



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA**

**“ANÁLISIS QUÍMICO BÁSICO E ÍNDICES DE CALIDAD
DE PULPA DE LA MADERA DE 4 ESPECIES DE EUCALIPTO”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN TECNOLOGIA DE LA MADERA**

PRESENTA:

Nallely Sariana Martínez Ríos

Director de Tesis:

Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones

Co-director de Tesis:

M. C. Fabiola Eugenia Pedraza Bucio

Morelia, Michoacán, Marzo de 2007.

PARA:

JERRY, MARI, CAR, LULÚ, MAY y GRICHEL

AGRADECIMIENTOS:

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera.

Departamento de Madera Celulosa y papel "Ing. Karl Augustin Grellman",
Universidad de Guadalajara.

"Comercializadora de Resinas y sus Derivados S.A de C.V"

Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones

M.C Fabiola Eugenia Pedraza Bucio.

Ing. Teresa García Moreno.

Omar Rodríguez.

El presente trabajo de investigación (“Análisis Químico Básico e Índices de Calidad de Pulpa de la madera de 4 especies de eucalipto”) se desarrollo en los Laboratorios del Departamento de Madera, Celulosa y Papel “*Ing. Kart Agustín Grellman*” de la Universidad de Guadalajara, Jal., en los Laboratorios de Investigación de la División de Estudios de Posgrado y el Laboratorio de Anatomía de la Madera de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán , México.

Dicho trabajo se realizó dentro del proyecto con clave 12450 (2004-2006) aprobado por los Fondos Mixtos CONACYT - Gobierno del Estado de Michoacán al Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones.

Las especies aquí estudiadas, son parte de un grupo de especies de eucalipto de la plantación experimental de Crisoba Industrial, Planta Morelia, serán objeto de estudio próximamente.

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCION	1
2. DESCRIPCIÓN DEL GÉNERO <i>Eucalyptus ssp</i>	3
3. ANTECEDENTES	7
4. OBJETIVOS	13
5. HIPÓTESIS	13
6. JUSTIFICACIÓN	13
7. METODOLOGIA	14
7.1 Recolección y preparación del material de estudio	14
7.2 Composición química	15
7.2.1 Diseño experimental	15
7.2.2 Por ciento de humedad	16
7.2.3 pH	16
7.2.4 Sustancias inorgánicas	16
7.2.5 Extraíbles	16
7.2.6 Lignina	17
7.2.7 Holocelulosa	17
7.3 Índice de calidad de pulpa	17
7.4 Análisis estadístico	18
7.4.2 Relación Runkel	18
7.4.3 Coeficiente de rigidez	18
7.4.4 Coeficiente de flexibilidad	18
8. RESULTADOS	19
8.1 Composición química	19
8.2 Índices de calidad de pulpa	32
9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	38
10. CONCLUSIONES	45
11. RECOMENDACIONES	46
12. BIBLIOGRAFIA	47
13. ANEXOS	55

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Preparación del material de estudio	14
Figura 2.	Determinación del por ciento de humedad	16
Figura 3.	Potenciómetro	16
Figura 4.	Determinación del contenido de cenizas	16
Figura 5.	Determinación del contenido de extraíbles	16
Figura 6.	Determinación del contenido de lignina	17
Figura 7.	Determinación del contenido de holocelulosa	17
Figura 8.	Material disociado	17
Figura 9.	Microscopio óptico	17
Figura 10.	Diagrama general para la composición química e índices de calidad de pulpa	18
Figura 11.	Gráfica de medias y gráfica de interacción por zona, para pH	19
Figura 12.	Gráfica de medias y gráfica de interacción por especie, para pH	20
Figura 13.	Gráfica de medias y gráfica de interacción por zona, para cenizas	21
Figura 14.	Gráfica de medias y gráfica de interacción por especie, para cenizas	22
Figura 15.	Gráfica de medias y gráfica de interacción por zona, para extraíbles	23
Figura 16.	Gráfica de medias y gráfica de interacción por especie, para extraíbles	24
Figura 17.	Gráfica de medias y gráfica de interacción por zona, para pH "libre de extracto"	25
Figura 18.	Gráfica de medias y gráfica de interacción por especie, para pH " libre de extracto"	26
Figura 19.	Gráfica de medias y gráfica de interacción por zona, para lignina	27
Figura 20.	Gráfica de medias y gráfica de interacción por especie, para lignina	28
Figura 21.	Gráfica de medias y gráfica de interacción por zona, para holocelulosa	29
Figura 22.	Gráfica de medias y gráfica de interacción por especie, para holocelulosa	30
Figura 23.	Comparación entre especies de la composición química	31
Figura 24.	Comparación entre especies en por ciento de extraíbles	31
Figura 25.	Comparación entre especies en índices de calidad de pulpa	37

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Descripción general, <i>Eucalyptus ssp</i>	3
Cuadro 2.	Descripción general de las especies estudiadas	4
Cuadro 3.	Datos de las especies de <i>Eucalyptus</i> muestreados	14
Cuadro 4.	Anova para pH de la harina antes de la extracción	19
Cuadro 5.	Prueba de rango múltiple para pH por zona	20
Cuadro 6.	Prueba de rango múltiple para pH por especie	20
Cuadro 7.	Anova para cenizas	21
Cuadro 8.	Prueba de rango múltiple para cenizas por zona	22
Cuadro 9.	Prueba de rango múltiple para cenizas por especie	22
Cuadro 10.	Anova para extraíbles	23
Cuadro 11.	Prueba de rango múltiple para extraíbles por zona	23
Cuadro 12.	Prueba de rango múltiple para extraíbles por especie	24
Cuadro 13.	Anova para pH "libre de extracto"	25
Cuadro 14.	Prueba de rango múltiple para pH "libre de extracto" por zona	25
Cuadro 15.	Prueba de rango múltiple para pH "libre de extracto" por especie	26
Cuadro 16.	Anova para lignina	27
Cuadro 17.	Prueba de rango múltiple para el contenido de lignina por zona	27
Cuadro 18.	Prueba de rango múltiple para el contenido de lignina por especie	28
Cuadro 19.	Anova para el contenido de holocelulosa	29
Cuadro 20.	Prueba de rango múltiple para el contenido de holocelulosa por zona	29
Cuadro 21.	Prueba de rango múltiple para el contenido de holocelulosa por especie	30
Cuadro 22.	Resultado de la composición químico	30
Cuadro 23.	Resultado de las extracciones (%)	31
Cuadro 24.	Resultado de las mediciones de las fibras (parte baja)	32
Cuadro 25.	Resultado de las mediciones de las fibras (parte alta)	32
Cuadro 26.	Resultado de las mediciones de las fibras (parte baja)	33
Cuadro 27.	Resultado de las mediciones de las fibras (parte alta)	33
Cuadro 28.	Resultado de las mediciones de las fibras (parte baja)	34
Cuadro 29.	Resultado de las mediciones de las fibras (parte alta)	34
Cuadro 30.	Resultado de las mediciones de las fibras (parte baja)	35
Cuadro 31.	Resultado de las mediciones de las fibras (parte alta)	35
Cuadro 32.	Valores de las características mesurables, Índices de calidad de pulpa	36
Cuadro 33.	Clasificación de las fibras	36
Cuadro 34.	Resultados reportados por distintos autores en obtención de pulpa para papel	43

1. INTRODUCCIÓN



Koala

Mamífero marsupial arborícola que **vive únicamente en los bosques de eucaliptos** del este de Australia. **Se alimenta de hojas de eucalipto**, boj y muérdago y puede pasar días enteros sin bajar de los árboles. Antes se cazaba por la piel, muy suave, pero ahora está protegido.

La demanda siempre creciente de papel, con características especiales, hace necesario utilizar material celulósico con propiedades idóneas. La característica de los elementos estructurales (fibras) no es el único factor que afecta la calidad final del papel, pero si es importante que ofrezca las mayores ventajas para cada tipo de papel en particular (Mayer 1963).

La fabricación de celulosa a partir de madera de fibra corta cultivada en plantaciones forestales comerciales se está popularizando rápidamente a nivel mundial, las razones son las siguientes (Monreal 2006):

- Las especies de latifoliadas (fibra corta) crecen mucho más rápido y son más fácilmente cultivables, que las coníferas en plantaciones forestales comerciales.
- La madera de especies de hoja ancha más utilizadas en la fabricación de celulosa-papel, particularmente la madera de eucalipto, es de tonalidades más claras debido a que la proporción de celulosa contra lignina del tejido madera es mayor.
- La reducción del uso de blanqueadores químicos permite obtener papel libre de cloro elemental, que es un producto no amigable con el ambiente, con el consecuente ahorro en costos de producción y permite obtener celulosa blanqueada de mayor calidad y por tanto papel tipo bond más competitivo, lo que incrementa las ventas del producto final.

Canadá Japón y otros países están tratando de adquirir cuantiosos volúmenes de madera de fibra corta, preferentemente eucalipto en diversos países de América.

De esta manera las superficies de plantaciones de especies de hoja ancha se incrementan en mucha mayor proporción que las plantaciones de coníferas; asimismo, el precio de las maderas de especies de hoja ancha se ha incrementado 10% en los últimos cinco años, mientras que el precio de las maderas de especies coníferas se mantiene igual y, en algunos casos se está reduciendo.

En la búsqueda de indicadores confiables para clasificar la calidad de las pulpas y su influencia en el papel producido, diferentes autores han aportado experiencias sobre cuales son las características principales a tomar en cuenta. Entre estas se encuentran las propiedades químicas y las características mesurables de las fibras (longitud de fibra, espesor de pared, diámetro de lumen, etc.)

Con estos antecedentes se ha desarrollado un proyecto de investigación destinado a recoger y divulgar el conocimiento de las propiedades de la madera de eucalipto, propiamente las especies: *Eucalyptus camaldulensis*, *E. citriodora*, *E. robusta* y *E. saligna*, para finalmente proponer la especie o especies más idóneas para el pulpeo químico, que se obtendrán de la plantación comercial Crisoba Industrial S. A. de C. V., Planta Morelia. Contribuyendo con información para que estas especies sean aprovechadas integralmente, demostrar que a pesar de ser una especie exótica, tiene propiedades que son susceptibles de ser aprovechadas, tal es el caso de la obtención de pulpa celulósica. Por lo tanto, la presente investigación tiene como objetivos determinar las propiedades químicas de forma general de la madera de estas especie, así mismo, los índices de calidad de pulpa.

3. ANTECEDENTES

La bibliografía consultada sobre las especies, motivo de estudio, se considera relevante la siguiente:

Eucalyptus camaldulensis

Tischler (1976), citado por Hillis (1984) reporta que las sustancias solubles en agua caliente para el exterior del duramen en *Eucalyptus camaldulensis* en edades de 18 y 20 años en Israel, fueron mayores de 14,3 % y en el interior del duramen 12,1%. Para la albura se obtuvo el valor de 7,4%.

Ona *et al.* (1995), al estudiar los contenidos de lignina a lo largo del fuste observaron también ciertas variaciones, con valores que oscilan entre 21.6% y 42.8%. También realizaron 10 mediciones a lo largo del fuste del árbol en *Eucalyptus globulus* Labill procedente de Australia. Resultados similares fueron observados al estudiar al *E. camaldulensis* a 12 alturas diferentes (Yoshinaga *et al.* 1993).

Ona *et al.* (1997), demostraron que los contenidos de sustancias extraíbles para el *Eucalyptus globulus* Labill y *E. camaldulensis*, presentan diferencias porcentuales entre ambas especies, diferencias que disminuyen dentro del mismo árbol a las diferentes alturas estudiadas. Estos autores sugieren, que este comportamiento está relacionado con las condiciones climáticas en que las plantas crecen, así como las propias características genéticas de cada especie en particular. Por otra parte Wu *et al.* (1992) y Fukushima *et al.* (1994), subrayan que los contenidos de lignina varían con la morfología de la fibra.

Ortega *et al.* (2005) realizaron pulpeo Kraft utilizando madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh; los rendimientos que encontraron variaron de 30.7 a 36.2%

Ortega *et al.* (2005) realizaron blanqueo de la pulpa Kraft de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, utilizando las secuencias (CD) EpPD y OAZEopPP.

Eucalyptus citriodora

Domratcheva *et al.* (2006) determinaron la composición química en albura y duramen de *Eucalyptus citriodora*, los resultados promedio los obtuvieron en el duramen con 0.47% en cenizas, 7.3% extraíbles, 19.1% lignina y 50% holocelulosa.

Rodríguez *et al.* (2006) obtuvieron pulpa celulósica mediante el proceso Kraft en madera de *Eucalyptus citriodora* Hook. Reportan rendimientos de 47.5% en la parte baja y 49.3% en la parte de arriba.

Eucalyptus robusta

Domratcheva *et al.* (2006) determinaron la composición química en albura y duramen de *Eucalyptus robusta*, los resultados promedio los obtuvieron en el duramen con 0.25% en cenizas, 3.63% extraíbles, 21.82% lignina y 72.8% holocelulosa.

Trujillo (2006) obtiene pulpa Kraft y a la Sosa a partir de la madera de *Eucalyptus robusta*, con un rendimiento de 46.9% y 47% respectivamente, así como su blanqueo utilizó dos secuencias, una clorada y otra del tipo TCF obtuvo los mejores resultados con la secuencia clorada con la que alcanzó una blancura de 86.3% ISO.

Eucalyptus saligna

Pereira y Sardinhas (1984) al estudiar la composición química de *Eucalyptus globulus* Labill, en España, a seis alturas del fuste, encontraron irregularidades en la variación de la composición química de las sustancias extraíbles, lo que sucedió también al estudiar *E. saligna* Smith, en el que encontró mayores variaciones, atribuyendo este comportamiento a las características anatómicas de la fibra en esta madera.

Pereira y Miranda (1991) publican un comportamiento similar, al estudiar la misma especie a diferentes alturas del fuste, a diferentes edades y en diferentes sitios, encontraron un aumento de las sustancias extraíbles y ligeras variaciones de los componentes de la pared celular con la edad del árbol, pero pequeñas variaciones a lo largo del fuste.

Rutiaga *et al.* (2005) obtuvieron pulpa Kraft en madera de *Eucalyptus saligna* utilizaron secuencias clorada y libre de cloro. Reportan rendimientos promedio de 39.7%.

Domratcheva *et al.* (2006) determinaron la composición química en albura y duramen de *Eucalyptus saligna*, los resultados promedio los obtuvieron en el duramen con 0.16% en cenizas, 3.25% extraíbles, 22.2% lignina y 67.22% holocelulosa.

Debido a la poca disponibilidad de datos sobre estas especies en lo que se refiere a composición química, se considera relevante presentar algunos valores obtenidos en estas mismas especies, pero en la **corteza**:

Conde *et al.* (1995), mencionan que hay evidencia de la presencia de componentes de taninos hidrolizables y condensables en la corteza de *Eucalyptus globulus*. Además identifican polifenoles en *E. camaldulensis*.

Valerio (2003) realiza la determinación de taninos condensados en maderas de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* y *E. urophylla*.

Pedraza *et al.* (2004), determinaron en la corteza de *E. citriodora*, en promedio, los siguientes valores: pH de 5.1, sustancias inorgánicas 4.5%, sustancias extraíbles 14.0%. Para *E. robusta* un valor promedio de pH de 3.3, 0.8% de cenizas y 13.5% de sustancias extraíbles éste último valor, obtenido mediante extracción sucesiva con ciclohexano, acetona y metanol.

Pedraza y Rutiaga (2005), reportaron un contenido de extracto tánico de 2.9% y de 2.8%, en muestras de corteza de *E. citriodora*, obtenidas de la parte baja y de la parte alta del fuste, respectivamente. Y para *E. robusta* de 0.50% parte baja y de 0.29% en la parte alta del fuste.

Pedraza *et al.* (2005), reportaron en promedio, los siguientes valores para muestras de corteza de *E. saligna*: pH 5.01, cenizas 3.8%, extraíbles 15.7% (después de extracción sucesiva con ciclohexano, acetona, metano y agua caliente), lignina 14.0% y holocelulosa 48.0%.

Pedraza *et al.* (2005) encontraron 4.10% y 2.02% de extracto tánico en muestras de corteza de *E. saligna*, obtenidas de la parte baja y alta del fuste, respectivamente.

Pedraza (2006) encontró un poder calorífico de 18.11 MJ/Kg en muestras de corteza de *E. saligna*, 15.13 MJ/Kg en la corteza de *E. robusta*, 14.07 MJ/Kg la corteza de *E. citriodora* y 16.99 MJ/Kg en la corteza de *E. camaldulensis*.

Otros trabajos relacionados con el género *Eucalyptus*, son los siguientes:

Dadswell *et al.* (1962), encontraron para el *Eucalyptus regnans*, contenidos de hemicelulosas entre 14 y 20%, holocelulosas de 75 a 82% y lignina de 20 - 27%.

Dillner *et al.* (1970) en Portugal, publica valores de celulosa entre 36 y 57% en maderas de *Eucalyptus globulus* Labill. En cuanto a los componentes de la pared celular, encontró una ligera disminución con la altura del contenido de celulosa, corroborando los resultados alcanzados por Sardinhas (1979).

Nelson y Heather (1972) citado por Hillis (1984), muestran que el duramen del *Eucalyptus grandis* contiene 1/3 del valor encontrado en la parte exterior de árboles maduros de esta especie, asociando los colores característicos de estas maderas con los contenidos de sustancias extraíbles.

Bamber y Curtin (1974) el contenido de extraíbles en el *Eucalyptus pilularis* (Australia) varió en el rango de 7,4% y 8,4% en el duramen, hasta 2,9% en la albura para esta especie.

Dietrichs (1975) indica que el contenido de polisacáridos varía considerablemente en la corteza, incluso dentro del mismo árbol, y que existe diferencia en la composición química de los extraíbles entre la corteza interna y corteza externa, encontró también variaciones en dependencia con las épocas del año.

Wilkes (1984) realiza una investigación del duramen de seis especies de *Eucalipto* (*E. albens*, *E. bancroftii*, *E. dealbata*, *E. goniocalyx*, *E. macrorhyncha*, *E. sideroxylon*) para determinar la influencia de la velocidad de crecimiento sobre la densidad y el contenido de extraíbles.

Bland (1985) encontró que en la madera tensionada *Eucalyptus cypellocarpa*, se registró un incremento del contenido de celulosa de 44 a 57%, decreciendo el porcentaje de pentosanos de 15,1 a 11%, los grupos acetilo variaron de 3 a 1,9% y la lignina de 29,5 a 13,8%.

Hillis (1984) y Bland (1985) demostraron que la lignina de los *Eucalyptus* es del tipo siringil - guayacil (G-S), con menor variación dentro del propio árbol. Esta variación puede ir aumentando entre especie y entre árboles. La variación de los contenidos de lignina dentro del propio árbol puede ser diferente, lo que puede afectar su desarrollo, ocasionando su debilitamiento.

Krilov y Lasander (1989), realizan una investigación sobre la concentración, distribución y variabilidad de las sustancias polifenólicas solubles en butanol del duramen de las siguientes especies de *Eucalyptus*: *E. acmenioides*, *E. macrorhyncha*, *E. oblicua*, *E. pilularis* y *E. grandis*.

Tsoumis (1991) reporta que la cantidad de celulosa y hemicelulosas es menor en la corteza que en la madera, mientras que la cantidad de extraíbles es mayor en la corteza.

Ona *et al.* (1995) encontraron que la tensión en la madera da como resultado variaciones en el contenido de celulosa, hemicelulosas y ligninas, los que se han verificado en maderas de tensión con respecto a la madera normal.

Penner *et al.* (1996), encontraron que las hemicelulosas de *Eucalyptus* contienen alta proporción de grupos capaces de producir ácido acético, por la presencia de O-acetil- 4-O-metilglucuronoxilano.

En lo que corresponde a **los índices de calidad de pulpa**, tanto de algunas especies de eucalipto, como de otras, se dispuso de la siguiente información:

En los trabajos relacionados con Guridi (1998), De la Paz *et al.* (1979), De la Paz *et al.* (1980), De la Paz y Corral (1980), Flores (1981), Corral (1981), Rogel (1982a), De la Paz y Corral (1982) y Bucio (1993), caracterizan diversas maderas de latifoliadas mexicanas desde el punto de vista anatómico, proporcionando los valores medios, máximos y mínimos de los elementos mensurables, además de señalar los usos a los que se les puede destinar, siendo uno de ellos el de pulpa para papel, sin embargo, como ya se mencionó antes, son las relaciones de las dimensiones de las fibras las que indicarán si una madera es apropiada para producir pulpa para papel de una determinada calidad.

Huerta y Corral (1975) mencionan que la calidad de pulpa esta relacionada íntimamente con la especie maderable de la cual proviene y aunque las dimensiones de las fibras, especialmente la longitud, tuvieron gran importancia en el pasado, pero son más útiles las relaciones que de ella se puedan derivar, tales como: coeficiente de rigidez, coeficiente de flexibilidad y coeficiente de Petri además de la relación Runkel.

Kayama (1979) realizó pruebas de pulpeo para 60 especies de maderas tropicales, estudió la relación entre las propiedades químicas de la madera y las características morfológicas y de pulpeo con las propiedades del papel.

Barrichuelo *et al.* (1983) afirman que la densidad básica de la madera se encuentra fuertemente correlacionada con el grosor de pared de la fibra, diámetro de lumen y longitud de fibra, teniendo efecto en la calidad de la pulpa.

Luna (1983) determinó los índices de calidad de pulpa para papel de 29 maderas tropicales de Chiapas, encontrando que solo 20 de ellas producían pulpa de calidad aceptable.

Fuentes (1987) comprueba que el proceso Kraft no altera los resultados de los índices de calidad determinados en 30 árboles de *Pinus montezumae*.

Tamarit (1996) determina los índices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas latifoliadas de México y clasificó su calidad en base a la relación de Runkel. Se encontró que el 69% del total de las especies estudiadas proporcionan

pulpa de excelente (2.3%), muy buena (7.6%), buena (34.8%) y regular (24.2) calidad y el 31% restante producen pulpas de mala calidad.

Villaseñor y Rutiaga (2000) determinan la composición química y los índices de calidad de pulpa de la madera de *Casuarina Equisetifolia* L., encontrando que las fibras de esta madera se clasifican como “regular” para papel.

Igartúa *et al.* (2000), realizan el estudio de la estructura de la madera de *Eucalyptus globulus* en la provincia de Buenos Aires, Argentina, analizando la variación axial y radial de la densidad básica y la longitud de la fibra de 10 árboles de aproximadamente 40 años, encontraron magnitudes y patrones de variación axial y radial de la densidad básica acordes a los mencionados en general para la especie, del mismo modo para la longitud de la fibra en la cual no se observó una importante variación en el sentido axial. La longitud de fibras registró un valor promedio de 863.79 μm (+/- 320.1) con un rango entre 773.68 μm (+/-181.3) y 907.32 μm (+/- 168.2).

Monteoliva *et al.* (2002) desarrollaron la caracterización de una plantación de *Eucalyptus globulus* de 7 años de edad en la provincia de Buenos Aires, Argentina, determinando la densidad básica, la longitud de fibras y la composición química para su utilización en pulpa Kraft. El valor promedio de longitud de fibras para el conjunto de los árboles estudiados fue de 1045.30 μm con un desvío estándar de 202.32 μm .

Mariani *et al.* (2004) determinaron la variabilidad en sentido radial de *Eucalyptus nitens* en albura y duramen, así como su efecto sobre pulpa Kraft en la Región de Chile, encontrando que las fibras de duramen presentan una menor longitud y un espesor menor de pared, por ende mayor capacidad de colapso que las fibras de albura.

En base a la revisión bibliográfica presentada y tomando en cuenta que no se encontraron estudios relacionados en cuanto a Composición Química e Índices de Calidad de Pulpa para papel en material celulósico (astillas para pulpa), para las especies a estudiar, se plantean los objetivos que a continuación se señalan.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Determinar la composición química básica e índices de calidad de pulpa para papel, en material celulósico, de 4 especies de eucalipto de una plantación experimental.

4.2 Objetivos específicos

1. Medir el pH
2. Evaluar el contenido de sustancias inorgánicas
3. Determinar la solubilidad, en diferentes solventes de polaridad ascendente
4. Determinar el contenido de los principales componentes de la pared celular (holocelulosa y lignina)
5. Determinar los índice de calidad de pulpa para papel

5. HIPÓTESIS

En base a la composición química y a los índices de calidad de la pulpa, las especies de *Eucalyptus* pueden ser materia prima para obtener pulpa Kraft y podrán ser utilizados como material celulósico.

6. JUSTIFICACIÓN

Los estudios básicos de caracterización de la madera son de singular importancia para sugerir posibles usos o aplicaciones industriales, artesanales e incluso medicinales. Por otra parte y debido a la escasez de maderas del género *Pinus* y del género *Quercus*, empleadas tradicionalmente por la industria de la pulpa, las plantaciones comerciales con especies de rápido crecimiento, como son los árboles del género *Eucalyptus*, pueden ser una alternativa a la exigencia del abastecimiento de este tipo de industria forestal, aunque deberán evaluarse otros factores, como los ambientales, que no es el alcance del presente trabajo. Sin embargo, se considera necesario realizar el análisis químico básico en astillas de las cuatro especies de eucalipto señaladas, como primera etapa y obtener los índices de calidad de pulpa para papel y estar en condiciones, en base a los resultados y al alcance de este estudio, sugerir las especies más idóneas para obtener pulpa celulósica por el proceso Kraft. Importante es señalar que los árboles son de una edad aproximada de 7 años, lo que probablemente será ventaja al encontrar relativamente poca cantidad de sustancias extraíbles, que para el caso de los eucaliptos, pueden limitar su empleo en el proceso de pulpeo.

7. METODOLOGÍA

7.1 Recolección y preparación del material de estudio

Para el desarrollo de esta investigación, se colectó la madera de cuatro especies de eucalipto, con una edad aproximada de 7 años, a dos alturas del fuste comercial (siendo la primer troza de 1.3 m a partir del tocón; y la segunda troza de 1.3 m tomada a 3.9 m del tocón), de la plantación experimental de Crisoba Industrial S. A. de C. V., planta Morelia. El material se secó al aire libre, para posteriormente obtener astillas para pulpa, de estas astillas, se trituraron, molieron y tamizaron para obtener la fracción 40 (Fig. 1).

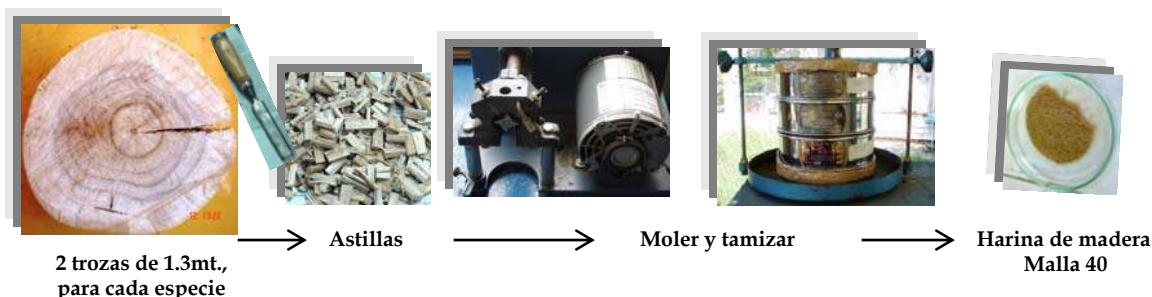


Figura 1. Preparación del material de estudio (fotos: R. Aguilar R).

Los datos sobre las dimensiones de los árboles derribados se dan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Datos de las especies de *Eucalyptus* muestreados:

Especie	Altura total	Diámetro DAP*
<i>E. camaldulensis</i>	15 m	20.4 cm
<i>E. citriodora</i>	22.5 m	25.0 cm
<i>E. robusta</i>	18.0 m	19.4 cm
<i>E. saligna</i>	31.5 m	21.0 cm

*DAP: Diámetro a la altura del pecho.

Las características de la zona de la plantación experimental son (INEGI 2004):

- **Clima:** subhúmedo con lluvias en verano de acuerdo con el sistema W. Koppen.
- **Temperatura promedio anual:** 17.7 °C
- **Temperatura máxima durante el periodo Mayo - Junio:** 20.3 °C
- **Temperatura mínima durante el periodo Diciembre - Enero:** 14.4 °C
- **Precipitación anual promedio:** 780.2 mm
- **Coordenadas geográficas:** Latitud 19° 38.8' Longitud 101° 15.5'
- **Altura sobre el nivel del mar:** 1997 msnm

- **Límites geográficos:** Al norte con San Juanito Itzicuaró, al sur con Cointzio, al oeste con La Mintzita y al este con la Tenencia Morelos.

7.2 Composición química

7.2.1 Diseño experimental

A fin de determinar diferencias estadísticas en la composición química de las maderas, entre especies y a dos alturas del fuste, se aplicó un diseño experimental factorial 2x4, con n = a una réplica; teniendo los siguientes factores y niveles:

A = altura (baja, alta)

B = especies (cuatro especies de eucalipto)

De acuerdo con lo anterior, el modelo estadístico correspondiente a tal diseño (Montgomery 1991) es el siguiente:

$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$, donde:

Y_{ijk} = variable de respuesta

μ = efecto medio general

τ_i = efecto de altura

β_j = efecto de especies

$(\tau\beta)_{ij}$ = efecto de la interacción

ε_{ijk} = error aleatorio

Las hipótesis de interés a probar son:

H_0 : efecto de altura (A) = 0

H_1 : efecto de altura (A) \neq 0

H_0 : efecto de especies (B) = 0

H_1 : efecto de especies (B) \neq 0

H_0 : efecto de interacción (AB) = 0

H_1 : efecto de interacción (AB) \neq 0

El nivel de confianza con el que se analizaron los datos fue del 95 % y los resultados se realizaron mediante el programa Statgraphics Plus versión 4.

7.2.2 Por ciento de humedad



Figura 2. Determinación del Por ciento de humedad
(Fotos: I. Coello R.)

A las cuatro especies de madera se les determinó el por ciento de humedad de las astillas de madera dos alturas (Fig. 2), por el método de deshidratación con una temperatura de 105° C en una estufa convencional.

7.2.3 pH



Figura 3. Potenciómetro
(Fotos: I. Coello R.)

Se determinó el pH de cada especie y a su respectiva altura, con su réplica, a la harina de madera en forma natural y posteriormente a la harina de madera “libre de extractos” de acuerdo al método de Sandermann y Rothkamm (1959) midiéndose con un potenciómetro marca HANNA, modelo pH 211 (Fig. 3).

7.2.4 Sustancias inorgánicas



Figura 4. Determinación del contenido de cenizas.
(Fotos: I. Coello R.)

Para calcular el contenido de sustancias inorgánicas en la madera (Fig. 4) se colocó la harina en crisoles de níquel, quemándose cuidadosamente para posteriormente calcinarlo en una mufla marca Lindberg, a una temperatura de 525°C, de acuerdo a la norma T 211 om 93 (TAPPI 2000).

7.2.5 Extraíbles



Figura 5. Determinación del contenido de extraíbles.
(Fotos: I. Coello R.)

La cantidad de sustancias extraíbles (Fig. 5) se determinó aplicando una secuencia de extracción con solventes de polaridad creciente: ciclohexano, acetona, metanol, finalizando el ciclo de extracciones con agua caliente a reflujo, todas estas por un periodo de 4 horas. Los solventes fueron recuperados en un rotavapor marca Heidolph aplicando vacío para obtener así el extracto de cada secuencia.

7.2.6 Lignina



Figura 6. Determinación del contenido de lignina (Fotos: I. Coello R.)

En la harina “libre de extractos” se determinó el contenido de lignina (Fig. 6) de acuerdo con Runkel y Wilke (1951).

7.2.7 Holocelulosa



Figura 7. Determinación del contenido de holocelulosa (Fotos: I. Coello R.)

Para la determinación del porcentaje de holocelulosa (Fig. 7) se apoyo en el Método de Wise 1946, *in*: San Juan Dueñas Rubén (1991).

7.3 Índice de calidad de pulpa



Figura 8. Material disociado (Fotos: N. Martínez. R)

Para este estudio se tomó una muestra representativa del material que se dispuso para el proceso de pulpeo, en donde virutas pequeñas fueron sometidas a un proceso de ablandamiento primeramente, para después colocarlas en una mezcla disociadora (ácido nítrico, ácido láctico, ácido acético glacial en partes iguales) a baño María (Fig. 8), para posteriormente ser entintadas en Pardo de Bismark y ser montadas en portaobjetos para medir los elementos estructurales (fibras) de acuerdo a la clasificación realizada por Tortorelli (1956).



Figura 9. Microscopio óptico. (Fotos: B. Alcaraz V.)

Las mediciones de los elementos estructurales (fibras), 50 elementos como tamaño de muestra, se utilizará un microscopio óptico (Fig. 9), con ocular micrométrico, previamente calibrado.

7.4 Análisis estadístico

Para las dimensiones de las fibras se determinó; el valor promedio, el valor máximo, el valor mínimo, la moda y la desviación Standard, mientras que para los índices de calidad de pulpa para papel (ver anexos) se determinó lo siguiente:

7.4.1 Relación de Runkel:

R. R. = $2w/l$ (Dos veces el grosor de pared con respecto al diámetro del lumen)

7.4.2 Coeficiente o índice de rigidez:

C. R.= $2w/D$ (Dos veces el grosor de la pared con respecto al diámetro de la fibra.

7.4.3 Coeficiente de flexibilidad:

C. F. = l/D (Amplitud del lumen con respecto al diámetro de la fibra)

En donde:

D= Diámetro de fibra

l= Amplitud del lumen

2w= Dos veces el grosor de pared

A continuación se presenta un diagrama general que ilustra la estrategia experimental diseñada para realizar la investigación (Fig. 10).

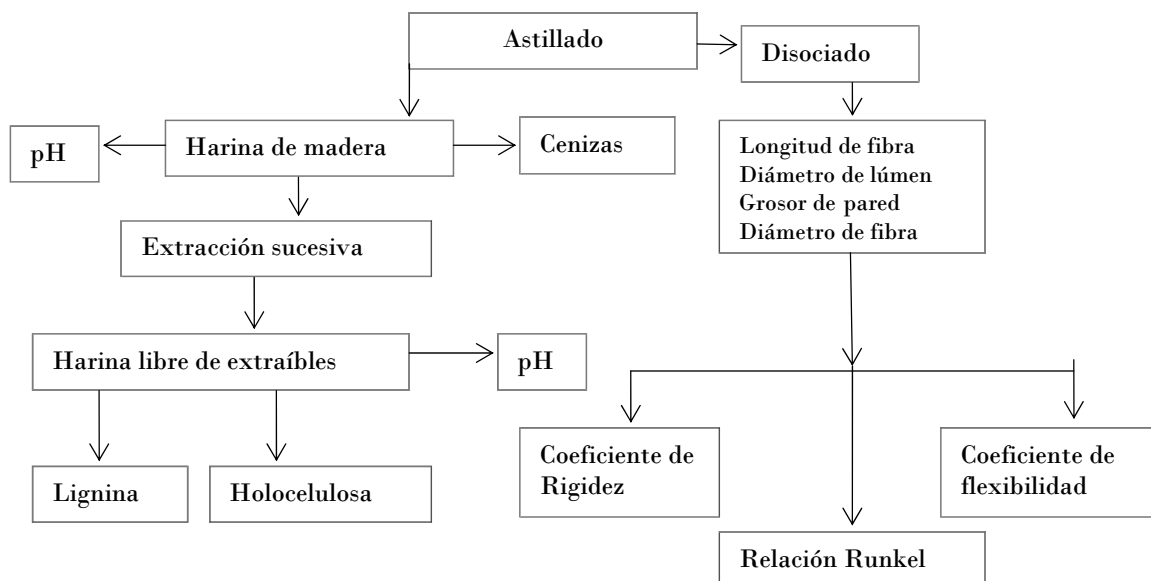


Figura 10. Diagrama general para el análisis químico básico e índices de calidad de pulpa.

8. RESULTADOS

Una vez cumplidos los objetivos que fueron planteados y de acuerdo a lo establecido en el modelo estadístico (Montgomery 1991), los resultados son los siguientes:

8.1. Composición química

8.1.1 pH antes de las extracciones con los solventes de polaridad ascendente

En el análisis de varianza para pH (Cuadro 4) antes de la extracción con solventes, indica que el nivel de significancia (p-Value) para ambos efectos, zona y especie, es menor de 0.05, es decir, estos dos factores tienen influencia en la variable de respuesta, pH. Las figuras 11 y 12, así como los cuadros 5 y 6 muestran dichos resultados.

Cuadro 4. Anova para pH de la harina antes de la extracción

Analysis of Variance for pH - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Zona	0.81	1	0.81	23.28	0.0013
B:Especie	5.5389	3	1.8463	53.05	0.0000
INTERACTIONS					
AB	0.2027	3	0.0675667	1.94	0.2015
RESIDUAL	0.2784	8	0.0348		
TOTAL (CORRECTED)	6.83	15			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

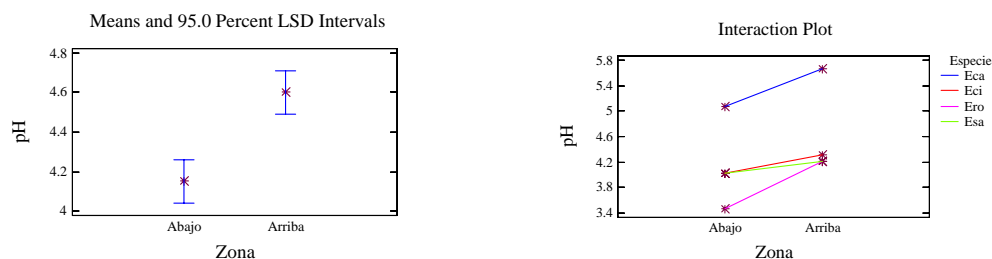


Figura 11. Gráfica de medias y gráfica de interacción por zona, para pH.

Cuadro 5. Prueba de rango múltiple para pH por Zona

Multiple Range Tests for pH by Zona

Method: 95.0 percent LSD

Zona	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Abajo	8	4.15	X
Arriba	8	4.6	X

Contrast	Difference	+/- Limits
Abajo - Arriba	*-0.45	0.21509

* denotes a statistically significant difference.

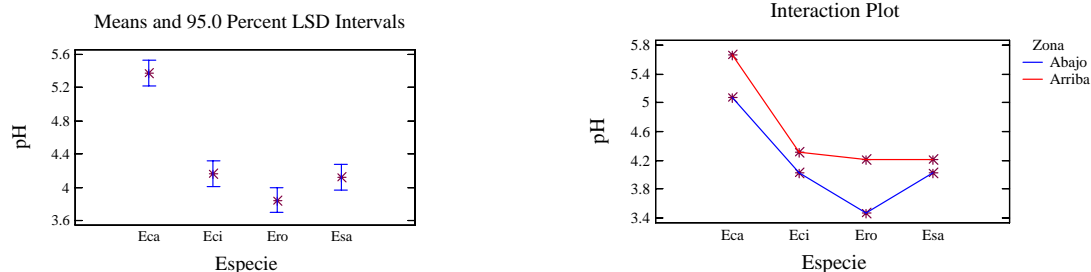


Figura 12. Gráfica de medias y gráfica de interacción por especie, para pH.

Cuadro 6. Prueba de rango múltiple para pH por especie

Multiple Range Tests for pH by Especie

Method: 95.0 percent LSD

Especie	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Ero	4	3.8475	X
Esa	4	4.1175	XX
Eci	4	4.1625	X
Eca	4	5.3725	X

Contrast	Difference	+/- Limits
Eca - Eci	*1.21	0.304184
Eca - Ero	*1.525	0.304184
Eca - Esa	*1.255	0.304184
Eci - Ero	*0.315	0.304184
Eci - Esa	0.045	0.304184
Ero - Esa	-0.27	0.304184

* denotes a statistically significant difference.

8.1.2 Sustancias inorgánicas (Cenizas)

El cuadro 7, muestra el análisis de varianza (Anova) para el valor del contenido de sustancias inorgánicas (cenizas), indica que el nivel de significancia calculado (p-Value) es menor a 0.05 tanto para los factores zona y especie, así como para la intersección zona-especie, por lo que la hipótesis se rechaza, es decir, tienen influencia en la variable de respuesta, cenizas. Las figuras 13 y 14 así como los cuadros 8 y 9 muestran dichos resultados.

Cuadro 7. Anova para cenizas

Analysis of Variance for Cenizas - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Zona	0.0203063	1	0.0203063	28.25	0.0007
B:Especie	0.443619	3	0.147873	205.74	0.0000
INTERACTIONS					
AB	0.0353187	3	0.0117729	16.38	0.0009
RESIDUAL	0.00575	8	0.00071875		
TOTAL (CORRECTED)	0.504994	15			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

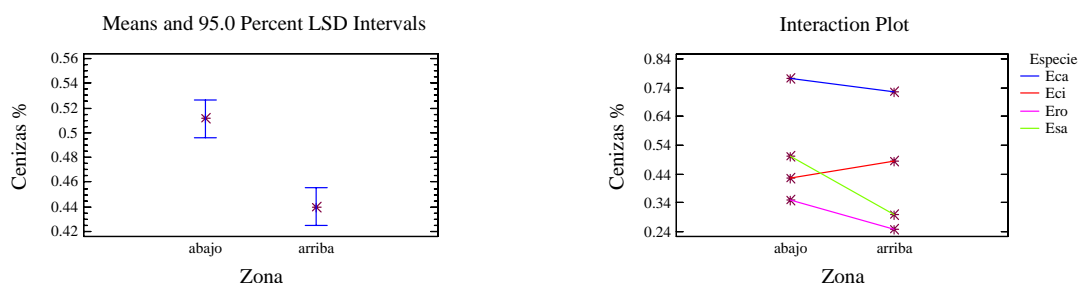


Figura 13. Gráfica de medias y gráfica de interacción por zona, para cenizas.

Cuadro 8. Prueba de rango múltiple para cenizas por zona

Multiple Range Tests for Cenizas by Zona

Method: 95.0 percent LSD

Zona	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Arriba	8	0.44	X
Abajo	8	0.51125	X

Contrast	Difference	+/- Limits
Abajo - Arriba	*0.07125	0.0309115

* denotes a statistically significant difference.

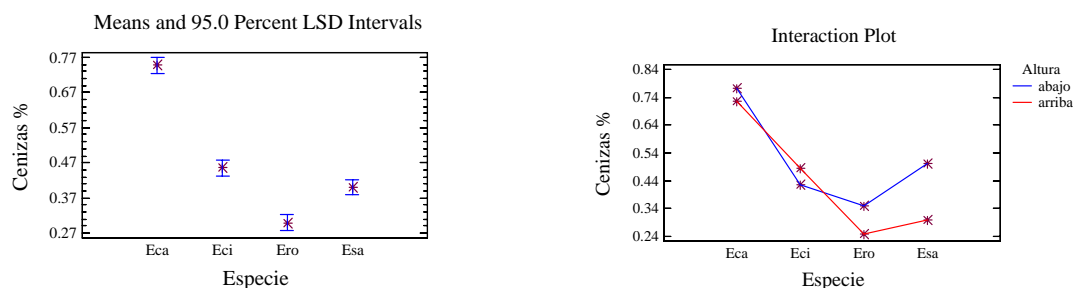


Figura 14. Gráfica de medias y gráfica de interacción por especie, para cenizas.

Cuadro 9. Prueba de rango múltiple para cenizas por especie

Multiple Range Tests for Cenizas by Especie

Method: 95.0 percent LSD

Especie	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Ero	4	0.3	X
Esa	4	0.4	X
Eci	4	0.455	X
Eca	4	0.7475	X

Contrast	Difference	+/- Limits
Eca - Eci	*0.2925	0.0437155
Eca - Ero	*0.4475	0.0437155
Eca - Esa	*0.3475	0.0437155
Eci - Ero	*0.155	0.0437155
Eci - Esa	*0.055	0.0437155
Ero - Esa	*-0.1	0.0437155

* denotes a statistically significant difference.

8.1.2.1 Extraíbles

El análisis de varianza (Anova) para el valor del contenido total de extraíbles obtenido por la extracción sucesiva con solventes orgánicos y agua (Cuadro 10), indica que el nivel de significancia calculado (p-Value) para ambos efectos y su interacción es menor a 0.05, por lo que la hipótesis se rechaza, es decir, los factores y su interacción, influyen en la variable de respuesta, extraíbles. Los cuadros 11 y 12, así como las figuras 15 y 16 lo muestran.

Cuadro 10. Anova para extraíbles

Analysis of Variance for Extraíbles - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value

MAIN EFFECTS					
A:Zona	14.025	1	14.025	451.51	0.0000
B:Especie	28.1126	3	9.37088	301.68	0.0000
INTERACTIONS					
AB	0.825825	3	0.275275	8.86	0.0064
RESIDUAL	0.2485	8	0.0310625		

TOTAL (CORRECTED)	43.212	15			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

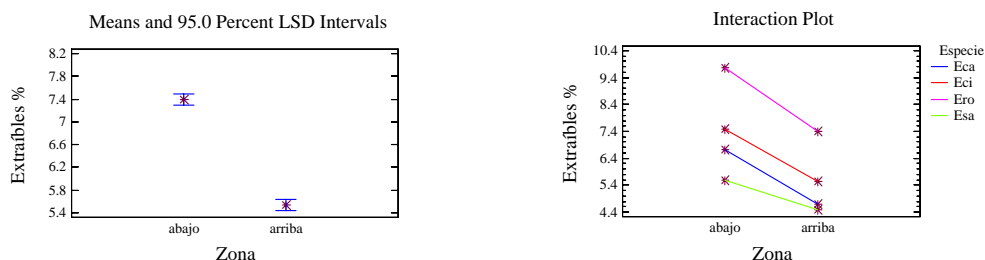


Figura 15. Gráfica de medias y gráfica de interacción por zona, para extraíbles.

Cuadro 11. Prueba de rango múltiple para extraíbles por zona.

Multiple Range Tests for Extraíbles by Zona

Method: 95.0 percent LSD

Zona	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Arriba	8	5.535	X
Abajo	8	7.4075	X

Contrast	Difference	+/- Limits
Abajo - Arriba	*1.8725	0.203212

* denotes a statistically significant difference.

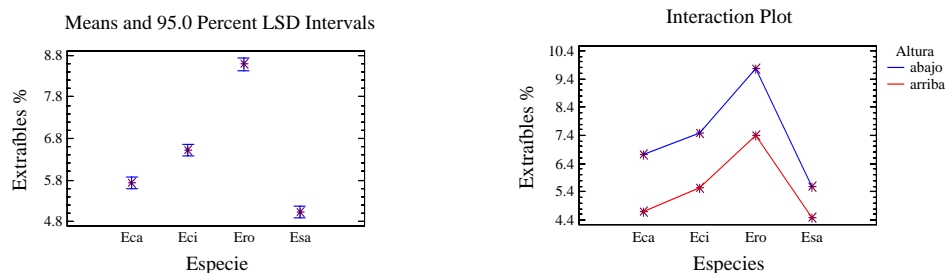


Figura 16. Gráfica de medias y gráfica de interacción por especie, para extraíbles

Cuadro 12. Prueba de rango múltiple para extraíbles por especie.

Multiple Range Tests for Extraíbles by Especie

Method: 95.0 percent LSD			
Especie	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Esa	4	5.0575	X
Eca	4	5.73	X
Eci	4	6.51	X
Ero	4	8.5875	X

Contrast	Difference	+/- Limits
Eca - Eci	*-0.78	0.287385
Eca - Ero	*-2.8575	0.287385
Eca - Esa	*0.6725	0.287385
Eci - Ero	*-2.0775	0.287385
Eci - Esa	*1.4525	0.287385
Ero - Esa	*3.53	0.287385

* denotes a statistically significant difference.

8.1.3 pH en harina "libre de extracto"

El cuadro 13 nos muestra el análisis de varianza para pH de la harina de madera después de la extracción con solventes e indica que el nivel de significancia calculado (p-Value) tanto para los factores zona y especie, además de la interacción zona-especie es menor a 0.05, por lo que la hipótesis respectiva se rechaza, es decir, dichos factores y su interacción, si tienen influencia significativa en la variable de respuesta, pH en la harina "libre de extracto". Las figuras 17 y 18 y los cuadros 14 y 15 lo muestran.

Cuadro 13. Anova para pH "libre de extracto"

Analysis of Variance for pHLE - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value

MAIN EFFECTS					
A:Zona	0.2916	1	0.2916	25.14	0.0010
B:Especie	1.39105	3	0.463683	39.97	0.0000
INTERACTIONS					
AB	0.44135	3	0.147117	12.68	0.0021
RESIDUAL	0.0928	8	0.0116		

TOTAL (CORRECTED)	2.2168	15			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

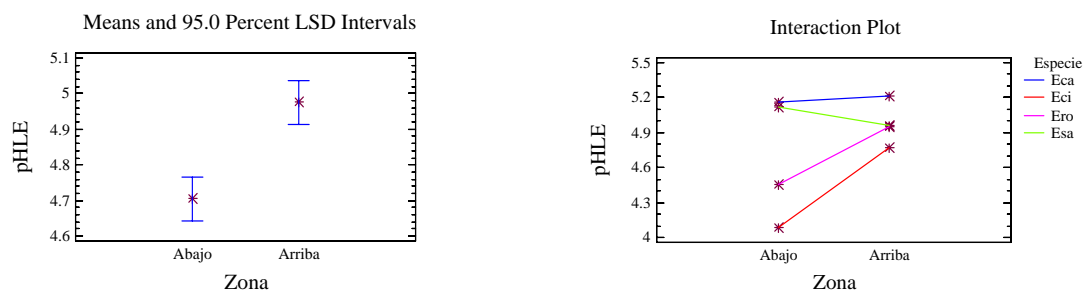


Figura 17. Gráfica de medias y gráfica de interacción por zona, para el pH "libre de extracto".

Cuadro 14. Prueba de rango múltiple para el pH "libre de extracto" por zona

Multiple Range Tests for pHLE by Zona

Method: 95.0 percent LSD			
Zona	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Abajo	8	4.705	X
Arriba	8	4.975	X

Contrast		Difference	+/- Limits
Abajo - Arriba		*-0.27	0.124182

* denotes a statistically significant difference.

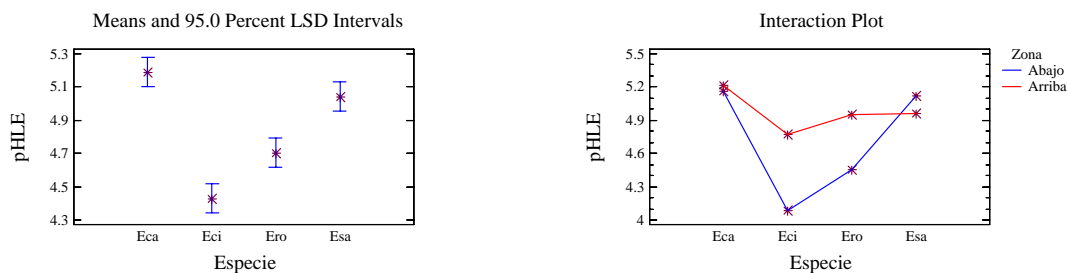


Figura 18. Gráfica de medias y gráfica de interacción por especie, para pH "libre de extracto".

Cuadro 15. Prueba del rango múltiple para pH "libre de extracto" por especie.

Multiple Range Tests for pHLE by Especie

Method: 95.0 percent LSD

Especie	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Eci	4	4.43	X
Ero	4	4.7025	X
Esa	4	5.04	X
Eca	4	5.1875	X

Contrast	Difference	+/- Limits
Eca - Eci	*0.7575	0.17562
Eca - Ero	*0.485	0.17562
Eca - Esa	0.1475	0.17562
Eci - Ero	*-0.2725	0.17562
Eci - Esa	*-0.61	0.17562
Ero - Esa	*-0.3375	0.17562

* denotes a statistically significant difference.

8.1.5. Lignina

El análisis de varianza (Anova) para el valor del contenido de lignina de la harina de madera, después de la extracción con solventes orgánicos (Cuadro 16), indica el nivel de significancia calculado por (p-Value) solo para el factor especie, es menor a 0.05, por lo que la hipótesis respectiva se rechaza, es decir, solo el factor especie es estadísticamente significativo sobre la variable de respuesta, lignina. Las figuras 19 y 20, así como los cuadros 17 y 18 muestran dichos resultados.

Cuadro 16. Anova para Lignina

Analysis of Variance for Lignina - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value

MAIN EFFECTS					
A:Zona	0.1369	1	0.1369	0.05	0.8325
B:Especie	44.8811	3	14.9604	5.22	0.0275
INTERACTIONS					
AB	2.3682	3	0.7894	0.28	0.8418
RESIDUAL	22.9464	8	2.8683		

TOTAL (CORRECTED)	70.3326	15			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

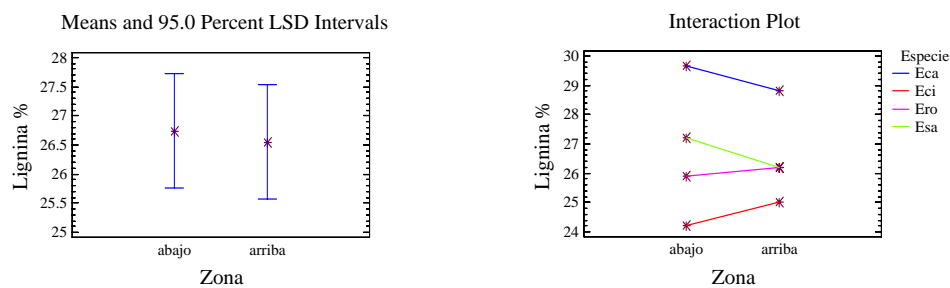


Figura 19. Gráfica de medias y gráfica de interacción por zona, para lignina.

Cuadro 17. Prueba de rango múltiple para el contenido de lignina por zona

Multiple Range Tests for lignina by Zona

Method: 95.0 percent LSD			
Zona	Count	LS Mean	Homogeneous Groups

Arriba	8	26.5525	X
Abajo	8	26.7375	X

Contrast	Difference		+/- Limits

Abajo - Arriba	0.185		1.95274

* denotes a statistically significant difference.

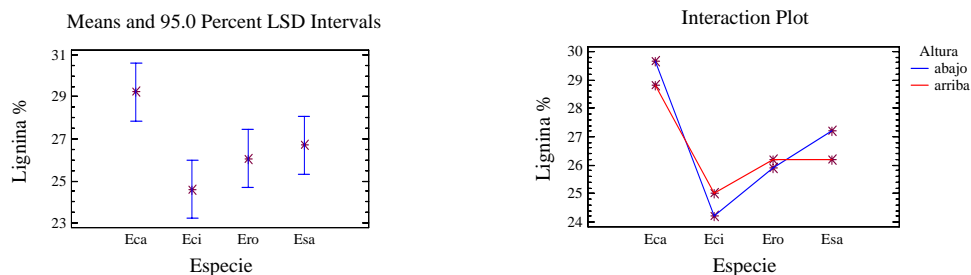


Figura 20. Gráfica de medias y gráfica de interacción por especie, para lignina.

Cuadro 18. Prueba de rango múltiple para el contenido de lignina por especie

Multiple Range Tests for lignina by Especie

Method: 95.0 percent LSD			
Especie	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Eci	4	24.6025	X
Ero	4	26.0525	X
Esa	4	26.6925	XX
Eca	4	29.2325	X

Contrast	Difference	+/- Limits
Eca - Eci	*4.63	2.76159
Eca - Ero	*3.18	2.76159
Eca - Esa	2.54	2.76159
Eci - Ero	-1.45	2.76159
Eci - Esa	-2.09	2.76159
Ero - Esa	-0.64	2.76159

* denotes a statistically significant difference.

8.1.6 Holocelulosa

El análisis de varianza (Anova) para el valor del contenido de holocelulosa de la harina de madera después de la extracción con solventes aparece en el cuadro 19, e indica que el nivel de significancia calculado por (p-Value) para ambos factores y su intersección zona-especie, es menor a 0.05, por lo que la hipótesis se rechaza, es decir, que estos factores y su intersección si tienen influencia significativa sobre la variable de respuesta, contenido de holocelulosa, dichos resultados se muestran en los cuadros 20 y 21, así como en las figuras 21 y 22.

Cuadro 19. Anova para el contenido de holocelulosa

Analysis of Variance for Holocelulosa - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value

MAIN EFFECTS					
A:Zona	13.9876	1	13.9876	20.33	0.0020
B:Especie	80.4442	3	26.8147	38.97	0.0000
INTERACTIONS					
AB	28.8095	3	9.60315	13.96	0.0015
RESIDUAL	5.5041	8	0.688012		

TOTAL (CORRECTED)	128.745	15			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

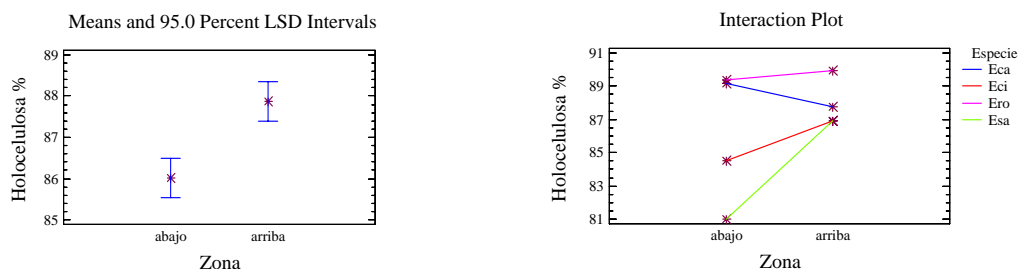


Figura 21. Gráfica de medias y gráfica de interacción por zona, para holocelulosa.

Cuadro 20. Prueba de rango múltiple para el contenido de holocelulosa por zona

Multiple Range Tests for Holocelulosa by Zona

Method: 95.0 percent LSD

Zona	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Abajo	8	86.0113	X
Arriba	8	87.8813	X

Contrast		Difference	+/- Limits
Abajo - Arriba		*-1.87	0.956377

* denotes a statistically significant difference.

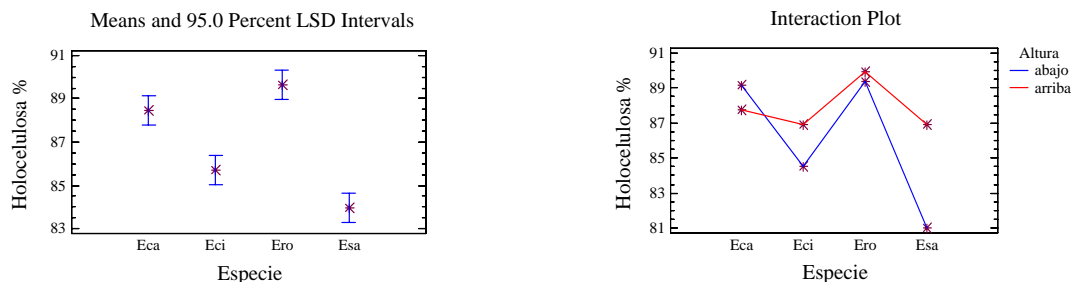


Figura 22. Gráfica de medias y gráfica de interacción por especie, para holocelulosa.

Cuadro 21. Prueba de rango múltiple para el contenido de holocelulosa por especie.

Multiple Range Tests for Holocelulosa by Especie

Method: 95.0 percent LSD

Especie	Count	LS Mean	Homogeneous Groups
Esa	4	83.9575	X
Eci	4	85.7075	X
Eca	4	88.465	X
Ero	4	89.655	X

Contrast	Difference	+/- Limits
Eca - Eci	*2.7575	1.35252
Eca - Ero	-1.19	1.35252
Eca - Esa	*4.5075	1.35252
Eci - Ero	*-3.9475	1.35252
Eci - Esa	*1.75	1.35252
Ero - Esa	*5.6975	1.35252

* denotes a statistically significant difference.

Los valores promedio del análisis químico de la madera de eucalipto a dos diferentes alturas se aprecian en el cuadro 22, la comparación entre especies en la figura 23.

Cuadro 22. Resultado de la composición química:

Especie	Altura	pH*	(%) Cen*	(%) Ext*	pH (H.L.E)*	(%) Lig *	(%) Holo*
<i>E. saligna</i>	baja	4.02	0.51	5.6	5.11	27.20	81.01
	alta	4.21	0.3	4.99	4.96	26.18	86.9
<i>E. citriodora</i>	baja	4.02	0.42	7.49	4.09	24.19	84.49
	alta	4.3	0.48	5.53	4.77	25.01	86.92
<i>E. robusta</i>	baja	3.47	0.35	9.77	4.45	25.9	89.38
	alta	4.22	0.25	7.4	5.87	26.2	89.93
<i>E. camaldulensis</i>	baja	5.08	0.73	6.74	5.16	29.65	89.22
	alta	5.66	0.74	4.72	5.21	28.81	87.77

*pH: potencial Hidrógeno, Cen: Cenizas, Ext: Extraíbles, H.L.E: Harina "libre de extraíbles", Lig: Lignina, Holo: Holocelulosa.

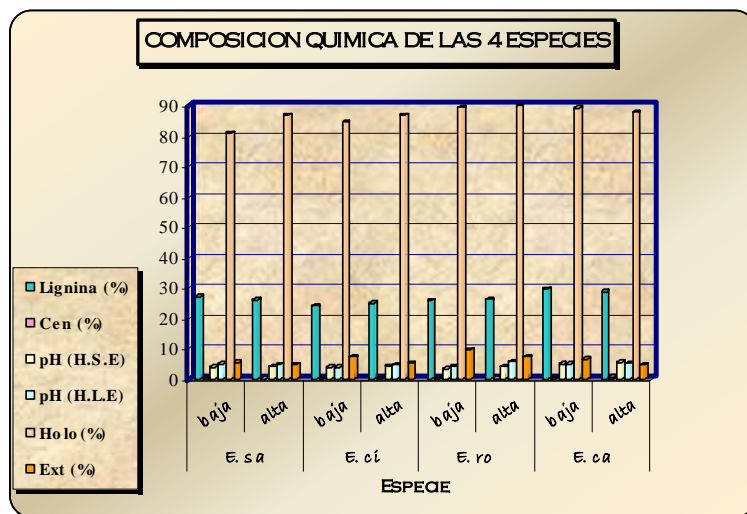


Figura 23. Comparación entre especies de la composición química.

Valores de las extracciones con los diferentes solventes a dos diferentes alturas de la madera en estudiado, se aprecian en el cuadro 23, y la comparación entre especies Figura 24.

Cuadro 23. Resultado de las extracciones (%):

Especie	Parte	Ciclohexano	Acetona	Metanol	H2O caliente	Suma de extractos
E. ca.*	baja	0.56	4.75	3.9	2.03	11.24
	alta	0.38	2.76	2.56	1.83	7.53
E. ci.*	baja	1.37	5.24	2.6	1.22	10.43
	alta	0.99	3.08	3.08	2.38	9.53
E. ro.*	baja	2.78	6.04	3.48	1.53	13.83
	alta	1.99	3.03	3.03	0.88	8.93
E. sa*	baja	0.36	3.89	2.62	1.03	7.9
	alta	0.24	3.42	2.05	0.67	6.38

*E. ca: *Eucalyptus camaldulensis*, E. ci: *E. citriodora*, E. ro: *E. robusta* y E. sa: *E. saligna*.

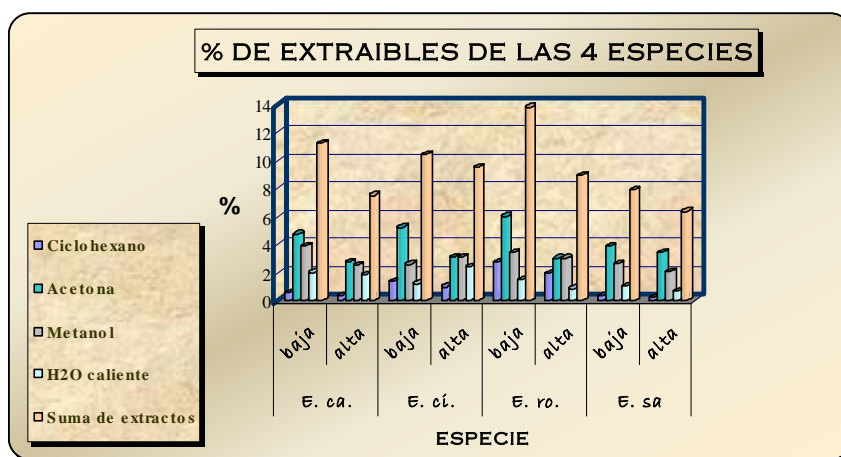


Figura 24. Comparación entre especies en % de extraíbles.

8.2 Índices de calidad de pulpa

8.2.1 Análisis estadístico de las mediciones de las fibras por especie

8.2.1.1 *Eucalyptus camaldulensis*

El cuadro 24 muestra los resultados estadísticos de las mediciones de las fibras en la parte baja del árbol, y en el cuadro 25 se encuentran los resultados de la parte alta del árbol.

Cuadro 24. Resultado de las mediciones de las fibras (parte baja):

Valores	Longitud (μm)	Diámetro de lumen(μm)	Grosor de pared (μm)	Diámetro de fibra (μm)
Promedio	868.6	9.6	2.4	14.4
Máximo	1313	21.6	4.8	26.4
Mínimo	696.9	4.8	2.4	9.6
Moda	848.4	9.6	2.4	14.4
D. S.*	112.7	3.3	1.05	3.5

Cuadro 25. Resultados de las mediciones de las fibras (parte alta):

Valores	Longitud (μm)	Diámetro de lumen(μm)	Grosor de pared (μm)	Diámetro de fibra (μm)
Promedio	919.1	7.2	2.4	12
Máximo	1212	14.4	7.2	19.2
Mínimo	797.9	4.8	2.4	9.6
Moda	939.3	7.2	2.4	12
D. S.*	113.7	2.2	1.03	2.4

* Desviación Standard

8.2.1.2 *Eucalyptus citriodora*

Los resultados estadísticos de las mediciones de las fibras en la parte baja del árbol se muestran en el cuadro 26 y en el cuadro 27 se presentan los resultados de la parte alta del árbol.

Cuadro 26. Resultado de las mediciones de las fibras (parte baja):

Valores	Longitud (µm)	Diámetro de lumen(µm)	Grosor de pared (µm)	Diámetro de fibra (µm)
Promedio	999.9	7.2	4.8	16.8
Máximo	1313	12	8.4	19.2
Mínimo	676.7	2.4	2.4	9.6
Moda	999.9	4.8	3.6	12
D. S.*	117.8	2.2	1.5	2.3

Cuadro 27. Resultados de las mediciones de las fibras (parte alta):

Valores	Longitud (µm)	Diámetro de lumen(µm)	Grosor de pared (µm)	Diámetro de fibra (µm)
Promedio	1040.3	10.8	4.8	15.6
Máximo	1494.8	19.2	6	19.2
Mínimo	828.2	2.4	2.4	9.6
Moda	1252.4	7.2	4.8	14.4
D. S.*	140.5	3.5	1.2	2.2

* Desviación Standard

8.2.1.3 *Eucalyptus robusta*

El cuadro 28 se presentan los resultados estadísticos de las mediciones de las fibras en la parte baja del árbol, y en el cuadro 29 se encuentran los resultados de la parte alta del árbol.

Cuadro 28. Resultado de las mediciones de las fibras (parte baja):

Valores	Longitud (μm)	Diámetro de lumen(μm)	Grosor de pared (μm)	Diámetro de fibra (μm)
Promedio	1206.9	8.16	2.92	14.02
Máximo	1383.7	14.4	6	19.2
Mínimo	636.3	2.4	2.4	9.6
Moda	818.1	7.2	2.4	12
D. S.*	221.4	2.8	1.04	2.4

Cuadro 29. Resultados de las mediciones de las fibras (parte alta):

Valores	Longitud (μm)	Diámetro de lumen(μm)	Grosor de pared (μm)	Diámetro de fibra (μm)
Promedio	1050.4	7.2	2.4	12
Máximo	1313	12	6	16.8
Mínimo	777.7	2.4	2.4	9.6
Moda	1060.5	7.2	2.4	12
D. S.*	143.4	2.7	1.1	2.02

* Desviación Standard

8.2.1.4 *Eucalyptus saligna*

El cuadro 30 nos muestra los resultados estadísticos de las mediciones de las fibras en la parte baja del árbol, y en el cuadro 31 se encuentran los resultados de la parte alta del árbol.

Cuadro 30. Resultado de las mediciones de las fibras (parte baja):

Valores	Longitud (µm)	Diámetro de lumen(µm)	Grosor de pared (µm)	Diámetro de fibra (µm)
Promedio	969.6	12	2.4	16.8
Máximo	1515	14.4	7.2	19.2
Mínimo	222.2	4.8	2.4	9.6
Moda	1414	7.2	2.4	12
D. S.*	223.1	2.5	1.2	2.5

Cuadro 31. Resultados de las mediciones de las fibras (parte alta):

Valores	Longitud (µm)	Diámetro de lumen(µm)	Grosor de pared (µm)	Diámetro de fibra (µm)
Promedio	1040.3	8.4	2.4	13.2
Máximo	1504.9	21.6	10.8	26.4
Mínimo	585.8	2.4	2.4	9.6
Moda	1161.5	9.6	2.4	14.4
D. S.*	204.9	4.1	1.3	3.9

*Desviación Standard

Cuadro 32. Valores de las características mesurables, índices de calidad de pulpa:

Especie	Fibras (μm)				Índices de calidad		
	L*	DI*	GP*	DF*	R.R*	C.R*	C.F*
Eca* abajo	868.6	9.6	2.4	14.4	0.6	0.4	0.6
Eca arriba	919.1	7.2	2.4	12.0	0.5	0.3	0.6
Eci* abajo	999.9	7.2	4.8	16.8	0.8	0.6	0.7
Eci arriba	1040.3	10.8	4.8	15.6	1.3	0.5	0.4
Ero* abajo	1206.9	8.16	2.92	14.02	0.6	0.4	0.6
Ero arriba	1050.4	7.2	2.4	12.0	0.71	0.41	0.58
Esa* abajo	1040.3	8.4	2.4	13.2	0.4	0.2	0.7
Esa arriba	969.6	12.0	2.4	16.8	0.5	0.3	0.6

*Eca: *Eucalyptus camaldulensis*, Eci: *E. citriodora*, Ero: *E. robusta*, Esa: *E. saligna*, L: Longitud de la fibra, DI: Diámetro del lumen, GP: grosor de pared, DF: Diámetro de fibra, R.R: Relación de Runkel, C.R: Coeficiente de rigidez, C.F: Coeficiente de flexibilidad.

8.2.2 Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel

En el cuadro 32 se presentan las mediciones de las fibras, así como los resultados de sus índices de calidad de pulpa, mientras que en el cuadro 33 y figura 24 se muestra la respectiva clasificación de las fibras de cada una de las diferentes especies a dos diferentes alturas.

Cuadro 33. Clasificación de las fibras:

Especie	R.R*	C.R*	C.F*
Eca* abajo	Buena	Media	Media
Eca arriba	Buena	Media	Media
Eci* abajo	Buena	Media	Media
Eci arriba	Buena	Muy delgada	Delgada
Ero* abajo	Buena	Media	Media
Ero arriba	Buena	Media	Media
Esa* abajo	Regular	Media	Gruesa
Esa arriba	Buena	Gruesa	Delgada

*Eca: *Eucalyptus camaldulensis*, Eci: *E. citriodora*, Ero: *E. robusta*, Esa: *E. saligna*, R.R: Relación de Runkel, C.R: Coeficiente de rigidez, C.F: Coeficiente de flexibilidad.

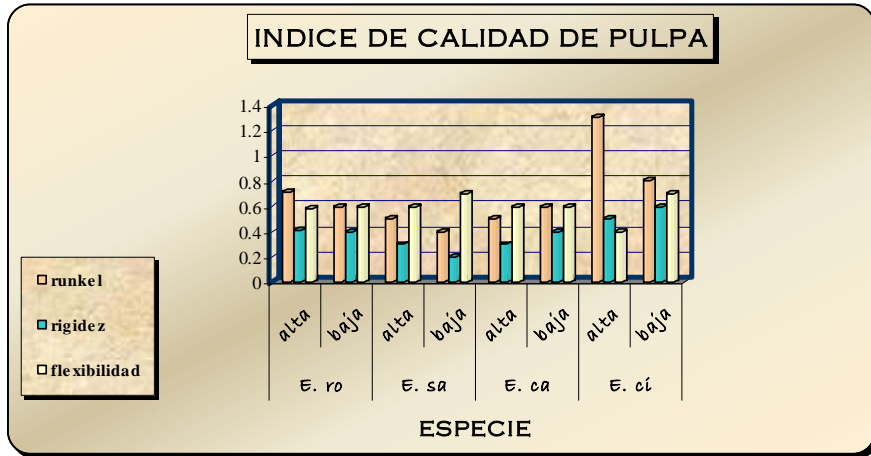


Figura 25. Comparación entre especies en índices de calidad de pulpa.

9. DISCUSION DE RESULTADOS

9.1 Composición química

9.1.1 pH

Una vez realizadas las mediciones de **pH, antes de realizar las extracciones** con solventes de polaridad ascendente, se encontraron diferencias significativas por zona y por especie, los valores obtenidos en las cuatro especies son los siguientes: en la parte de abajo de *Eucalyptus camaldulensis* 5.08 y en la parte alta 5.6, para *E. citriodora* 4.02 y 4.3, *E. robusta* 3.4 y 4.22 finalmente para *E. saligna* 4.02 y 4.21 respectivamente (Cuadro 4, Fig. 11 y 12). Siendo *E. camaldulensis* en la parte alta la menos ácida, y el más ácido en la parte baja de *E. robusta*. Es conocido que el valor del pH está influenciado por la cantidad y tipo de sustancias extraíbles presentes en una muestra de madera, concretamente por la presencia de ácidos libres y grupos ácidos, entre otros (Fengel, Wegener 1983). Estos resultados dejan visible la variabilidad que se puede encontrar, incluso en muestras del mismo género.

Comparando los resultados con la literatura consultada, según Domratcheva *et al.* (2006), encontraron en albura (parte baja) para *Eucalyptus citriodora* 4.17 y 4.66 en *E. robusta* y 4.61 en *E. saligna*; en duramen (parte alta) 3.77 para *E. citriodora*, 3.04 para *E. robusta* y 3.18 para *E. saligna*. Para la parte alta (en la albura) se registraron valores de 4.83 en *E. citriodora*, 4.69 en *E. robusta*, y 4.72 para *E. saligna*; en la parte baja 3.81 para *E. citriodora*, 3.22 para *E. robusta* y 3.43 para *E. saligna* por otra parte los datos reportados por Pedraza (2006), en promedio para pH *E. robusta* resulto ser más ácida (3.39) mientras que el menos ácido resulto ser *E. saligna* (5.0), los valores para *E. camaldulensis* y *E. citriodora* son de 4.82 y 4.68 respectivamente, coinciden con los reportados en la presente investigación donde la parte inferior es más ácida que la superior, esto debido a la cantidad y tipo de extraíbles presentes en una muestra de madera (Fengel, Wegener 1983).

9.1.2 Sustancias inorgánicas (cenizas)

En los valores obtenidos se encuentran diferencias significativas entre especies y zonas, los valores obtenidos para la parte de abajo de *Eucalyptus camaldulensis* 0.73% y en la parte alta 0.74%, para *E. citriodora* 0.42% y 0.48%, *E. robusta* 0.35% y 0.25% y finalmente para *E. saligna* 0.51% y 0.3% (Cuadro 7, Fig. 13 y 14). Encontrando menor cantidad de sustancias inorgánicas en la parte alta de *E. robusta*, y la mayor cantidad en la parte alta de *E. camaldulensis*. Aún cuando no se dispuso de datos sobre el contenido de sustancias inorgánicas, Domratcheva *et al.* (2006), presentan diferencias significativas con respecto a las especies,

teniendo mayor porcentaje de cenizas en *E. citriodora*, seguida de *E. saligna* y por último *E. robusta* con el menor porcentaje.

A manera de comparación, aunque no se refiere a especies de eucalipto, se pueden señalar las siguientes referencias para diferentes especies, que comprueban lo anterior: 0.27% para albura de *Pinus sylvestris*, 0.21% para albura y 0.54% para duramen de *Quercus petraea* (Balaban, Yilgör 1995); 0.33% para *Swietenia macrophylla* (Torelli, Čufar 1994); 0.68% en duramen de *Dalbergia granadillo* y 0.96% en duramen de *Platymiscium lasiocarpum* (Rutiaga, García 1999); 0.16% en albura y 0.08% en duramen de *Pinus pseudostrobus*, 0.67% en albura y 0.23% en duramen de *Quercus laurina*, 0.36% en duramen de *Swietenia macrophylla*, 0.66% en duramen de *Cedrela odorata*, 0.78% en duramen de *Manilkara zapota* (Rutiaga 2001).

9.1.3 Extraíbles

Los valores obtenidos (suma total de extracto) para las especies en estudio son para la parte de abajo de *Eucalyptus camaldulensis* 6.74% y en la parte alta 4.72%, para *E. citriodora* 7.4% y 5.5%, *E. robusta* 9.7% y 7.4% y finalmente para *E. saligna* 5.6% y 4.9% respectivamente (Cuadro 10, Fig. 15 y 16). Encontrando menor cantidad de sustancias extraíbles en la parte alta de *E. camaldulensis*, y la mayor cantidad en la parte alta de *E. robusta* (Cuadro 23), denota diferencia estadística entre especies y zonas. La cantidad de sustancias extraíbles en la madera, no sólo depende de los solventes utilizados, sino también de la misma especie (Fengel, Wegener 1983), como lo deja de manifiesto los resultados encontrados en este estudio, es conocido que la influencia de factores ambientales y genéticos, la edad del árbol, el clima, la cantidad de agua suministrada, los nutrientes disponibles y la época de corte (Hillis 1971, Shiraishi *et al.* 1991). Aún cuando una comparación resulta difícil de realizar, pues no siempre es el mismo método de extracción, solventes y secuencia de extracción utilizados, pueden existir diferencias en la toma de la muestra y edad de los árboles, se considera conveniente citar algunos datos reportados sobre el contenido de extraíbles en madera de eucaliptos.

Los resultados obtenidos por Domratcheva *et al.* (2006) para la parte baja en la albura es de de 4.85% en *E. citriodora*, 3.92% en *E. robusta* y 3.65% para *E. saligna*, en duramen se obtuvo 7.21% en *E. citriodora*, 12.5% en *E. robusta* y 7.37% para *E. saligna*. En la parte alta de albura fue de 3.67% en *E. citriodora*, 3.33% en *E. robusta* y 2.84% para *E. saligna*, y en duramen 6.85% en *E. citriodora*, 8.78% en *E. robusta* y 6.05% para *E. saligna*. Aunque esta investigación no fueron separados en albura y duramen los datos obtenidos están dentro de los parámetros reportados por Domratcheva *et al.* (2006)

Por otra parte, estudios realizados por Gutmann *et al.* (1971) indica que el contenido de sustancias extraíbles en muestras de aserrín de *E. globulus* procedente de un aserradero de Santiago, Chile, encontrando 4.2%. Hillis (1987) reporta los siguientes valores de extracto acuoso caliente para el duramen de *E. creba* (6.8-20.2%), *E. delegantensis* (2.4-6.5%), *E. obliqua* (7.9-26.6%), *E. regnans* (4.8-15.3%) y *E. sieberi* (2.6-15.5%). Éste mismo autor da a conocer el contenido de extracto etanólico presente en el duramen de las siguientes especies: *E. creba* (5.0-18.6%), *E. delegantensis* (1.6-16.55%), *E. obliqua* (10.1-29.1%), *E. regnans* (1.3-16.3%) y *E. sieberi* (4.7-17.7%). No obstante, que son otras especies de eucaliptos, los datos obtenidos quedan dentro de las cuantificaciones obtenidas en la presente investigación.

9.1.4 pH libre de extractos

Para los valores de **pH, después de llevar a cabo las extracciones**, los resultados obtenidos son: en la parte de abajo de *Eucalyptus camaldulensis* 5.16 y en la parte alta 5.2, para *E. citriodora* 4.09 y 4.77, *E. robusta* 4.45 y 5.87 finalmente para *E. saligna* 5.11 y 4.96 respectivamente (Cuadro 13, Fig. 17 y 18), encontrando diferencias significativas entre especies y zonas. *E. robusta*, parte alta fue la menos ácida y *E. citriodora*, parte baja la más ácida. Se comprueba que las sustancias extraíbles influyen en el valor del pH, como es reportado en la literatura (Fengel, Wegener 1983).

9.1.5. Lignina

En promedio el contenido de lignina de la parte baja varia mínimamente con la parte alta 26.73% y 26.55 respectivamente (Cuadro 23, Fig. 23), encontrándose diferencias estadísticas sobre la especie (Cuadro 15, Fig. 19 y 20). La menor cantidad de lignina se encontró en la parte alta de *Eucalyptus citriodora* con 25%, mientras que el porcentaje más alto se encontró en *E. camaldulensis* con 29.65% en la parte baja.

Estudios recientes realizados por Coello (2006) encontró que en la albura, la parte baja del fuste presenta un porcentaje de 21.18% para *E. citriodora*, 23.12% en *E. robusta* y 23.03 en *E. saligna*, mientras que en la parte alta para *E. citriodora* 19.87%, en *E. robusta* 21.61 y 21.88 en *E. saligna*. En cuanto al duramen, en la parte baja obtuvo 19.52 para *E. citriodora*, 22.22 para *E. robusta* y 22.56 en *E. saligna*, por otro lado en la parte alta encontró 18.58% en *E. citriodora*, 21.41 para *E. robusta* y 21.83% en *E. saligna*. Si bien, son las mismas especies los resultados varían un poco, esto puede ser debido a la separación de albura y duramen, pero en realidad es muy poca la diferencia.

Otros trabajos bibliográficos reportan valores de lignina en madera de *Eucalyptus*, en donde Dadswell *et al.* (1962) reportan valores de 20 - 27% en *E. regnans*, Hillis (1984) encontró valores de lignina entre 15 y 22%, Gutmann *et al.* (1971) obtuvieron 23.2% de lignina en muestra de aserrín de *E. globulus*. Mansilla *et al.* (1991), en madera de esta misma especie, encontraron 20% de lignina. Paz (1994) estudia químicamente la madera de *E. globulus* de diferentes edades y procedente de diversas localidades; sus resultados indican, por ejemplo, que para árboles de 8 años, la cantidad de lignina fue de 23% y que para la edad de 19 años, el contenido fue de 20.4%. Los porcentajes de lignina reportados por Akira *et al.* (2003) en 13 especies de eucaliptos en rangos de 24.97% a 34.65% en donde encontró para *E. saligna* 26.08% y *E. robusta* 29.85%. Lo que indica que los resultados en porcentaje de lignina para nuestras 4 especies de *Eucalyptus*, están dentro de los rangos reportados por los diferentes autores consultados.

9.1.6 Holocelulosa

El porcentaje mayor obtenido de las cuatro especies fue para *E. camaldulensis* en la parte baja del fuste, mientras que la más baja se encontró en *E. saligna* en la parte baja del fuste (Cuadro 23, Fig. 23). Encontrando así diferencias estadísticas (Cuadro 18, Fig. 21 y 22).entre especies y entre zonas, con excepción de *E. camaldulensis* y *E.robusta* que estadísticamente resultaron ser iguales los contenidos de holocelulosa para *E. robusta* parte baja 89.93%, mientras que para *E. camaldulensis* para la parte baja 89.22%. En lo que respecta al trabajo presentado por Coello (2006) en donde reporta para la albura en la parte baja de *E. citriodora* presenta un porcentaje de 80.90%, *E. robusta* 46.17% y *E. saligna* 51.05%. Se aprecia para *E.robusta* y *E. saligna* un porcentaje muy bajo, por lo que no hay coincidencia en los datos alcanzados por la presente investigación. Mismo caso se observa en los trabajos realizados por Dadswell *et al.* (1962) donde encontró para *E. regnans* valores de 75% a 82% en holocelulosa, así mismo, Rowell (1984) reporta en *E.kirtoniana* y *E. saligna* valores de 74%. Además en el estudio químico para 13 especies de eucalipto realizado por Akira *et al.* (2003) encontraron que para *E.robusta* 61.04% y para *E. saligna* 64.45%. Esto puede ser debido a la secuencia de extracción para dejar el material libre de extractos, lo que indica también la variabilidad en la composición química de la madera, en general.

De acuerdo a los valores obtenidos en cuanto a composición química de la madera de eucalipto en general se encuentra dentro de los parámetros de los datos consultados en la literatura, así mismo, se observa que la composición química depende de factores diversos como la edad, el tiempo en que se toman las muestras, la altura del árbol, las condiciones climáticas, el suelo donde se desarrollo la planta, localización y condición del árbol (Rosales 1987).

9.2 Índices de calidad de pulpa

Los valores de calidad de pulpa son los parámetros que indican si las fibras reúnen las características necesarias para sugerirlas idóneas o no dentro de un proceso de pulpeo, a continuación se expresan los valores obtenidos en cada una de las especies, para la parte baja de *Eucalyptus camaldulensis* 0.6 relación Runkel, 0.4 en rigidez y 0.6 de flexibilidad y en la parte alta 0.5 relación Runkel, 0.3 en rigidez y 0.6 en flexibilidad (cuadro 33); para *E. citriodora* 0.8 relación Runkel, 0.6 en rigidez, 0.7 en flexibilidad en la parte baja y 1.3 relación Runkel, 0.5 en rigidez y 0.4 de flexibilidad en la parte alta (cuadro 33); en la parte baja de *E. robusta* 0.6 relación Runkel, 0.4 de rigidez y 0.6 de flexibilidad, en la parte alta 0.71 relación Runkel, 0.41 de rigidez y 0.58 de flexibilidad (cuadro 33) y por último para *E. saligna* 0.4 relación Runkel, 0.4 de rigidez y 0.6 de flexibilidad en la parte baja; 0.71 relación Runkel, 0.41 de rigidez y 0.58 de flexibilidad en la parte alta (cuadro 33).

En general las 4 especies arrojan buenos resultados en cuanto a **relación Runkel** se refiere, excepción de *Eucalyptus citriodora* parte alta, donde la clasificación fue "regular" (cuadro 33), para el **índice de rigidez** en *E. citriodora* (parte baja) define a la fibra de "paredes gruesas" manifestando la poca superficie de contacto y poca unión fibra-fibra (cuadro 33), no así para *E. saligna* en donde dicho índice define a la fibra "muy delgada", lo que indica que hay buena superficie de contacto y buena unión fibra-fibra; el **índice de flexibilidad** está íntimamente **ligado al índice de rigidez** (cuadro 33), variando un poco dicha clasificación por los rangos establecidos en éste índice, es por ello que se ven reflejadas estas diferencias en *E. citriodora* parte baja, en la cual cambia el índice de rigidez "medio" a índice de flexibilidad "grueso".

Comparando las clasificaciones que resultaron de los índices de calidad con los rendimientos reportados en las obtenciones de pulpa Kraft (cuadro 34), queda demostrado que las 4 especies, motivo de la presente investigación, son recomendables para el proceso de pulpeo, por lo que a continuación se mencionan algunos rendimientos generados en investigaciones previas sobre pulpa por dos tipos de procesos, Kraft en las especies de estudio a dos alturas del fuste; en donde, Rodríguez (2006) a partir de la madera de *Eucalyptus citriodora* Hook, reporta un rendimiento de 47.5% en la parte baja y 49.3% en la parte alta del fuste (cuadro 34); por otra parte, Trujillo (2006) a partir de la madera de *Eucalyptus robusta*, reporta rendimiento de 46.9% Kraft (cuadro 34); Gabriel (2005) emplea madera de *Eucalyptus saligna* reporta rendimientos en la parte baja 35.4% y en la parte alta de 39.4% para pulpa Kraft (cuadro 34). Mientras que Ortega (2005) reporta rendimientos de 36.2 en la parte superior de *E. camaldulensis* Dehrnh y en la parte inferior 30.6, encontrando diferencias significativas en ambas alturas del fuste (cuadro 34).

Cuadro 34. Se presentan los resultados reportados por distintos autores en la obtención de pulpa y los Índices de Calidad realizados en el presente trabajo:

Autor	Parte del fuste Y Especie	Rendimiento en %	Relación Runkel	Coefficiente de Rigidez	Coefficiente de Flexibilidad
Ortega (2005)	E. ca.* Parte baja	30.6	Buena	Media	Media
	E. ca. Parte alta	36.2	Buena	Media	Media
Rodríguez (2006)	E. ci.* Parte baja	47.5	Buena	Media	Media
	E. ci. Parte alta	49.3	Buena	Muy delgada	Delgada
Trujillo (2006)	E. ro.* Parte baja	47.5	Buena	Media	Media
	E. ro. Parte alta	49.3	Buena	Media	Media
Parra (2005)	E. sa.* Parte baja	41.6	Regular	Media	Gruesa
	E. sa. Parte alta	45.3	Buena	Gruesa	Delgada

*Eca: *Eucalyptus camaldulensis*, Eci: *E. citriodora*, Ero: *E. robusta*, Esa: *E. saligna*.

Por último, con los resultados obtenidos, queda de manifiesto la comprobación de la hipótesis planteada indicando que; en base a la composición química y a los índices de calidad de la pulpa, las especies de *Eucalyptus* pueden ser materia prima para obtener pulpa Kraft y podrán ser utilizados como material celulósico. Lo que se puede apreciar en los resultados de esta investigación.

11. RECOMENDACIONES

- Los Índices de Calidad de Pulpa debieran efectuarse con anterioridad y así realizar procesos de pulpeo para determinar cuáles serán las especies con mejores elementos estructurales.
- Realizar estudios cualitativos y cuantitativos de los azúcares presentes en estas especies.
- Realizar estudios cualitativos por medio de energía dispersiva de rayos x para determinar las sales inorgánicas presentes en las especies estudiadas.
- Surgen una infinidad de sugerencias al *planear un proyecto de investigación integral*, que es el caso de las especies de eucalipto aquí estudiadas. Si se llevan a cabo oportunamente todos los análisis, no se presentarán diferencias con las informaciones, por esto deben considerarse todos los factores que intervendrán al realizarlos. Realizar la cantidad de experimentos, procesos y métodos necesarios para lograr una recopilación de antecedentes tal que se sume al conocimiento, no solo de las especies, sino al género *Eucalyptus*.

10. CONCLUSIONES

- Se encontró diferencia estadística para el valor del pH (antes de realizar las extracciones), tanto en la zona de la toma de muestra, como en relación a las especies.
- El pH fue más ácido en la parte baja del árbol.
- La madera con mayor acidez se encontró en *Eucalyptus robusta* (3.84) y la menos ácida en *E. camaldulensis* (5.37).
- Se encontró diferencia estadística por la cantidad de sustancias inorgánicas, tanto en la zona de muestreo, como en cada una de las especies.
- En la zona baja del árbol hubo mayor cantidad de sustancias minerales.
- La madera con menor contenido de cenizas fue *E. robusta* (0.3%), parte alta y en la que se obtuvo mayor cantidad fue en *E. camaldulensis* (0.74%), parte alta.
- Se encontró diferencia estadística para el contenido de sustancias extraíbles, tanto en la zona de muestra como en cada una de las especies.
- La mayor cantidad de sustancias extraíbles se encontró en la zona baja del árbol.
- La especie menos rica en porcentaje de sustancias extraíbles fue la parte baja de *E. saligna* (5.05%) y la cantidad mayor estuvo presente en *E. robusta* (8.58%) parte baja.
- Se encontró que al diluir las sustancias extraíbles, el valor de pH en la madera aumentó, es decir, fue menos ácido.
- Se encontró diferencia estadística en el pH libre de extraíbles entre la zona de muestreo y la especie.
- Se encontró diferencia estadística por la cantidad de lignina, solo para el caso de las especies.
- La madera con menor contenido de lignina se encontró en *E. citriodora* (24.60%) y el mayor contenido en *E. camaldulensis* (29.23%).
- Se encontró diferencia estadística por la cantidad de holocelulosa, tanto para la zona de muestra como para cada especie.
- En la parte baja del árbol se encontró menor proporción de holocelulosa.
- La madera con menor cantidad de holocelulosa fue *E. saligna* (83.95%) y el mayor porcentaje lo obtuvo *E. robusta* (89.65%).
- La determinación de los Índices de Calidad de Pulpa, fueron parámetros que nos confirmaron los resultados obtenidos en los trabajos que se realizaron con anterioridad sobre pulpeo, quedando demostrado que las especies aquí utilizadas son adecuadas para este proceso.
- En cuanto a Relación Runkel se refiere *E. saligna* única especie en la que se encontró fibra regular. Se atribuyen buenos parámetros para *E. camaldulensis*, *E. robusta* y *E. citriodora*. Siendo la mejor especie *E. citriodora* en la que todos los índices le favorecieron.
- En el Coeficiente de Rigidez y Coeficiente de Flexibilidad para *E. citriodora* presenta las mejores características, siendo las únicas fibras clasificadas con paredes muy delgadas, lo que nos quiere decir que hay

buena superficie de contacto y buena unión fibra-fibra, a diferencia de *E. saligna* catalogada con paredes gruesas en la parte alta, habiendo así poca superficie de contacto y poca unión fibra-fibra.

Los resultados derivados de la composición química y los índices de calidad de pulpa son viables para que las especies de eucalipto sean materia prima para obtener pulpa celulósica quedando de manifiesto la comprobación de la hipótesis planteada.

7. BIBLIOGRAFÍA

Akira Mori f, Marin Mendes L, trugilho P F, das Graças cardoso M (2003) Use of wood of *Eucalyptus* sp and native in the storage of the sugar cane spirit, *Ciência e tecnologia de Alimentos*. Vol 23, no. 3. Campinas.

Balaban M, Yilgör N (1995) The acidity of hardwoods and softwoods grown in Turkey. *Holz Roh Werkst*.

Bamber RK, Curtin RA (1974) "Some properties of wood in blackbutt trees of two ages", *Aust. For*.

Barrichuelo LEG, Foelkel CEB, Gonzaga JV, Busnardo CA (1983) Basic density and characteristics of *Eucalyptus grandis* wood fibers. In: Proceedings of ABCP 16th Annual meeting, 3rd Latin American cellulose and papers Congress. Sao Paulo, Brazil.

Bland DE (1985) "The composition and Analysis of *Eucalyptus* wood" *Appita*, Vol. 38, N° 4.

Boas IH (1947) *The commercial Timbers of Australia, Their Properties and uses Commonwealth of Australia*. C. S. I. R. O. Melbourne.

Bucio SYH (1993) Características anatómicas de la Madera de cinco encinos del estado de Michoacán. *Boletín Técnico*, No. 109. SARH. INIFAP. México.

Coello Ruiz I (2006) *Composición Química de la Madera de tres especies de Eucalipto*. Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera. Facultad de Ingeniería en tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

Conde E, Cadahía E, Garcia-Vallejo MC, Tomás-Barberán F (1995) Low molecular weight polyphenols in wood and bark of *Eucalyptus globulus*. *Wood and Fiber Science* 27(4): 379-383.

Corral LG (1981) Anatomía de la Madera de siete especies del género *Quercus*. *Boletín Técnico* No. 72. SARH. INIF. México.

Cozzo D. s/f. *Eucalyptus y Eucaliptotecnia*. Edit. Buenos Aires, Argentina.

Dadswell H E, Wardrop A B, Watson A J (1962) "The Morphology, Chemistry and pulp characteristics of reaction wood", *Fundamentals of Papermarking Fiber*, publ. tech. sect. Brit. Paper and Board Marker's Assoc.

De la Paz POC, Robles G, Simental S (1979) Determinación de las características anatómicas y físico-mecánicas de la madera de 4 especies de leguminosas. Boletín técnico No. 61. SARH. INIF. México.

De la Paz POC, Carmona TF, Rogel GM (1980) Estudio anatómico de la madera de 43 especies tropicales. Boletín Técnico No. 63. SARH. INIF. México.

De la Paz POC, Corral LG, (1980) Estudio anatómico de la madera de once especies de angiospermas. Boletín Técnico No. 64. SARH. INIF. México.

De la Paz POC, Corral LG, (1982) Estudio anatómico de la madera de 26 especies de angiospermas de clima templado. Boletín Técnico No. 91. SARH. INIF. México.

Dietrichs HH (1975) Polysaccharide der Rinden. Holz Roh-Werkestoff 33(1):13-20.

Dillner B *et al.* (1970) The breeding of *E. globulus* on the basis of wood density, chemical composition and growth rate. In the production and Industrial Utilization of *Eucalyptus* Symposium in Lisboa, Supplement 5 to V. XXIII, Timber Bulletin for Europe, FAO, Roma.

Domratcheva Lvova L, Coello-Ruiz I, Rutiaga-Quiñones JG (2006) Chemical characterization of heartwood and sapwood from three *Eucalyptus* species. XV International Materials Research Congress. Cancún, México. Abstract book, pp 20. ISBN 968 863 943 5.

Fengel D, Wegener G (1983) Wood, Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Walter de Gruyter. Berlin.

Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO (1990) El dilema del eucalipto. Roma.

Flores RLJ (1981) Anatomía de la Madera de tres especies tropicales mexicanas. Boletín Técnico No. 24 SARH. INIF. México.

Fuentes Salinas M (1987) Efecto de la digestión en los índices de calidad de pulpa para papel de la madera de *Pinus montezumae* Lamb. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad michoacana de san Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. México.

Fukushima, K. *et al.* (1994) "Heterogeneous lignification in one year old shoots of trees I: characterization of cell wall component in the various tissues", Holzforshung 24.

Gabriel Parra R (2005) Obtención de pulpa Kraft a partir de la especie de *Eucalyptus saligna* Smith. Tesis profesional. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad michoacana de san Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. México.

Gabriel-Parra R, Rivera-Prado JJ, Vargas-Radillo JJ, Sanjuán-Dueñas R, Rutiaga-Quiñones JG (2005) Blanqueo de la pulpa celulósica de *Eucalyptus saligna* Smith, utilizando secuencias clorada y libre de cloro. VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Chihuahua, México. Memorias pp 560-563. ISBN 970-748-027-0.

Guridi Gómez LI (1998) Anatomía de la Madera, Instructivos. Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera. FITECMA-UMSNH. (Edición Libre). Morelia, Michoacán. México.

Gutmann *et al.* (1971) Serie de Investigación. Publicación no.3, Análisis Químico de la madera de Eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.) creciendo en Chile. Instituto Forestal. Chile 29 p (*in:* Barahona Olmos GL (2005) Variación de la composición química en albura, duramen y altura de madera pulpable de *Eucalyptus globulus*, proveniente de monte alto y monte bajo. Tesis profesional. Universidad de Chile.

Hillis W E (1971) Distribution Properties and Formation of Some Wood Stability. Wood Sc. Technol.

Hillis W E (1984) Eucalyptus for Wood production. CSIRO ACADEMIC PRESS.

Hillis W E (1987) Heartwood and Tree Exudates. Springer-Verlag. Berlin.

Huerta CJ, Corral LG (1975) Características tecnológicas de las pulpas de 10 coníferas. VI Congreso Mexicano de Botánica. Xalapa, México.

Igartúa DV *et al.* (2000) Calidad del Leño en *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus*, variación de la densidad básica y la longitud de fibra en una estación del sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Congreso Iberoamericano de Investigación en celulosa y Papel 2000. CIADICYP.

INEGI (2004) El municipio de cifras. Aspectos geográficos. Morelia, México.

Kayama T (1979) Pulping and papermarketing properties and Wood properties of tropical hardwoods. In: Tamolang FN Ed. Wood quality and utilization of tropical species. Proceedings. International Union of Forestry Research Organizations. College, Laguna, Filipinas.

Krilov A, Lasander WH (1989) Concentration, Distribution and Variability of Butanol-soluble Phenolic Compounds in Eucalypt Heartwood. *Holzforschung* 43(1): 49-54.

Luna OT (1983) Determinación de los índices de calidad de las pulpas de 29 maderas tropicales de Chiapas. Tesis profesional. Universidad Nacional Autónoma de México. Escuela nacional de Estudios Profesionales Iztacala. México.

Mangieri H, Milan J (1958) Los eucaliptos en la Silvicultura. Editorial ACME, Buenos Aires, Argentina.

Mansilla H, García R, Tapia J, Durán H, Urzúa S (1991) Chemical characterization of Chilean Hardwoods. *Wood Sci. technol.* (25): 145-149.

Mariani AS, Torres UM, Fernández RA, Morales ME (2004) Variabilidad en sentido radial de *Eucalyptus nitens* y su efecto en Pulpa Kraft. Instituto de Productos Forestales, Universidad Austral de Chile. Valdivia Chile.

Mayer RM (1963) Papeles especiales, requiere pulpas especiales. *ATCP*. México III(4): 279-284.

Mondragón Noguez VS (2004) Contribución al conocimiento de la madera de *Lysiloma acapulcensis* (Kunth) Benth. Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad michoacana de san Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. México.

Monteoliva S, Nuñez C, Igartua D (2002) Densidad básica, longitud de fibras y composición química de la madera de una plantación de *Eucalyptus globulus* en la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Congreso Iberoamericano de Investigación en celulosa y Papel 2002. CIADICYP.

Montgomery DC (1991) Diseño y análisis de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica. México.

Ona T Sodona T, Ito K, Shibata M, Tamai Y, Kojima Y (1995) Japan, TAPPI 49.

Ona T Sodona T, Ito K, Shibata M (1997) "Relationship of lignin content, lignin monomeric composition and hemicellulosic composition in the same trunk sought by their withing tree variation in *E. camaldulensis* and *E. globulus*", *Holzforschung* 51.

Ortega Mora J R (2005) Obtención de pulpa Kraft a partir de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. Tesis Profesional. Facultad de Ingeniería en

Tecnología de la Madera. Universidad michoacana de san Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. México.

Ortega-Mora JR, Vargas-Radillo JJ, Vega-Elvira R, Castillo-Maciel LG, Sanjuán-Dueñas R, Rutiaga-Quiñones JG (2005) Proceso de pulpeo Kraft utilizando madera de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. XXVI Encuentro Nacional de la AMIDIQ. Acapulco, México. Memorias en CD.

Ortega-Mora JR, Rivera-Prado JJ, Vargas-Radillo JJ, Sanjuán-Dueñas R, Rutiaga-Quiñones JG (2005) Blanqueo de la pulpa Kraft de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, utilizando las secuencias (CD)EpPD y OAZEopPP. VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Chihuahua, México. Memorias ISBN 970-748-027-0.

Paz J (1994) Características físicas, químicas y biométricas de distintas especies de Eucaliptos y su aptitud pulpable in: Barahona Olmos GL (2005) Variación de la composición química en albura, duramen y altura de madera pulpable de *Eucalyptus globulus*, proveniente de monte alto y monte bajo. Tesis profesional. Universidad de Chile. Chile).

Pedraza-Bucio FE, Ochoa-Ruiz HG, Sanjuán-Dueñas R, Rutiaga-Quiñones JG (2004) pH, contenido de cenizas y de extraíbles de la corteza de dos eucaliptos. V Congreso Mexicano de Tecnología de Productos Forestales. Pachuca, México. Memorias.

Pedraza-Bucio FE, Ochoa-Ruiz HG, Sanjuán-Dueñas R, Rutiaga-Quiñones JG (2005) Sobre la composición química de la corteza de dos eucaliptos. Taller de Desarrollo Forestal Sostenible DEFORS 2005. Comisión No. 1 "Taller de Tecnología de la Madera y Productos Forestales" La Habana, Cuba. Memorias en CD. Trabajo No. 20.

Pedraza-Bucio FE, Ochoa-Ruiz HG, Sanjuán-Dueñas R, Rutiaga-Quiñones JG (2005) Cuantificación del extracto tánico de la corteza de dos especies de eucalipto. VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Chihuahua, México. Memorias pp 549-554. ISBN 970-748-027-0.

Pedraza-Bucio FE, Rutiaga-Quiñones JG (2005) Cuantificación del extracto tánico de la corteza de dos especies de eucalipto (*E. citriodora* y *E. robusta*). Primer Foro Académico de la DES de Ingenierías y Arquitectura 2005. Memorias pp 257-260.

Pedraza BFE (2006) Composición química de la corteza de 4 especies de eucalipto y evaluación de las propiedades de sus extractos tánicos. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Penner MH *et al.* (1996) Acid-catalized hydrolysis of lignocellulosic extracted materials, ACS, series.

Pereira H, Miranda I (1991) "The chemical composition of wood and bark of fast-grow *Eucalyptus globulus* L. trees during the first 3 years", Depto de Engenharia Florestal, Universidad Técnica de Lisboa, Portugal.

Pereira H, Sardinhas R (1984) Chemical composition of plantation *Eucalyptus globulus* Labill. *Appita* 37(8):661-664.

Rodríguez Olalde NE (2006) Obtención de pulpa Kraft y a la sosa y su blanqueo a partir de la madera de *Eucalyptus citriodora* Hook. Tesis de Maestría en Ciencias y tecnología de la Madera. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. México.

Rodríguez-Olalde NE, Vargas-Radillo JJ, Rivera-Prado JJ, Castillo-Maciel LG, Sanjuán-Dueñas R, Rutiaga-Quiñones JG (2006) Proceso de pulpeo Kraft utilizando madera de *Eucalyptus citriodora* Hook. XXVII Encuentro Nacional de la AMIDIQ. Ixtapa-Zihuatanejo, México. Memorias en CD.

Rogel GMA (1982) Características anatómicas de la madera de siete especies tropicales. Boletín Técnico. No. 86. SARH. INIF. México.

Rosales Castro M (1987) Determinación del peso molecular de taninos y composición química en cortezas de dos leguminosas. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guadalajara. México.

Rowel M R (1984) The Chemistry of Solid Wood. American Chemical Society, Washington, D. C. U.S.A.

Runkel ROH, Wilke KD (1951) Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. *Holz Roh Werkstoff*. 9: 260-270.

Rutiaga-Quiñones JG (2001) Chemische und biologische Untersuchungen zum Verhalten dauerhafter Holzarten und ihrer Extrakte gegenüber holzabbauenden Pilzen. Buchverlag Gräefelfing. München.

Rutiaga-Quiñones JG, Gabriel Parra R, Castillo-Maciel LG, Vargas-Radillo JJ, Sanjuán-Dueñas R (2005) Pulpeo Kraft en madera de *Eucalyptus saligna*. Taller de Desarrollo Forestal Sostenible DEFORS 2005. Comisión No. 1 "Taller de Tecnología de la Madera y Productos Forestales" La Habana, Cuba. Memorias en CD. Trabajo No. 23,

Rutiaga-Quiñones JG, García Díaz (1999) Elementos químicos en las cenizas del duramen de dos maderas tropicales. Ciencia Forestal en México.

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

Shiraishi N, *et al.* (1991) Wood and Cellulose Chemistry. (*In*: David N, Hon SC (Eds). University South Carolina. U.S.)

Swan *et al.* (1967) Wood extractives from *E. Globulus*. Svensks popp. Tedn.

Tamarit Urias JC (1996) Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas de latifoliadas. Madera y bosques 2(2):29-41.

TAPPI Test Methods (2000) TAPPI Press. Atlanta.

Tischler K (1976) Improvement of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh wood. PhD Tesis, Hebrew Univ, Jerusalem Israel.

Torelli N, Čufar K (1994) Comparative decay resistente of 43 Mexican tropical hardwoods. Holz Roh werkst.

Tortorelli LA (1956) Maderas y bosques argentinos. ACME. S.A.C.I. Buenos Aires.

Trujillo Jiménez U (2006) Obtención de pulpa Kraft y a la sosa y su blanqueo a partir de la madera de *Eucalyptus robusta*. Tesis de Maestría. Maestría en Ciencias y tecnología de la Madera. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. México.

Tsoumis G (1991) Science and Technology of Wood. Van Nostrand Reinhold. New York.

Valerio Firme LF (2003) Determinação de taninos condensados em madeiras de eucaliptos e sua influência na qualidade da cachaça.

Villaseñor Araiza JC, Rutiaga Quiñones JG (2000) La madera de *Casuarina equisetifolia* L. química e índices de calidad de pulpa. Madera y Bosques 6(1):29-40.

Wilkes J (1984) The influence of rate of growth on the density and heartwood extractives content of eucalypt species. Wood Sci. Technol. 18: 113-120.

Wise (1946) *In*: San Juan Dueñas R (1991) Guía práctica para la especialidad en celulosa y papel. Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Guadalajara.

Wu, J., Fukazawa, K. and Ohtani, J., (1992) "Distribution of Syringyl and guaiacyl lignins in hard woods in relation to habitat and porosity form in wood Holzforshung 46.

Yoshinaga A, Fujita M, Saiki H (1993) "Composition of lignin building units and neutral sugar in Oak Xilem tissue", Mokussai Gakkaishi 39.

Hemerografía de Internet:

Monreal Rangel SB (2006) La recuperación de la Industria Mexicana de la Celulosa y el Papel a partir de las plantaciones forestales comerciales. México Forestal, Bosques y Selvas para siempre. Revista electrónica de la Comisión Nacional Forestal. No. 49.

<http://www.mexicoforestal.gob.mx/editorial.php?id=21> [Fecha de consulta: 13 de noviembre de 2006]

13. ANEXOS

Índice de Calidad de Pulpa para Papel tomado de Mondragón (2004)

1. Índice de rigidez: $C.R. = 2W/D$
2. Índice de flexibilidad: $C.F. = l / D$
3. Relación Runkel: $R.R. = 2w/l$

En donde:

C.R. = Índice de rigidez

C.F. = Índice de flexibilidad

R.R. = Relación Runkel

D = diámetro

l = amplitud del lumen

w = grosor de pared

Clasificación del índice de rigidez (2W/D)	
Rango	Clasificación del grosor de pared
<0.20	Muy delgada
0.20 - 0.35	Delgada
0.35 - 0.50	Media
0.50 - 0.70	Gruesa
>0.70	Muy gruesa

Clasificación del índice de flexibilidad (l/D)		
Rango	Clasificación del grosor de pared	Características
<0.30	Muy gruesa	Las fibras no se colapsan. Hay muy poca superficie de contacto y poca unión fibra-fibra.
0.30 - 0.50	Gruesa	Las fibras se colapsan muy poco. Hay poca superficie de contacto y poca unión fibra-fibra.
0.50 - 0.65	Media	Fibras con sección transversal elíptica, parcialmente colapsadas; buena superficie de contacto y buena unión fibra-fibra.
0.65 - 0.80	Delgada	<i>Idem</i>
>0.80	Muy Delgada	Las fibras se colapsan. Hay buena superficie de contacto y buena unión fibra-fibra.

Clasificación del índice de flexibilidad (l/D)		
Grado	Rango	Clasificación
I	<0.25	Excelente
II	0.25 - 0.50	Muy buena
III	0.50 - 1.00	Buena
IV	1.00 - 2.00	Regular
V	>2.00	Mala