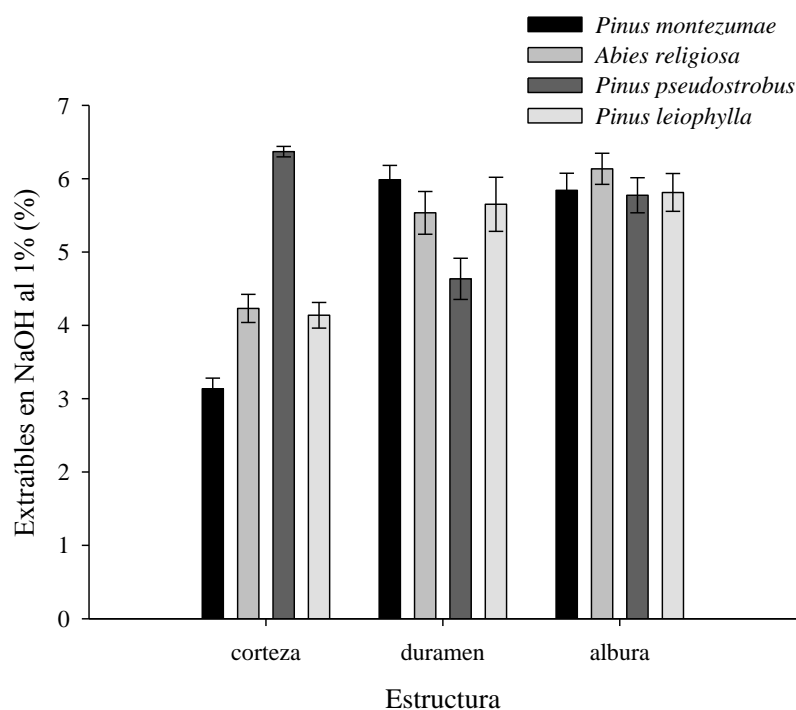


Figura 12. Contenido de sustancias solubles en NaOH al 1 % en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones ± 1 error estándar.

Cuadro 7. Valores medios de sustancias solubles en NaOH al 1 % base seca en corteza, duramen y albura por especie.

	<i>P.</i> <i>montezumae</i>	<i>A.</i> <i>religiosa</i>	<i>P.</i> <i>pseudostrobus</i>	<i>P.</i> <i>leiophylla</i>
Corteza	3.14 ^z b	4.23 b	6.37 a	4.14 b
Duramen	5.98 a	5.54 a	4.63 b	5.65 a
Albura	5.84 a	6.14 a	5.77 a	5.81 a
Promedio	4.50 ^y a	5.30 a	5.59 a	5.20 a
C.V. (%)	6.78	7.70	6.67	9.29

^zletras iguales en el sentido de las columnas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

^yletras iguales en el sentido de las filas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

6.2.3 Contenido de cenizas

Los mayores porcentajes de cenizas se presentaron en la corteza (Figura 13). El contenido de cenizas no presentó una tendencia en función de la estructura, en *A. religiosa* y *P. leiophylla*, el duramen presentó los valores más altos, estadísticamente diferentes respecto a los contenidos promedio en la albura. Por el contrario para *P. montezumae* y *P. pseudostrobus* los porcentajes mayores se encontraron en la albura, siendo solo significativos en *P. montezumae* con un promedio de 0.25 % respecto a 0.15 % en duramen. Cuando se comparan los valores de cenizas entre las especies se observa que *A. religiosa* presentó un valor de 1.14% significativamente diferente a todas las especies, las cuales no presentaron diferencias estadísticas entre ellas.

Mientras que el contenido de cenizas en la corteza se sitúa entre el 5 y 10 %, las cenizas obtenidas tras la combustión de la madera presentan valores medios referidos a su peso seco alrededor del 1 % (García *et al.*, 2003). La cantidad de cenizas varía con las especies y dentro de la misma especie, la estación, condiciones del clima, influyen tanto en cantidad como en la composición de las cenizas. La albura es normalmente más rica en ceniza que el duramen, pero más elevada para las cortezas (Kollmann, 1959). Los valores obtenidos estuvieron dentro del intervalo (0.1-1.0%) reportado para algunas maderas blandas (Fengel y Wegener, 1989).

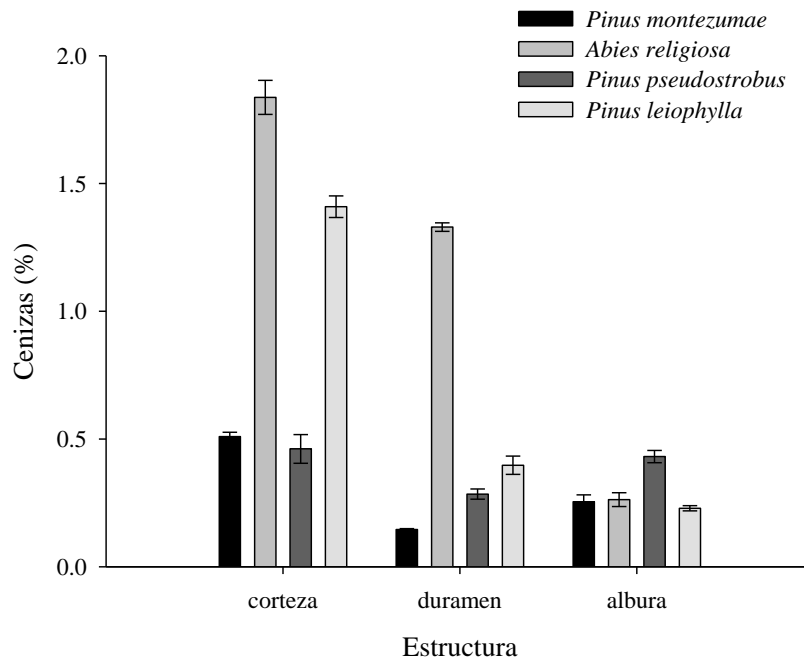


Figura 13. Contenido de cenizas en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones \pm 1 error estándar.

Cuadro 8. Valores medios del contenido de cenizas (%) en corteza, duramen y albura por especie.

	<i>P.</i> <i>montezumae</i>	<i>A.</i> <i>religiosa</i>	<i>P.</i> <i>pseudostrobus</i>	<i>P.</i> <i>leiophylla</i>
Corteza	0.51 ^z a	1.84 a	0.46 a	1.41 a
Duramen	0.15 c	1.33 b	0.28 b	0.39 b
Albura	0.25 b	0.26 c	0.43 ab	0.23 c
Promedio	0.30 ^y b	1.14 a	0.39 b	0.68 b
C.V. (%)	10.50	6.46	16.37	8.23

^zletras iguales en el sentido de las columnas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

^yletras iguales en el sentido de las filas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

6.2.4 Contenido de minerales

Los elementos detectados por espectroscopía de rayos-x en corteza, duramen y albura de las especies fueron: magnesio, calcio, potasio, fosforo, aluminio, silicio, azufre y sodio. Según se muestra en el cuadro 9, los elementos encontrados en mayor proporción fueron, potasio, calcio y magnesio, principales componentes de las sustancias inorgánicas de la madera, encontradas hasta en un 80 % en las cenizas de madera. Estos elementos pueden existir en

la madera como oxalatos, carbonatos y sulfatos (Hon y Shiraishi, 1991). Young y Guinn (1966) determinaron la distribución de 12 elementos inorgánicos en varias partes del árbol (raíz, corteza, madera y hojas) y concluyeron que el contenido inorgánico total y la concentración de cada elemento variaron extensamente dentro y entre especies. El contenido inorgánico varía dependiendo de las condiciones ambientales en que se desarrolla el árbol.

Los mayores valores promedio para todos los minerales se presentaron en *P. montezumae* y en la corteza de *A. religiosa*, en *P. pseudostrobus* en el duramen y en la corteza y, albura para *P. leiophylla*. Los mayores contenidos de Mg y P se presentaron en *P. leiophylla*, con valores de 14.03 y 6.15 %, respectivamente. La mayoría de los elementos encontrados son los mismos que mediante la misma técnica, Rutiaga (2001) encontró en duramen y albura de *P. pseudostrobus*.

La variación en contenido de Ca, Mg y Mn en madera y corteza de varias especies de pinos fue estudiada por Fossum *et al.* (1972). Excepto para el cambium, encontraron una disminución del contenido de Mg y Mn y un incremento del contenido de Ca de la madera hacia la corteza. Los compuestos minerales están distribuidos en todas las paredes celulares. El alto contenido de Ca es causado por la presencia de cristales de oxalato de calcio encontrados principalmente en células de parénquima axial y radial (Chattaway 1956; Carlquist, 2001).

En general, la corteza contiene mayores contenidos de inorgánicos que la madera. El contenido de inorgánicos puede ser tan alto como 13 % (Young, 1971; Choong *et al.* 1976). Los mayores elementos inorgánicos encontrados en la corteza son Na, K, Mg, Mg, Zn y P (Choong *et al.*, 1976) y hay más Na, K, Mg, Mn Zn y P en la albura que en la corteza y más Ca en la corteza que en la albura.

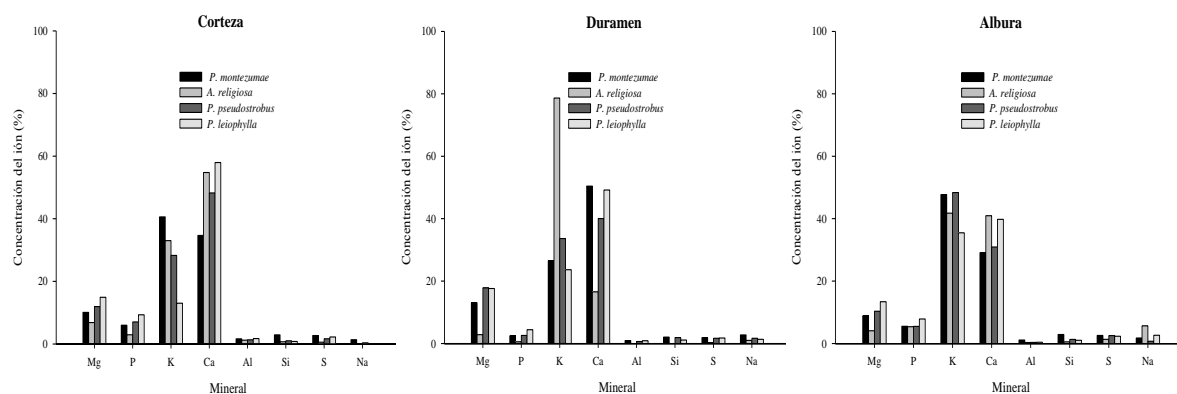


Figura 14. Contenido de minerales (%) en corteza, albura y duramen de las especies.

Cuadro 9. Valores medios de contenido de minerales (%) en corteza, albura y duramen por especie.

Especie	Estructura	Mg	P	K	Ca	Al	Si	S	Na
<i>P. montezumae</i>	Corteza	10.08 ^z b	6.01 a	40.61 b	34.66 b	1.66 a	2.91 a	2.69 a	1.36 b
	Duramen	13.04 a	2.44 c	26.51 c	50.42 a	0.94 a	2.04 a	1.88 b	2.76 a
	Albura	8.84 c	5.53 b	47.72 a	29.12 c	1.11 a	2.90 a	2.59 a	1.75 ab
	Promedio C.V. (%)	10.66 3.88	4.66 3.69	38.28 4.55	38.07 3.38	1.25 20.33	2.62 24.85	2.39 8.91	1.94 20.64
<i>A. religiosa</i>	Corteza	6.85 a	2.94 ab	33.00 c	54.78 a	1.24 a	0.71 a	0.58 b	-
	Duramen	2.84 b	0.54 b	78.66 a	16.55 c	0.10 b	-	0.31 b	1.0 b
	Albura	4.09 b	5.37 a	41.76 b	40.94 b	0.33 b	0.51 a	1.34 a	5.65 a
	Promedio C.V. (%)	4.60 21.13	2.95 35.10	51.14 2.39	37.42 5.12	0.55 41.78	0.61 41.49	0.75 27.58	3.33 28.00
<i>P. pseudostrobus</i>	Corteza	11.96 b	7.04 a	28.29 c	48.25 a	1.33 a	1.04 b	1.68 b	0.39 b
	Duramen	17.82 a	2.59 c	33.63 b	40.05 b	0.63 b	1.91 a	1.69 b	1.68 a
	Albura	10.34 c	5.49 b	48.35 a	30.93 c	0.35 b	1.30 ab	2.53 a	0.72 b
	Promedio C.V. (%)	13.37 4.21	5.04 10.38	36.76 1.54	39.74 2.43	0.77 25.95	1.41 19.45	1.97 8.34	0.93 24.04
<i>P. leiophylla</i>	Corteza	14.92 ^{ab}	9.32 a	13.02 b	57.96 a	1.74 a	0.81 ^a	2.23 a	-
	Duramen	17.63 a	4.43 b	23.63 b	49.17 b	0.91 b	1.11 a	1.77 a	1.34 a
	Albura	13.38 b	7.87 ab	35.47 a	39.79 c	0.42 b	1.04 ^a	2.34 a	2.63 a
	Promedio C.V. (%)	24.04 19.40	7.20 20.37	24.04 19.39	48.97 1.45	1.02 25.23	0.98 44.00	2.11 27.21	1.99 81.95

^zletras iguales en el sentido de las columnas indican igualdad estadística ($p < 0.05$)

6.2.5 Contenido de extractos totales

El contenido de extractos totales de la corteza presentó mayores valores respecto a la albura y el duramen para todas las especies a excepción de *P. pseudostrobus*, el cual no presentó diferencia estadística significativa en la corteza y el duramen. Así mismo, los resultados (Cuadro 10), indican que el duramen contiene, en general, mayor porcentaje de componentes extraíbles que la albura. Esta condición se presenta en general en otras maderas, aunque no siempre es el caso, ya que se ha encontrado que *Quercus laurina* contiene mayor cantidad de extraíbles en la albura en comparación con el duramen (Rutiaga *et al.*, 1999).

Los valores promedio de contenido de extractos totales no mostraron diferencias estadísticas entre especies, los valores mostraron un rango de 11.17 a 17.60 %. Estos valores son comunes en coníferas por la exudación de material resinoso, el contenido es mayor en el duramen que en la albura (Uprichard, 1991). La corteza, al igual que la madera está formada por los componentes típicos de la pared celular, celulosa, lignina y por sustancias extraíbles, que se forman a partir del metabolismo secundario de las plantas y que contienen compuestos variados como terpenos, grasas, ceras, fenoles, azúcares, entre otros, por lo que la corteza se caracteriza por un alto contenido de extraíbles (Rydholm, 1965). Generalmente, la albura de maderas blandas contiene menor contenido de sustancias extraíbles que el duramen (Fengel y Wegener, 1989). Es importante considerar que la cantidad y composición de extractivos depende de la especie, parte del árbol, época del año, condiciones de crecimiento entre otros factores (Fonseca, 2006).

Cuadro 10. Extractos totales (%) base seca en corteza, duramen y albura por especie.

	<i>P.</i> <i>montezumae</i>	<i>A.</i> <i>religiosa</i>	<i>P.</i> <i>pseudostrobus</i>	<i>P.</i> <i>leiophylla</i>
Corteza	36.32 ^z a	15.33 a	15.39 a	33.73 a
Duramen	8.75 b	12.12 b	17.28 a	9.73 b
Albura	7.73 b	6.07 c	5.41 b	6.26 b
Promedio	17.60 ^y a	11.17 a	12.70 a	16.57 a
C.V. (%)	6.34	3.90	6.90	26.76

^zletras iguales en el sentido de las columnas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

^yletras iguales en el sentido de las filas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

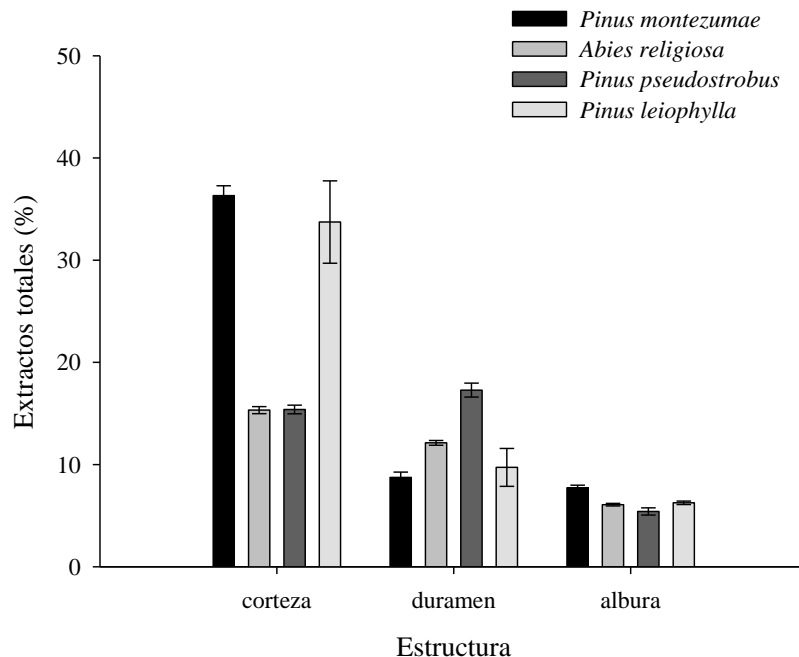


Figura 15. Extractos totales en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones \pm 1 error estándar.

6.2.6 Contenido de lignina

El contenido de lignina muestra sus mayores valores en la corteza de las cuatro especies con diferencias estadísticas significativas respecto al duramen y albura. El mayor valor lo presenta la corteza de *P. leiophylla*. El contenido medio de lignina entre especies varió entre 32.46 y 41.56 % correspondiendo estos valores a *A. religiosa* y *P. leiophylla* respectivamente. El elevado porcentaje de lignina obtenido en *P. leiophylla* (41.56 %), fue debido al mayor contenido de lignina encontrado en la corteza de esta especie ya que como se muestra en el Cuadro 11, los valores en duramen y albura se encuentran dentro del rango promedio en madera de coníferas de 25 a 33% (Aitken *et al.*, 1998). Pino y Maximino (2000) encontraron un contenido de lignina alto de 32% en madera de *Taxodium distichum* frente a valores promedios de 28 a 29 % encontrados en *Pinus elliotii* y *Pinus taeda* (Núñez y Felissia, 1988).

En general la madera contiene entre 20 y 30 % de lignina la cual forma parte de la pared celular y de la lámina media de las fibras de madera, es un polímero no tóxico compuesto

de unidades de fenil propano como guayacil con enlaces carboxilos e hidroxilos presentándose en las maderas de las coníferas. Según la literatura, los valores en el contenido de lignina pueden variar dependiendo del método de extracción (Kurth y Smith, 1954, Higuchi *et al.*, 1967). Se considera que valores altos en los materiales combustibles incrementa la calidad como combustible, el valor calorífico reportado de la lignina es de 26,000 a 27,000 J g⁻¹ (Francescato *et al.*, 2008). La corteza contiene altos contenidos de taninos condensados e hidrolizables y suberina insoluble en ácido sulfúrico, lo que puede dar un falso valor en el contenido de lignina. Se ha encontrado 46% de lignina Klason en la corteza de *Pinus taeda* incluyendo taninos condensados y solo un 20.4 % cuando la corteza es extraída con álcali (McGinnis y Parikh, 1975). Se han encontrado también más unidades de p-hidroxifenol en la corteza de coníferas comparadas con la madera de las mismas especies (Andersson *et al.*, 1973). Según Sjöström (1993), Zobel y Van Buijtenen (1989), la madera joven tiene mayores cantidades de lignina, en comparación con la madera adulta. Schroeder (1972) comparó los valores de contracciones y contenido de lignina entre angiospermas y gimnospermas considerando las maderas más abundantes en los Estados Unidos y encontró que a rangos semejantes de densidad relativa, las angiospermas se contraen aproximadamente un 20% más que las gimnospermas. También señala que las primeras contienen menos lignina que las gimnospermas.

Actualmente, la lignina constituye uno de los desperdicios industriales más grandes del mundo, cuando es desechada en la forma de derivados de lignina en el licor de sulfito empleado en el proceso industrial de transformación de madera en pasta. También se ha considerado responsable por la contaminación del agua, originada por descargar dicho desperdicio en ríos y lagos (Hon y Shiraishi, 1991). Este residuo es frecuentemente propuesto como combustible para la generación de calor mediante la determinación de las propiedades de combustión de residuos ricos en lignina por lo que residuos de corteza con altos contenidos de lignina puede ser utilizado para la generación de energía.

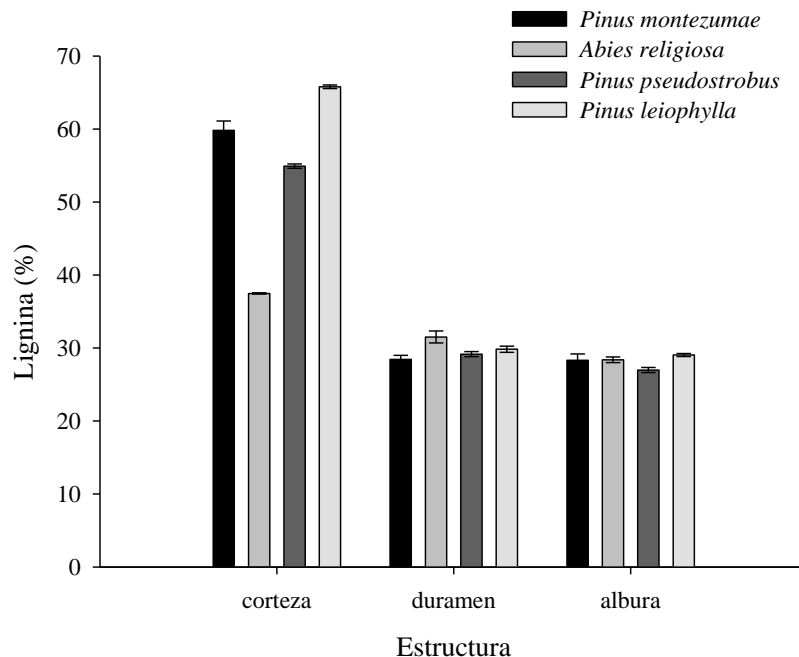


Figura 16. Contenido de lignina en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones \pm 1 error estándar.

Cuadro 11. Valores medios de lignina (%) base seca libre de extraíbles, en corteza, duramen y albura por especie.

	<i>P.</i> <i>montezumae</i>	<i>A.</i> <i>religiosa</i>	<i>P.</i> <i>pseudostrobus</i>	<i>P.</i> <i>leiophylla</i>
Corteza	59.81 ^z a	37.48 a	54.92 a	65.78 a
Duramen	28.44 b	31.51 b	29.16 b	29.84 b
Albura	28.33 b	28.39 c	26.98 c	29.05 b
Promedio	38.86 ^y ab	32.46 b	37.02 ab	41.56 a
C.V. (%)	4.24	2.81	1.55	1.29

^zletras iguales en el sentido de las columnas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

^yletras iguales en el sentido de las filas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

6.2.7 Contenido de holocelulosa

La holocelulosa representa la fracción total de polisacáridos, es decir celulosa más hemicelulosas. Las holocelulosas presentan valores elevados en albura y duramen de las cuatro especies (Cuadro 12). La característica fundamental de las holocelulosas investigadas fue la presencia de altos contenidos de celulosa, con diferencias estadísticas significativas entre secciones en la especie *P. montezumae*. Para las tres especies restantes hubo diferencias estadísticas entre la corteza con la albura y duramen. El contenido de holocelulosa en la madera abarca del 70 al 90 por ciento del total de las sustancias de la

pared celular libre de extractivos o material extraño. La presencia de holocelulosa es generalmente mucho más elevado en maderas duras que en maderas blandas. Es conocido que el contenido de polisacáridos en la corteza es bajo en relación a la madera (Fengel y Wegener, 1989), lo que refleja la variabilidad en la composición química en la madera. Diferencias entre duramen y albura fueron observadas, encontrando menor contenido de holocelulosa en duramen que en la albura, por Campbell *et al.* (1990); Mariana *et al.* (2005); Gao *et al.* (2011) en *Pinus contorta*, *Eucalyptus nitens* y *Cedrus deodara*, respectivamente.

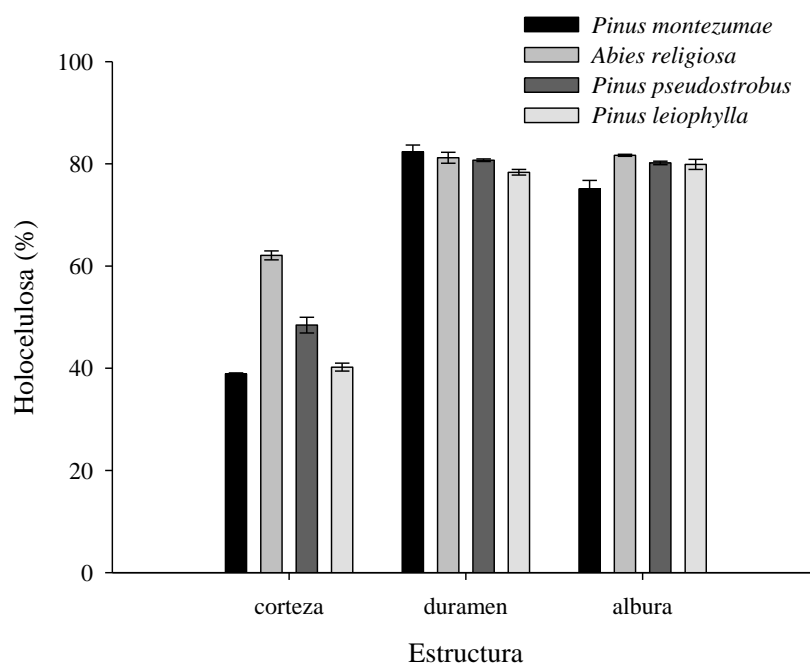


Figura 17. Contenido de holocelulosa en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones \pm 1 error estándar.

Cuadro 12. Contenido de holocelulosa (%) base seca libre de extraíbles, en corteza, duramen y albura por especie.

	<i>P.</i> <i>montezumae</i>	<i>A.</i> <i>religiosa</i>	<i>P.</i> <i>pseudostrobus</i>	<i>P.</i> <i>leiophylla</i>
Corteza	38.87 ^z c	62.08 b	48.44 b	40.21 b
Duramen	82.33 a	81.19 a	80.71 a	78.34 a
Albura	75.08 b	81.67 a	80.17 a	79.89 a
Promedio	65.43 ^y b	74.98 a	69.77 ab	66.15 b
C.V. (%)	3.30	1.86	2.27	2.07

^zletras iguales en el sentido de las columnas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

^yletras iguales en el sentido de las filas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

6.2.8 Contenido de alfa-celulosa

De acuerdo con el Cuadro 13, existen diferencias significativas en el contenido de alfa-celulosa entre secciones de las especies estudiadas. Valores menores fueron encontrados en las cortezas de las especies excepto la corteza de *A. religiosa* que presentó el mayor valor y el mayor valor promedio respecto a demás especies. En general, la alfa-celulosa indica contenido de celulosa no degradada, de mayor peso molecular. El contenido de alfa-celulosa de algunas maderas americanas, en base al procedimiento utilizado, se ha calculado entre 46 y 53 % por lo que los valores encontrados para las especies de este estudio son relativamente altos. Diferencias de contenido de alfa-celulosa entre albura y duramen de varias especies han sido reportadas por diversos investigadores quienes han encontrado menores contenidos en duramen que en la albura (Campbell *et al.* 1990; Mariana *et al.* 2005; Gao *et al.* 2011). En este caso, únicamente en *P. leiophylla* se encontró este comportamiento. En las demás especies no se encontraron diferencias estadísticas entre duramen y albura.

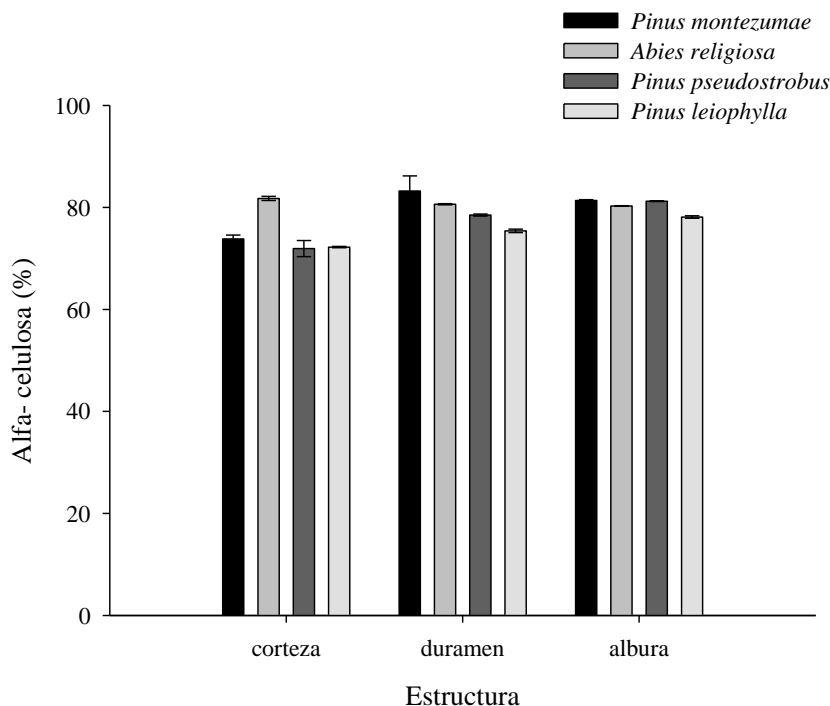


Figura 18. Contenido de alfa-celulosa (%) en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones ± 1 error estándar.

Cuadro 13. Contenido de alfa-celulosa (%) base seca de holocelulosa, en corteza, duramen y albura por especie.

	<i>P.</i> <i>montezumae</i>	<i>A.</i> <i>religiosa</i>	<i>P.</i> <i>pseudostrobus</i>	<i>P.</i> <i>leiophylla</i>
Corteza	73.82 ^z b	81.76 a	71.93 b	72.22 c
Duramen	83.22 a	80.62 b	78.52 a	75.40 b
Albura	81.35 ab	80.28 b	81.23 a	78.12 a
Promedio	79.46 ^y ab	80.88 a	77.22 bc	75.25 c
C.V. (%)	3.85	0.53	2.08	0.58

^zletras iguales en el sentido de las columnas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

^yletras iguales en el sentido de las filas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

6.3 Poder calorífico

El máximo poder calorífico lo presentó el duramen de *P. pseudostrobus* (Cuadro 14). Se encontraron diferencias estadísticas significativas entre corteza, duramen y albura. El menor valor de poder calorífico se presentó en la corteza de *A. religiosa*, esta misma especie mostró el menor valor promedio, siendo estadísticamente diferente a *P. montezumae*, *P. pseudostrobus* y *P. leiophylla*. Según la literatura, el poder calorífico esperado de la madera de pino oscila entre 11,000 y 16,000 J g⁻¹, el cual es superior en 2% con relación a las maderas latifoliadas. El poder calorífico presentado por las especies estudiadas cuyo el rango fue de 17,882 a 19,629 J g⁻¹ es similar al reportado para coníferas por Francescato *et al.* (2008). Este valor es interesante para el posible uso de los residuos de estas especies para la producción de energía. Por lo anterior, se observa que el calor de combustión de la madera y corteza de las especies es alto, ya que la leña presenta valores entre 10,032 y 15,048 J g⁻¹, según la dirección de Manejo y Abastecimiento Forestal.

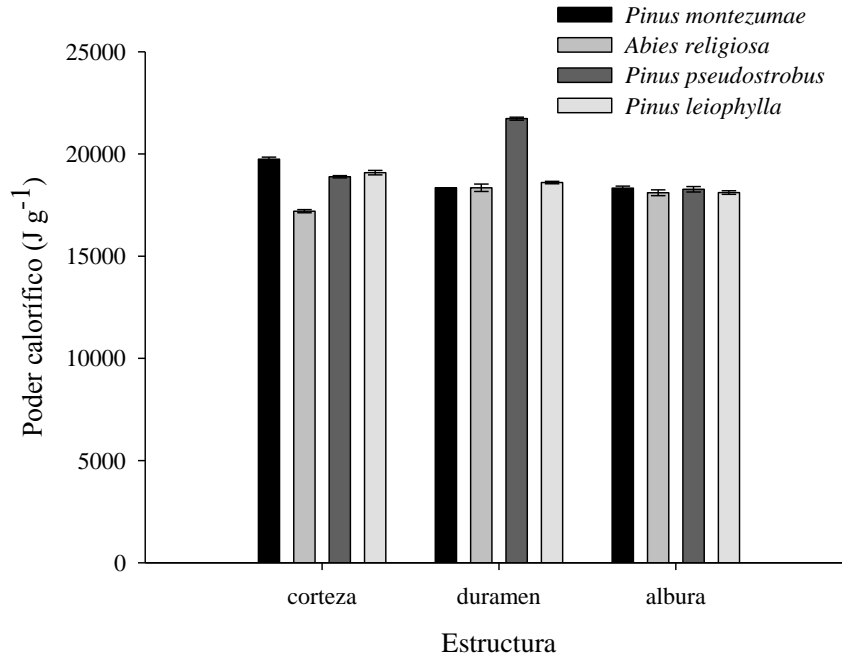


Figura 19. Poder calorífico en corteza, duramen y albura por especie. Cada barra representa el valor promedio de las observaciones \pm 1 error estándar.

Cuadro 14. Valores de poder calorífico ($J g^{-1}$) en corteza, duramen y albura por especie.

	<i>P.</i> <i>montezumae</i>	<i>A.</i> <i>religiosa</i>	<i>P.</i> <i>pseudostrabus</i>	<i>P.</i> <i>leiophylla</i>
Corteza	19,743 ^z a	17,200 b	18,888 b	19,086 a
Duramen	18,341 b	18,344 a	21,726 a	18,601 ab
Albura	18,331 b	18,103 a	18,273 c	18,110 b
Promedio	18,805 ^y ab	17,882 b	19,629 a	18,599 ab
C.V. (%)	0.60	1.10	0.68	0.68

^zletras iguales en el sentido de las columnas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

^yletras iguales en el sentido de las filas indican igualdad estadística ($p \leq 0.05$)

6.4 Análisis de regresión y correlación para poder calorífico y extractos totales entre especies

El análisis de correlación simple de Pearson mostró el menor número de correlaciones entre el poder calorífico y las variables evaluadas, y dentro de estas el porcentaje de extractos totales (%). El análisis de regresión, mostró una relación lineal entre el poder calorífico y el contenido de extractos totales (%) (Cuadro 15). Los valores de los coeficientes de

determinación para *Pinus montezumae* y para *Pinus leiophylla* fueron de $R^2=0.9921$ ($p<0.0001$) y de $R^2=0.6624$, ($p=0.0487$) respectivamente. En la Figura 20 se observan las curvas de regresión correspondientes.

Cuadro 15. Coeficiente de determinación y valores de p para la relación entre el poder calorífico y el contenido de extractos totales en las especies.

	R^2	Valor de p
<i>Pinus montezumae</i>	0.9921	$<0.0001^z$
<i>Abies religiosa</i>	0.3321	0.2287
<i>Pinus pseudostrobus</i>	0.5100	0.1119
<i>Pinus leiophylla</i>	0.6624	0.0487

^z $P \leq 0.05$

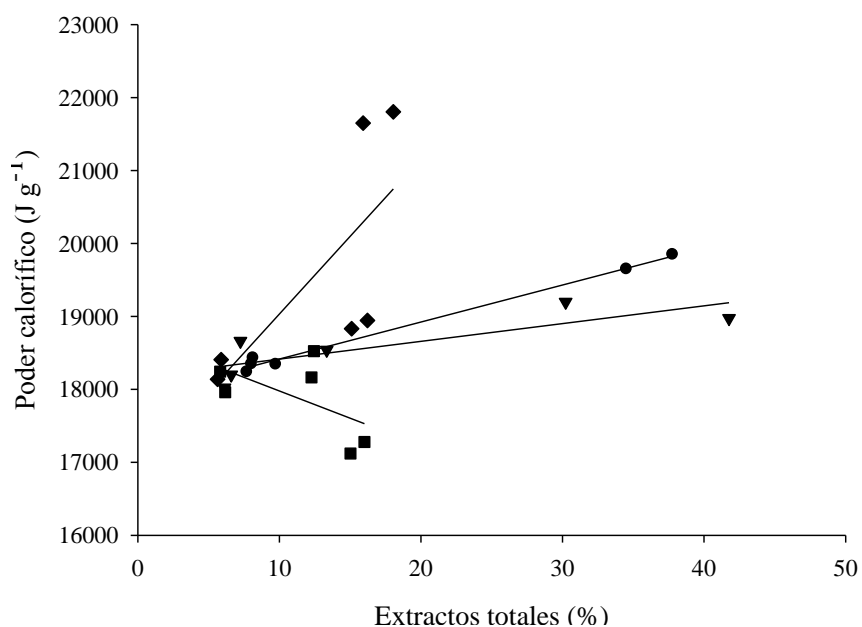


Figura 20. Relación entre poder calorífico ($J g^{-1}$) y extractos totales (%) para *Pinus montezumae* (●), *Abies religiosa* (■), *Pinus pseudostrobus* (◆), y *Pinus leiophylla* (▼).

De igual manera se realizó el análisis de regresión lineal para la relación entre todas las coníferas para poder calorífico y extractos totales (Figura 21), encontrándose un valor bajo de $R^2=0.1700$ y $p=0.0450$. El modelo para la relación entre ambas variables fue el siguiente:

$$PC = 18091.94 + 42.9619 ET$$

donde:

PC= Poder calorífico ($J g^{-1}$)

ET= Extractos totales (%)

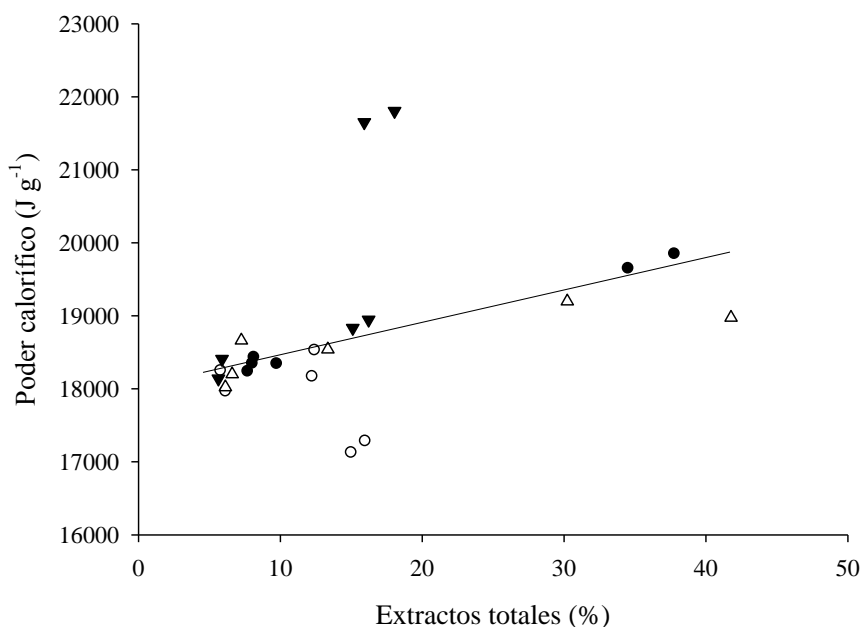


Figura 21. Valores de poder calorífico ($J g^{-1}$) contra contenido de extractos totales (%) en *Pinus montezumae* (●), *Abies religiosa* (○), *Pinus pseudostrobus* (▼), y *Pinus leiophylla* (Δ).

Cunha *et al.* (1989) y Jara (1989) afirman que el poder calorífico es influenciado por la composición química de la madera, principalmente por el contenido de lignina y extractivos. Cuando se comparan las maderas comúnmente utilizadas para la generación de energía y los valores obtenidos de extractivos de las especies analizadas en este estudio fueron mayores, lo que puede haber afectado el poder calorífico. El valor medio de poder calorífico de las cuatro especies estudiadas fue de $18,729 J g^{-1}$, valor próximo al encontrado por Quirino *et al.* (2005) en eucalipto, inferior a medio encontrado por Vale *et al.* (2002) en 47 especies tropicales brasileñas ($19,909 J g^{-1}$) y la obtenida por Castilho (1988) en 20 especies de la Amazonía peruana ($19,860 J g^{-1}$).

7. CONCLUSIONES

La calidad de la madera de las especies *Pinus montezumae*, *Abies religiosa*, *Pinus pseudostrabus* y *Pinus leiophylla* para ser usados como combustibles se considera adecuada. El contenido de humedad de la albura y duramen presentó valores de 46 a 148 %, los valores superiores al 60 % como los detectados en *Pinus montezumae* y *Abies religiosa* deberán ser reducidos por medio de pretratamientos de secado ya que reducen el potencial para la producción de energía al utilizar parte de ella para evaporar el exceso de humedad. Algunos ensayos con diferentes pre-tratamientos de secado que incluyan aspectos técnicos y económicos deberán ser realizados para ambas especies si se desea aumentar su poder calorífico vía reducción del contenido de humedad.

La densidad básica de las especies estudiadas se presentó dentro de los valores reportados para las coníferas, la cual es considerada de baja a media (densidad $< 0.5 \text{ g cm}^{-3}$). No se encontró relación entre densidad de la madera y el poder calorífico, por lo que se considera que el poder calorífico se encuentra relacionado con otros aspectos o en relación con múltiples aspectos que se encuentran interactuando.

En forma general, la corteza, albura y duramen de las especies presentan valores altos en el contenido de lignina y extractos totales, características indispensables de los buenos combustibles. La misma característica de un buen combustible se presenta cuando el material presenta bajos niveles en el contenido de cenizas, lo anterior permite considerar a la corteza y madera de las especies estudiadas con alto potencial para el uso energético.

Los valores de poder calorífico de las especies estudiadas son considerados adecuados para ser utilizadas con fines energéticos. En forma general, se puede concluir que la corteza, el duramen y la albura de las especies pueden ser utilizadas como fuente de energía al presentar un poder calorífico de 17,882 a 19,629 J g^{-1} .

8. RESUMEN

Uno de los principales obstáculos para la sostenibilidad de los bosques y las industrias forestales es el nivel de desechos producidos, situación que demanda una investigación aplicada sobre procesos de tratamiento de los residuos para su aprovechamiento óptimo, que generen a su vez beneficios sociales, económicos y ambientales. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el potencial energético en función de las propiedades físicas y la composición química de la corteza, duramen y albura de *Pinus montezumae* Lamb., *Abies religiosa* (Kunth) Schltdt. & Cham., *Pinus pseudostrobus* Lindl., y *Pinus leiophylla* Sch. et Cham., colectados en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Los análisis estadísticos consistieron en comparar los valores medios de cada variable entre las especies y dentro de cada especie y estructura, y establecer posibles correlaciones entre las variables y el poder calorífico. El contenido de humedad en todas las especies se encontró en un rango de 46 a 148 %. La densidad básica mostró diferencias estadísticas significativas entre albura y duramen de todas las especies con mayores valores en la albura a excepción de *A. religiosa*. El rango del pH para todas las especies fue de 5.18 a 6.01 mostrando mayor acidez la corteza. Los contenidos de sustancias solubles en NaOH al 1 % mostraron diferencias estadísticas significativas entre la corteza y madera a excepción de *P. pseudostrobus*. Los valores promedio de contenido de extractos totales no mostraron diferencias estadísticas entre especies, con un rango de 11.17 a 17.60 %. El contenido inorgánico referido al contenido de cenizas fue mayor en las cortezas, los elementos detectados por espectroscopía de rayos-x fueron Mg, Ca, K, P, Al, Si, S y Na. La lignina Runkel presentó los mayores valores en la corteza y valores cercanos entre albura y duramen. Las holocelulosas presentaron valores elevados en albura y duramen con un rango de 75 a 82 %. Valores menores de alfa-celulosa fueron encontrados en las cortezas de las especies excepto la corteza de *A. religiosa*. El poder calorífico se encontró en el rango de 17,882 a 19,629 J g⁻¹. El poder calorífico fue influenciado por el contenido de extractos totales para *P. montezumae* ($R^2= 0.9921$, $p<0.0001$) y para *P. leiophylla* ($R^2=0.6624$, $p=0.0487$).

Palabras clave: Extractos, albura, duramen, poder calorífico, lignina, cenizas.

9. ABSTRACT

One of the main obstacles to forestry development and sustainable management for both, forests and forest industries is the amount of waste produced. This situation calls for applied research on waste treatment for optimal use, to generate social, economic and environmental benefits. Therefore, the objective of this study was to evaluate the potential energy of bark, heartwood and sapwood as a function of the physical properties and chemical composition of *Pinus montezumae* Lamb., *Abies religiosa* (Kunth) Schltdt. & Cham., *Pinus pseudostrobus* Lindl., and *Pinus leiophylla* Sch. et Cham., collected in Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Statistical analyses consisted of comparing mean values of each variable between species and within species and structure, and establish correlations between variables and calorific value. Moisture content in all species ranged from 46 to 148%. The basic density showed statistically significant differences between sapwood and heartwood for all species with higher values in sapwood except for *A. religiosa*. pH value ranged from 5.18 to 6.01 the bark for the four species had higher acidity than wood. The 1% NaOH soluble substances content showed significant differences between the bark and wood except for *P. pseudostrobus*. Total extractives amount showed no statistical differences between species, with a range of 11.17 to 17.60%. The content referred to inorganic ash content was higher in the bark, the elements detected by x-ray spectroscopy were Mg, Ca, K, P, Al, Si, S, and Na. Lignin showed the highest values in the bark and close values between sapwood and heartwood. Holocellulose showed high values in sapwood and heartwood with a range of 75-82%. Low values of alpha-cellulose were found in the bark of the species except the bark of *A. religiosa*. Calorific value ranged from 17.882 to 19.629 (J g⁻¹). Calorific value was influenced by extractives content. *P. montezumae* and *P. leiophylla* showed a positive correlation of calorific value and extractives content with $R^2 = 0.9921$ ($p < 0.0001$) and $R^2 = 0.6624$ ($p = 0.0487$) respectively.

Keywords: Extracts, sapwood, heartwood, calorific value, lignin, ash.

10. LITERATURA CITADA

Aitken, I., Cadel, F. y Voillot, C. 1988. Constituants fibreux des pates papiers et cartons pratique de l'analyse.

Aktuell, 2007. Meyers Lexikonverlag Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich. 125.

Alakangas, E., 2002, Wood pellets in Finland, technology economy and market, OPET Report 5, Technical Research Center of Finland.

Andersen, R., Towers, W. y Smith, P. 2005. Assessing the potential for biomass energy to contribute to Scotland's renewable energy needs. *Biomass & Bioenergy* 29(2): 73-82.

Andersson, A., Ericson, M., Fridh, H. y Miksche, G.E. 1973. Gas chromatographic analysis of lignin oxidation products. XI. Structure of the bark lignins of hardwoods and softwoods. *Holzforschung* 27:189.193.

ASINEL. 1992. La biomasa y sus aplicaciones energéticas. ASINEL., Madrid, España.

Askew, M. y Holmes, C. 2002. The potential for biomass and energy crops in agriculture in Europe, in land use, policy and rural economy terms (Reprinted from *Aspects in Applied Biology*, vol 65, pg 365-374, 2001), *International Sugar Journal* 104 (1247): 482.

ASTM D 1103-60 (1977). Método estándar para determinar Alfa-celulosa en la madera.

ASTM D 1105-56 (1977). Método estándar para determinar Extraíbles en la madera.

Bonfill, J. 1985. Estudio de viabilidad del aprovechamiento de residuos forestales como fuente energética. Asociación de Forestalistas del país Vasco. Bilbao.

Borja, V. M. 2006. Aprovechamiento de los residuos forestales para uso energético. Universidad Politécnica de Valencia. España.

Brown, H. P., Panshin, A.J. y Forsaith, C.C. 1952. Textbook of wood technology. Vol. 2. McGraw-Hill. New York Toronto London.

Buatas, C. E. 1982. Utilización de la madera como combustible industrial. Generaliat de Catalunya, Barcelona.

Campbell, A.G., Kim, W.J. y Koch P. 1990. Chemical variation in lodgepole pine with sapwood/heartwood, stem height and variety. Wood Fiber Sci 22: 22–30.

Camps, M. M. y M. F. Marcos. 2008. Los Biocombustibles 2da ed. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa.

Carlquist, S. 2001. Comparative wood anatomy. Springer. 2ed Nueva York. 448p

Castilho, E., Alzola, A. 1988. Utilizacion de biomasa: determinacion del poder calorifico de los conos de tres especies florestales cubanas. Revista Florestal Baracoa, v.18, n.2, p.117-120.

Chattaway, M. 1956. Crystals in woody tissues II. Trop. Woods 104: 100-124.

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

Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro. 2009. Programa de manejo forestal sustentable para el aprovechamiento de los recursos forestales maderables con carácter de persistente en los bosques de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Mich. 26 p.

Coronel, E.O. 1994. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. Aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones. Instituto de Tecnología de la Madera. Serie de publicaciones 9.404. Editorial El Liberal Santiago del Estero, Argentina.

Cunha, M. P., C., Pontes C. L., F., Cruz I., A., Cabral M. F., D., Cunha Neto. Z., B., & Barbosa A.P., R. (1989). Estudio Químico de 55 especies lenhosas para geracao de energía em caldeiras. In, 3º. Encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira. Anais, v.2. Sao Carlos, Brasil.

Choong, E. T. Abdullah, G. y Kowalezuk, J.1976. Louisiana State University, Wood utilization notes, No. 29.

Díaz, J.C. 2004. Determinación de la transición de madera juvenil a madera madura de *Pinus ayacahute* Enrenb. y *Pinus montezumae* Lamb. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales. Texcoco, México. 56 p.

Dickson, R. L. y Walker, J.C. F. 1997. Selecting wood quality characteristics for pines. In timber Management Toward Wood Quality and End-Product Value. S.Y. Zhang, R. Gosselin and G. Chauret (eds). Proceedings of the CTIA/IUFRO International Wood Quality Workshop, Quebec City. Part IV. 45-52 pp.

DIN 52182. 1977. Determinación del Contenido de Humedad de la Madera

DIN 52183. 1976. Determinación de la Densidad.

Doat, J. 1977. Le Pouvoir Calorifique des Bois Tropicaux. Bois et Forets des Tropiques. Centre Technique Forestier Tropical. France. No. 172. 33-44 pp.

Elvira, M., L.M. 1982. Comportamiento al fuego de materiales y estructuras. INIA.

Enciso, E., E. 2007. Guía para el uso y aprovechamiento de la biomasa en el sector forestal. España. 40 p.

Echenique, M. R. y V. Díaz G. 1972. Algunas características tecnológicas de la madera de once especies mexicanas. Bol. Téc. 27. Inst. Nac. Invest. For. México, D. F. 71 p.

FAO. 1997. The role of wood energy in Europe and OECD, WETT-Wood Energy Today for Tomorrow. Rome: FOPW, Forestry Department. 87 p.

FAOSTAT. 2006. Forestry data. November, 2006. *In*: <http://faostat.fao.org>.

Fengel, D. y Wegener, G. 1989. Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Walter de Gruyter. Berlín, Germany. 415 p.

Fuentes S. M. 1998. Propiedades tecnológicas de las maderas mexicanas de importancia en la construcción. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 4 (1) 221-229.

Flores, M., G., J. Jiménez, L., X. Madrigal S., F. Moncayo R. y F. T. Takaki. 1971. Memoria de mapa de tipos de vegetación de la República Mexicana. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México, D.F. 59 pp.

Fonseca M. M. R. 2006. Determinación de la composición química de la madera de pino (*Pinus maximinoi* H.E. Moore) procedente de la finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz. Tesis Bach. Ciudad de Guatemala. GT: Universidad de San Carlos de Guatemala graduación. 154 p.

Fossum, T., Hartler, N. y Libert, J. 1972. The inorganic content of wood. Svensk Papperstidn 75(8): 305.

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

Frühwald, A. 1986. Technological properties of wood from trees in polluted regions. IAWA Bulletin n. s. 7(4): 389-397.

García, E. L., Guindeo C. A., Peraza O. C. y Palacios de Palacios P. 2002. La Madera y su Tecnología. Madrid. 322 p.

García, E. L., Guindeo C. A., Peraza O. C., Palacios de Palacios P. 2003. La Madera y su anatomía. Madrid.

García H. C., Guyat D. M. A., Martell O. D. y Capote V. P. 2004. Caracterización química del follaje, corteza y madera de cinco especies forestales del grupo de Guamuhaya. Revista Forestal Baracoan. Vol 24 no. 1.

Gao H, Zhang L. y Liu S.Q. 2011. Comparison of KP pulping properties between heartwood and sapwood of *Cedrus deodara* (Roxb.) G. Don. Advanced Materials Research, 55-57: 1778-1784.

Ghosh, T.K. y Prelas, M.A. 2011. Energy resources and systems: Volume 2. Springer Science + Business Media B.V.

Goche, T. J.; Fuentes, S.M.; Borja de la Rosa, A. y Ramirez, M. H. 2000. Variación de las propiedades físicas de la madera en un árbol de *Abies religiosa* y de *Pinus ayacahute* var. *Veitchii*. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 6(1): 83-92.

Gómez, P., P.A. 1995. Residuos generados por la industria maderera de la provincia de Talca determinación de las condiciones adecuadas para su briquetado. Tesis Licenciatura. Universidad de Talca. Talca, Chile.

Granada, E. L. 2006. Feasibility study of forest residue use as fuel through CO-firing with pellet. *Biomass & Bioenergy*. 30:238-246.

Gutiérrez, A. y Plaza, F. 1967. Características físico-mecánicas de las maderas españolas. IFIE, Ministerio de Agricultura. Madrid. 103 pp.

Gutiérrez, A., del Río, J.C., González-Vila, F.J. y Romero, J. 1998. Variation in the composition of wood extractives from *Eucalyptus globulus* during seasoning. *J. Wood Chem. Technol.* 18:439–446.

Harris, J.M. y Cown D.J. 1991 Basic wood properties. In: Properties and uses of New Zealand radiata pine, vol. 1 Wood properties. Kininmonth J.A., Whitehouse.

Higuchi, T. Ito, Y., Shimadam, M y Kawamura, I. 1967. Chemical properties of bark lignins. *Cellulose Chem. Technol.* 1:585-595.

Hillis, W.E.1962. Wood extractives. Academic press. London.

Holmbom, B. 1999. Extractives, pp 125-148 (*In: Sjöström E, Alén R (1999) (Eds.) Analytical methods in wood chemistry, pulping and papermaking. Springer. Berlin.*

Hon, D. N. S. y Shiraishi, N. 1991 *Wood and Cellulosic Chemistry*. New York. NY: Marcel Dekker, Inc.

Ivaska, A., Harju, L. 1999. Analysis of inorganic constituents, pp 287-304 (*In: Sjöström E, Alén R (1999) (Eds.) Analytical methods in wood chemistry, pulping and papermaking. Springer. Berlin.*

Jara, E. R. P. 1989. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 6 p.

Jiménez, G. 1991. Los residuos de origen vital. Real Academia de Farmacia. Madrid.

Kofujita, H.; K. Etyyu y M. Ota. 1999. Characterization of the major components in bark from five Japanese tree species for chemical utilization. *Wood Science and Technology* 33:223-228.

Kollmann, F. 1959. *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*. Ministerio de Agricultura Instituto Forestal de Investigaciones y experiencias, Madrid.

Kurth, E.F. y Smith, J.E. 1954. The chemical nature of lignin of Douglas-fir bark. *Pulp Paper Mag. Canada*. 55: 125.

Marcos, F. 2001. *Biocombustibles sólidos de origen forestal*. AENOR. Madrid.

Marcos, F.; Núñez, M. 2006. Biomasa forestal: fuente energética. *Energética XXI IV* (52): 80-85.

McNamara, W.S., Sullivan, S.E. and Higgins, J.C. 1970. *Wood Sci.* 3: 48-51

McGinnis, G.D. y Parikh, s. 1975. The chemical constituents of loblolly pine. *Wood Science* 7(4):

Mariana, S., Torres, M., Fernandez, A. y Morales E. 2005. Effects of *Eucalyptus nitens* heartwood in kraft pulping. *Tappi J* 4: 8-10.

Martín, M., F. 1989. *El carbón vegetal propiedades y obtención agroguías Mundiprensa*. Madrid, España. pp. 13-21.

Martín, M., F. 2001. *Biocombustibles sólidos de origen forestal*. AENOR. Madrid, España

Martin, R.E. y Gray, G.R. 1971. pH of southern pine barks. *Forest Products Journal* 21(3): 49-52.

Martínez, L., S. 2009. Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña. Tesis doctoral. Universitat Girona. 234 p.

Núñez C. y Felissia F. 1988. Análisis químicos corregidos de especies papeleras del norte de la Mesopotamia. 24° Congreso ATIPCA, Tomo 1, pág. 57, Bs. As.

Panshin, A. J. y C. De Zeeuw. 1980. Textbook of wood technology. 4 ed. New York McGraw-Hill.

Pearson, R.G. y Gilmore, R.C. 1980. Effect of fast growth rate on the mechanical properties of loblolly pine. Forest Products Journal 30(5): 47-54.

Pino, A.L. y Maximino, M., G. 2000. Evaluación preliminar de la aptitud papelera del ciprés calvo. Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel. Argentina.

Quezada A., P. 1999. Estudio técnico-económico de la fabricación de pellets de aserrín. Tesis Ingeniería Forestal. Universidad de Talca, Chile.

Quirino, W. 2005. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. Revista da Madeira, n.89, p.100-106, 2005.

Rydholm S. 1965. Pulping Processes. New York, Interscience Publishers, 1269 pp.

Rojas, A. 2004. Prefactibilidad Técnica y Económica para la Instalación de una Planta de Pélets para Combustibles a partir de Desechos de Madera: Universidad de Chile, 127 p.

Rutiaga, Q., J.G. 2001. Chemische und biologische Untersuchungen zum Verhalten dauerhafter Holzarten und ihrer Extrakte gegenüber holzabbauenden Pilzen. Buchverlag

Rutiaga Q., J.G., E. Windeisen, P. Schumacher y G. Wegener. 1999. Antifungal effect of extracts from *Quercus laurina* Hum. Et Bonpl. Research Trends, India.

Runkel, R.O.H. y Wike, K.D. 1951. Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz Roh Werkstoff. 9:260, 270.

Rzedowski, J. 1972 Contribuciones a la fitogeografía florística e histórica de México. II Afinidades geográficas de la flora fanerogámica de diferentes regiones de la República Mexicana. An Esc. Nac. Cienc. Biol. Mex 19: 45-48

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.

Schroeder, H.A. 1972. Shrinking and swelling differences between hardwoods and softwoods. Wood and Fiber 4(1):20-25.

SEMARNAT, 2011. Anuario Estadístico de la Producción Forestal.

Sjöström, E. 1993. Wood chemistry. Fundamentals and applications. Academia Press, San Diego.

Swan, E.P. 1989. Health hazards associated with extractives, p. 931-952. In J. W. Rowe (ed.), natural products of woody plants II. Springer-Verlag.

TAPPI. 2000. Tappi Test Methods. TAPPI Press. Atlanta.

Teixeira A.; M. A. Mourã B. y A. Lopes L. 2002. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do Cerrado. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 12, n. 1, 71-80 p

Tillman, D. 1981. Review of mechanisms associated with wood science. Vol 13, 4:117-184.

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

Uprichard, J. M. 1991. Chemistry of wood and bark. In: Properties and uses of New Zealand radiata pine, vol. 1 Wood properties. Kininmonth J.A., Whitehouse L.J., ed. Research Institute, Rotorua New Zealand, pp. 4.1-4.45.

Vale, A. T., Brasil, M. A. M.; Leão, A. L. 2002. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. *Ciência Florestal*, v.12, n.1, p.71-80

Volz, K.R. 1971. *Holz-Zentralbl.* p 97.

Wise, 1946, in: Sanjuan Dueñas, R. 1991. Guía práctica para la especialidad en celulosa y papel. Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Guadalajara.

Wilson, K. y D. J. B. White. 1986. The anatomy wood: Its diversity and variability. Stobart y Son LTD. London, Great Britain. 306 p.

Young, H.E. 1971. Preliminary estimates of bark percentages and chemical elements of bark percentages. *Forest Products Journal* 21 (5): 56-59.

Young, H.E. y Guinn, V. P. 1966. Chemical elements in complete mature trees. *Forest Products Journal* 21 (5): 56-59.

Zobel, B.J. y J.P. Van Buijtenen. 1989. Wood variation, its causes and control. Springer Verlag. 363 p.