



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO **INGENIERIA**



FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA

RELACIÓN ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS BÁSICAS Y LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS DE TRES ESPECIES DE ENCINO DE LA COMUNIDAD INDÍGENA DE  
NUEVO SAN JUAN PARANGARICUTIRO, MICHOACÁN

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO

EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA

PRESENTA:

ARMANDO PÉREZ LANDA

DIRECTORA DE TESIS:

M. C. LUZ ELENA ALFONSINA ÁVILA CALDERÓN

CODIRECTOR DE TESIS:

M. C. MARCO ANTONIO HERRERA FERREYRA

MORELIA, MICHOACÁN, NOVIEMBRE 2018

El presente trabajo de investigación “Relación entre las características químicas básicas y las propiedades mecánicas de tres especies de encino de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán” se realizó en el Laboratorio de Investigación de Química y Preservación de la Madera del programa de Licenciatura en Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Dicho trabajo se efectuó en el marco de los proyectos CIC 2012-2013 “Caracterización tecnológica de tres especies de encino de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán” y CIC 2016-2017 “Estudio químico de la madera y la corteza de dos especies provenientes de huertos y plantaciones comerciales para su aprovechamiento integral” en los que la M. C. Luz Elena A. Ávila Calderón y el M.C. Marco Antonio Herrera Ferreyra participan.

## **DEDICATORIA**

### ***A mis padres.***

*En especial a ellos, por estar conmigo, por haberme apoyado y guiado en todo momento, por ayudarme a crecer, por enseñarme que si en algún momento me caigo debo levantarme, por sus valores, sus consejos, su motivación, por ser ejemplos de perseverancia, de constancia, de humildad y de optimismo para salir adelante. Ellos son las bases que me impulsaron a llegar hasta aquí, quienes me dieron grandes enseñanzas y mostraron el camino hacia la superación, sobre todo por ser los principales protagonistas de este sueño alcanzado, pero más que nada, por su amor.*

### ***A mis hermanos.***

*Fernando, Maricela y Alfonso que además de ser mis hermanos, son mis mejores amigos, porque siempre me han apoyado a seguir adelante, por escucharme y aconsejarme, por siempre estar a mi lado, mostrarme que lo que te propones en la vida se puede lograr si se trabaja fuerte y continuamente.*

### ***A mis maestros.***

*M. C. Luz Elena Alfonsina Ávila Calderón, directora de tesis, por su continuo y gran apoyo y motivación para mi formación académica y la culminación de mis estudios profesionales, así como la elaboración de esta tesis; al M. C. Marco Antonio Herrera Ferreyra, codirector de tesis, por su gran apoyo y tiempo compartido a lo largo de mi formación académica.*

### ***A mis familiares.***

*Abuelos, tíos, primos y cuñadas que me ayudaron en la elaboración de esta tesis directa e indirectamente.*

### ***A mis amigos.***

*Para mí existen dos tipos de hermanos: Los hermanos de sangre y los de corazón. Ustedes son los segundos, Cristhian Pérez por compartir toda una vida de apoyo y excelentes momentos, sobre todo por el tiempo compartido y por haberme ayudado en la elaboración de este trabajo; Alejandro, Juan, Omar, Arturo por su amistad y consejos, por estar a mi lado en momentos felices y también difíciles.*

*Finalmente a todos mis maestros, quienes formaron parte de mi camino para llegar hasta aquí, quienes marcaron cada etapa de mis estudios, me ayudaron y resolvieron cualquier duda.*

*¡Gracias a ustedes!*

## ÍNDICE

	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>3</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO</b>	<b>6</b>
3.1. Localización del lugar de donde se obtuvieron las muestras	6
3.2. Descripción botánica de la familia Fagaceae	6
3.3. Características generales del género <i>Quercus</i>	6
3.4. Características de la madera del género <i>Quercus</i>	7
3.5. Características de las tres especies de <i>Quercus</i> en estudio	8
<b>4. OBJETIVOS</b>	<b>14</b>
4.1. Objetivo general	14
4.2. Objetivos particulares	14
<b>5. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>15</b>
5.1. Habilitación del material	15
5.2. Análisis químico de las especies	16
5.2.1. Determinación del pH en las especies	18
5.2.2. Determinación del contenido de cenizas	18
5.2.2.1. Análisis cualitativo y cuantitativo de las cenizas	19
5.2.3. Solubilidad en sosa (NaOH) al 1%	19
5.2.4. Solubilidad en solventes orgánicos	19

5.2.5. Determinación de lignina	20
5.2.6. Determinación de holocelulosa	21
5.2.7. Determinación de $\alpha$ -celulosa	22
5.3. Propiedades mecánicas	23
5.4. Análisis estadístico	23
<b>6. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>24</b>
6.1. Análisis químico de las especies	24
6.2. Propiedades mecánicas	27
6.3. Análisis estadístico	28
6.3.1. pH en las especies estudiadas	28
6.3.2. Porcentaje de cenizas	30
6.3.3. Solubilidad en NaOH al 1%	32
6.3.4. Solubilidad en ciclohexano	34
6.3.5. Solubilidad en acetona	36
6.3.6. Solubilidad en metanol	38
6.3.7. Solubilidad en agua	40
6.3.8. Lignina	42
6.3.9. Holocelulosa	44
6.3.10. $\alpha$ -celulosa	46
<b>7. DISCUSIÓN</b>	<b>49</b>
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>52</b>

**9. RECOMENDACIONES**

**53**

**10. REFERENCIAS**

**54**

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1.</b> Localización de Nuevo San Juan Parangaricutiro	6
<b>Figura 2.</b> Árbol y fruto de <i>Quercus rugosa</i> Née	9
<b>Figura 3.</b> Corte paralelo y corte perpendicular de <i>Quercus rugosa</i> Née	9
<b>Figura 4.</b> Árbol y fruto de <i>Quercus laurina</i> Humb. & Bonpl	11
<b>Figura 5.</b> Corte paralelo y corte perpendicular de <i>Quercus laurina</i> Humb. & Bonpl	11
<b>Figura 6.</b> Árbol y fruto de <i>Quercus candicans</i> Née	13
<b>Figura 7.</b> Corte paralelo y corte perpendicular de <i>Quercus candicans</i> Née	13
<b>Figura 8.</b> Proceso para habilitación de material	15
<b>Figura 9.</b> Determinación de contenido de humedad	16
<b>Figura 10.</b> Diagrama general para realización del análisis químico de las especies	17
<b>Figura 11.</b> Medición de pH	18
<b>Figura 12.</b> Secuencia efectuada para obtener el contenido de cenizas	18
<b>Figura 13.</b> Proceso para determinación del porcentaje de solubilidad en sosa	19
<b>Figura 14.</b> Secuencia para la extracción Soxhlet	20
<b>Figura 15.</b> Secuencia para determinar el contenido de lignina	21
<b>Figura 16.</b> Proceso para obtención de holocelulosa	22
<b>Figura 17.</b> Proceso para obtención de $\alpha$ -celulosa	23
<b>Figura 18.</b> Micrografías de las sustancias inorgánicas	25
<b>Figura 19.</b> Espectros de los elementos encontrados	26
<b>Figura 20.</b> Efecto de las especies sobre el pH	29
<b>Figura 21.</b> Efecto del material sobre el pH	30
<b>Figura 22.</b> Efecto de las tres especies y el material sobre el pH	30
<b>Figura 23.</b> Efecto de las especies sobre el porcentaje de cenizas	31

<b>Figura 24.</b> Efecto del material sobre el porcentaje de cenizas	<b>32</b>
<b>Figura 25.</b> Efecto de las especies y el material sobre el porcentaje de cenizas	<b>32</b>
<b>Figura 26.</b> Efecto de las especies sobre la solubilidad en NaOH 1%	<b>33</b>
<b>Figura 27.</b> Efecto del material sobre la solubilidad en NaOH 1%	<b>34</b>
<b>Figura 28.</b> Efecto de las especies y el material sobre la solubilidad en NaOH 1%	<b>34</b>
<b>Figura 29.</b> Efecto de las especies sobre la solubilidad en ciclohexano	<b>35</b>
<b>Figura 30.</b> Efecto del material sobre la solubilidad en ciclohexano	<b>36</b>
<b>Figura 31.</b> Efecto de las especies y el material sobre la solubilidad en ciclohexano	<b>36</b>
<b>Figura 32.</b> Efecto de las especies sobre la solubilidad en acetona	<b>37</b>
<b>Figura 33.</b> Efecto del material sobre la solubilidad en acetona	<b>38</b>
<b>Figura 34.</b> Efecto de las especies y el material sobre la solubilidad en acetona	<b>38</b>
<b>Figura 35.</b> Efecto de las especies sobre la solubilidad en metanol	<b>39</b>
<b>Figura 36.</b> Efecto del material sobre la solubilidad en metanol	<b>40</b>
<b>Figura 37.</b> Efecto de las especies y el material sobre la solubilidad en metanol	<b>40</b>
<b>Figura 38.</b> Efecto de las especies sobre la solubilidad en agua	<b>41</b>
<b>Figura 39.</b> Efecto del material sobre la solubilidad en agua	<b>42</b>
<b>Figura 40.</b> Efecto de las especies y el material sobre la solubilidad en agua	<b>42</b>
<b>Figura 41.</b> Efecto de las especies sobre la lignina	<b>43</b>
<b>Figura 42.</b> Efecto del material sobre la lignina	<b>44</b>
<b>Figura 43.</b> Efecto de las especies y el material sobre la lignina	<b>44</b>
<b>Figura 44.</b> Efecto de las especies sobre la holocelulosa	<b>45</b>
<b>Figura 45.</b> Efecto del material sobre la holocelulosa	<b>46</b>
<b>Figura 46.</b> Efecto de las especies y el material sobre la holocelulosa	<b>46</b>
<b>Figura 47.</b> Efecto de las especies sobre la $\alpha$ -celulosa	<b>47</b>
<b>Figura 48.</b> Efecto del material sobre la $\alpha$ -celulosa	<b>48</b>



## ÍNDICE DE CUADROS

	Página
<b>Cuadro 1.</b> Composición química de tres especies de encinos	24
<b>Cuadro 2.</b> Elementos químicos en las cenizas	27
<b>Cuadro 3.</b> Resultados de propiedades mecánicas	27
<b>Cuadro 4.</b> Coeficientes de correlación	28
<b>Cuadro 5.</b> Anova para el efecto pH	29
<b>Cuadro 6.</b> Anova para el porcentaje de cenizas	31
<b>Cuadro 7.</b> Anova para la solubilidad en NaOH al 1%	33
<b>Cuadro 8.</b> Anova para la solubilidad en ciclohexano	35
<b>Cuadro 9.</b> Anova para la solubilidad en acetona	37
<b>Cuadro10.</b> Anova para la solubilidad en metanol	39
<b>Cuadro 11.</b> Anova para la solubilidad en agua	41
<b>Cuadro 12.</b> Anova para el efecto lignina	43
<b>Cuadro 13.</b> Anova para el efecto holocelulosa	45
<b>Cuadro 14.</b> Anova para el efecto $\alpha$ -celulosa	47

## RESUMEN

Con el propósito de incrementar el conocimiento sobre el género *Quercus*, en este estudio se realizó la caracterización química básica y se evaluó su relación con las propiedades mecánicas de la madera de tres especies de encino provenientes de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán: *Quercus candicans* Née, *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. y *Quercus rugosa* Née. Las características químicas que se determinaron fueron sustancias inorgánicas (T 211 om-93, TAPPI 2000), solubilidad en sosa (T 212 om-98, TAPPI 2000), solubilidad en ciclohexano, acetona, metanol y agua caliente, lignina (Runkel y Wilke, 1951), holocelulosa (Wise, 1996) y  $\alpha$ -celulosa (D1 103-60, ASTM, 1997). Estas características se correlacionaron con sus propiedades mecánicas: la carga máxima ( $P_{max}$ ), la resistencia máxima ( $\sigma_{bw}$ ) y el módulo de elasticidad ( $E_w$ ) en flexión estática; y la carga máxima ( $P_{max}$ ), la resistencia máxima ( $\sigma_w$ ) y el módulo de elasticidad ( $E_w$ ) en compresión paralela a la fibra. Los valores de cenizas, lignina, holocelulosa y  $\alpha$ -celulosa obtenidos en este estudio se encuentran en el rango reportado en la literatura para otras especies de encino. No así los contenidos de extraíbles totales que resultaron mayores. En cuanto a los componentes químicos y su relación con las propiedades mecánicas, se determinó que la  $P_{max}$  y el  $E_w$  a flexión estática son directamente proporcionales a los extraíbles solubles en ciclohexano, metanol y agua. El  $E_w$  en compresión paralela aumenta al hacerlo los extraíbles solubles en ciclohexano, acetona y sosa. Se observó correlación entre el contenido de lignina y la  $P_{max}$ , la  $\sigma_{bw}$ , y el  $E_w$  a flexión estática. La carga máxima a flexión estática se vio afectada por el contenido de  $\alpha$ -celulosa, pero no en compresión paralela. También se determinó una relación inversa entre el contenido de holocelulosa y el  $E_w$  a flexión estática y la  $P_{max}$  a compresión paralela, el cual participa en valores negativos en las propiedades mecánicas de la madera.

**Palabras clave:** madera, corteza, lignina, holocelulosa,  $\alpha$ -celulosa.

## ABSTRACT

In order to increase the knowledge of gen. *Quercus*, in this work the chemical and mechanical properties of three species of oak are studied. Those species are *Quercus candicans* Née, *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. y *Quercus rugosa* Née, which are natives from the Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro Michoacán. The chemical analysis were done quantifying the inorganic material (T 211 om-93, TAPPI 2000), alkali solubility at 1% (T 212 om-98, TAPPI 2000), solubility in cyclohexane, acetone, methanol and hot water, lignin (Runkel y Wilke, 1951), homocellulose (Wise, 1996) and  $\alpha$ -cellulose c (D1 103-60, ASTM, 1997). The mentioned properties were correlated with their mechanical properties: maximum load ( $P_{max}$ ), maximum resistance ( $\sigma_{bw}$ ), elastic modulus ( $E_w$ ) at static bending and maximum load. For the compression parallel to fibers the maximum resistance and the elastic modulus were also calculated, finding in general that, these parameters are in the range of other oak species reported in the literature. However, the total extracts quantified in this work are larger than other oak species. The alkali solubility and pH values show larger values in wood fiber than the cork. The relationship between the chemical and mechanical properties ( $P_{max}$  and the  $E_w$ ) are directly proportional with the content of extracts in cyclohexane, methanol and water, as well when the content of lignin is correlated with the  $P_{max}$ , the  $\sigma_{bw}$ , and the  $E_w$  at static bending. These parameters, properties and relationships are discussed properly in this work.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los encinos blancos o robles son un grupo de especies que pertenecen al género *Quercus*, de la familia Fagaceae. Se encuentran en casi todos los bosques templados y en algunas regiones tropicales y subtropicales húmedas del hemisferio norte, aunque también existen algunas especies en hábitats subhúmedos, en el sureste de Asia y nororiente de África (Zavala, 1995).

Aunque para México se desconoce con exactitud el número de especies de este género, se estima que son alrededor de 160. Se ha estimado que el número de especies de encinos, para todo el mundo, es entre 400 y 600; en México estarían representadas entre 32.2 y 40.2 % del total de especies del género. Los encinos, en nivel de género, son considerados como el segundo recurso forestal maderable más importante del país después del género *Pinus* (Valencia, 2004).

Los estados con mayor riqueza de encinos son Nuevo León, Veracruz y Oaxaca. Sin embargo, las entidades con mayor información científica sobre este tipo de plantas son Jalisco, Guerrero, Estado de México y Michoacán. De manera natural el único estado sin encinos es Quintana Roo (Arizaga *et al.*, 2009).

La importancia de los bosques de *Quercus* en México radica principalmente en el hecho de que junto con los miembros del género *Pinus* constituyen la mayor parte de la cubierta vegetal de las áreas de clima templado y semihúmedo; sin embargo, no se limitan a estas condiciones, pues penetran en regiones de clima caliente formando también bosques. Son elementos del bosque tropical perennifolio y existen en las zonas semiáridas siendo parte del matorral xerófilo en forma arbustiva (Rodríguez y Romero, 2007).

Los principales usos que se les da a los encinos, desde diferentes puntos de vista, se enuncian a continuación: materia prima básica para elaboración de carbón, elaboración de mangos de diversas herramientas, instrumentos e implementos agrícolas, confección de artesanías locales y elaboración de muebles. A nivel mundial, la madera de los encinos es considerada de alta calidad, por lo que resulta importante para la economía de algunos países europeos. Es un recurso natural renovable que sirve de alimento y para diversas aplicaciones en el sector industrial. Desde la visión ecológica, los encinos son proveedores de servicios ambientales, dado que producen oxígeno, capturan bióxido de carbono (contaminante atmosférico producido por el hombre), filtran el ruido, reducen la erosión del suelo, infiltran el agua al subsuelo, regulan la temperatura atmosférica y son hospederos naturales que alojan en sus cortezas, ramas, hojas y flores, a numerosas especies de ardillas, pájaros, avispas, abejas, moscas, escarabajos, orquídeas, líquenes, bromelias, helechos y plantas trepadoras (Arizaga *et al.*, 2009).

Luna *et al.* (2003) han encontrado diversos usos de *Quercus* en diferentes partes de la República Mexicana: uso medicinal, alimenticio, artesanal, forraje, taninos, colorantes y posee valor cultural. Esto hace a los encinos uno de los grupos taxonómicos de plantas de mayor importancia económica en el hemisferio norte.

En la literatura se reportan varios estudios sobre el género *Quercus* sobre aspectos anatómicos, físico-mecánicos, propiedades tecnológicas y algunos sobre propiedades químicas, pero pocos tratan sobre caracterización química y su relación con sus propiedades mecánicas.

Con base en lo anterior y con el propósito de incrementar el conocimiento de este género, en este estudio se realizó la caracterización química básica y se evaluó su relación con sus y propiedades mecánicas de tres especies de encinos provenientes de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro Michoacán: *Quercus candicans* Née, *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. y *Quercus rugosa* Née.

## 2. ANTECEDENTES

Los encinos (*Quercus*) son de gran importancia en México, tanto por su abundancia, como por su utilidad como especies forestales (Martínez, 1981).

A nivel mundial, los encinos se desarrollan ampliamente y de manera natural en los bosques templados, bosques tropicales, semitropicales y en los matorrales de climas secos del hemisferio norte. Por el contrario, muy pocos encinos se asientan en los ecosistemas tropicales y semitropicales del hemisferio sur (América del Sur y el sureste de Asia) (Arizaga *et al.* 2009).

Se encontró en la literatura los siguientes estudios de la madera del género *Quercus*:

### Estudios anatómicos y físico-mecánicos

Rivera *et al.* (1999) describieron las características histoquímicas cualitativas y morfológicas cuantitativas de algunas células que componen la albura y el duramen de *Quercus glabrescens*, *Q. potosina* y *Q. eduardii* que fueron colectados en el municipio de Huayacocotla, Veracruz. Los resultados indican que las alburas son muy semejantes en sus características histoquímicas y en las tendencias cuantitativas, pero las de duramen presentan diferencias en: tipo de fibras gelatinosas, depósitos violáceos de polisacáridos en cavidades de fibras y parénquima radial y en este tipo celular, la presencia de algunos procesos pétreos en la madera de *Q. potosina*.

De la Paz *et al.* (2006) presentaron la descripción anatómica, macroscópica y microscópica de la madera de ocho especies de *Quercus* provenientes del estado de Oaxaca: *Q. affinis* Scheidw., *Q. conzatti* Trel., *Q. laurina* Humb. & Bonpl., *Q. scytophylla* Liebm., pertenecientes a la sección encinos rojos y *Q. glabrescens* Benth., *Q. obtusata* Humb. & Bonpl., *Q. peduncularis* Née y *Q. rugosa* Née, ubicadas dentro de la sección *Quercus* encinos blancos. Se observaron diferencias en el color de la madera, en el tipo de porosidad, en la distribución y abundancia de los poros, en el tamaño y abundancia de los radios multiseriados y en la presencia y cantidad de los contenidos celulares (cristales, gomas y tálides) entre las especies de los dos subgéneros.

De la Paz y Dávalos (2008) muestran las características anatómicas, físicas y mecánicas de la madera de 24 especies de *Quercus* recolectadas en varios estados de la República Mexicana. Se muestreó de uno a cinco ejemplares por especie en bosques de pino-encino. Con base en bibliografía se incluyen otras características tecnológicas de la madera y de acuerdo con los resultados obtenidos se sugieren usos.

## Estudios Químicos

Honorato y Hernández (1998) llevaron a cabo un análisis químico para determinar los principales componentes químicos de cinco especies de encinos del estado de Puebla. Las especies estudiadas fueron *Quercus affinis*, *Q. crassifolia*, *Q. glabrescens*, *Q. mexicana* y *Q. laurina*. Para cada una se determinaron los contenidos de celulosa, lignina, pentosanos, extractivos solubles en etanol-benceno, ceniza, sílice y taninos en una mezcla de madera de albura-duramen. Las cantidades de componentes químicos presentes en la mezcla de madera de albura y duramen de las especies se encuentran en el rango de 54.24 a 56.72% para la  $\alpha$ -celulosa, de 19.84 a 22.35% para la lignina, de 18.37 a 21.64% para los pentosanos, de 3.84 a 5.24% para los solubles en etanol-benceno, de 0.87 a 1.38% para la ceniza, de 0.0040 a 0.0096% para el sílice, y de 1.17 a 3.46% para los taninos. Los contenidos de solubles en etanol-benceno y de sílice fueron más altos en la madera de duramen que en la madera de albura de las cinco especies. El contenido de taninos también fue más alto en las cortezas (7.4-10.4%) que en las mezclas de madera de albura-duramen. El análisis de varianza estadístico de los resultados indicó que los componentes químicos varían significativamente ( $P < 0.05$ ) entre las especies y el tipo de madera.

Rutiaga *et al.* (2000) estudian harina tamizada del duramen de *Quercus candicans*, la cual fue extraída sucesivamente con éter de petróleo, acetona y metanol; posteriormente con agua fría y finalmente con agua caliente. El análisis de carbohidratos se realizó en la harina extraída y en los extractos metanólico y acuosos. Se determinó el contenido de lignina Runkel. En la harina no extraída se determinó el contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno y de cenizas. Las cenizas fueron analizadas mediante energía dispersiva de Rayos X. El valor del pH se determinó en la harina no extraída. El duramen de *Q. candicans* contiene 10.2 % de extraíbles, 66.9 % de polisacáridos, 21.4 % de lignina Runkel, 47.2 % de carbono, 6.2 % de hidrógeno, 45.7 % de oxígeno y 0.9 % de cenizas. Las cenizas contienen los siguientes elementos químicos: K, Mg, Ca, P y S. El pH es de 5.6.

Bárcenas *et al.* (2008) realizan un estudio para determinar las características químicas y densidad básica de dos especies de encino blanco de la Sierra de Álvarez, SLP, México. Encontraron que la cantidad de cenizas fue mayor que lo publicado para especies mexicanas del mismo género. Los contenidos de extractos de *Q. sebifera* con la mezcla etanol-benceno y con agua caliente fueron mayores que los registrados para otros encinos blancos. El contenido de extractos fue estadísticamente mayor en *Q. sebifera*. La riqueza de cenizas y extractos de estas especies parece estar relacionada con su adaptación a las condiciones de aridez en las que crecen. La densidad básica relativa de *Q. sebifera* es media y la de *Q. thinkami*, es alta.

Estudios de relaciones de composición química y características físicas y propiedades mecánicas de la madera

Ona *et. al.* (1998) muestran las relaciones entre las diversas densidades básicas extraídas y los componentes químicos de la madera, se investigaron las variaciones dentro de árboles de *Eucalyptus globulus* para así determinar las propiedades de la madera o de los productos derivados de la madera. Los compuestos extraños afectan a las relaciones entre las diferentes densidades básicas y los componentes químicos de la madera tales como la holocelulosa y la lignina, relación guayacil/siringil.

Hernández y Pontin (2005) utilizan dos técnicas experimentales para llevar a cabo pruebas de sorción de humedad a 25 °C en muestras de tres especies de maderas duras tropicales: tornillo (*Cedrelinga cateniformis* Ducke), pumaquiro (*Aspidosperma macrocarpon* Mart.), y de Huayruro (*Ormosia coccinea* Jackson). La primera técnica utilizada, fueron soluciones de sal saturada a una humedad relativa de 0% a 90%, y en la segunda utilizaron el método de membrana de presión por encima de una humedad relativa del 96%. Estas pruebas de sorción se combinaron con las mediciones de contracción. El punto de saturación de la fibra (FSP), que se calcula por interpolación a cero contracciones volumétricas, fue del 28%, 22.5%, y el 21.5% para tornillo, pumaquiro y huayruro, respectivamente. Los resultados confirmaron que en equilibrio el contenido de humedad, radial, tangencial, y la contracción volumétrica se producen por encima de la FSP real.

Leonardon *et al.* (2010) analizan la influencia del ángulo de micro fibrillas (MFA), la densidad y la composición química de la pared celular en la contracción la cual varió entre las direcciones longitudinales y tangenciales, así como entre los tipos de madera, es decir, madera de compresión (CW), madera tardía (MW) y madera temprana (JW). Al mismo MFA, la CW exhibió una menor contracción tangencial que JW, indicando la influencia de la composición química en la contracción de la madera. La composición química se midió a través de microespectroscopía FTIR y se demostró que, junto con la densidad, el MFA es un dato alternativo para las predicciones de contracción de la madera.

Herrera (2014), determinó la densidad en madera, poder calorífico y composición química en corteza y madera de seis especies de latifoliadas, para el cual obtuvo una rodaja de 30 cm de espesor de *Q. candicans*, *Q. rugosa*, *Q. laurina*, *Alnus acuminata*, *A. jorullensis* y *Symplocos citrea*, procedentes de la comunidad de San Juan Nuevo Parangaricutiro, de las cuales se separó corteza y madera, y en las que fue posible obtener albura y duramen. En madera se determinó la densidad, el contenido de humedad. El poder calorífico se determinó en material con extractos, sin extractos, en lignina y holocelulosa. Para el análisis químico se determinó: pH, contenido de cenizas, solubilidad de sustancias extraíbles (en solventes de polaridad ascendente y agua), cuantificación de lignina, holocelulosa, alfa-celulosa y hemicelulosa por diferencia de porcentajes, y solubilidad a la sosa, también se determinó en contenido de taninos en las diferentes zonas de las especies.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Localización del lugar de donde se obtuvieron las muestras

Las muestras de las especies estudiadas se recolectaron de la zona boscosa de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, ubicada en la Sierra Purépecha, Michoacán, a 12 km al sur de la ciudad de Uruapan, entre las coordenadas 19° 21' 00" y 19° 34' 45" latitud Norte y 102° 08' 15" y 102° 17' 30" longitud Oeste y la superficie total es de 18. 318 ha (Figura 1).



**Figura 1.** Localización de Nuevo San Juan Parangaricutiro.

#### 3.2. Descripción botánica de la familia Fagaceae

Los encinos se encuentran dentro de la familia Fagaceae que comprende de seis a nueve géneros y alrededor de 600 a 900 especies de plantas. Pertenecen al género conocido como *Quercus* (Arizaga *et al.*, 2009).

#### 3.3. Características generales del género *Quercus* (Arizaga *et al.*, 2009).

Todos los encinos comparten una serie de características biológicas comunes: tallos leñosos, hojas con consistencia similar al cuero (duras) y presencia de bellotas. Su forma de crecimiento es comúnmente como árbol (con una altura de 3 a 40 m) y algunos como arbustos (con alturas de 10 a 60 cm), pero nunca como hierba.

Su desarrollo es lento, causa por la cual son de larga vida, y crecen principalmente en bosques templados, aunque también pueden hallarse en matorrales, pastizales y de forma intercalada, en algunas selvas secas (Bello y Labat, 1987).

Una peculiaridad de los encinos es el patrón en la duración de las hojas. En los encinos perennifolios, el follaje siempre se mantiene verde, y se va sustituyendo de manera paulatina. Por el contrario, los encinos caducifolios pierden la totalidad de sus hojas durante la estación de sequía. En el renuevo de las hojas se muestran colores vívidos que van del naranja al rojo carmesí, por lo que durante esta temporada los bosques son un deleite para la vista.

Las hojas se caracterizan por tener diferentes tipos de ápice (punta de la hoja), base de la hoja, número de nervaduras, margen (o borde de la hoja), textura, tamaños y colores, propiedades morfológicas que son empleadas en la taxonomía para su clasificación científica (Martínez, 1981).

#### 3.4. Características de la madera del género *Quercus*

Características de la madera: Aunque sus características varían según las especies, en lo general es fuerte y durable, susceptible de hermoso pulimento y muy preferida para muebles, construcciones terrestres y navales, mangos de herramientas, etc., y para hacer carbón, el cual resulta de calidad superior al que se hace con otras maderas. Tiene grandes vasos aglomerados en los anillos de crecimiento, y los radios medulares son bien visibles, unos largos y toscos y otros cortos y finos (Martínez, 1981).

Trabajabilidad: Madera pesada y dura que se debe trabajar con herramientas provistas de pastillas de carburo de tungsteno o estelita. Su comportamiento encortes transversales y longitudinales es satisfactorio, ocasionalmente suele “aprisionar” y friccionar el disco a cortarla longitudinalmente debido a tensiones internas. Buena para cepillar. Permite buenos encolados, sin embargo, el uso de pegamentos tradicionales (blancos) provocan reacciones químicas con los taninos en la madera ocasionando un manchado de color negro en las superficies en contacto con el material encolante (SEMARNAT, 2013).

Secado: Madera difícil de secar por su alta variabilidad de permeabilidad causada por la presencia de extraíbles y de tálides en el duramen. Se recomienda un presecado en estufa solar (hasta aprox. 30% CH), posteriormente un secado técnico convencional suave, temperatura inicial no mayor de 40°C finalizando el secado a temperaturas no mayores de 60°C. Durante el proceso se originan rajaduras en las testas con gran facilidad y frecuencia, madera susceptible a tensiones, alabeos, agrietamientos y colapso (SEMARNAT, 2013).

### 3.5. Características de las tres especies de *Quercus* en estudio.

***Quercus rugosa* Née** (Bello y Labat, 1987.; Arizaga *et al.* 2009.; Martínez, 1981.; Pérez *et al.* 2008).

#### Características botánicas

Nombre común: encino avellano, encino blanco liso, encino cuero, encino de asta, encino de miel, encino quiebra hacha, roble y tocuz.

Tamaño: árbol de 3 a 25 m de altura y con diámetro del tronco de 10 a 80 cm.

Corteza: gris castaño y escamosa.

Hoja: obovada de 4 a 17 cm de largo por 1.8 a 10 cm de ancho; margen con 3 a 17 dientes; haz verde oscuro y lustroso; envés amarillento tomentoso.

Fruto: anual, solitario y en grupos de 2 ó 3; bellota ovoide de 16 a 25 mm de largo por 9 a 14 mm de diámetro (Figura 2).

Usos: leña, carbón, fabricación de cabos, pilotes, durmientes; fruto para preparar café.

Manejo: no hay programas de manejo para su aprovechamiento.

Mecanismo de propagación: por bellotas producidas de octubre a enero.

Estado de conservación: no amenazado.

Hábitat: barrancas, laderas y terrenos planos de bosque de encino, pino-encino y oyamel entre 1,100 a 3,000 msnm y sobre suelos ligeramente rocosos.

Distribución geográfica: en Estados Unidos y México; se distribuye en Aguascalientes, Chihuahua, Chiapas, Coahuila, Colima, Distrito Federal, Guerrero, Guanajuato, Durango, Hidalgo, Jalisco, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sonora, Veracruz y Zacatecas.

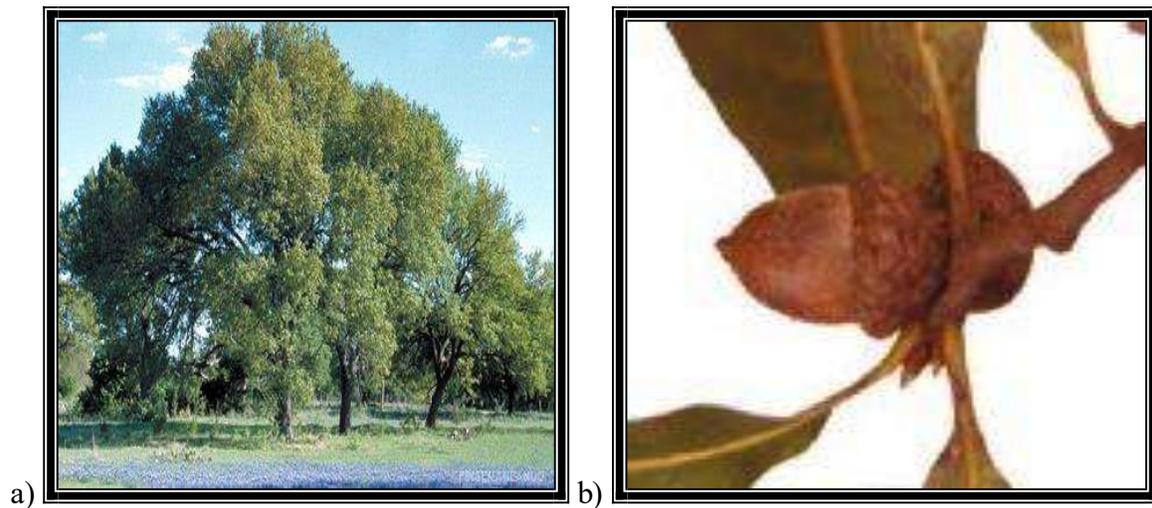
#### Características anatómicas

Albura castaño pálido y duramen amarillo con radios multiseriados castaño oscuro. Porosidad difusa. Anillos de crecimiento de 1 mm. Vasos medianos. Los radios multiseriados muy altos y extremadamente anchos la mayoría de 27 series. Fibras largas, de

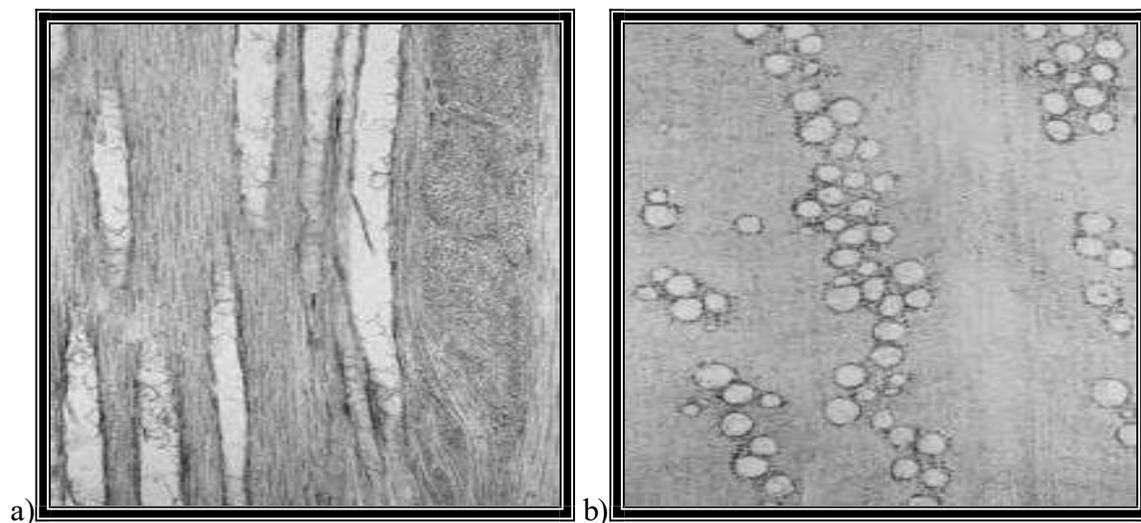
diámetro fino y pared gruesa. Vasos con abundantes tílides y parénquima con abundantes cristales romboidales (Figura 3).

Características físicas y mecánicas

Madera pesada, de contracciones altas, dura a muy dura, rígida, resistente a la compresión paralela, a la compresión perpendicular y al cortante paralelo.



**Figura 2.** Árbol (a) y fruto (b) de *Quercus rugosa* Née (Arizaga et al.,2009).



**Figura 3.** a) Corte paralelo y b) corte perpendicular de *Quercus rugosa* Née (Pérez et al.,2008).

***Quercus laurina* Humb. & Bonpl** (Bello y Labat, 1987.; Arizaga *et al.* 2009.; Martínez, 1981.; Pérez *et al.* 2008).

#### Características botánicas

Nombre común: encino blanco, encino chilillo, encino colorado, encino laurelillo, encino prieto y encino urikua.

Tamaño: árbol de 10 a 40 m de altura y con diámetro del tronco de 15 a 100 cm.

Corteza: gris obscura y finamente agrietada.

Hoja: elíptica a lanceolada de 3.3 a 14.5 cm de largo por 1 a 5 cm de ancho; margen con 1 a 3 aristas a cada lado; haz verde lustroso; envés verde a verdeamarillento.

Fruto: bianual, solitario o en pares; bellota ovoide de 15 a 20 mm de largo por 15 a 17 mm de diámetro (Figura 4).

Usos: leña, carbón, fabricación de cercas, cabos, arados, redilas y vaquetas de tambor.

Manejo: no hay programas de manejo para su aprovechamiento.

Mecanismo de propagación: por bellotas producidas de septiembre a diciembre.

Estado de conservación: no amenazado.

Hábitat: barrancas, en bosques de encino, pino-encino, mesófilo de montaña y de coníferas entre 1,500 a 3,200 msnm y sobre suelos areno-pedregosos profundos.

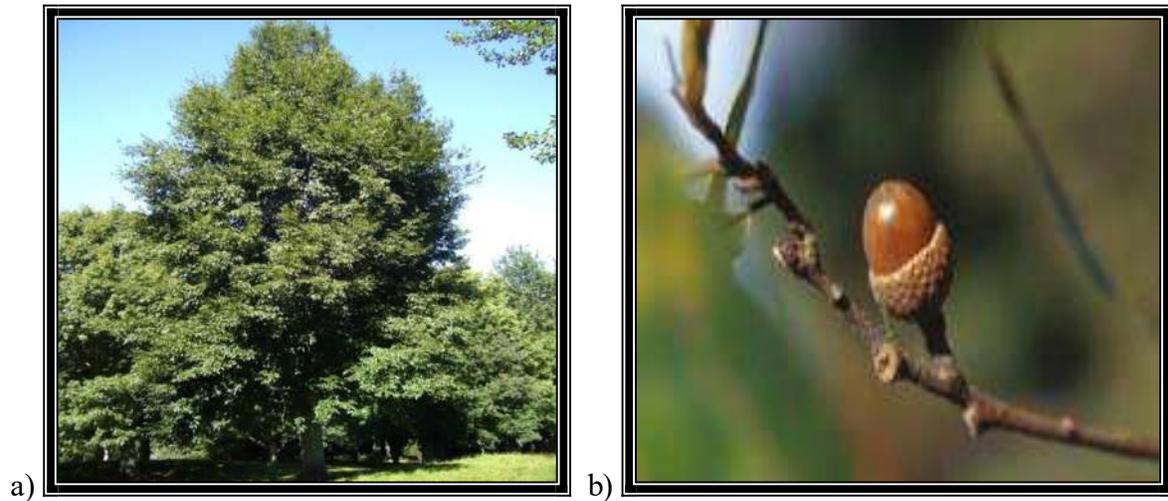
Distribución geográfica: endémica a México; se distribuye en Colima, Distrito Federal, Guerrero, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Sinaloa, Tlaxcala y Veracruz.

#### Características anatómicas

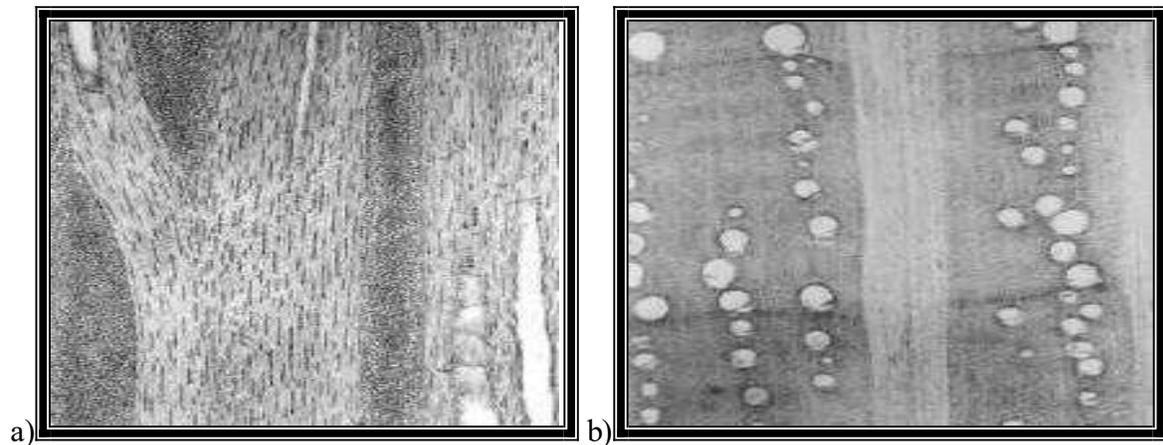
Albura rosa y duramen castaño claro a castaño rojizo con radios multiseriados castaño oscuro. Porosidad anular. Anillos de crecimiento de 1 a 4 mm. Vasos medianos. Radios multiseriados altos y muy anchos, la mayoría de 15 a 24 series. Fibras medianas, de diámetro fino y pared mediana a gruesa. Vasos con pocas tílides (Figura 5).

## Características físicas y mecánicas

Madera pesada a muy pesada, de contracciones altas a muy altas, dura a muy dura, rígida a muy rígida, resistente a muy resistente a la compresión paralela y a la compresión perpendicular y moderadamente resistente a resistente al cortante paralelo.



**Figura 4.** a) Árbol y b) fruto de *Quercus laurina* Humb. & Bonpl (Arizaga *et al.*,2009).



**Figura 5.** a) Corte paralelo y b) corte perpendicular de *Quercus laurina* Humb. & Bonpl (Pérez *et al.*,2008).

*Quercus candicans* Née (Bello y Labat, 1987.; Arizaga *et al.* 2009.; Martínez, 1981.; Pérez *et al.* 2008).

#### Características botánicas

Nombre común: corturapi, encino aguacatillo, encino de asta, encino bellotero, encino blanco, encino cenizo, encino papatla, encino rosillo, roble y urupcu.

Tamaño: árbol de 8 a 25 m de altura y con diámetro del tronco de 20 a 80 cm.

Corteza: café con grietas irregulares.

Hoja: elíptica-lanceolada, obovada u ovada de 9 a 26 cm de largo por 3.5 a 14 cm de ancho; haz verde oscuro liso y lustroso; envés densamente tomentoso de blanco a amarillento.

Fruto: bianual, solitario o en pares; bellota ovoide de 20 a 24 mm de largo por 19 mm de diámetro.

Usos: leña, carbón, cercas, cabos, redilas y cajas de empaque. El fruto tostado sirve para preparar una especie de café (Figura 6).

Manejo: no hay programas de manejo para su aprovechamiento.

Mecanismo de propagación: por bellotas producidas de junio a agosto.

Estado de conservación: amenazado, con hábitat transformado a huertos de aguacate.

Hábitat: cañadas o terrenos planos, en bosque de pino-encino y bosque mesófilo entre 1,200 a 2,700 msnm y sobre suelos pedregosos.

Distribución geográfica: desde México hasta Centroamérica; se distribuye en Chihuahua, Chiapas, Colima, Distrito Federal, Durango, Guerrero, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, México, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, y Veracruz.

#### Características Anatómicas

Albura blanca rosado, rosa, gris rosado o castaño rojizo claro y duramen rosa o rojizo claro con radios multiseriados castaño rojizo claro u oscuro.

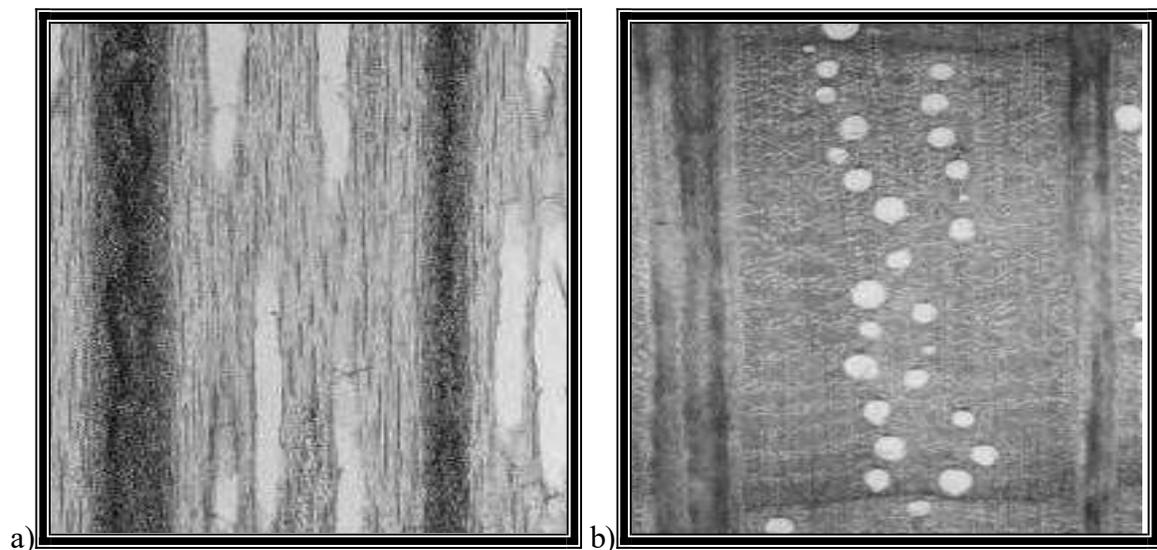
Porosidad difusa. Anillos de crecimiento de 2 a 5 mm. Vasos medianos. Radios multiseriados altos y extremadamente anchos, la mayoría de 20 a 25 series. Fibras medianas o largas, de diámetro fino y pared gruesa. Vasos con pocas tílides (Figura 7).

## Características físicas y mecánicas

Madera pesada a muy pesada, de contracciones altas a muy altas, dura a muy dura, moderadamente flexible a rígida, moderadamente resistente a la compresión paralela, resistente a la compresión perpendicular y moderadamente resistente a resistente al cortante paralelo.



**Figura 6.** a) Árbol y b) fruto de *Quercus candicans* Née (Arizaga *et al.*, 2009).



**Figura 7.** a) Corte paralelo y b) corte perpendicular de *Quercus candicans* Née (Pérez *et al.*, 2008).

## 4. OBJETIVOS

### 4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la relación entre las características químicas básicas y las propiedades mecánicas de *Quercus candicans* Née, *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. y *Quercus rugosa* Née, procedentes de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán.

### 4.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar la composición química básica de las maderas en estudio:
  - Determinar el pH
  - Determinar la cantidad de sustancias inorgánicas (cenizas)
  - Determinar la solubilidad en sosa (NaOH) al 1%
  - Determinar la solubilidad, mediante extracción sucesiva en ciclohexano, acetona, metanol y agua caliente.
  - Determinar el contenido de lignina
  - Determinar el contenido de holocelulosa
  - Determinar el contenido de  $\alpha$ -celulosa
  
- Realizar correlaciones simples entre las características químicas: pH, cenizas, solubilidad en sosa (NaOH) al 1%, extraíbles solubles en ciclohexano, extraíbles solubles en acetona, extraíbles solubles en metanol y extraíbles solubles en agua, holocelulosa,  $\alpha$ -celulosa y lignina; y las propiedades mecánicas: la carga máxima ( $P_{max}$ ), la resistencia máxima ( $\sigma_{bw}$ ) y el módulo de elasticidad ( $E_w$ ) en flexión estática y la carga máxima ( $P_{max}$ ), la resistencia máxima ( $\sigma_w$ ) y el módulo de elasticidad ( $E_w$ ) en compresión paralela.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. Habilitación del material

De dos árboles de cada especie en estudio, previamente identificados botánicamente, se obtuvieron probetas de diferentes dimensiones a una altura de 1.30 m de tocón. El material, mezcla de albura y duramen y también de corteza, se sometió a un astillado con la ayuda de un formón y un martillo, esto con la finalidad de obtener astillas de dimensiones adecuadas para la fase de molienda, la cual se llevó a cabo en un molino Willey, de conformidad con la norma T 257 cm-85 de TAPPI (2000), hasta que se obtuvo harina de madera, posteriormente se clasificaron en tres diferentes tamaños de partícula utilizando tamices. El material seleccionado con el que se determinaron las características químicas, tuvo que ser el que pasó por la malla 40 y se retuvo por la malla 60. Posteriormente se colocaron dentro de pequeñas bolsas para que no se contaminaran o absorbieran humedad (Figura 8).



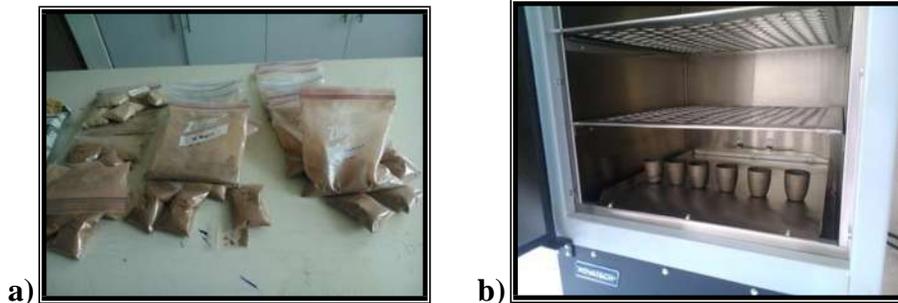
**Figura 8.** Proceso para habilitación de material, a) Astillado, b) Molienda, c) Tamizado, d) clasificación de harinas.

## 5.2. Análisis químico de las especies

A continuación, se indica la norma o método con la que se determinó la composición química básica de la madera de las tres especies de encinos. Las determinaciones se realizaron por duplicado.

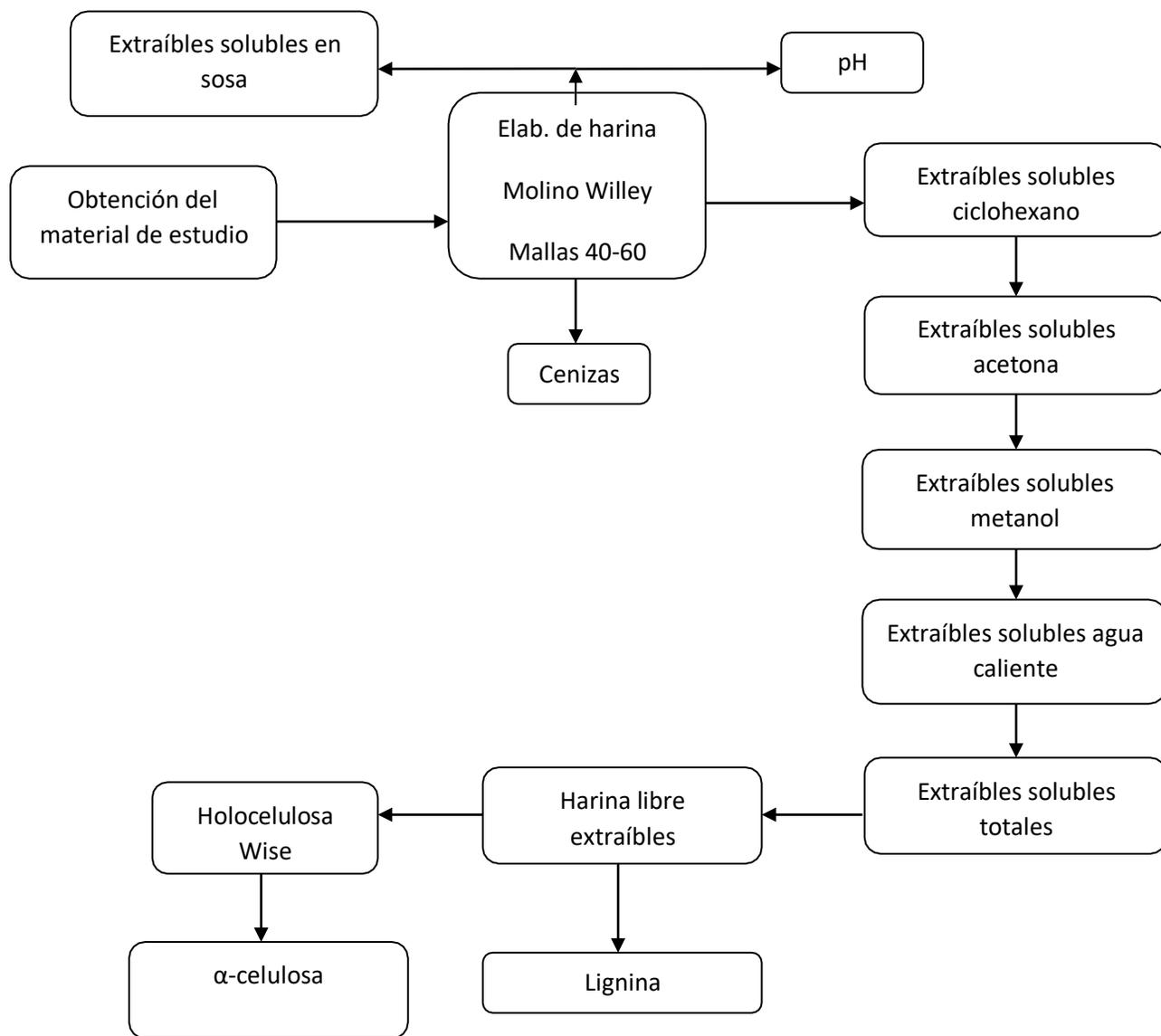
- Variabilidad de pH en las especies -----Sanderman y Rothkamm (1951).
- Contenido de cenizas----- T 211 om-93 (TAPPI 2000).
- Solubilidad en solventes orgánicos-----Extracción sucesiva con solventes de polaridad creciente.
- Solubilidad en sosa (NaOH) 1% ----- T 212 om-98 (TAPPI 2000).
- Lignina----- Runkel y Wilke (1951).
- Holocelulosa ----- Wise (1946).
- $\alpha$ -celulosa----- Método estándar ASTM D1 103-60 (1997).

Antes de iniciar el análisis químico, se determinó el contenido de humedad del material estudiado, el cual se realizó con la técnica de deshidratación a 103°C. El material que se utilizó para determinar la humedad no se utilizó para los ensayos químicos (Figura 9). La preparación del material para los ensayos se hizo siguiendo la norma T 264 cm-97 (TAPPI, 2000).



**Figura 9.** Determinación de contenido de humedad, a) Muestras, b) Deshidratado.

En seguida, se muestra el diagrama general para desarrollar la presente investigación (figura 10);



**Figura 10.** Diagrama general para realización del análisis químico de las especies.

### 5.2.1. Determinación del pH en las especies

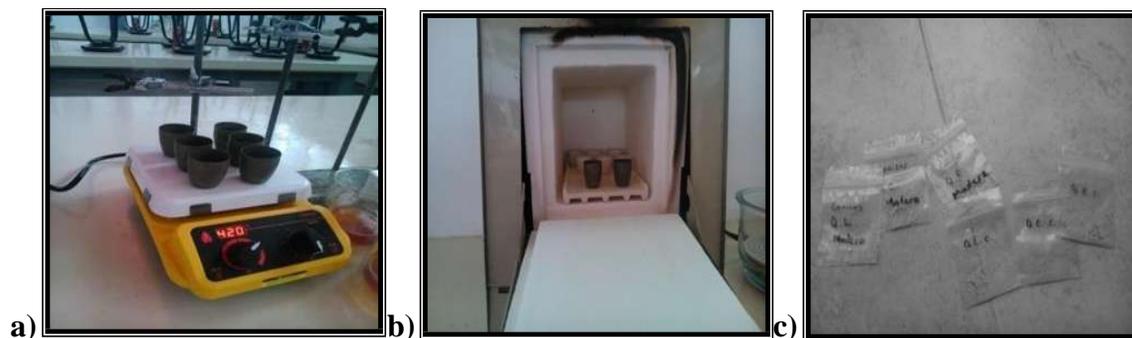
La determinación del pH (Moisture pH; MpH) se realizó de acuerdo al método Sanderman y Rothkamm (1959), en el cual se tomó la muestra y se colocó en un vaso de precipitados, se le adicionaron 20 ml de agua destilada y se procedió a tomar lecturas con un potenciómetro, a los 5 minutos, a las 4 horas, 24 horas y 48 horas consecutivamente (Figura 11).



**Figura 11.** a) Medición de pH con potenciómetro.

### 5.2.2. Determinación del contenido de cenizas

El contenido de cenizas se efectuó de manera gravimétrica, después de quemar cuidadosamente las muestras en crisoles de níquel sobre placas de calentamiento, se calcinó en una mufla a 525°C, de acuerdo a la norma T 211 om-93 (TAPPI, 2000) (Figura 12).



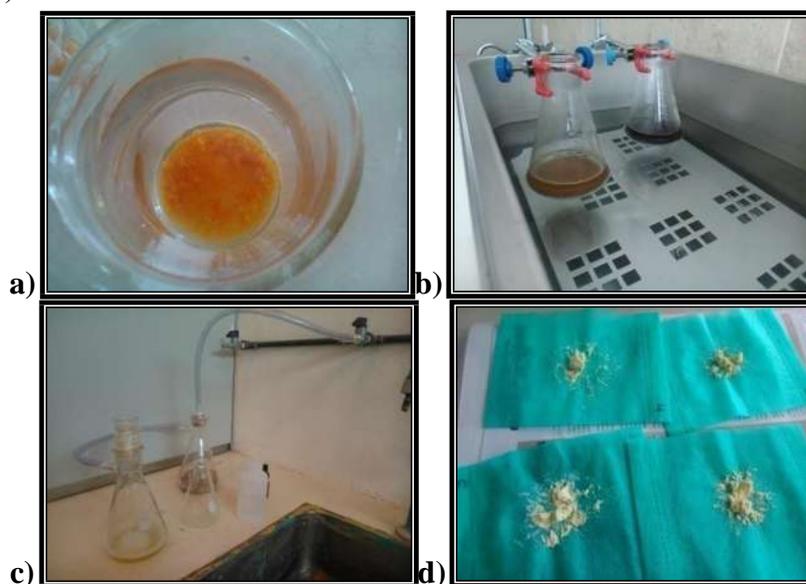
**Figura 12.** Secuencia efectuada para obtener el contenido de cenizas, a) Quemado, b) Calcinado, C) Muestras de cenizas.

### 5.2.2.1. Análisis cualitativo y cuantitativo de las cenizas

El análisis cualitativo y cuantitativo de las cenizas se determinó en un espectrómetro de dispersión de rayos X, acoplado a un Microscopio Electrónico de Barrido, las condiciones para el análisis fueron de 20 kV y 8.5 seg.

### 5.2.3. Solubilidad en sosa (NaOH) al 1%

Se obtuvo el porcentaje de solubilidad en sosa, agregando a 2.0 g de muestra a 100 ml de NaOH al 1% y se llevaron inmediatamente a un baño de agua por un tiempo de 1 hora, se agitó el contenido tres veces en periodos de 10, 15 y 25 minutos. Después del periodo del baño de agua, las muestras se filtraron y lavaron con agua caliente, posteriormente se adicionaron 50 ml de ácido acético al 10 % y se continuó lavando hasta que las muestras se encontraron neutras (Figura 13). Este proceso se efectuó siguiendo la norma T 211 om-98 (TAPPI, 2000).



**Figura 13.** Proceso para determinación del porcentaje de solubilidad en sosa (NaOH) al 1%, a) Muestra, b) Baño María, c) Filtrado y Lavado, d) Muestras.

### 5.2.4. Solubilidad en solventes orgánicos

La obtención de extractos se realizó utilizando los siguientes solventes de polaridad ascendente: ciclohexano, acetona, metanol y agua caliente, de manera sucesiva. Para los solventes orgánicos de polaridad ascendente se utilizó el equipo Soxhlet, en el cual las extracciones fueron por periodos de 4 horas.

Para las extracciones en agua caliente se emplearon condensadores durante 4 horas. Una vez que terminó este proceso de extracciones se obtuvo lo que se conoce como "harina libre de extraíbles".

Los extractos fueron colocados en un desecador hasta peso constante y luego se pesaron (Figura 14).



**Figura 14.** Secuencia para la extracción Soxhlet, a) Equipo Soxhlet, b) Extracción con solventes, c) Filtrado, d) Harina libre de extraíbles, e) Extractos en solución, f) Evaporación de solvente, g) Extractos.

#### 5.2.5. Determinación de lignina

El contenido de lignina presente en la madera de desarrolló en apego a la técnica Runkel y Wilke (1951), a la harina de madera libre de extraíbles se le adicionó ácido sulfúrico al 72 % y ácido bromhídrico al 40 %, se agitó y después se dejó reposar por 2 horas, posteriormente se le adicionaron 100 ml de agua destilada y se dejó hervir por 5 minutos,

finalmente se filtró con ayuda de embudos Buchner y se lavaron las muestras en repetidas ocasiones para que no quedaran residuos de ácido. Para finalizar se llevaron a peso constante en una estufa a 103° C (Figura 15).



**Figura 15.** Secuencia para determinar el contenido de lignina, a) Preparación de ácido sulfúrico al 72 %, b) Preparación de ácido bromhídrico al 40 %, c) Muestra en solución, d) Ebullición de muestras y solución, e) Filtrado y lavado, f) Lignina anhidra.

#### 5.2.6. Determinación de holocelulosa

Mediante el método Wise (1946) se determinó el porcentaje de holocelulosa contenida en la madera. Primero se colocaron las muestras en matraces Erlenmeyer en los que se adicionó 0.3 gr de una solución de clorito de sodio y 10 gotas de ácido acético, se mantuvieron los matraces tapados y en reacción en baño de agua a 75°C. Posteriormente se añadió cada hora clorito de sodio y ácido acético, hasta que se completó un tiempo de cuatro horas. Después se vertieron las muestras en filtros de fondo poroso con vacío para agilizar el filtrado, se procedió a lavarlas en repetidas ocasiones con agua destilada fría y acetona, finalmente se llevaron las muestras a una estufa a 40° C hasta peso constante (Figura 16).

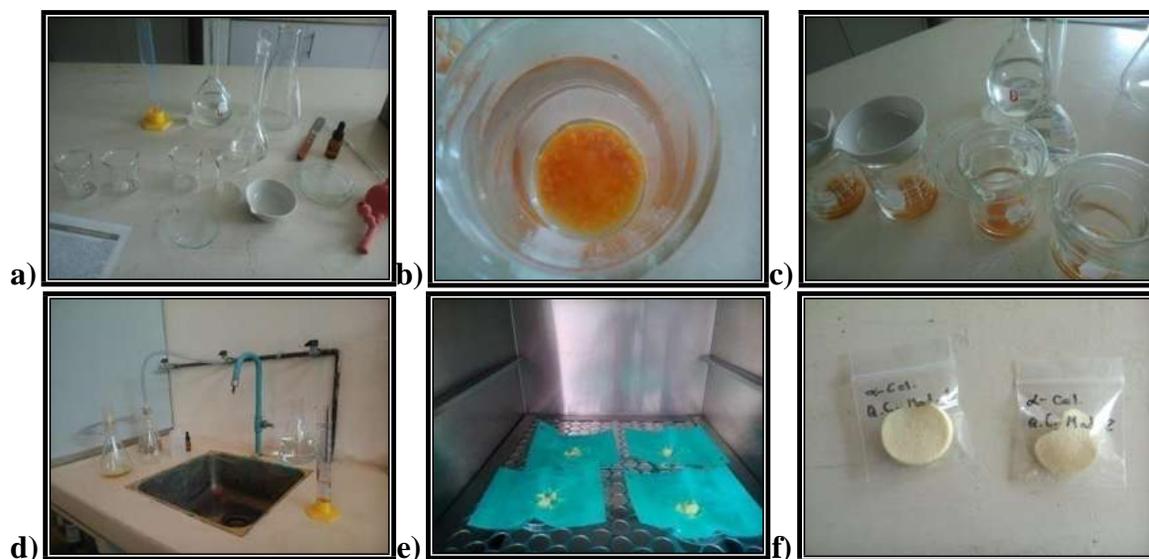


**Figura 16.** Proceso para obtención de holocelulosa, a) Muestra, b) Clorito de sodio y ácido acético, c) Baño María, d) Agitación, e) Filtrado y lavado mediante vacío, f) Secado a peso constante, g) Holocelulosa.

### 5.2.7. Determinación de $\alpha$ -celulosa

Para determinar el contenido de  $\alpha$ -celulosa en la madera se utilizó el método estándar ASTM D1 103-60 (1997) el cual consiste en medir 25 ml de sosa al 17.5% en una probeta graduada a una temperatura de 20 °C. Después se agregaron 10 ml de la solución a la muestra de holocelulosa previamente colocada en un vaso de precipitados de 250 ml, el cual se mantuvo a 20 °C en un baño de agua, después se cubrió con un vidrio de reloj. Después de 5 y 10 minutos se agregó 5 y 10 ml más de sosa respectivamente. Se dejó reposar la mezcla a 20 °C durante 30 minutos. La mezcla se lavó con 100 ml de solución de sosa (8.3 % a 20 °C) y después con agua destilada. A continuación, se vertió 15 ml de ácido acético al 10%. Se sometió la celulosa al tratamiento ácido por 3 minutos y después se succionó todo el ácido acético. Después se volvió a lavar con agua destilada y se repitió el

lavado hasta que la celulosa quedó libre de ácido. Por último, se secó a una temperatura de 100 a 105 °C hasta peso constante con el que se determinó el contenido de  $\alpha$ -celulosa (Figura 17).



**Figura 17.** Proceso para obtención de  $\alpha$ -celulosa, a) Reactivos, b) Muestra, c) Baño a 20°C, d) Filtrado y lavado, e) Secado, f)  $\alpha$ -celulosa.

### 5.3. Propiedades mecánicas

Las informaciones de las propiedades mecánicas de las especies en estudio se obtuvieron de Chávez (2014) que forma parte del Proyecto Caracterización tecnológica de 3 especies de encino de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán CIC 2012-2013 y PROMEP 2010.

Las propiedades mecánicas estudiadas fueron la carga máxima ( $P_{\max}$ ), la resistencia máxima ( $\sigma_{bw}$ ) y el módulo de elasticidad ( $E_w$ ) en flexión estática; y la carga máxima ( $P_{\max}$ ), la resistencia máxima ( $\sigma_w$ ) y el módulo de elasticidad ( $E_w$ ) en compresión paralela.

### 5.4. Análisis estadístico.

El análisis de regresión se realizó con el programa Statistica ver. 6. Se realizaron correlaciones simples entre las características químicas: pH, cenizas, solubilidad en sosa (NaOH) al 1%, extraíbles solubles en ciclohexano, extraíbles solubles en acetona, extraíbles solubles en metanol y extraíbles solubles en agua, holocelulosa,  $\alpha$ -celulosa y lignina; y las propiedades mecánicas descritas en el apartado anterior.

## 6. RESULTADOS Y ANALISIS

### 6.1. Análisis químico de las especies

Los resultados obtenidos del análisis químico de las especies de encino de la presente investigación se muestran en el cuadro 1.

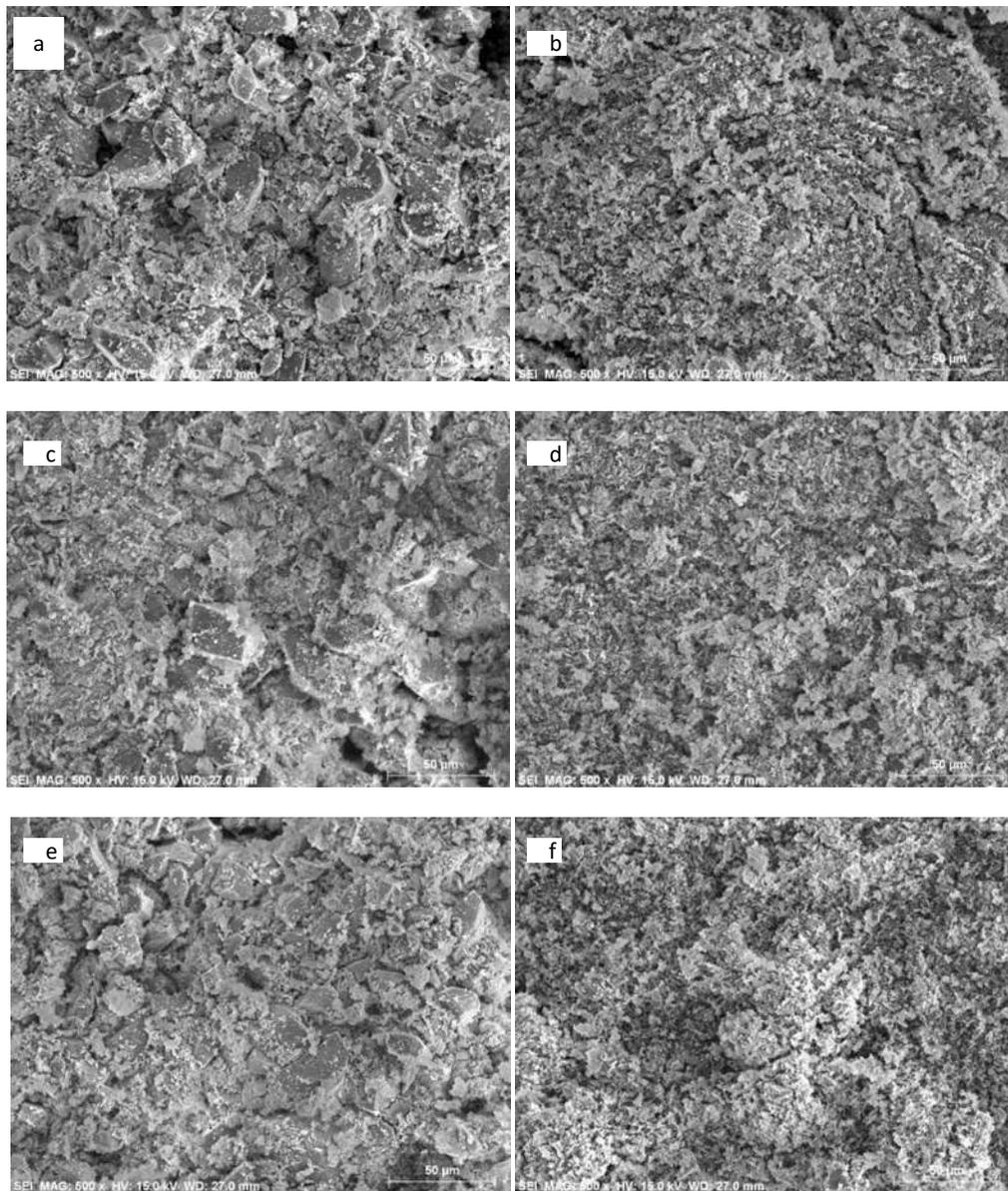
**Cuadro 1.** Composición química de tres especies de encinos.

Determinación	<i>Q. candicans</i>		<i>Q. laurina</i>		<i>Q. rugosa</i>	
	madera	corteza	madera	corteza	madera	corteza
pH	9.69(±0.10)	8.21(±0.26)	9.22(±0.17)	8.31(±0.21)	8.24(±0.16)	9.71(±0.16)
Sustancias inorgánicas <sup>1</sup>	0,62(±0.03)	4.75(±0.22)	0.31(±0.03)	4.17(±0.43)	0.52(±0.00)	8.03(±0.06)
Solubilidad en sosa al 1 %	19.32(±0.53)	22.98(±0.75)	20.62(±0.40)	21.24(±0.33)	18.05(±0.28)	25.82(±1.03)
Extraíbles totales <sup>1</sup>	13.96(±0.18)	17.95(±0.07)	19.12(±0.63)	22.38(±0.78)	17.61(±0.15)	24.25(±0.18)
Ciclohexano <sup>1</sup>	0.56(±0.25)	1.29(±0.24)	2.33(±0.19)	1.55(±0.00)	0.50(±0.03)	1.16(±0.04)
Acetona <sup>1</sup>	2.68(±0.04)	5.25(±0.21)	3.14(±0.07)	5.67(±0.40)	1.94(±0.26)	2.25(±0.11)
Metanol <sup>1</sup>	4.46(±0.63)	7.11(±0.34)	5.66(±0.42)	10.38(±0.04)	5.62(±0.41)	8.48(±0.19)
Agua caliente <sup>1</sup>	6.26(±1.02)	4.30(±0.30)	7.99(±0.09)	4.78(±0.34)	9.55(±0.55)	12.35(±0.15)
Lignina <sup>2</sup>	22.79(±0.33)	20.06(±0.16)	17.80(±0.20)	19.09(±0.22)	19.87(±1.23)	21.60(±0.34)
Holocelulosa <sup>2</sup>	74.30(±0.74)	74.27(±0.16)	76.54(±0.12)	73.08(±0.39)	78.98(±1.12)	69.89(±0.17)
α-celulosa <sup>2</sup>	56.54(±0.98)	53.83(±2.57)	54.45(±1.90)	50.44(±1.18)	55.83(±0.40)	59.10(±2.22)

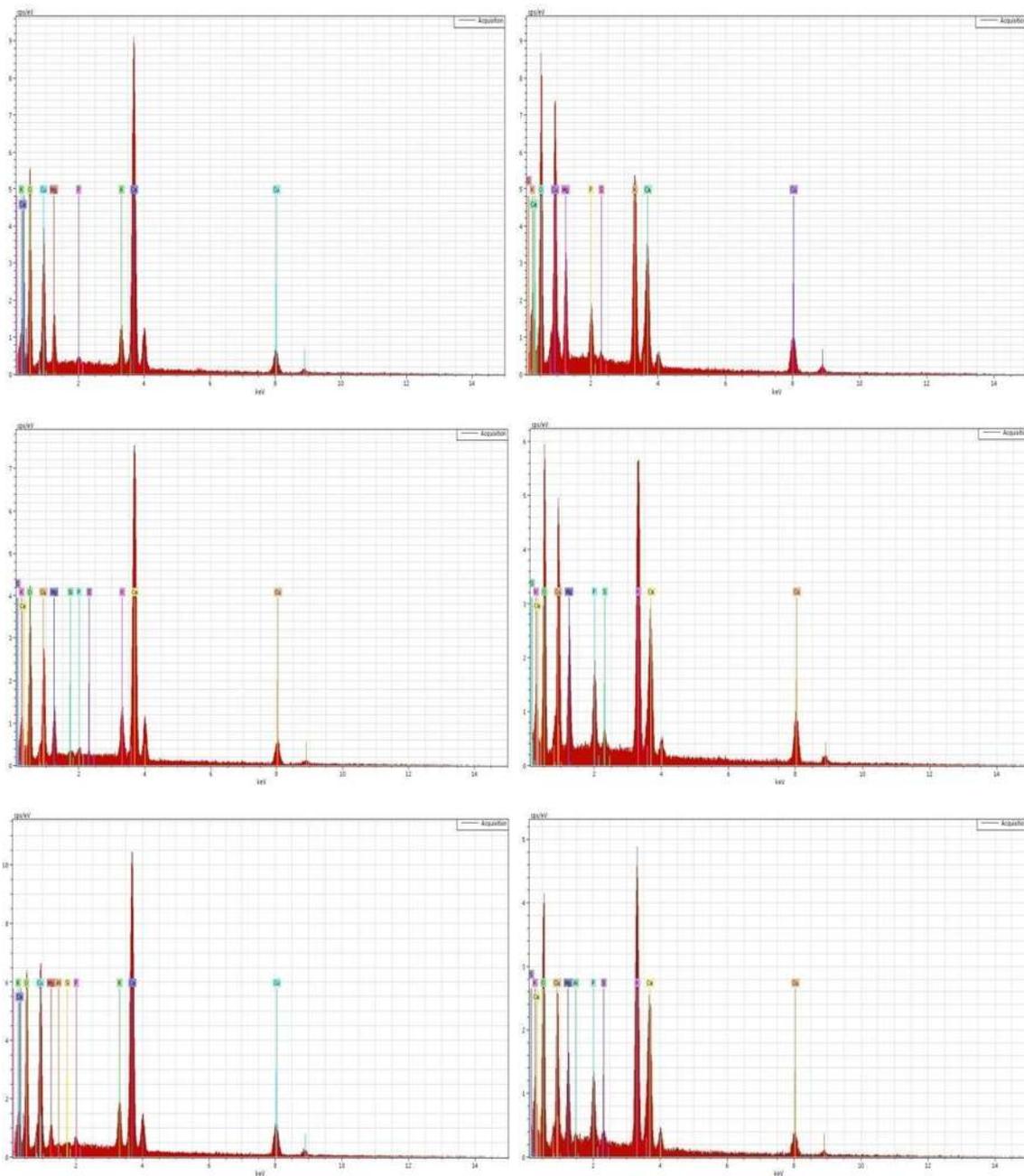
<sup>1</sup>Contenido en porcentaje con base en madera libre de humedad

<sup>2</sup>Contenido en porcentaje con base en madera libre de humedad y extraíbles

En el cuadro 2 y las figuras 18 y 19 se muestran los resultados obtenidos en el análisis cualitativo y cuantitativo de las diferentes zonas de las especies en estudio.



**Figura 18.** Micrografías de las sustancias inorgánicas. *Q. rugosa*: a) corteza, b) madera. *Q. laurina*: c) corteza, d) madera. *Q. candicans*: e) corteza, f) madera. 500 x.



**Figura 19.** Resultados del análisis experimental obtenido por la espectroscopia de energía dispersa en las especies estudiadas. *Q. rugosa*: a) corteza, b) madera. *Q. laurina*: c) corteza, d) madera. *Q. candicans*: e) corteza, f) madera. 200 x.

**Cuadro 2.** Elementos químicos en las cenizas en porcentaje.

Elementos Químicos	<i>Q. rugosa</i>		<i>Q. laurina</i>		<i>Q. candidans</i>	
	madera	corteza	madera	corteza	madera	corteza
Magnesio (Mg)	14.0534	5.1571	12.4260	4.9591	8.5890	1.9472
Fosforo (P)	6.6878	0.5824	7.1535	0.2346	7.7922	0.2966
Potasio (K)	43.5039	8.4170	48.5450	9.7990	46.6676	9.7898
Calcio (Ca)	35.0537	85.8432	30.3283	84.9554	35.6266	87.9641
Azufre (S)	0.7008		1.5470	0.0518	0.6641	
Silicio (Si)				0.000003		0.0005
Aluminio (Al)					0.6601	0.0017

## 6.2. Propiedades mecánicas

A continuación, se muestran los resultados de propiedades mecánicas reportados por Chávez (2014) (cuadro 3), y los coeficientes de correlación entre las características químicas y las propiedades mecánicas consultadas (cuadro 4), las cuales fueron la carga máxima ( $P_{max}$ ), la resistencia máxima ( $\sigma_{bw}$ ) y el módulo de elasticidad ( $E_w$ ) en flexión estática; y la carga máxima ( $P_{max}$ ), la resistencia máxima ( $\sigma_w$ ) y el módulo de elasticidad ( $E_w$ ) en compresión paralela.

**Cuadro 3.** Resultados de propiedades mecánicas reportados por Chávez (2014).

		<i>Q. rugosa</i>	<i>Q. laurina</i>	<i>Q. candidans</i>
<b>Flexión</b>	$P_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	2903.76 ( $\pm$ 411.61)	2731.50 ( $\pm$ 534.51)	4955.59 ( $\pm$ 632.20)
	$\sigma_{bw}$ (MPa)	238.48 ( $\pm$ 37.27)	176.94 ( $\pm$ 29.38)	259.02 ( $\pm$ 37.02)
	$E_w$ (GPa)	1.55 ( $\pm$ 0.31)	1.53 ( $\pm$ 0.26)	2.08 ( $\pm$ 0.29)
<b>Compresión</b>	$P_{max}$ (MPa)	588.38 ( $\pm$ 52.81)	734.20 ( $\pm$ 262.23)	626.85 ( $\pm$ 100.50)
	$\sigma_w$ (MPa)	229295.28 ( $\pm$ 21804.47)	293995.57 ( $\pm$ 105984.37)	270278.18 ( $\pm$ 47380.11)
	$E_w$ (MPa)	89400.16 ( $\pm$ 26437.73)	171416.77 ( $\pm$ 66034.38)	123966.44 ( $\pm$ 32768.29)

**Cuadro 4.** Coeficientes de correlación entre las características químicas y las propiedades mecánicas en madera de encinos.

Análisis Químico	Flexión			Compresión		
	$P_{max}$	$\sigma_{bW}$	$E_w$	$P_{max}$	$\sigma_w$	$E_w$
pH	0.2549	0.1702	<b>0.5079</b>	<b>0.5495</b>	0.2880	<b>0.5019</b>
% Cenizas	<b>0.7416</b>	<b>0.7042</b>	0.4527	-0.0063	-0.3316	-0.4135
NaOH 1%	-0.3619	-0.3946	0.0316	0.4037	0.4571	<b>0.6745</b>
Ciclohexano	<b>-0.6371</b>	<b>-0.6292</b>	-0.2664	0.1945	0.4266	<b>0.5822</b>
Acetona	-0.2720	-0.3162	0.1224	0.4571	0.4549	<b>0.6862</b>
Metanol	<b>-0.5813</b>	<b>-0.5128</b>	<b>-0.5495</b>	-0.3000	0.0316	-0.0316
Agua caliente	-0.3924	-0.3065	<b>-0.5585</b>	-0.4969	-0.1897	-0.3646
Lignina	<b>0.7422</b>	<b>0.6833</b>	<b>0.5576</b>	0.1549	-0.2213	-0.2213
Holocelulosa	-0.3674	-0.2828	<b>-0.5540</b>	<b>-0.5147</b>	-0.2144	-0.4000
$\alpha$ -celulosa	<b>0.5244</b>	<b>0.4969</b>	0.3240	0.0028	-0.2302	-0.2846

### 6.3. Análisis estadístico

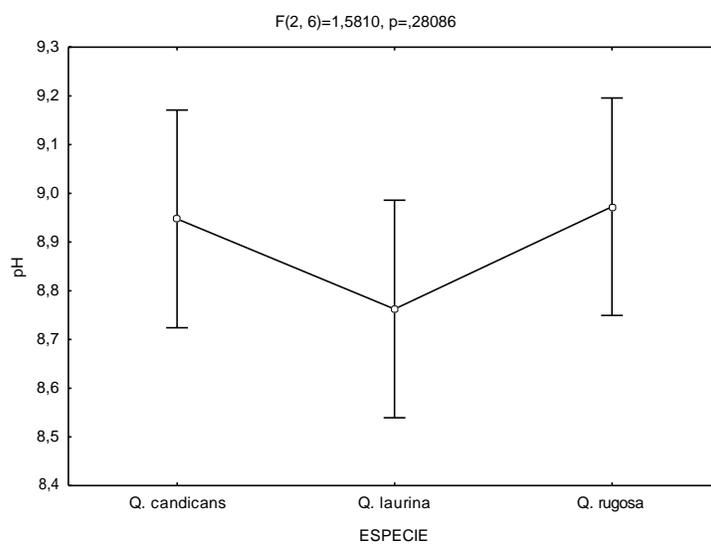
En seguida, se muestran los análisis de varianza de los componentes químicos de las tres especies estudiadas.

#### 6.3.1. pH en las especies estudiadas

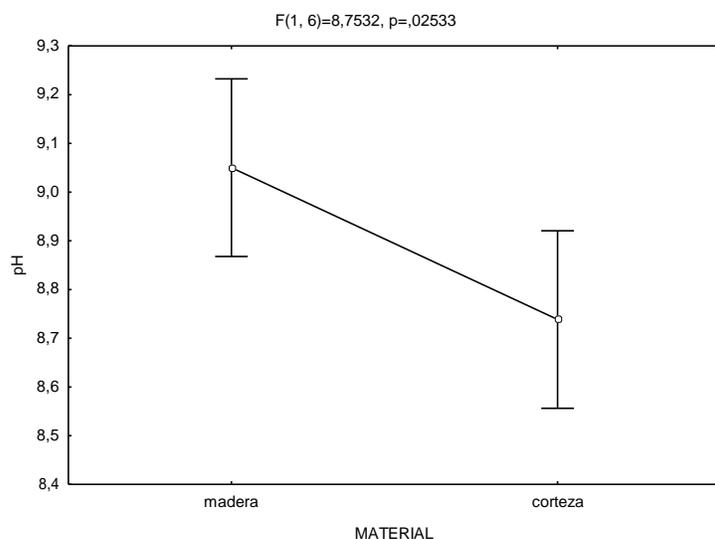
El Anova para el pH en las tres especies en estudio aparece en el cuadro 4. Se muestra que el factor material y la interacción especie x material tienen diferencia estadística en el pH. Las figuras 20, 21 y 22 muestran dichos resultados.

**Cuadro 5.** Anova para el efecto pH.

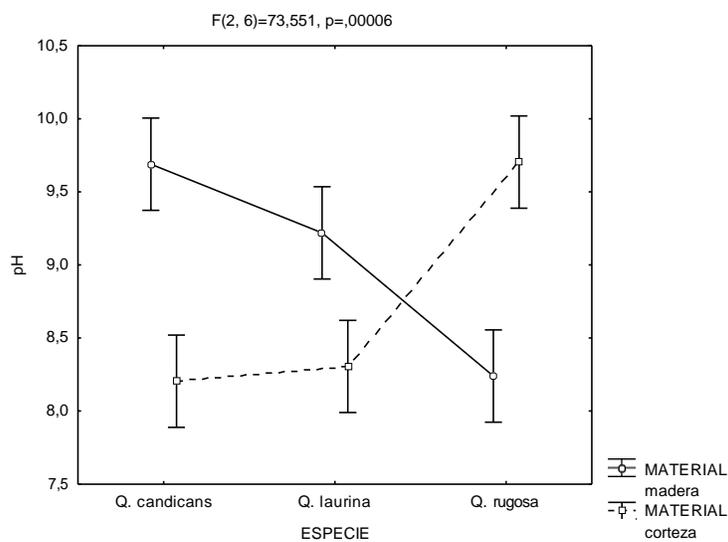
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	p
<b>ESPECIE</b>	0.1053	2	0.0526	1.58	0.280860
<b>MATERIAL</b>	0.2914	1	0.2914	8.75	0.025330
<b>ESPECIE*MATERIAL</b>	4.8973	2	2.4486	7.55	0.000060
<b>Error</b>	0.1998	6	0.0333		



**Figura 20.** Efecto de las especies sobre el pH.



**Figura 21.** Efecto del material sobre el pH.



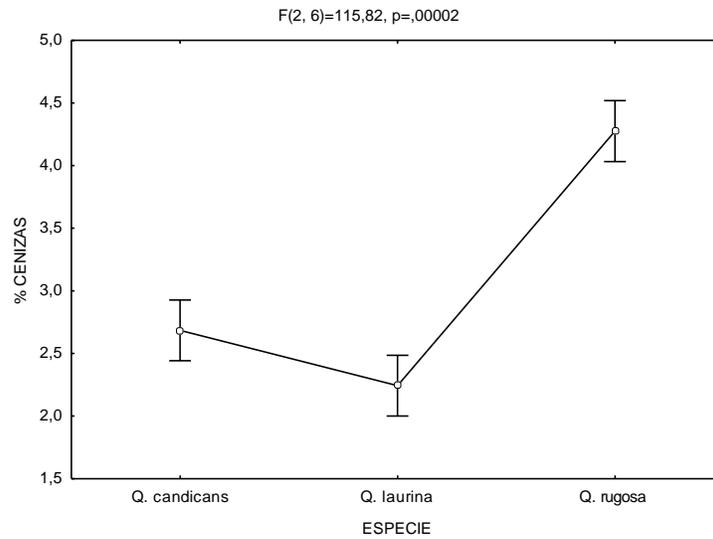
**Figura 22.** Efecto de las tres especies y el material sobre el pH.

### 6.3.2. Porcentaje de cenizas

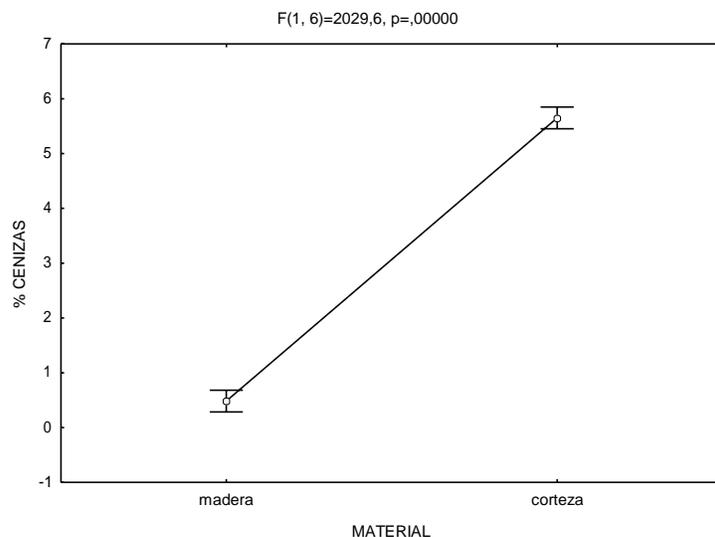
A continuación, se muestra el análisis de varianza para el porcentaje de cenizas en las muestras de madera y corteza de las especies en estudio (cuadro 5), e indica que el nivel de significancia calculado (Valor-p) para especie, material e interacción de estos dos factores es menor de 0.05, por lo que la hipótesis nula se rechaza, es decir, estos factores y su interacción, sí tienen influencia en la variable de respuesta porcentaje de cenizas. En las figuras 23, 24 y 25, se observan estos resultados.

**Cuadro 6.** Anova para el porcentaje de cenizas.

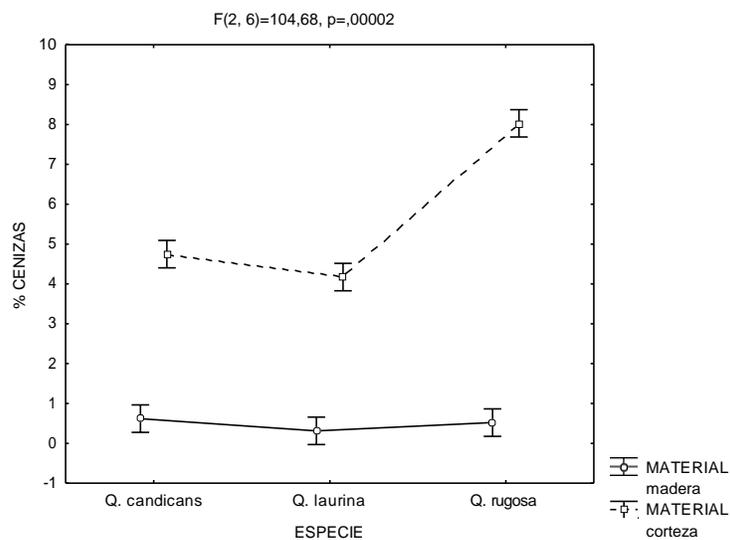
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	p
<b>ESPECIE</b>	9,1438	2	4,5719	115,824	0,000016
<b>MATERIAL</b>	80,1133	1	80,1133	2029,582	0,000000
<b>ESPECIE*MATERIAL</b>	8,2643	2	4,1322	104,684	0,000022
<b>Error</b>	0,2368	6	0,0395		



**Figura 23.** Efecto de las especies sobre el porcentaje de cenizas.



**Figura 24.** Efecto del material sobre el porcentaje de cenizas.



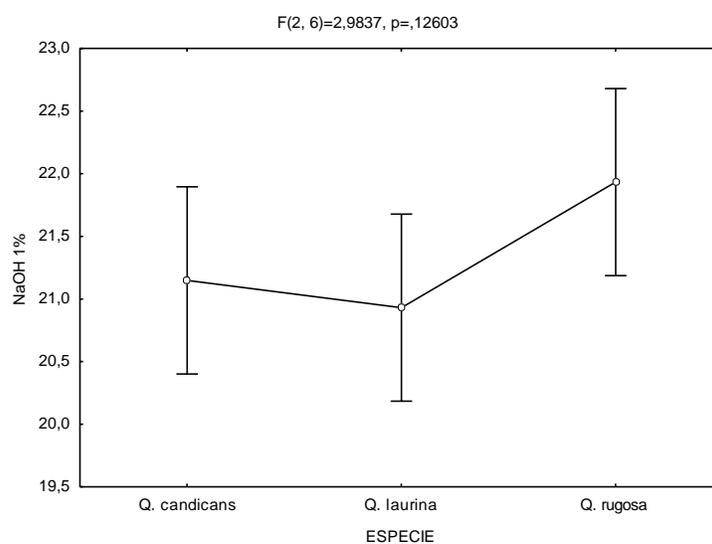
**Figura 25.** Efecto de las especies y el material sobre el porcentaje de cenizas.

### 6.3.3. Solubilidad en NaOH al 1%

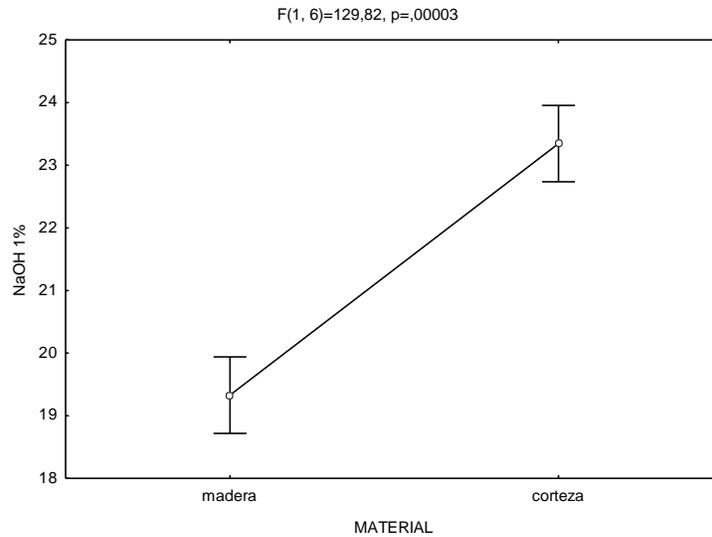
El análisis de varianza (Anova) para la solubilidad en NaOH al 1% en las tres especies en estudio se muestra en el cuadro 6. Se observa que el factor especie y la interacción especie\*material tienen diferencia estadística en la solubilidad en NaOH al 1%. Las figuras 26, 27 y 28 muestran dichos resultados.

**Cuadro 7.** Anova para la solubilidad en NaOH al 1%.

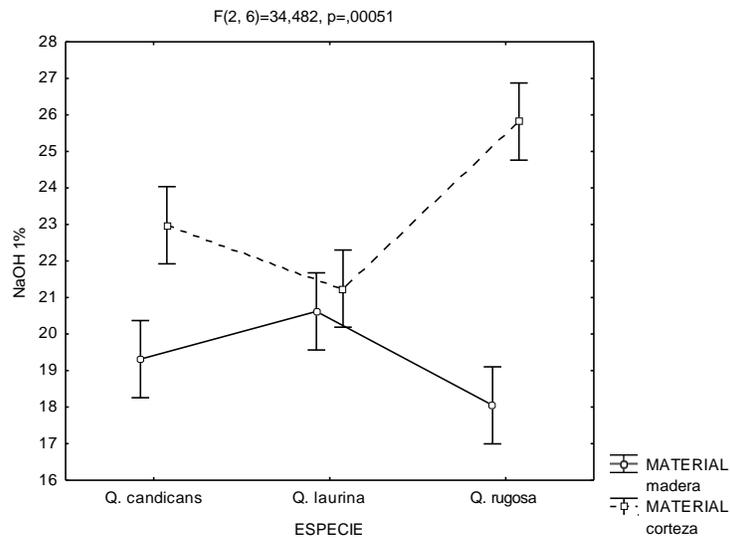
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	p
<b>ESPECIE</b>	2,225	2	1,112	2,98	0,126027
<b>MATERIAL</b>	48,401	1	48,401	129,82	0,000027
<b>ESPECIE*MATERIAL</b>	25,711	2	12,856	34,48	0,000513
<b>Error</b>	2,237	6	0,373		



**Figura 26.** Efecto de las especies sobre la solubilidad en NaOH 1%.



**Figura 27.** Efecto del material sobre la solubilidad en NaOH 1%.



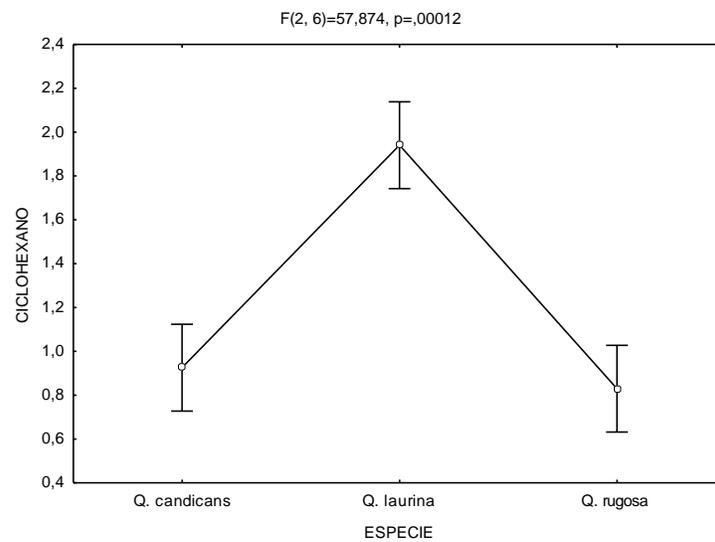
**Figura 28.** Efecto de las especies y el material sobre la solubilidad en NaOH 1%.

#### 6.3.4. Solubilidad en ciclohexano

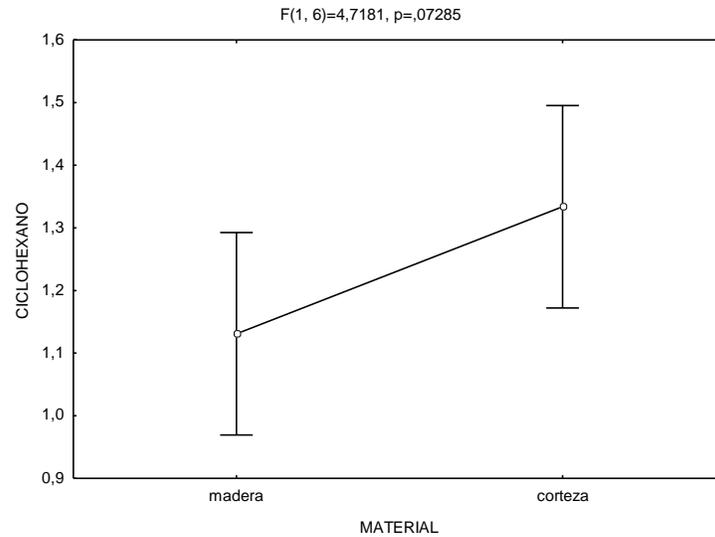
Se observa que, para la solubilidad en ciclohexano, su análisis de varianza en las tres especies en estudio (cuadro 7) el factor especie y la interacción especie x material tienen diferencia estadística. Las figuras 29, 30 y 31 muestran dichos resultados.

**Cuadro 8.** Anova para la solubilidad en ciclohexano.

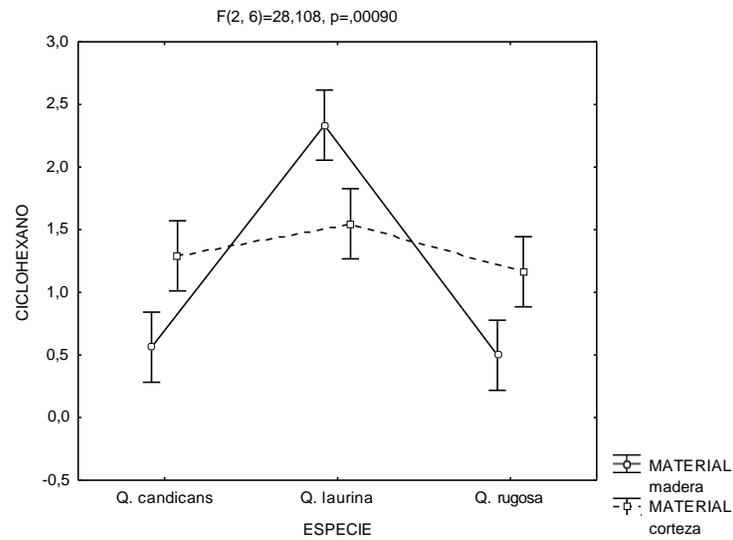
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	p
<b>ESPECIE</b>	3,02994	2	1,51497	57,8738	0,000120
<b>MATERIAL</b>	0,12351	1	0,12351	4,7181	0,072850
<b>ESPECIE*MATERIAL</b>	1,47157	2	0,73578	28,1079	0,000897
<b>Error</b>	0,15706	6	0,02618		



**Figura 29.** Efecto de las especies sobre la solubilidad en ciclohexano.



**Figura 30.** Efecto del material sobre la solubilidad en ciclohexano.



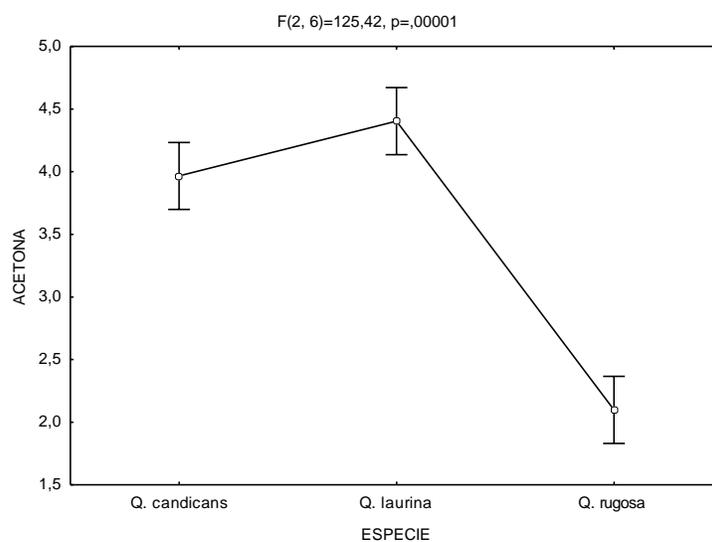
**Figura 31.** Efecto de las especies y el material sobre la solubilidad en ciclohexano.

### 6.3.5. Solubilidad en acetona

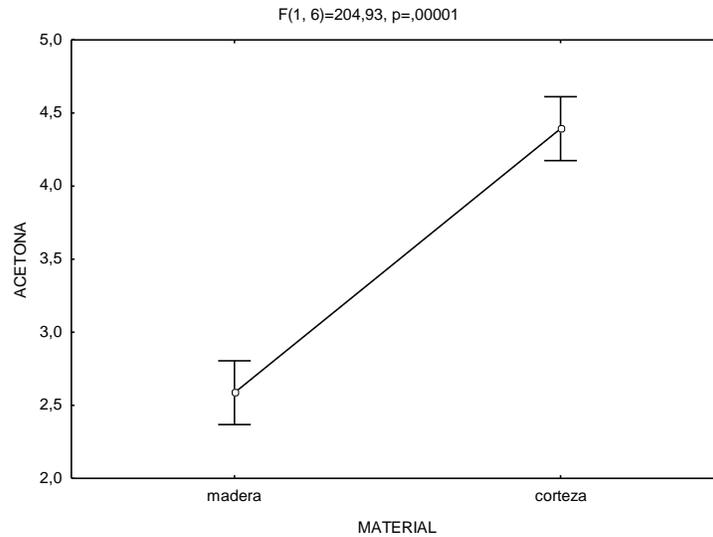
En el cuadro 8 se muestra el análisis de varianza para solubilidad en solventes orgánicos acetona de las muestras de madera y corteza de las especies en estudio, indica que el nivel de significancia calculado (Valor-p) para especie e interacción de especie y material es menor de 0.05, por lo que la hipótesis nula se rechaza, es decir, estos factores y su interacción, si tienen influencia en la variable de respuesta solubilidad en acetona. En las figuras 32, 33 y 34 se observan estos resultados.

**Cuadro 9.** Anova para la solubilidad en acetona.

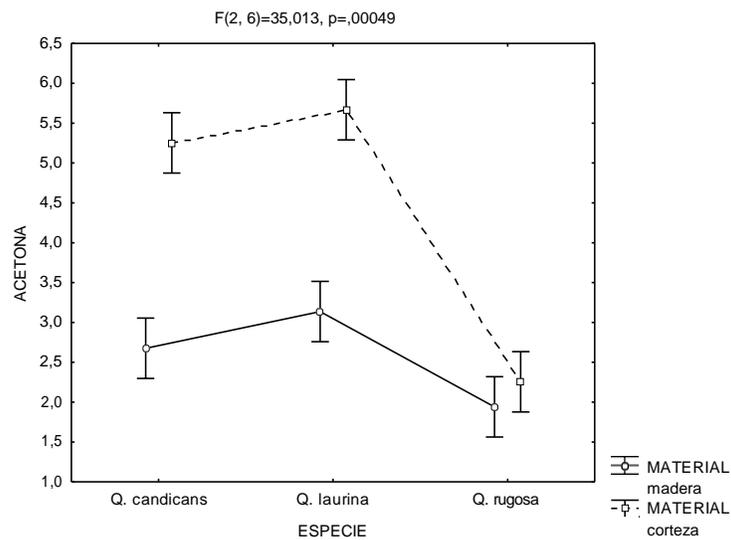
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	p
<b>ESPECIE</b>	11,9884	2	5,9942	125,415	0,000013
<b>MATERIAL</b>	9,7945	1	9,7945	204,927	0,000007
<b>ESPECIE*MATERIAL</b>	3,3468	2	1,6734	35,013	0,000492
<b>Error</b>	0,2868	6	0,0478		



**Figura 32.** Efecto de las especies sobre la solubilidad en acetona.



**Figura 33.** Efecto del material sobre la solubilidad en acetona.



**Figura 34.** Efecto de las especies y el material sobre la solubilidad en acetona.

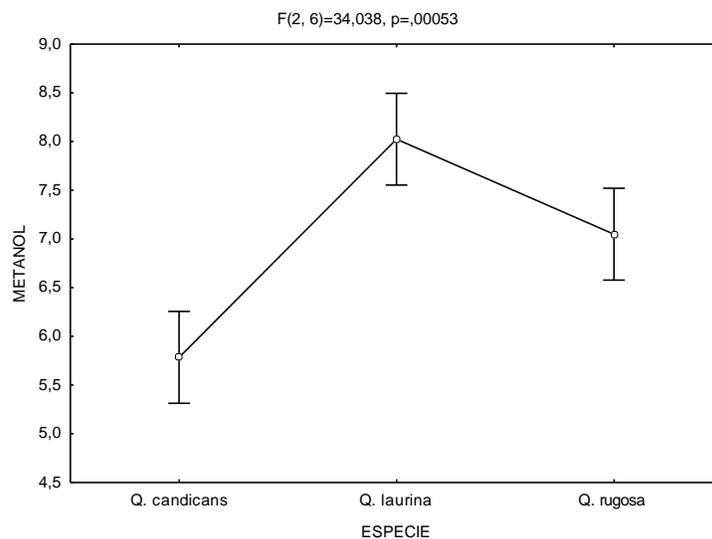
### 6.3.6. Solubilidad en metanol

A continuación, se muestra el análisis de varianza para la solubilidad en metanol de las muestras de madera y corteza de las especies en estudio (cuadro 9), e indica que el nivel de significancia calculado (Valor-p) para material e interacción de especie y material es menor de 0.05, por lo que la hipótesis nula se rechaza, es decir, estos factores y su interacción, si

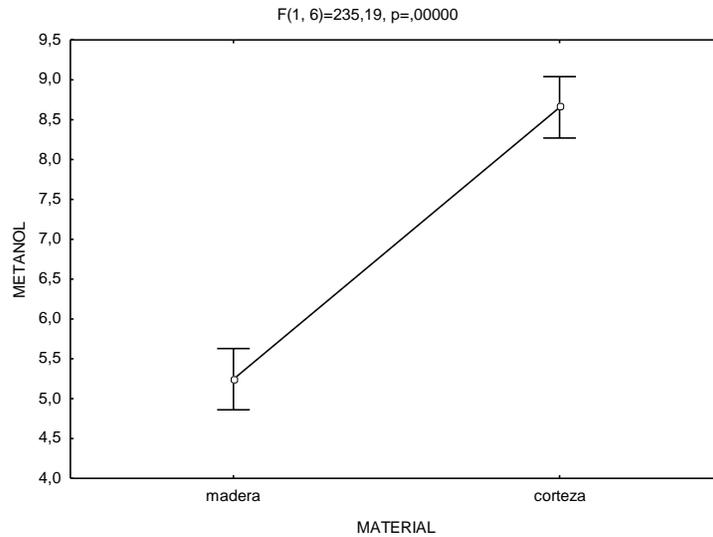
tienen influencia en la variable de respuesta solubilidad en solventes orgánicos metanol. En las figuras 35, 36 y 37 se observan estos resultados.

**Cuadro 10.** Anova para la solubilidad en metanol.

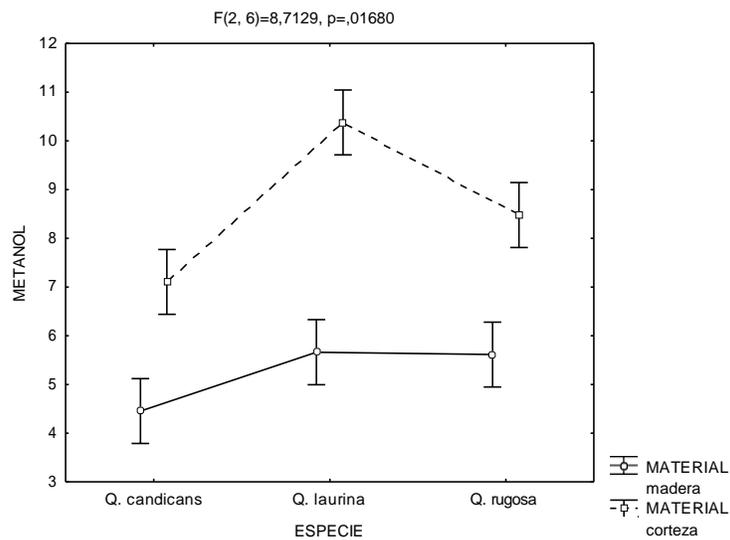
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	p
<b>ESPECIE</b>	10,0937	2	5,0469	34,038	0,000531
<b>MATERIAL</b>	34,8727	1	34,8727	235,193	0,000005
<b>ESPECIE*MATERIAL</b>	2,5838	2	1,2919	8,713	0,016802
<b>Error</b>	0,8896	6	0,1483		



**Figura 35.** Efecto de las especies sobre la solubilidad en metanol.



**Figura 36.** Efecto del material sobre la solubilidad en metanol.



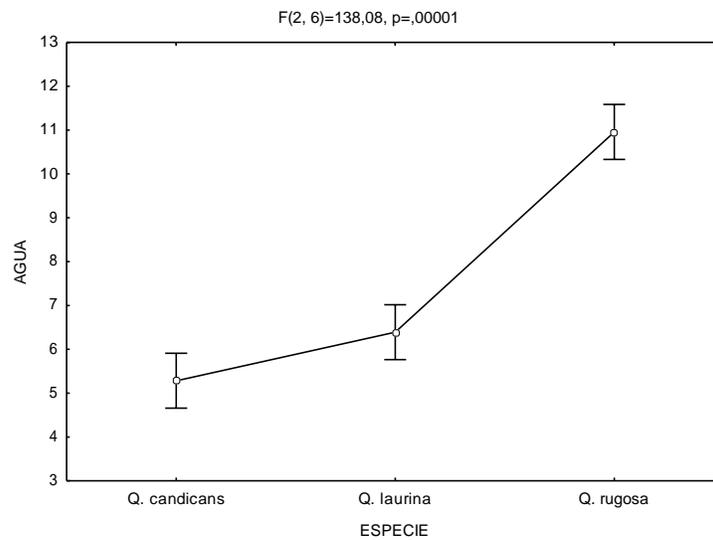
**Figura 37.** Efecto de las especies y el material sobre la solubilidad en metanol.

### 6.3.7. Solubilidad en agua

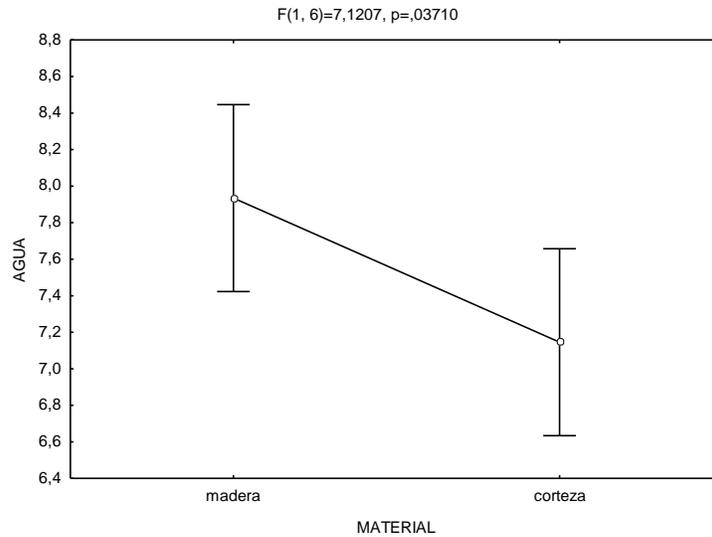
Se observa que, para la solubilidad en agua, su análisis de varianza en las tres especies en estudio (cuadro 10) el factor especie y la interacción especie x material tienen diferencia estadística. Las figuras 38, 39 y 40 muestran dichos resultados.

**Cuadro 11.** Anova para la solubilidad en agua.

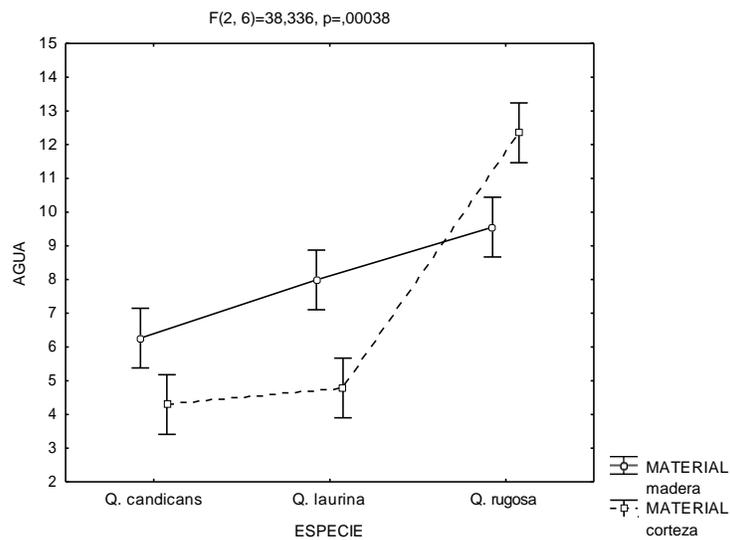
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	p
<b>ESPECIE</b>	72,3850	2	36,1925	138,077	0,000010
<b>MATERIAL</b>	1,8665	1	1,8665	7,121	0,037103
<b>ESPECIE*MATERIAL</b>	20,0970	2	10,0485	38,336	0,000382
<b>Error</b>	1,5727	6	0,2621		



**Figura 38.** Efecto de las especies sobre la solubilidad en agua.



**Figura 39.** Efecto del material sobre la solubilidad en agua.



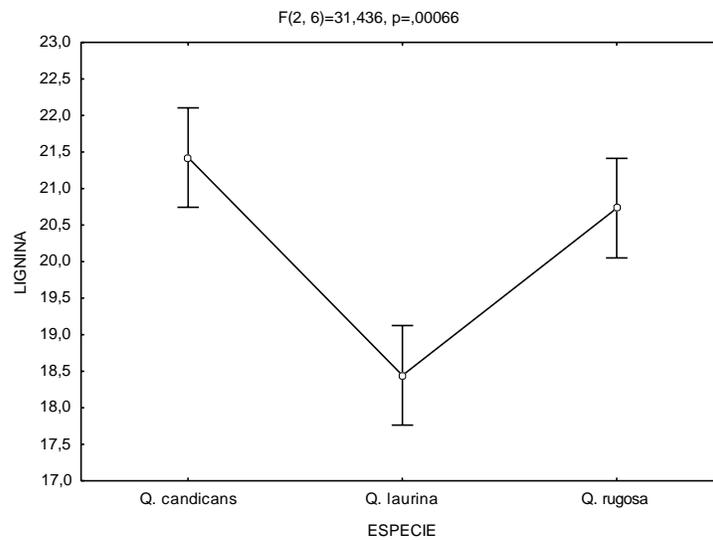
**Figura 40.** Efecto de las especies y el material sobre la solubilidad en agua.

### 6.3.8. Lignina

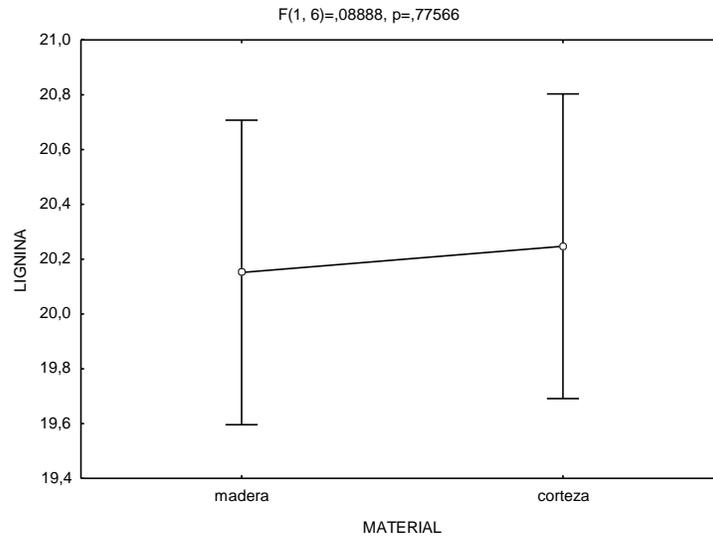
El análisis de varianza para la lignina en las tres especies en estudio aparece en el cuadro 11. Se muestra que el factor especie y la interacción especie x material tienen diferencia estadística en la lignina. Las figuras 41, 42 y 43 muestran dichos resultados.

**Cuadro 12.** Anova para el efecto lignina.

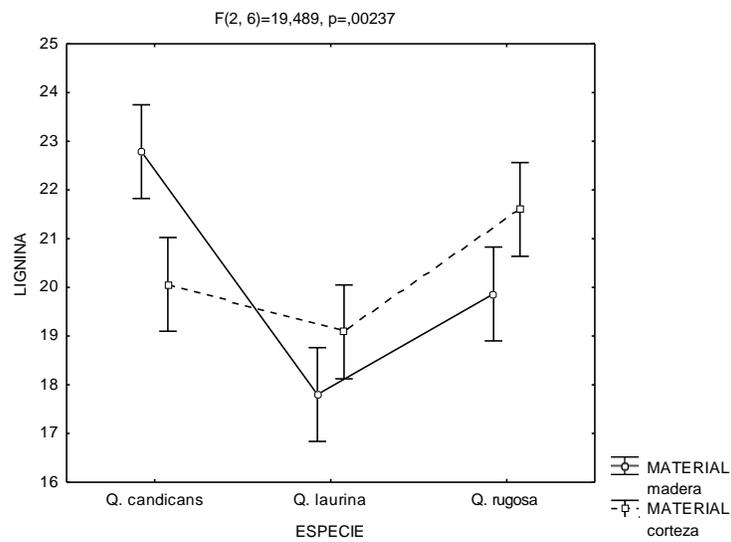
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	p
<b>ESPECIE</b>	19,463	2	9,732	31,44	0,000661
<b>MATERIAL</b>	0,028	1	0,028	0,09	0,775661
<b>ESPECIE*MATERIAL</b>	12,066	2	6,033	19,49	0,002374
<b>Error</b>	1,857	6	0,310		



**Figura 41.** Efecto de las especies sobre la lignina.



**Figura 42.** Efecto del material sobre la lignina.



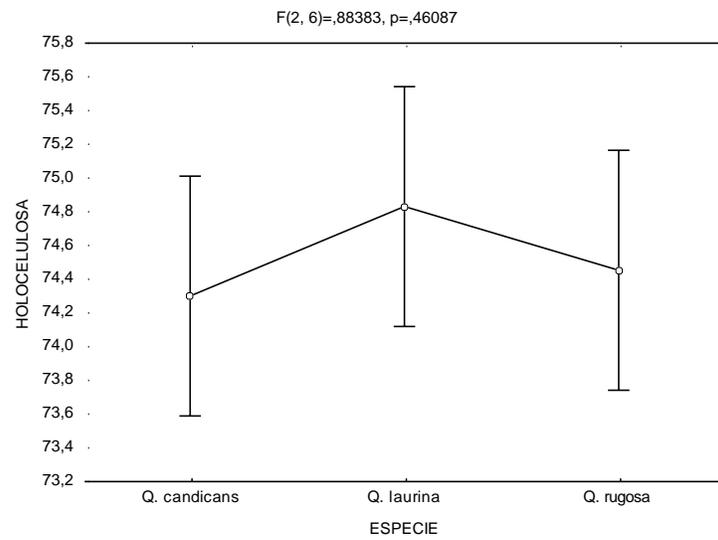
**Figura 43.** Efecto de las especies y el material sobre la lignina.

### 6.3.9. Holocelulosa

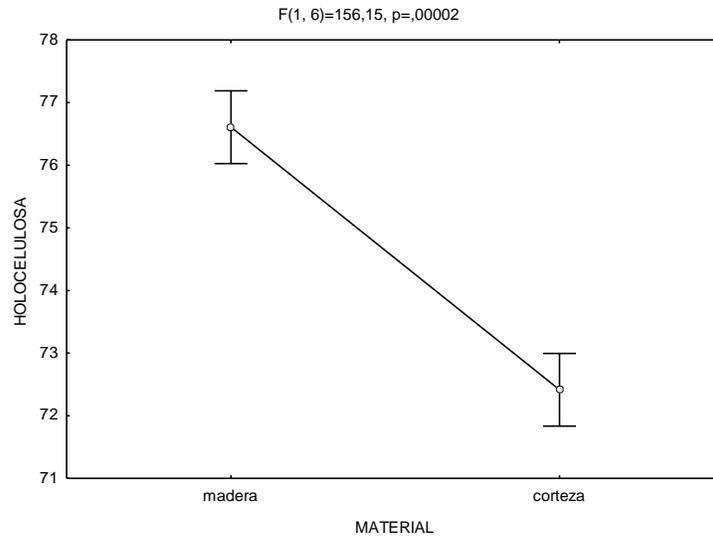
En el cuadro 12 se muestra el análisis de varianza para la holocelulosa en las tres especies en estudio. Se observa que el factor especie y la interacción especie x material tienen diferencia estadística en la holocelulosa. Las figuras 44, 45 y 46 muestran dichos resultados.

**Cuadro 13.** Anova para el efecto holocelulosa.

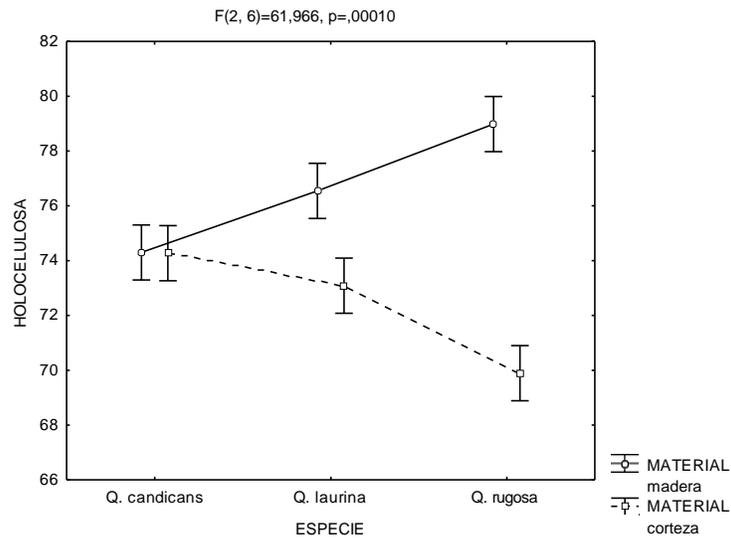
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	p
<b>ESPECIE</b>	0,60	2	0,30	0,9	0,460874
<b>MATERIAL</b>	52,74	1	52,74	156,2	0,000016
<b>ESPECIE*MATERIAL</b>	41,86	2	20,93	62,0	0,000098
<b>Error</b>	2,03	6	0,34		



**Figura 44.** Efecto de las especies sobre la holocelulosa.



**Figura 45.** Efecto del material sobre la holocelulosa.



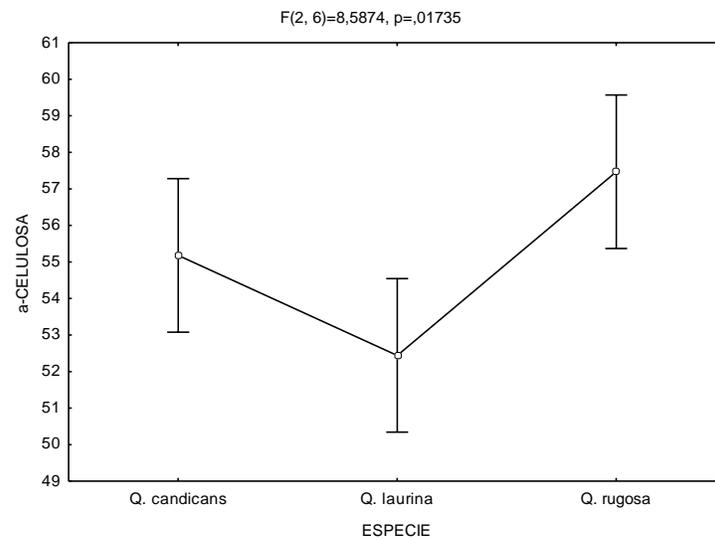
**Figura 46.** Efecto de las especies y el material sobre la holocelulosa.

### 6.3.10. $\alpha$ -celulosa

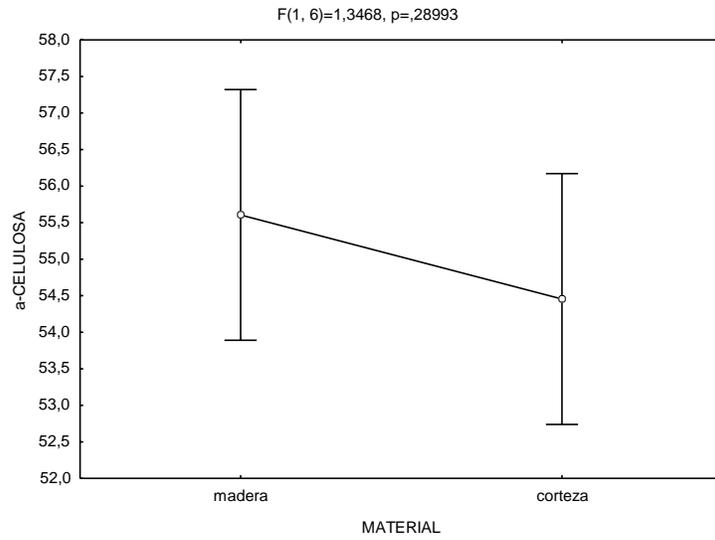
El análisis de varianza para la  $\alpha$ -celulosa en las tres especies en estudio aparece en el cuadro 12. Se muestra que el factor especie y la interacción especie x materiales tienen diferencia estadística en la lignina. Las figuras 47, 48 y 49 muestran dichos resultados.

**Cuadro 14.** Anova para el efecto  $\alpha$ -celulosa.

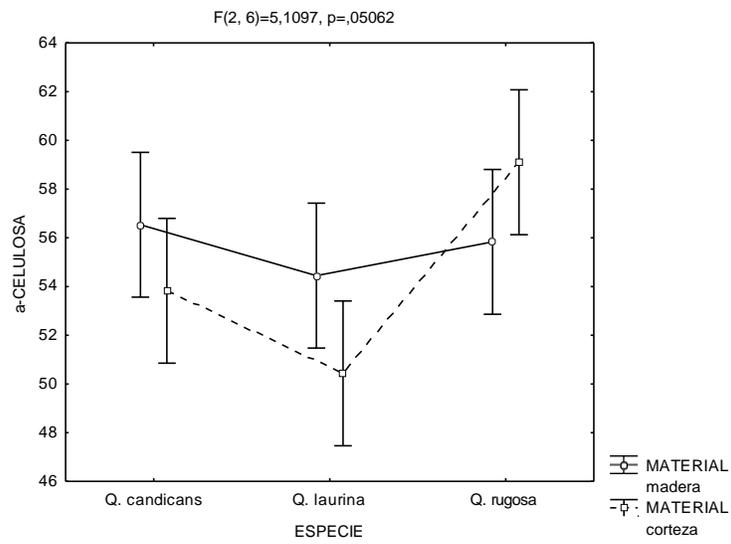
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F	p
<b>ESPECIE</b>	50,66	2	25,33	8,59	0,017354
<b>MATERIAL</b>	3,97	1	3,97	1,35	0,289929
<b>ESPECIE*MATERIAL</b>	30,14	2	15,07	5,11	0,050623
<b>Error</b>	17,70	6	2,95		



**Figura 47.** Efecto de las especies sobre la  $\alpha$ -celulosa.



**Figura 48.** Efecto del material sobre la  $\alpha$ -celulosa.



**Figura 49.** Efecto de las especies y el material sobre la  $\alpha$ -celulosa.

## 7. DISCUSIÓN

El contenido de cenizas en la madera de *Q. candicans* del presente estudio fue de 0.62 % semejante a los reportados por Herrera (2013) de 0.95 % en duramen y 0.55 % en albura y por Rutiaga *et al.* (2000) de 0.9 % en duramen. Mientras que para *Q. laurina* y *Q. rugosa* Herrera (2013) reporta valores mayores (0.75 % para duramen y 0.49 % para albura de la primera especie y 0.63 % para duramen y 0.78 % para albura de la segunda especie) a los obtenidos en este trabajo. Contenidos altos de ceniza para especies del género *Quercus* también fueron obtenidos por Bárcenas *et al.* (2008) (2.67 % a 3.22 %) y Honorato y Hernández (1998) (0.87 % a 1.38 %). No obstante, Fengel y Wegener (1989) reportan valores bajos de cenizas de 0.1 a 0.3 % en *Q. robur* y *Q. rubra* respectivamente.

Respecto al contenido de cenizas en corteza se obtuvieron valores superiores a los reportados por Herrera (2013) de 2.36 % en *Q. candicans* y 3.25 % en *Q. laurina*, pero menores en *Q. rugosa* (9.26 %).

Para el análisis cualitativo y cuantitativo de las cenizas de las diferentes zonas de las especies en estudio. Como se puede observar, el elemento con más presencia en las cenizas de las maderas es el potasio que va desde 43.5 % a 48.54 % y el valor menor fue de azufre de 0.66 % a 1.54 %, en tanto el aluminio que solo se encontró un valor de 0.66 % en *Q. candicans*, valores similares reporta Herrera (2013) que también encuentra mayor presencia de potasio de 46.4 % a 67.37 % y menor de silicio con 0.11 % a 0.85 %.

En cuanto a la corteza, se encontró mayor presencia de calcio con contenidos que van de 84.94 % a 87.96 % y una presencia menor de silicio con un valor de 0.0003 % a 0.0005 %, valor similar al reportado por Herrera (2013), la cual encontró 85.67 % también para calcio y 0.01 % de silicio.

El pH obtenido en las especies en estudio va de 8.48 a 9.69 valores alcalinos, mientras que Honorato y Hernández (2006) reportan valores ácidos en *Q. rugosa* de 4.85, en *Q. oleoides* de 3.94, en *Q. coccolobifolia* de 5.10 y en *Q. durifolia* de 4.95. Esta variación se debe a que el grado de acidez de la madera se ve afectado por la localización en el árbol de la madera analizada, la estación, los factores climáticos, la cantidad y el tipo de extraíbles, y por la presencia de grupos ácidos y ácidos libres (Bernabé-Santiago *et al.*, 2013).

La solubilidad en NaOH al 1% va de 18.05 % a 20.62 % en las especies en estudio, valores ligeramente inferiores a los reportados por Herrera (2013) para las mismas especies (20.28 % a 26.99 %) y por Rowell (1984) (19 % a 24 %).

El contenido de extraíbles en madera se incrementa conforme va pasando por los solventes, el valor más bajo corresponde al ciclohexano, seguido de la acetona, metanol y finalmente en agua. Rutiaga *et al.* (2000) reportan extraíbles totales menores (10.2 %) a los reportados

en este estudio en *Q. candicans* (13.9 %). También Herrera (2013) reporta contenidos de extraíbles totales menores que los aquí encontrados (de 8.55 % a 9.02 % en *Q. candicans*, de 6.94 % a 8.49 % en *Q. laurina* y de 9.94 % a 17.44 % en *Q. rugosa*).

El rendimiento de extraíbles en corteza varía respecto a la madera. El mayor contenido de extraíbles en *Q. candicans* y *Q. laurina* fue en metanol seguido de acetona, agua caliente y ciclohexano. En *Q. rugosa* el mejor solvente fue igual que para madera. Se obtuvieron rendimientos mayores de extraíbles totales en las especies estudiadas en este trabajo respecto a los datos reportados por Herrera (2013) (11.95 % en *Q. candicans*, 13.05 % en *Q. laurina* y de 17.24 % en *Q. rugosa*).

En cuanto al contenido de lignina obtenido en la madera de las especies en estudio, el valor menor fue de 17.8 % y el más alto fue de 22.78 % para *Q. laurina* y para *Q. candicans* respectivamente, valores similares a los reportados por Herrera (2013) los cuales fueron de 16.6 % hasta 19.36 % para *Q. rugosa* y *Q. laurina* respectivamente. Los valores reportados por Fengel y Wegener (1989) van de 21.8 % a 29.6 %, Bárcenas *et al* (2008) reporta valores de 21.02 % a 21.47 % y Honorato y Hernández (1998) de 18.37 % a 21.64 %, de igual manera son similares a los reportados por Rutiaga *et al.* (2000) de 21.4 %. Por su bajo contenido de lignina, esta madera pudiera emplearse para la fabricación de pulpa celulósica. Rutiaga *et al.* (2000).

Respecto a la corteza se obtuvieron valores de 20.05 % para *Q. candicans*, 19.08 % para *Q. laurina* y 21.6 % para *Q. rugosa*, los cuales son resultados bajos en comparación a los reportados por Herrera (2013) que van de 22.83 % hasta 34.69 %.

El porcentaje de holocelulosa determinado para la madera de las tres especies en estudio en orden ascendente son de 74.3 %, 76.54 % y 78.9 % para *Q. candicans*, *Q. laurina* y *Q. rugosa*, respectivamente. Herrera (2013) reporta en valores que van de 81.63 % hasta 90.71 % para estas mismas especies. Rowell (1984) reporta valores bajos desde 63 % a 69 %, en tanto lo reportado por Fengel y Wegener (1989) son desde 49.2 % hasta 73.2 % para otros encinos.

Los resultados de holocelulosa en la corteza van de 69.9 % a 74.26 %, relativamente bajos comparados con los de Herrera (2013) que van de 81.93 % a 83.97 %. Honorato (2002) reporta en general un rango de los valores de holocelulosa el cual va de 60 % a 82% para algunos encinos mexicanos.

El porcentaje de alfa-celulosa obtenido en este estudio en madera de *Q. candicans* fue de 56.53 %, 54.44 % en *Q. laurina* y 55.83 % en *Q. rugosa*. Se reportaron valores muy similares a los obtenidos por Herrera (2013), (de 55.55 % a 66.12 %) para estas mismas especies. Honorato *et al.* (1998) reporta valores para encinos mexicanos en general de 54.24 % a 56.72 %, mientras que Rowell (1984) reporta un valor de 46 % para *Q. rubra* y *Q. coccínea* y un valor de 47 % para *Q. alba*.

Para la corteza se reportan valores que van de 50.43 % a 59.1 %, que se encuentran en el rango de los valores reportados por Herrera (2013) que van de 42.32 % a 62.15 %.

Se encontró correlación entre el contenido de lignina y  $P_{max}$ ,  $\sigma_{bW}$ ,  $E_W$ . Esto es, a mayor contenido de lignina la resistencia a flexión aumenta. Windeinsen *et al.* (2008) encuentran que al disminuir el contenido de lignina en madera de *Fagus sp* tratada térmicamente el  $E_W$  disminuye.

En este estudio la carga máxima en flexión estática se vio afectada por el contenido de  $\alpha$ -celulosa, no así en compresión paralela. Al contrario de lo encontrado aquí, Riyaphama *et al.* (2015) encuentran que hay una correlación directa entre el contenido de  $\alpha$ -celulosa de madera *Hevea brasiliensis* y la resistencia a la compresión.

Bárceñas *et al.* (2008) en su estudio concluyen que la presencia de un alto contenido de extraíbles solubles en agua disminuye la resistencia mecánica de la madera al tener un efecto plastificante. Este hecho puede explicar la correlación inversa entre mayores contenidos de extraíbles solubles en metanol con la  $P_{max}$ ,  $\sigma_{bW}$  y el  $E_W$  en el esfuerzo a flexión.

Bjurhager *et al.* (2011) proponen que altos contenidos de holocelulosa participan positivamente en las propiedades mecánicas de la madera. No obstante, Sánchez *et al.* (2014) reportan lo contrario en madera de bambú (*Guadua angustifolia*) al encontrar que altos contenidos de celulosa y de hemicelulosas están relacionadas con la disminución del  $E_W$  en flexión estática.

Ifju y Kennedy (1962) sostienen que el efecto de la remoción de extractivos puede ser positivo o negativo dependiendo de la propiedad mecánica bajo consideración y de su localización en la estructura celular.

El  $E_W$  en compresión paralela resultó que aumenta proporcionalmente al aumentar los extraíbles solubles en ciclohexano, acetona y sosa. Ajoung y Breese (1997) obtienen resultados similares usando probetas extraídas con tolueno, etanol, mezclas de etanol-tolueno y agua; y comprueban que los extractivos, sobre todo los que se encuentran en las paredes celulares, otorgan resistencia a la compresión paralela. El-Osta *et al.* (1981) determinan que el contenido de extractivos y la densidad tuvieron una variación en el ensayo de compresión paralela en madera *Khaya grandifolia* de un 43.6%.

El efecto de los extractivos sobre las propiedades mecánicas no es claro, mientras Stamm (1964) reconoce un ligero efecto en ellas, Kollmann y Cote (1968) y Ávila (1999) concluyen que los extraíbles no mejoran el esfuerzo a la compresión de la madera.

## 8. CONCLUSIONES

En el presente estudio se determinó la composición química básica y su relación con las propiedades mecánicas por duplicado de tres especies del género *Quercus* procedentes de la Comunidad Indígena Nuevo San Juan Parangaricutiro, en el cual arrojó las siguientes conclusiones.

1. Los valores de pH en las especies estudiadas se catalogan como alcalinos, con valores más altos en madera que en corteza, excepto en *Q. rugosa*.
2. El contenido de cenizas varió de 0.31 % a 0.61 % en madera y de 4.17 % a 8.03% en corteza. Los elementos encontrados en el análisis de las sustancias inorgánicas de las especies fueron los siguientes: Mg (8.58 % a 14.05 % en madera y 1.94 % a 5.15 % en corteza), P (6.58 % a 7.79 % en madera y 0.23 % a 0.58 % en corteza), K (43.5 % a 48.54 % en madera y 8.41 % a 9.79 % en corteza), Ca (30.32 % a 35.62 % en madera y 84.95 % a 87.96 % en corteza), S (0.66 % a 1.54 % en madera y 0.051 % en corteza), Si (0.0003 % en corteza) y Al (0.66% en madera y 0.001% en corteza).
3. En cuanto a la solubilidad en sosa al 1%, la especie que obtuvo mejor rendimiento en la madera fue *Q. laurina* con 20.62% y el menor fue *Q. rugosa* con 18.05%. Para la corteza el mayor valor fue para *Q. rugosa* con 25.81% y el menor para *Q. laurina* con 21.24%.
4. Para los extraíbles totales, la especie que presentó menor cantidad fue *Q. candicans* con un valor de 13.19% para harina de madera y 18% para harina de corteza.
5. Con base en la secuencia utilizada de los solventes la mayor proporción de extraíbles se obtuvo en agua caliente, después en metanol, seguido por acetona y por último en ciclohexano con ligeras variantes en las tres especies en cuanto a la madera y la de corteza.
6. La especie que presentó mayor rendimiento de lignina en madera y corteza fue *Q. candicans*, seguido por *Q. rugosa* y por último *Q. laurina*.
7. La madera de *Q. rugosa* tiene un mayor contenido de holocelulosa 78.98%, mientras que *Q. candicans* presenta el menor contenido 74.29%. Por el contrario, la corteza de *Q. candicans* presentó en valor más alto 74.26% y el menor fue de 69.89% para *Q. rugosa*.
8. Se obtuvo un mayor rendimiento de  $\alpha$ -celulosa en la madera en la especie de *Q. candicans*, seguido por *Q. rugosa* y finalmente en *Q. laurina*. Para la corteza donde hubo mayor presencia fue en *Q. rugosa*, luego en *Q. candicans* y por último en *Q. laurina*.
9. Se determinó que a mayores contenidos de extraíbles solubles en ciclohexano y metanol en la  $P_{max}$  y la  $\sigma_{bW}$ , y el metanol y agua en la  $\sigma_{bW}$  y el  $E_W$  a flexión estática la resistencia es menor. Se encontró que el  $E_W$  en compresión paralela aumenta

proporcionalmente al aumentar los extraíbles solubles en ciclohexano, acetona y sosa.

10. Se encontró correlación entre el contenido de lignina y la  $P_{max}$ , la  $\sigma_{bw}$ , el  $E_w$  a flexión estática, lo que significa que a mayor contenido de lignina la resistencia a flexión aumenta. La carga máxima a flexión estática se vio afectada por el contenido de  $\alpha$ -celulosa, pero no en compresión paralela. También se determinó una relación inversa entre el contenido de holocelulosa y el  $E_w$  a flexión estática y la  $P_{max}$  a compresión paralela, el cual participa en valores negativos en las propiedades mecánicas de la madera.
11. En general, en los análisis de varianza se encontró diferencia significativa para la especie, el material y la interacción de estos dos factores. En pH, solubilidad a la sosa y holocelulosa no se presentó efecto de la especie, mientras que, para solubilidad en ciclohexano, lignina y  $\alpha$ -celulosa no se determinó el efecto debido al tipo de material (madera o corteza).

## 9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda efectuar más estudios de las especies del género *Quercus* sobre caracterización química y su relación con sus propiedades mecánicas, ya que muy pocos trabajos tratan sobre este tema.
- Se propone hacer estudios para determinar el contenido de azúcares en las especies estudiadas.
- Se sugiere analizar las cortezas de las especies estudiadas, ya que pueden ser una gran fuente de taninos.

## 10. REFERENCIAS

Ajounj, E. M. A. M. y M. C. Breese. 1997. The Role of Extractives on Short-term Creep in Compression Paralleled to the Grain of Pai Wood (*Azelia africana* Smith). *Wood and Fiber Science*. 29(2): 161-170.

Arizaga, S.; Martínez, C. J.; Salcedo, C.M.; Bello, G. M. Á. 2009. Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos. Instituto Nacional de Ecología (INE- SEMARNAT). México. 113 p.

ASTM (American Society for Testing and Materials). 1997. Método estándar para determinar alfa celulosa en la madera. D1 103-60. ASTM. Philadelphia.

Ávila Calderón, L. E. A. Efectos de los extraíbles en 4 propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum*. Griseb. Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 73 p.

Bárceñas, P., G.M.; Ríos V., R.; Aguirre R., J. R.; Juárez F., B. I.; Honorato S., J. A. 2008. Composición química y densidad básica relativa de la madera de dos especies arbustivas de encino blanco de la Sierra de Álvarez, SLP, México. *Madera y Bosques* 14(3):81-94.

Bello, M., y Labat, J. 1987. Los Encinos (*Quercus*) del estado de Michoacán México. *Centre d'études Mexicaines et Centramericaines* 1(1):6-18.

Bautista, H. R. y Honorato, S. J. A. 2006. Composición química de la madera de cuatro especies del género *Quercus*. *Ciencia Forestal en Mexico*. 30: 35-34.

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

Bjurhager, I. 2011. Effects of Cell Wall Structure on Tensile Properties of Hardwood. Thesis Doctoral. Stockholm, Sweden.

Chávez García, L. E. 2014. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de tres especies de encino (*Quercus candicans* Née, *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. *Quercus rugosa* Née) de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP). Tesis profesional. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 81 p.

De la Paz Pérez, O., C.; Dávalos S., R. 2008. Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. *Madera y Bosques* 14(3):43-80.

De la Paz Pérez, O., C.; Vélez, J.; Ceja, R. 2006. Anatomía de la madera de ocho especies de *Quercus* (FAGACEAE) de Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 12(1):63-94.

Fengel, D. y Wegener, G. 1989. *Wood:chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter. Berlín. 613 p.

El-Osta, M. L. M.; Lotfy, M.; O. A. Badran y E. M. A, Ajoung, 1981. Crushing Strength of Three Sudanese Tropical Hardwoods in Relation to Specific Gravity, Extractive and Lignin Contents *Wood Science*. 13(4):225-232.

Herrera Fernández, A. C. 2013. Determinación en la densidad en madera, poder calorífico y composición química en corteza y madera de seis especies de latifoliadas. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 147 p.

Hernández, R., y Pontin, M. 2005. Shrinkage of three tropical hardwoods below and above the fiber saturation point. *Society of Wood Science and Technology. Wood and Fiber Science*, 38(3):474 – 483.

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

Ifju, G., and Kennedy, R. W. (1962) Some variables affecting microtensile strength of Douglas fir. *For. Prod. J.* 12 (5): 213-72.

Kollmann, F. F. P. y Cote, W. 1968. *Principles of Wood Science and Technology I. Solid Wood* Springer-Verlag. New York. 92 p.

Leonardon, M.; Altaner, C.; Vihermaa, L.; Jarvis, M. 2010. Wood shrinkage: influence of anatomy, cell wall architecture, chemical composition and cambial age. *School of Biological Sciences, University of Auckland*, 68:87-94.

Luna, A.; Montalvo, L.; Rendón, B. 2003. Los Usos no Leñosos de los Encinos en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 72:107-117.

Martínez, M. 1981. Los encinos de México. *Comisión Forestal del Estado de Michoacán* (2):13-95.

Ona, T.; Sonoda, T.; Ito, K.; Shibata, M. 1998. Relations between various extracted basic densities and Wood chemical components in *Eucalyptus globulus*. The Japan Wood Research Society.44: 165-168.

Rivera, N., L.; Quintanar, I., A.; De la Paz Pérez, O., C. 1999. Comparación histoquímica de albura y duramende tres especies de *Quercus*. Madera y Bosques 5(1):27-41.

Riyaphama, J.; Phumichaib, T.; Neimsuwanc, T.; Witayakranc, S.; Sungsing, K.; Kaveetaa, R.; Phumichaia, C., 2015. Variability in chemical and mechanical properties of *Pará rubber (Hevea brasiliensis)* trees. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900 Thailand. 41: 251–258.

Rodríguez, I., y Romero, S. 2007. Arquitectura Foliar de Diez Especies de Encino (*Quercus*, FAGACEAE) de México. Acta Botánica Mexicana 81: 9-34.

Rowell R. M., American Chemical Society, Washington. DC. 1984.

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

Rutiaga, Q., J.G.; Windeisen, E.; Strobel, C. 2000. Composición química del duramen de la madera de *Quercus candicans* Neé. Madera y Bosques 6(2):73-80.

Sánchez-Echeverri, L.A., G. Aita, D. Robert and M.E. Rodríguez-García 2014. Correlation between chemical compounds and mechanical response in culms two different ages of *Guadua angustifolia* Kunth. Madera y Bosques20(2):87-94.

Sandermann, W.; Rothkamm, M. 1959. Über die Bedeutung der pH-Werte von Handelsholzern und deren Bedeutung für die Praxis. Holz Roh Werstoff 17: 433-440.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2013. Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México. SEMARNAT.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) 2000. TAPPI Test Methods (2000-2001). TAPPI Press. Atlanta.

Valencia, A. S. 2004. Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. Boletín de la Sociedad Botánica de México 75: 33-35.

Windeinsen, E.; Bächle, H.; Zimmer, B. y Wengerer, G. 2008. Relation between chemical changes and mechanical properties of thermally treated wood. Stockholm, Sweden. 63 p.

Wise. 1946. Determinación de Holocelulosa. Método usual Wise. In. 1992. Instituto de Madera, Celulosa y Papel. Ing. Karl Augustin Grellmann. Universidad de Guadalajara. Traducción por el Departamento de Tecnología Química de la Madera. 20-22.

Zavala, F. 1995. Encinos Hidalguenses. México. Universidad Autónoma de Chapingo. 1: 16-23.