



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA
MADERA OBTENIDA DEL PRIMER CLAREO EN ÁRBOLES DE
MELINA (*Gmelina arborea Roxb.*), DE UNA PLANTACIÓN
PROVENIENTE DEL DEPARTAMENTO DE IZABAL**

Francisco José Paz Fong

Asesorado por: Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales
Ing. For. Msc. José Mario Saravia Molina

Guatemala, octubre de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA
MADERA OBTENIDA DEL PRIMER CLAREO EN ÁRBOLES DE
MELINA (*Gmelina arborea Roxb.*), DE UNA PLANTACIÓN
PROVENIENTE DEL DEPARTAMENTO DE IZABAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FRANCISCO JOSÉ PAZ FONG

ASESORADO POR: INGA. QCA. TELMA MARICELA CANO MORALES
ING. FOR. MSC. JOSÉ MARIO SARAVIA MOLINA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Milton de León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Telma Maricela Cano Morales
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADORA	Inga. Teresa Lisely de León Arana
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA
MADERA OBTENIDA DEL PRIMER CLAREO EN ÁRBOLES DE
MELINA (*Gmelina arborea Roxb.*), DE UNA PLANTACIÓN
PROVENIENTE DEL DEPARTAMENTO DE IZABAL,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Química, el 11 de marzo de 2008.

Francisco José Paz Fong

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
HIPÒTESIS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 La madera	1
1.1.1 La composición de la madera	2
1.1.2 Clasificación de los árboles	3
1.1.3 Partes de la madera	4
1.1.3.1 La corteza	4
1.1.3.2 El cambium	4
1.1.3.3 La albura	4
1.1.3.4 Duramen	4
1.1.3.5 Anillos de crecimiento	5
1.1.4 Dureza de la madera	6
1.1.5 Composición química de la madera	7
1.1.5.1 Lignina	8
1.1.5.2 Celulosa	10
1.1.5.3 Taninos	13
1.1.5.4 Cenizas	22
1.1.5.5 Extraíbles	24

1.2	Fundamentación teórica de la especie Gmelina arborea (Roxb.)	29
1.2.1	Taxonomía	31
1.2.2	Botánica y ecología	32
1.2.3	Distribución natural	36
1.2.4	Lugares de introducción a nivel mundial	37
1.2.5	Lugares de introducción en Centroamérica	38
1.2.6	Descripción de la especie	40
1.2.7	Características y propiedades de la madera	41
1.2.8	Sitios óptimos de desarrollo	42
1.2.9	Requerimientos ambientales	42
1.2.10	Usos recomendados	43
1.3	Fundamentación teórica de la metodología	44
1.3.1	Calcinación	44
1.3.2	Lixiviación	46
1.3.3	Secado	46
1.3.4	Gravimetría	47
1.3.5	Volumetría	48
2.	METODOLOGÍA	51
2.1	Metodología de la investigación	51
2.1.1	Localización	51
2.1.2	Recursos	51
2.2	Metodología experimental	55
2.2.1	Obtención y preparación de las muestras	55
2.2.2	Caracterización química de la madera	55
2.2.3	Determinación de humedad	56
2.2.4	Determinación de taninos	57
2.2.5	Determinación de extraíbles	61
2.2.6	Determinación de lignina	62

2.2.7	Determinación de celulosa	64
2.2.8	Determinación de cenizas	66
2.3	Diseño experimental	67
2.3.1	Diseño de tratamientos	67
2.3.2	Análisis estadístico	69
3.	RESULTADOS	73
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	79
	CONCLUSIONES	83
	RECOMENDACIONES	85
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	89
	BIBLIOGRAFÍA	91
	APÉNDICES	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Partes de la madera	6
2. Estructura de la celulosa	11
3. Plantación de Melina en Morales, Izabal	30
4. Distribución natural de la Melina	37
5. Origen de las muestras a tres diferentes alturas del tronco	69
6. Concentración promedio de celulosa en función de la altura de Melina (<i>Gmelina arborea Roxb.</i>)	72
7. Concentración promedio de lignina en función de la altura de Melina (<i>Gmelina arborea Roxb.</i>)	72
8. Concentración promedio de extraíbles en función de la altura de Melina (<i>Gmelina arborea Roxb.</i>)	73
9. Concentración promedio de taninos en función de la altura de Melina (<i>Gmelina arborea Roxb.</i>)	73
10. Concentración promedio de cenizas en función de la altura de Melina (<i>Gmelina arborea Roxb.</i>)	74
11. Equipo utilizado para lograr el tamaño de partícula deseado, tamiz 40 escala Tyler en la preparación de las muestras	88
12. Cristalería diversa para la determinación de celulosa, lignina, extraíbles y taninos	88
13. Proceso para la determinación de cenizas	89
14. Proceso para la determinación de humedad	90
15. Proceso para la determinación de extraíbles	90

16. Proceso para la determinación de taninos	91
17. Otros equipos utilizados	92

TABLAS

I. Composición química de la madera	29
II. Requerimientos ambientales	42
III. Variables para el diseño unifactorial	69
IV. Análisis de varianza para el diseño unifactorial	70
V. Resultados generales de la composición química de la madera de Melina (<i>Gmelina arborea</i> Roxb.)	71
VI. Datos calculados para celulosa	81
VII. Datos calculados para lignina	81
VIII. Datos calculados para extraíbles	81
IX. Datos calculados para taninos	82
X. Datos calculados para cenizas	82
XI. Resultados del análisis de varianza para celulosa	83
XII. Resultados del análisis de varianza para lignina	84
XIII. Resultados del análisis de varianza para extraíbles	84
XIV. Resultados del análisis de varianza para taninos	84
XV. Resultados del análisis de varianza para cenizas	84

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Nivel de confianza estadística
ASTM	American Society for Testing and Materials
cm	Centímetro
DAP	Diámetro a la altura del pecho
D6	Altura comercial del fuste
Fo	Fisher observada
F	Fisher tabulada
g	Gramo

Hi	Hipótesis alterna
Ho	Hipótesis nula
msnm	Metros sobre el nivel del mar
INAB	Instituto Nacional de Bosques
Kg	Kilogramo
L	Litro
m	Metro
mL	Mililitro
mm	Milímetro
°C	Grado Celsius

GLOSARIO

Aceites esenciales	Mezcla de sustancias volátiles, en donde predominan los terpenos y terpenoides oxigenados (alcoholes y ácidos).
Análisis gravimétrico	Consiste en determinar la cantidad proporcionada de un elemento, radical o compuesto presente en una muestra.
Análisis volumétrico	Análisis cuantitativo que consta de la medición del volumen de reactivo que hay que gastar, hasta que ocurre una reacción en el líquido analizado.
Celulosa	Es un homopolisacárido rígido, insoluble, que contiene desde varios cientos hasta varios miles de unidades de glucosa.
Clareo	Operación de corta que tiene la finalidad de reducir la densidad extrayendo los peores árboles y que al practicarse con pinos jóvenes da lugar a productos de difícil o imposible comercialización.
Extraíbles	Se entienden aquellas sustancias que se extraen de diferentes partes de los árboles de coníferas y latifoliadas mediante agua, disolventes orgánicos, vapor de agua y mediante un exprimido mecánico.

Lignina

Es un grupo de compuestos químicos usados en las paredes celulares de las plantas para crear madera.

Taninos

Los taninos son polímeros polifenólicos producidos en las plantas como compuestos secundarios, y que tienen la habilidad de formar complejos desempeñando en las plantas una acción defensiva frente a los insectos.

RESUMEN

Se hizo la caracterización química de la madera de Melina (*Gmelina arborea Roxb.*), de una finca ubicada en Morales, Izabal.

La muestra fue de nueve árboles, de los cuales se hicieron tratamientos de tres diferentes alturas para cada árbol; siendo éstas la altura basal (DAP = diámetro a la altura del pecho = 1.3 m), media y alta o apical.

Para ello se realizaron los siguientes ensayos basados en las normas especificadas: determinación de celulosa en madera según norma ANSI/ASTM D1103 – 60, lignina en madera según norma ANSI/ASTM D1106 – 56, madera libre de sustancias extraíbles según norma ANSI/ASTM D1105 – 56, taninos según método tara en vaina y cenizas en madera según norma ANSI/ASTM D1103 – 60.

De los ensayos anteriores se obtuvieron los siguientes resultados: Celulosa entre 50 y 67% en peso, Lignina entre 20 y 31 %, Extraíbles entre 8 y 14 %, Taninos entre 0.47 y 1.7 %, Cenizas entre 0.4 y 1.2%.

Además, se determinó que el porcentaje de los distintos componentes no tienen diferencia significativa respecto a la altura del árbol, lo cual significa que podemos tomar cualquier parte del mismo sin variar las composiciones.

OBJETIVOS

General:

1. Evaluar la composición química de la madera obtenida de la Melina (*Gmelina arborea Roxb.*) en función de las diferentes secciones del tronco, procedente del primer clareo de una plantación en Morales, Izabal.

Específicos:

1. Determinar la composición química de la madera obtenida de la Melina (*Gmelina arborea Roxb.*), a la altura basal del árbol.
2. Determinar la composición química de la madera obtenida de la Melina (*Gmelina arborea Roxb.*), a la altura media del árbol.
3. Determinar la composición química de la madera obtenida de la Melina (*Gmelina arborea Roxb.*), a la altura apical del árbol.
4. Evaluar la existencia de diferencias significativas en la composición de compuestos químicos, en función de las diferentes secciones del tronco de la Melina (*Gmelina arborea Roxb.*) estudiadas.

HIPÓTESIS

Existen diferencias en la composición de compuestos químicos en función de las diferentes secciones del tronco, seleccionadas del árbol de Melina (*Gmelina arborea Roxb.*)

Hipótesis Estadística

Ho: No existe diferencia significativa en los porcentajes de composición de compuestos químicos a cada una de las alturas seleccionadas, de la Melina (*Gmelina arborea Roxb.*)

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

Hi: Sí existe diferencia significativa en los porcentajes de rendimiento de compuestos químicos, a cada una de las alturas seleccionadas, de la Melina (*Gmelina arborea Roxb.*)

$$E_i = 1,2,3 / \mu_i \neq \mu$$

INTRODUCCIÓN

En Centroamérica, las investigaciones de la especie Melina (*Gmelina arborea Roxb.*) son muy pocas, y dado que en este tramo de países se dan las condiciones para cultivarla, ha sido objeto de diversos estudios. Éstos se han hecho en su mayoría en Costa Rica y Guatemala.

La Melina es una especie forestal originaria del continente asiático, ya que se adapta a los siguientes bosques: seco tropical, húmedo tropical, muy húmedo tropical y subtropical.

En Guatemala, esta especie es utilizada para madera y leña. Las diferentes plantaciones de Melina se encuentran en los siguientes departamentos: Izabal, Escuintla y Suchitepéquez.

Actualmente, se cuenta con poca información con respecto al estudio integral de las propiedades de la madera juvenil de especies forestales guatemaltecas con potencial industrial, por lo que con este estudio se está colaborando a diferentes temas relacionados al aprovechamiento sostenible de los bosques.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 La Madera:

La madera es un material anisotrópico encontrado como principal contenido del tronco de un árbol. Los árboles se caracterizan por tener troncos que crecen cada año y que están compuestos por fibras de celulosa unidas con lignina. Las plantas que no producen madera son conocidas como herbáceas.

Como la madera la producen y utilizan las plantas con fines estructurales, es un material muy resistente y gracias a esta característica y a su abundancia natural, es utilizada ampliamente por los humanos, ya desde tiempos muy remotos.

Una vez cortada y seca, la madera se utiliza para muy diferentes aplicaciones. Una de ellas es la fabricación de pulpa o pasta, materia prima para hacer papel. Artistas y carpinteros tallan y unen trozos de madera con herramientas especiales, para fines prácticos o artísticos. La madera es también un material de construcción muy importante desde los comienzos de las construcciones humanas y continúa siéndolo hoy.

En la actualidad y desde principios de la revolución industrial muchos de los usos de la madera han sido cubiertos por metales o plásticos, sin embargo, es un material apreciado por su belleza y porque puede reunir características que difícilmente se conjuntan en materiales artificiales.

La madera que se utiliza para alimentar el fuego se denomina leña y es una de las formas más simples de biomasa.

1.1.1 La composición de la madera

En composición media se compone de un 50% de carbono (C), un 42% de oxígeno (O), un 6% de hidrógeno (H) y el 2% de resto de nitrógeno (N) y otros elementos. Todo esto se compone formando la celulosa y la lignina. La celulosa: Un polisacárido estructural formado por glucosa que forma parte de la pared de las células vegetales. Su fórmula empírica es $(C_6H_{10}O_5)_n$, con el valor mínimo de $n = 200$.

Sus funciones son las de servir de aguante a la planta y la de darle una protección vegetal. Es muy resistente a los agentes químicos, insoluble en casi todos los disolventes y además inalterable al aire seco, su temperatura de astillación a presión de un bar son aproximadamente unos 232.2°C. El proceso de obtención de la celulosa es más o menos el siguiente:

Proceso de Kraft. Se trata con solución de sulfuro sódico e hidróxido sódico en relación 1:3 durante 2-6 horas a temperaturas de 160 -170° C. Después, en ebullición, se añade sulfato sódico que posteriormente pasa a sulfuro sódico y se elimina.

Método de la sosa. Se usa hidróxido sódico para digerir el material.

Método del sulfito. Se digiere con solución de bisulfito cálcico con dióxido de azufre libre, y las ligninas se transforman en lignosulfonatos solubles.

En medio de esto se hace uno de los tres casos en la madera. Esta llega y es descortezada y chipeada donde es echada a la caldera de acopio y de allí a una clasificación de lavado donde será seleccionado y blanqueado, más tarde

se secará y embalará. Ciertas que sobran serán metidas en unos silos que después darán cenizas que serán usadas para dar energía.

La lignina es otro polisacárido pero que se sitúa entre las fibras de la celulosa de algunas células. Se encarga de dar la dureza y la consistencia a la madera. La madera además contiene otras sustancias de las que se obtienen resinas, aceites..., etc.

1.1.2 Clasificación de los árboles

Se puede clasificar a los árboles en dos tipos, caducifolios y perennifolios:

- Árboles caducifolios: son los árboles en los que las hojas se caen en invierno para que les vuelvan a salir. Los más característicos son la encina, el roble, el almendro, el manzano y bastantes árboles frutales.
- Árboles perennifolios: son por el contrario los que se caracterizan por mantener la hoja todo el año, es decir, que no se les caen las hojas. Los más característicos son el pino, el ciprés, el abeto, el tejo,... Sin contar que estos árboles disponen de una madera más blanda que la de los caducifolios.

1.1.3 Partes de la madera

1.1.3.1 La corteza:

Es la capa más externa del árbol y esta formada por las células muertas del árbol. Esta capa es la protección contra los agentes atmosféricos.

1.1.3.2 El cambium:

Es la capa que sigue a la corteza y se divide en dos capas denominadas: La capa interior o capa de xilema que forma la albura y una capa exterior o capa de floema que se coloca formando la corteza.

1.1.3.3 La albura:

Es la madera de más reciente formación y por ella viajan la mayoría de los vasos de la savia que se parecerían a nuestro sistema sanguíneo. Los vasos transportan la savia que es una sustancia azucarada que la hace vulnerable a los ataques de los insectos. Es una capa más blanca porque por ahí viaja más savia que por el resto de la madera.

1.1.3.4 El duramen:

Es la madera dura y consistente, propiamente dicha, esta formada por unas células que no funcionan y se encuentra en el centro del árbol. Las diferencias con la albura son que es más oscura y no circula la savia, de ahí sale lo del color más oscuro.

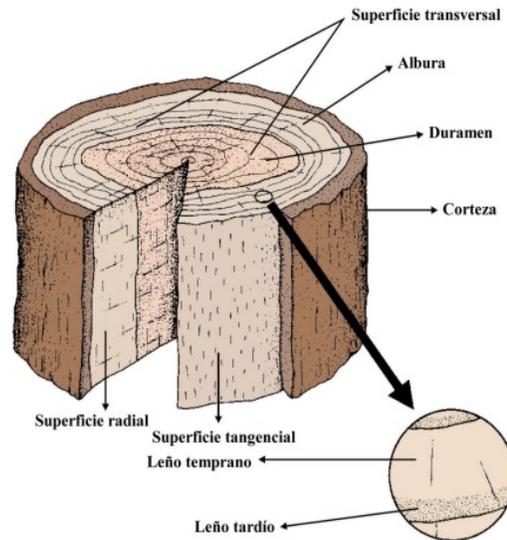
1.1.3.5 Anillos de crecimiento:

Los anillos de crecimiento nos indican muchas cosas:

- La edad del árbol: si se cuentan los anillos que hay al aplicarle un corte transversal; dirá los años que tiene el árbol, ya que esos anillos se forman por el crecimiento de una nueva capa de xilema.
- Sí es madera dura o blanda ya que la madera dura tiene los anillos más cercanos que los de la madera blanda.
- Algunos períodos climáticos, si están muy junto indican un periodo de sequía y en la cual el xilema no ha podido crecer demasiado y si por lo contrario ha llovido, los anillos estarán más separados.

Los "anillos" de la madera se producen por el "cambium" y el "felógeno" que forman el/la "felodermis" y el "corcho".

Figura 1. Partes de la madera



Fuente: Ref. Electrónica 1

1.1.4 Dureza de la madera

Según su dureza, la madera se clasifica en madera blanda y madera dura.

- **Maderas duras:** Las maderas duras son aquellas que proceden de árboles de un crecimiento lento, por lo que son más densas y soportan mejor las inclemencias del tiempo, si se encuentran a la intemperie, que las blandas. Estas maderas proceden de árboles de hoja caduca, que tardan décadas, e incluso siglos, en alcanzar el grado de madurez suficiente para ser cortadas y poder ser empleadas en la elaboración de muebles o vigas de los caseríos o viviendas unifamiliares. Son mucho más caras que las blandas, debido a que su lento crecimiento provoca su escasez, pero son mucho más atractivas para construir muebles con ellas. También son muy empleadas para realizar tallas de madera.

- Maderas blandas: El término madera blanda es una denominación genérica que sirve para englobar a la madera de los árboles pertenecientes a la orden de las coníferas. La gran ventaja que tienen respecto a las maderas duras, procedentes de especies de hoja caduca con un periodo de crecimiento mucho más largo, es su ligereza y su precio, mucho menor. Este tipo de madera no tiene una vida tan larga como las duras, pero puede ser empleada para trabajos específicos. Por ejemplo, la madera de cedro rojo tiene repelentes naturales contra plagas de insectos y hongos, de modo que es casi inmune a la putrefacción y a la descomposición, por lo que es muy utilizada en exteriores. La manipulación de las maderas blandas es mucho más sencilla, aunque tiene la desventaja de producir mayor cantidad de astillas. Además, la carencia de veteado de esta madera le resta atractivo, por lo que casi siempre es necesario pintarla, barnizarla o teñirla.

1.1.5 Composición química de la madera

“Con respecto a la composición química elemental, no hay ninguna diferencia importante entre los bosques. Los elementos químicos principales de madera son carbono, hidrógeno y oxígenos; las cantidades pequeñas de nitrógeno también están presentes. El análisis químico de varias especies, incluso maderas Gimnospermas o blandas y Angiospermas o maderas duras, muestra la proporción de elementos, en porcentaje en peso de madera, como se muestra a continuación: carbono 49-50%, hidrógeno 6%, oxígeno 44-45%, y nitrógeno sólo 0.1-1%.

El carbono, hidrógeno y la combinación de oxígeno sirven para formar los componentes orgánicos principales de sustancia de madera, α -celulosa, hemicelulosa, y lignina; cantidades pequeñas de sustancias pépticas también están presentes.

Estos componentes orgánicos de madera no son entidades químicas que pueden identificarse fácilmente. Los términos (α -celulosa, hemicelulosa y lignina) son genéricos, y cada uno incluye varios compuestos químicamente relacionados. La separación y la determinación cuantitativa de cada componente son llevadas a cabo en el laboratorio a través del uso de solventes y las técnicas específicas.

Las diferencias en procedimiento analítico mostrarán variación de composición química en la misma muestra de madera. Como resultado, los informes de la literatura no siempre están en acuerdo, y las dudas existen si las preparaciones del laboratorio son cuantitativamente y cualitativamente representativas de los componentes cuando éstos existen en madera en el estado natural.

Estos componentes forman la pared celular de madera y son responsables por la mayoría de sus propiedades físicas y químicas.

1.1.5.1 Lignina

La lignina es un grupo de compuestos químicos usados en las paredes celulares de las plantas para crear madera. La palabra *lignina* proviene del término latino *lignum*, que significa madera; así, a las plantas que contienen gran cantidad de lignina se las denomina leñosas.

La lignina está formada por la extracción irreversible del agua de los azúcares, creando compuestos aromáticos. Los polímeros de lignina son estructuras transconectadas con un peso molecular de 10 000 uma.

Se caracteriza por ser un complejo aromático (no carbohidrato) del que existen muchos polímeros estructurales (ligninas). Resulta conveniente utilizar el término lignina en un sentido colectivo para señalar la fracción lignina de la fibra. Después de los polisacáridos, la lignina es el polímero orgánico más abundante en el mundo vegetal. Es importante destacar que es la única fibra no polisacárido que se conoce.

Este componente de la madera realiza múltiples funciones que son esenciales para la vida de las plantas. Por ejemplo, posee un importante papel en el transporte interno de agua, nutrientes y metabolitos. Proporciona rigidez a la pared celular y actúa como puente de unión entre las células de la madera, creando un material que es notablemente resistente a los impactos, compresiones y flexiones. Realmente, los tejidos lignificados resisten el ataque de los microorganismos, impidiendo la penetración de las enzimas destructivas en la pared celular.

1.1.5.1.1 Estructura química

La molécula de lignina es una molécula, con un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). El acoplamiento aleatorio de estos radicales da origen a una estructura tridimensional, polímero amorfo, característico de la lignina.

La lignina es el polímero natural más complejo en relación a su estructura y heterogenicidad. Por esta razón no es posible describir una estructura definida

de la lignina; sin embargo, se han propuesto numerosos modelos que representan su estructura.

1.1.5.1.2 Propiedades físicas

Las ligninas son polímeros insolubles en ácidos y solubles en álcalis fuertes como el hidróxido de sodio, que no se digieren ni se absorben y tampoco son atacados por la microflora del colon. Pueden ligarse a los ácidos biliares y otros compuestos orgánicos (por ejemplo, colesterol), retrasando o disminuyendo la absorción en el intestino delgado de dichos componentes.

El grado de lignificación afecta notablemente a la digestibilidad de la fibra. La lignina, que aumenta de manera ostensible en la pared celular de la planta con el curso de la maduración, es resistente a la degradación bacteriana, y su contenido en fibra reduce la digestibilidad de los polisacáridos fibrosos.

1.1.5.2 Celulosa

La celulosa es un homopolisacárido (es decir, compuesto de un único tipo de monómero) rígido, insoluble, que contiene desde varios cientos hasta varios miles de unidades de glucosa.

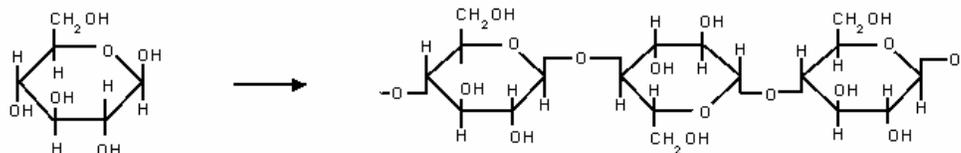
La celulosa corresponde a la biomolécula más abundante de la biomasa terrestre.

1.1.5.2.1 Estructura de la celulosa

La celulosa se forma por la unión de moléculas de β -glucosa mediante enlaces β -1,4-O-glucosídico. Es una hexosa que por hidrólisis da glucosa. La celulosa es una larga cadena polimérica de peso molecular variable, con fórmula empírica $(C_6H_{10}O_5)_n$, con un valor mínimo de $n= 200$.

La celulosa tiene una estructura lineal o fibrosa, en la que se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de glucosa, haciéndolas impenetrables al agua, lo que hace que sea insoluble en agua, y originando fibras compactas que constituyen la pared celular de las células vegetales.

Figura 2. Estructura de la celulosa



Fuente: Ref. Electrónica 1

1.1.5.2.2 Función de la Celulosa

La celulosa es un polisacárido estructural en las plantas ya que forma parte de los tejidos de sostén. La cepa de una célula vegetal joven contiene aproximadamente un 40% de celulosa; la madera un 50 %, mientras que el ejemplo más puro de celulosa es el algodón con un porcentaje mayor al 90%. El cáñamo también es una fuente de celulosa de alta calidad. A pesar de que está formada por glucosas, los animales no pueden utilizar a la celulosa como fuente de energía, ya que no cuentan con la enzima necesaria para romper los enlaces

β -1,4-glucosídicos, sin embargo, es importante incluirla en la dieta humana (fibra dietética) porque al mezclarse con las heces, facilita la digestión y defecación, así como previene los malos gases.

En el intestino de los rumiantes, de otros herbívoros y de termitas, existen microorganismos, muchos metanógenos, que poseen una enzima llamada celulasa que rompe el enlace β -1,4-glucosídico y al hidrolizarse la molécula de celulosa quedan disponibles las glucosas como fuente de energía.

Hay microorganismos (bacterias y hongos) que viven libres y también son capaces de hidrolizar la celulosa. Tienen una gran importancia ecológica, pues reciclan materiales celulósicos como papel, cartón y madera. De entre ellos, es de destacar el hongo *Trichoderma reesei*, capaz de producir cuatro tipos de celulasas: las 1,4- β -D-glucancelobiohirolasas CBH I y CBH II y las endo-1,4- β -D-glucanasa EG I y EG II. Mediante técnicas biotecnológicas se producen esas enzimas que pueden usarse en el reciclado de papel, disminuyendo el coste económico y la contaminación.

1.1.5.2.3 Historia y aplicaciones

La celulosa es la sustancia que más frecuentemente se encuentra en la pared de las células vegetales, y fue descubierta en 1838. La celulosa es la biomolécula más abundante de los seres vivos.

La celulosa constituye la materia prima del papel y de los tejidos de fibras naturales. También se utiliza en la fabricación de explosivos, celuloide, seda artificial, barnices. Esta presente en las plantas solamente los rumiantes lo ingieren.

1.1.5.3 Taninos

El término tanino fue originalmente utilizado para describir ciertas sustancias orgánicas que servían para convertir a las pieles crudas de animales en cuero, proceso conocido en inglés como tanning ("curtido" en español). Se extraen de las plantas con agua o con una mezcla de agua y alcohol, que luego se decanta y se deja evaporar a baja temperatura hasta obtener el producto final. Los taninos tienen un ligero olor característico, sabor amargo y astringente, y su color va desde el amarillo hasta el castaño oscuro. Expuestos al aire se tornan oscuros y pierden su efectividad para el curtido.

Químicamente son metabolitos secundarios de las plantas fenólicos, no nitrogenados, solubles en agua y no en alcohol ni solventes orgánicos.

Abundan en las cortezas de los robles (donde están especialmente concentrados en las agallas) y los castaños, entre otros árboles. Los taninos se utilizan en el curtido porque reaccionan con las proteínas de colágeno presentes en las pieles de los animales, uniéndolas entre sí, de esta forma aumenta la resistencia de la piel al calor, a la putrefacción por agua, y al ataque por microbios.

Los taninos tienen la propiedad de formar complejos con macromoléculas, particularmente con las proteínas; así forman enlaces colocándose entre las fibras de colágeno de la piel de los animales, por lo que se usan para "curtir la piel", dándole flexibilidad y resistencia. Esta propiedad explica también su astringencia, al precipitar las glicoproteínas contenidas en la saliva, haciendo que ella pierda su poder lubricante.

El tanino es un compuesto que se oxida al contacto con el aire, es inodoro y de sabor agrio, soluble en agua, alcohol y acetona; reacciona con el cloruro férrico y otras sales; es combustible con un punto de inflamación de 199°C, una temperatura de auto ignición de 528.5°C; poco tóxico por ingestión o inhalación.

Desde el punto de vista biológico los taninos son sustancias complejas producidas por las especies vegetales que cumplen funciones antisépticas o de conservación.

Los taninos se presentan en especies de familias vegetales de todo el mundo, se han identificado aproximadamente 500 especies de plantas que contienen varias cantidades de taninos, entre las principales familias botánicas con importancia en la obtención de taninos se pueden citar a las siguientes: Leguminosae, Rosaceae, Polygonaceae, Fgaceae, Rhyzophoraceae y Myrtaceae. Algunos géneros como las acacias (*Acacia* spp.), los encinos (*Quercus* spp.) y algunos pinos (*Pinus* spp.) que habitan bosques de pino-encino o zonas de transición son importantes en la producción de estos productos.

Es indudable la importancia que los taninos vegetales han adquirido a través de los años, conforme se ha profundizado su conocimiento y encontrado aplicaciones tan variadas. Quizás la aplicación más antigua es en la industria del cuero, para el proceso del curtido, aprovechando su capacidad de precipitar proteínas; ésta propiedad fue también aplicada en los tejidos vivos, constituyendo la base para su acción terapéutica, empleándolos en medicina en tratamientos del tracto gastrointestinal y para las escoriaciones y quemaduras de la piel. En este último caso las proteínas forman una capa protectora antiséptica bajo la cuál se regeneran los tejidos.

En los últimos años, en los que ha sido posible el aislamiento y determinación estructural de muchos de estos taninos, ha aumentado la investigación de sus actividades biológicas en base a las diferencias estructurales presentes. Dichas actividades, algunas de las cuales se mencionarán más adelante, dependen en muchos casos de los tipos de taninos y concentraciones empleadas; esto nos indica la necesidad de su identificación de análisis estructural, como paso previo a la investigación de sus posibles aplicaciones.

1.1.5.3.1 Definición

Los taninos son polímeros polifenólicos producidos en las plantas como compuestos secundarios y que tienen la habilidad de formar complejos con proteínas, polisacáridos, ácidos nucleicos, esteroides, alcaloides y saponinas desempeñando en las plantas una acción defensiva frente a los insectos. Son astringentes (precipitan las proteínas) y curten la piel. Químicamente se diferencian los taninos hidrolizables o hidrosolubles (pirogálicos: se hidrolizan en ácidos fenólicos y azúcares) y los taninos condensados no hidrosolubles (taninos catéquicos y los leucoantocianos; son polímeros muy difíciles de hidrolizar; los más ampliamente distribuidos en las plantas). Además, son un grupo de sustancias complejas que están ampliamente distribuidas en el reino vegetal, en casi todas las familias.

Pueden encontrarse en todos los órganos o partes de la planta: tallos, madera, hojas, semillas y cúpulas, pero con particular abundancia en las excreciones patológicas provocadas por ciertos insectos, conocidas comúnmente con el nombre de agallas; cuando se presentan en cantidades considerables, suelen localizarse en determinadas partes, como las hojas,

frutos, corteza o tallos. Es común que en las plantas herbáceas se presenten localizados en una cantidad considerable en las raíces disminuyendo mucho la concentración cuando se trata de plantas anuales. En las plantas leñosas, tanto la localización como la abundancia son variadas.

Los taninos hidrolizables son los que mayor interés toxicológico encierran. Entre los ácidos fenólicos más frecuentes en su composición destacan el ácido gálico, tánico, cafeíco, hexohidrofénico y elágico. El ganado vacuno tolera plantas con taninos como el *Sorghum halepense* (L.) Pers. en cantidades de 500 gr./cabeza y día, pero mayores cantidades provocan gastroenteritis, glomerulonefritis, edema en el aparato digestivo con mucosas congestionadas y hemorrágicas, aumento del tamaño de los riñones, presencia de sangre hemolítica y edema en pulmón, disminución de las proteínas, aumento del nitrógeno uréico, creatinina, potasio y fósforo. La mortalidad alcanza el 80% Los équidos manifiestan en intoxicaciones crónicas, ictericia y anemia hemolítica. Los taninos se consideran sustancias hemoglobinizantes. Los pollos manifiestan anormalidades en las patas. El diagnóstico se realiza por los síntomas y lesiones, determinando en orina las concentraciones de ácido cafeíco y pirogalol y determinando taninos en dieta.

1.1.5.3.2 Características

Son las siguientes:

- Compuestos químicos no cristalizables cuyas soluciones acuosas son coloidales, de reacción ácida y sabor astringente.
- Precipitan con gelatina, albúmina y alcaloides en solución.
- Con sales férricas dan coloraciones negro azuladas o verdosas.

- Producen un color rojo intenso con ferricianuro de potasio y amoniaco.
- Precipitan a las proteínas en solución y se combinan con ellas, haciéndolas resistentes a las enzimas proteolíticas. Ésta propiedad, denominada astringencia, fue mencionada anteriormente.

1.1.5.3.3 Clasificación

Dado que estos compuestos se han investigado durante más de 100 años, se diseñaron diferentes clasificaciones de acuerdo con el nivel del conocimiento que de éstos se tenía en los diferentes periodos de tiempo.

La clasificación de Freudenberg, que actualmente es empleada, tiene su fundamento en el tipo de estructura base del tanino. Es así que los agrupa en dos grandes clases: taninos hidrolizables y taninos condensados, con las siguientes características:

a. Taninos hidrolizables o pirogálicos

Son ésteres fácilmente hidrolizables formados por una molécula de azúcar (en general glucosa) unida a un número variable de moléculas de ácidos fenólicos (ácido gálico o su dímero, el ácido elágico). Son comunes de observar en plantas dicotiledóneas. Cuando se destilan en seco producen pirogalol.

- Se hidrolizan con facilidad por la acción de los ácidos, bases o enzimas, en un azúcar, un polialcohol y un ácido fenolcarboxílico. Dependiendo del tipo de ácido que produce por la reacción se subdividen en: galotaninos (ácido gálico) y elagitaninos (ácido elágico o dilactona estable del ácido hexahidroxidifénico)
- Los nucleos bencénicos están unidos por medio de átomos de oxígeno

- Dan coloración azul con FeCl_3 .
- No precipitan con soluciones de bromo.

Como ejemplos de taninos hidrolizables, del subgrupo de galotaninos se puede mencionar al que se obtiene de los frutos de *Caesalpinia Spinosa* (nombre común: tara). Este tanino es fácilmente hidrolizable por la acción de la enzima tanasa. Esto permitió asignar la estructura de un éster poligaloílo del ácido químico a dicho tanino, con un peso molecular aproximado de 800. Es común, también en las agallas del encino y en la raíz del zumaque.

Dentro de los elagitaninos, se puede poner como ejemplo al corilagin, primer tanino aislado de este tipo, de *Caesalpinia coriarea* (nombre común: divi-divi) y *Terminalia chebula* (nombre común: mirabolano). El isorugosin B, aislado de *Liquidambar*, es otro ejemplo.

b. Taninos condensados

Los taninos condensados son polímeros de flavan-3,4-dioles. Los taninos condensados presentes en leguminosas tropicales se encuentran en tres formas principales: (a) extractables (reactivos con proteína), (b) ligados a proteína, y (c) ligados a fibra. Existen leguminosas donde todos los taninos son extractables (e.g. *Acacia boliviana*) y en otras donde todos son ligados (e.g. *Gliricidia sepium*).

Por otra parte, se ha demostrado que el secado de una muestra puede afectar la distribución de taninos en el tejido de una planta. Por ejemplo, se ha observado que en varias leguminosas secadas al horno (60 °C) hubo una reducción de taninos extractables y un aumento de taninos ligados en comparación con muestras liofilizadas.

- Son derivados de unidades de flavan-3,4-dioles (leucoantocianidinas o proantocianidinas monómeras), conocidos actualmente también como proantocianidinas condensadas.
- Al ser tratados con ácidos en caliente, se origina una polimerización progresiva hasta dar taninos amorfos, llamados flobafenos o taninos rojos.
- En ellos, los núcleos bencénicos están unidos por átomos de carbono (por ejemplo C-4 a C-8, C-4 a C-6).
- Dan coloración verde con FeCl_3 .
- Precipitan con soluciones de bromo.

Ejemplo de este tipo de taninos los encontramos en la corteza de mimosa (*Acacia mollissima* Willd), en la madera de quebracho (*Schinopsis lorenzii*, Engl.), en la corteza de mangle (*Rhizophora mangle*), en las hojas de lentisco (*Pistacia lentiscus*), en la madera del castaño (*Castanea sativa*), entre otros.

1.1.5.3.4 Funciones

En las plantas cumplen funciones de defensa ante el herbivorismo. Los taninos en general son toxinas que reducen significativamente el crecimiento y la supervivencia de muchos herbívoros cuando se adicionan a su dieta. Además, tienen potencial de producir rechazo al alimento ("antifeedants" o "feeding repellents") en una gran diversidad de animales. Los mamíferos como la vaca, el ciervo y el simio característicamente evitan a las plantas o partes de las plantas con alto contenido de taninos. Las frutas no maduras, por ejemplo, con frecuencia tienen altos contenidos de taninos, que pueden estar concentrados en las capas celulares más externas de la fruta.

Es interesante el dato de que los humanos usualmente prefieren un cierto nivel de astringencia en las comidas que contienen taninos, como las manzanas, las zarzamoras, y el vino tinto. Recientemente, son los taninos del vino tinto los que mostraron poseer propiedades de bloquear la formación de endotelina-1, una molécula señal ("signaling molecule") que produce la constricción de los vasos sanguíneos lo cual disminuiría el riesgo de enfermedades cardíacas a aquellos que consuman vino tinto en forma moderada.

Si bien hay taninos específicos que pueden ser inocuos para el hombre, en general son tóxicos, debido a las mismas propiedades que los hace buenos para la curtiembre: su capacidad de unir entre sí proteínas de forma no específica. Durante mucho tiempo se pensó que los taninos formaban complejos con las proteínas del intestino de los herbívoros formando puentes de hidrógeno entre sus grupos hidroxilo y los sitios electronegativos de la proteína, pero evidencia más reciente también avala una unión covalente entre los taninos (y otros compuestos fenólicos provenientes de las plantas) y las proteínas de los herbívoros que los consumen. El follaje de muchas plantas contiene enzimas que oxidan los fenoles a sus formas quinona en los intestinos de los herbívoros. Las quinonas son altamente reactivas, electrofílicas, y reaccionan con los grupos de proteínas nucleofílicos $-NH_2$ y $-SH$. Cualquiera sea el mecanismo por el que ocurra la unión proteína-tanino, este proceso tiene un impacto negativo en la nutrición de los herbívoros. Los taninos pueden inactivar las enzimas digestivas de los herbívoros y crear complejos agregados de taninos y proteínas de plantas que son difíciles de digerir.

Los herbívoros que habitualmente se alimentan de material rico en taninos parecen poseer algunas interesantes adaptaciones para eliminar los taninos de sus sistemas digestivos. Por ejemplo, algunos mamíferos como los

ratones y los conejos, producen proteínas en la saliva que tienen un alto contenido de prolina (25-45%), que tiene una gran afinidad por los taninos. La secreción de estas proteínas es inducida por la ingestión de comida con un alto contenido de taninos, y su efecto es la disminución en una medida importante de los efectos adversos de la ingestión de taninos (Butler 1989). La alta cantidad de residuos de prolina le otorga a estas proteínas una conformación muy flexible y abierta, y un alto grado de hidrofobia que facilita su unión con los taninos.

Los taninos de las plantas también funcionan como defensas contra los microorganismos. Por ejemplo, el corazón de madera muerta de muchos árboles contiene altas concentraciones de taninos que ayudan a prevenir el desmoronamiento por ataques de hongos y bacterias patógenos.

1.1.5.3.5 Aplicaciones

Ambos tipos de taninos, hidrolizables y condensados, se emplean en la industria del cuero, por su gran poder curtiente, permitiendo obtener una amplia variedad de cueros, que se diferencian en flexibilidad y resistencia.

Los taninos condensados se usan principalmente en la fabricación de adhesivos y resinas. Por ejemplo, aquéllos que han sido aislados de especies de Acacia, han servido para desarrollar adhesivos en frío y termofraguados, por tratamiento con úrea-formaldehído, o con copolímeros fenol-formaldehído, estos últimos usados en la fabricación de enchapes de madera a prueba de agua. También se menciona su empleo como precipitantes para suspensión de arcilla.

Los taninos hidrolizables encuentran amplia aplicación debido a sus propiedades antioxidantes y su habilidad para formar complejos solubles e insolubles con las proteínas. Por ello se emplea en la industria de alimentos, farmacéutica y en cervecería. En este último campo, por ejemplo, se usan como estabilizadores de la cerveza: en el producto que no a sido recientemente preparado, las proteínas se combinan con los polifenoles para formar complejos que son responsables de la presencia de turbidez. Al agregar los taninos, el nivel de proteínas es disminuido a un valor apropiado y se aumenta así el tiempo de almacenamiento de la cerveza. En la industria farmacéutica, se emplean para contraatacar el efecto de los alcaloides y el envenenamiento por sales de metales, inactivándose éstos por precipitación. En la industria de alimentos se puede por ejemplo, remover impurezas proteínicas por precipitación con taninos; emplearlo en la preservación y maduración de alimentos, aprovechando sus propiedades antisépticas y antioxidantes; así como en la clarificación del vino. Su aplicación en otros campos está orientada, por ejemplo, a la extracción de Pb, Fe, Ca, Ba, y Ra presentes en soluciones, por coprecipitación con gelatina y taninos; al efecto anticorrosivo en superficies de Fe, expuestos al medio ambiente; al empleo en la elaboración de tintas; como recubrimiento protector de Cinc y aleaciones del mismo metal.

1.1.5.4 Cenizas

Pequeñas cantidades de elementos minerales, como calcio, potasio y magnesio, se encuentran en ceniza de madera. Normalmente, el volumen de la ceniza raramente es más bajo que 0.2% o más alto que el 1% del porcentaje en peso de madera.

La ceniza puede contener cantidades diminutas de una lista larga de otros elementos, como fósforo (P), azufre (S), sodio (Na), aluminio (Al), titanio (Ti), manganeso (Mn), hierro (Fe), cobalto (Co), níquel (Ni), plata (Ag), bario (Ba), plomo (Pb), y oro (Au). En algunas especies tropicales, la mayoría de la ceniza está compuesta de sílice (SiO_2)". (Ref. 4, 54)

Ampliando la información en resultados obtenidos para la determinación de los componentes de la ceniza de leña de encino se determinó que, el compuesto con mayor presencia fue el CaO (óxido de calcio), seguido de éste el K_2O (óxido de potasio) y por último SiO_2 (óxido de sílice). (Miranda, Alvaro 43)

Una cantidad justa de información está disponible sobre los constituyentes inorgánicos de madera y corteza. En bosques de las zonas templadas, además de los elementos carbono, hidrógeno, oxígeno, y nitrógeno existen otros que integran entre 0.1 y 0.5% del peso de madera, considerando que aquéllos de las regiones tropicales integran el 5%. Esta proporción, aunque pequeña, contiene una gran variedad de elementos. Por ejemplo, el análisis espectrográfico del árbol abeto sueco reveló tanto como 32 elementos.

En muchos casos, elementos de tierra alcali como Ca, Mg, y K hacen aproximadamente 80% de los constituyentes inorgánicos totales. Estos elementos probablemente ocurren en madera como sales, los oxalatos, carbonatos, y sulfatos.

Algunos de los elementos inorgánicos presentes en madera son esenciales para crecimiento de madera, considerando que otros necesariamente no se requieren. Los elementos metálicos están a menudo absorbidos en el árbol a través del sistema de la raíz y se transportan a todas

las áreas dentro del árbol creciente. Para siete especies, se ha determinado la distribución de 12 elementos inorgánicos en varias áreas del tejido de un árbol como las raíces, corteza, madera, y hojas.

Los resultados indicaron que el volumen de la ceniza total y la concentración de cada elemento varían significativamente entre las especies. El contenido de los constituyentes inorgánicos varía en gran parte con las condiciones de ambiente bajo las que el árbol ha crecido. Poco se ha publicado con respecto a la distribución morfológica de elementos en la célula. Por micro incineración, Lange encontró que los componentes del abeto sueco se depositan predominantemente en el lámela medio.

1.1.5.5 Extraíbles

Por sustancias extraíbles de la madera se entienden aquellas sustancias que se extraen de diferentes partes de los árboles de coníferas y latifolias mediante agua, disolventes orgánicos, vapor de agua y mediante un exprimido mecánico.

Entre las sustancias extraíbles se encuentran los más diversos compuestos orgánicos e inorgánicos y su presencia en diferentes especies es relativa.

A los azúcares, el almidón y algunos compuestos nitrogenados se les encuentran en la albura. Las sustancias fenólicas se encuentran normalmente en el duramen. Existe una variación en la concentración de los extraíbles a lo largo del tronco del árbol y entre este y las ramas. Cuando se estudia la estructura de la madera se observa que las grasas se localizan en las células parenquimatosas, especialmente en los rayos parenquimatosos, mientras que

la resina es secretada por las células epiteliales y se depositan en los canales resiníferos. Otras sustancias se depositan en los poros de la madera (Ref. 5).

Esta distribución está regida por una serie de factores entre los que se pueden destacar los de significado genético y ecológico. Su composición y cantidad relativa dependen de diversos factores como especie, edad y región. Aproximadamente de 3-10 % de la madera seca está constituida por sustancias extraíbles. Para coníferas esta cifra oscila entre 5-8 % y para latifolias, entre 2-4 % (Ref. 6).

Estos constituyentes son responsables de algunas características de las plantas como resistencia natural a la pudrición, sabor y propiedades abrasivas. Los extractivos del duramen se consideran los responsables de impartir a ciertas especies de maderas olores y sabores muy característicos, como el olor a "lápiz" de la madera de pinabete, México, o el sabor desagradable amargo de amargoso, Guatemala. Algunas especies a las que los extractivos imparten aroma y sabor intenso son también muy resistentes al ataque de hongos e insectos (Ref. 7).

La producción de sustancias extraíbles de la madera se divide en dos grupos fundamentales:

- Producción de colofonia y trementina a partir de la resina, por destilación. Colofonia. Es una sustancia frágil, de aspecto vítreo, color que va del amarillo claro al pardo, soluble en la mayoría de los disolventes orgánicos. Está constituida por una mezcla amorfa de hasta 98 % de ácidos resinosos y sustancias neutrales no saponificables. La colofonia de resina de pino está constituida por 92 % de una mezcla de ácidos

resinosos; 0,4 - 1,6 % de productos grasos y 6,4 % de productos neutrales (Ref. 8).

Trementina. Constituye la fracción volátil de la resina. Está formada por una mezcla de hidrocarburos terpénicos (fórmula general: $C_{10}H_{16}$). Casi todos estos hidrocarburos tienen tendencia a la isomerización mediante la acción de ácidos, elevada temperatura, luz, catalizador y otros factores.

- Obtención de productos derivados de colofonia y trementina
Derivados de colofonia. Se denominan con más frecuencia colofonias modificadas. Son productos de diversas reacciones como polimerización, cloración, hidrogenación, oxidación, etc.; ácidos resinosos (abiético, levopimárico, dextropimárico); resinas sintéticas; resinatos (de Ca, Zn, Mn, Pb, Cu), emulsionadores, etc.
Derivados de trementina. Se destacan los pinenos (a y b), camfeno, alcanfor y otros.

Todas las especies de madera y la mayoría de los vegetales contienen cantidades variables de algunas sustancias químicas diferentes a los carbohidratos y a la lignina que constituyen la pared celular. De acuerdo con el punto de vista con el que se estén tratando, reciben diversos nombres:

- Componentes extraños de la madera, porque son diferentes a los compuestos que constituyen la pared celular
- Sustancias extraíbles o solubles.
- Extractivos
- Sustancias volátiles, porque muchas de estas sustancias son volátiles o imparten características de olor a la madera.
- Constituyentes menores

Los extraíbles que se encuentran en los tejidos vegetales son sustancias tales como terpenos, fenoles, taninos, minerales, azúcares, hidrocarburos alifáticos y aromáticos, ácidos alifáticos y aromáticos, esterinas, aceites esenciales, ácidos grasos y resinosos, resinas, grasas y otros.

Existe una considerable variación en la distribución de los extraíbles en un árbol; ellos se encuentran distribuidos en follaje, madera, corteza y raíces. La corteza y las raíces son las partes donde se encuentran en mayor concentración los extraíbles (Ref. 9).

1.1.5.5.1 Extractivos del follaje

Oscilan entre 30-36 %. Pueden dividirse en dos grandes grupos: las sustancias solubles en agua y los solubles en disolventes orgánicos

1.1.5.5.1.1 Sustancias solubles en agua

El follaje contiene considerable cantidad (hasta 30 %) de sustancias solubles en agua, los cuales pertenecen a diferentes clases de compuestos, que pudieran clasificarse de la siguiente forma: Vitaminas (C, B1, B2, B6, H, ácido fólico), compuestos nitrogenados (proteicos y no proteicos), ácidos, sustancias fenólicas, azúcares (mono y oligosacáridos) y cenizas (macro y microelementos)

1.1.5.5.1.2 Solubles en disolventes orgánicos

La composición química de las sustancias solubles en disolventes orgánicos es muy variada. En disolventes orgánicos fundamentalmente se

extraen grasas, resinas y ácidos grasos, ésteres de estos ácidos, cera, fitoesterinas (Ref. 8).

Tanto la cantidad como la composición de estas sustancias dependen del disolvente en que son extraídos. En la literatura aparecen bajo diferentes formas de nombrar: lípidos, sustancias solubles en grasas, sustancias resinosas, grasa bruta y otros.

Según las ideas actuales, las sustancias que forman los organismos vivos, insolubles en agua, pero solubles en disolventes orgánicos (cloroformo, éter, benceno y otros) y que contienen en sus moléculas radicales alquílicos superiores, se denominan lípidos. Estas sustancias son hidrocarburos, alcoholes, aldehídos, derivados de ácidos grasos (glicéridos, ceras, fosfo, glico, sulfolípidos), vitaminas solubles en grasas (A, D, E, K) y sus derivados, clorofila, carotenoides, esterinas, etc. La inclusión de estas sustancias en la composición de los lípidos se explica porque ellos con frecuencia se encuentran en las membranas y aparecen junto a los fosfolípidos y en los extractos con disolventes utilizados para la extracción de las grasas (Ref. 10).

1.1.5.5.2 Aceites esenciales

Son productos de la actividad vital de las plantas formadas por mezclas complejas de diferentes sustancias, líquidas incoloras o ligeramente coloreadas de amarillo, con olor específico y sabor ardiente (Ref. 8).

Constituyen una mezcla de sustancias volátiles que pertenecen a diferentes clases de compuestos orgánicos. Predominan los terpenos y terpenoides oxigenados (alcoholes y ácidos), algunos fenoles, éteres, aldehídos, cetonas y lactosas. Los terpenos son hidrocarburos de composición

C₁₀H₁₆ (derivados del isopreno C₅H₁₀). En los aceites esenciales aparecen monoterpenos, diterpenos (C₂₀H₃₂) y sesquiterpenos (C₁₅H₂₄) (Ref. 10).

Los aceites esenciales protegen al árbol de enfermedades por hongos e insectos y la mayor utilización industrial la alcanzan en perfumería para proporcionar aroma a los productos.

Tabla I. Composición química de la madera (%)

Componentes	Coníferas	Latifoliadas
Holocelulosa	59.8 – 80.9	71.0 – 89.1
Celulosa	30.1 – 60.7	31.1 – 64.4
Poliosas	12.5 – 29.1	18.0 – 41.2
Pentosas	4.5 – 17.5	12.6 – 32.3
Lignina	21.7 – 37.0	14.0 – 34.6
Extractivos (agua caliente)	0.2 – 14.4	0.3 – 11.0
Extractivos (agua fría)	0.5 – 10.6	0.2 – 8.9
Extractivos (éter)	0.2 – 8.5	0.1 – 7.7
Cenizas	0.02 – 1.1	0.1 – 5.4

Fuente: Ref. 4

1.2 Fundamentación teórica de la especie *Gmelina arborea* (Roxb.)

Nombre científico: *Gmelina arborea* (Roxb.)

Familia: Verbenaceae

Sinónimos: *Gmelina arborea* Linn

Nombres comunes: En América tropical se le conoce como melina, en Indonesia se le conoce como yemane y en la India gamari o gumadi. Otros nombres son gemelina, gmelina, gumhar, kashmir tree, malay beechwood, snapdragon, teca blanca, yemani (Birmania), so, so-maeo (Tailandia), kumhar, sewan (Pakistán), shivani (Indias central), gamar (Bangladesh).

Variedades: Han sido reportadas tres variedades de la especie: *Gmelina arborea* var. *arborea*, *Gmelina arborea* var. *glaucescens* y *Gmelina arborea* var. *canencens*, y su mayor diferencia está dada por su distribución natural.

Observaciones taxonómicas: El género *Gmelina* fue descrito por Linneo en 1742 y la especie *arborea* fue descrita por Roxburg en 1814.

Figura 3. Plantación de Melina en Morales, Izabal



Fuente: Ref. 3

1.2.1 Taxonomía

1.2.1.1 Aspectos generales. Límites de anillos de crecimiento distintos o indistintos o ausentes. Duramen de color café amarillo a blanco o gris. Color de la albura similar al color del duramen. Peso específico básico: 0,4–0,6 g/cm³.

1.2.1.2 Vasos. Madera de porosidad semianular o porosidad difusa. Vasos dispuestos en patron no específico, agrupados, generalmente en grupos radiales cortos (de 2–3 vasos). Promedio del diámetro tangencial de los vasos: 130–240 µm. Promedio del número de vasos/mm²: 3–6(–12). Placas de perforación simples. Punteaduras intervasculares alternas, promedio del diámetro (vertical) de las punteaduras intervasculares: 7–9 µm, ornamentadas. Punteaduras radiovasculares con aréolas distintas o con aréolas reducidas o aparentemente simples, similares a las punteaduras intervasculares, redondeadas o angulares o horizontales a verticales. Tíldes en los vasos presentes, de paredes finas.

1.2.1.3 Fibras y traqueidas. Traqueidas vasculares o vasicéntricas de esporádicas a ausentes. Fibras de paredes finas, o paredes de espesor medio. Promedio del largo de las fibras: 700–1500 µm. Punteaduras de las fibras en su mayoría restringidas a las paredes radiales, simples o con aréolas minúsculas. Fibras exclusivamente septadas. Fibras septadas distribuidas uniformemente.

1.2.1.4 Parénquima axial. Parénquima axial no en bandas. Parénquima axial paratraqueal. Paratraqueal vasicéntrico, o aliforme. Parénquima aliforme: en forma de rombo. Parénquima axial en serie. Promedio del número de células por serie de parénquima axial: 2–8.

1.2.1.5 Radios. Número de radios por mm: 5–13, radios multiseriados (también cuando muy pocos), radios con 2–5 células de ancho. Radios compuestos por

un solo tipo de células (homocelulares); células de los radios homocelulares procumbentes. Algunos radios parecen heterocelulares debido a la presencia de hileras marginales con células procumbentes más altas.

1.2.1.6 Estratificación. Estructura estratificada ausente.

1.2.1.7 Estructuras secretoras. Células oleíferas y mucilaginosas ausentes. Canales intercelulares ausentes. Laticíferos o tubos taniníferos ausentes.

1.2.1.8 Variantes del cambium. Floema incluso ausente. Otras variantes del cambium ausentes.

1.2.1.9 Sustancias minerales. Cristales presentes, aciculares (en forma de agujas), localizados en células de los radios. Células cristalíferas de los radios: erectas y/o cuadradas y procumbentes, erectas y/o cuadradas cristalíferas no septadas. Número de cristales por célula o cámara: más de uno. Sílica presente, como sílica vitrea, en células de parénquima axial y en fibras ((solo *Gmelina moluccana*)).

1.2.2 Botánica y ecología

La especie *Gmelina arborea* (Roxb.) fue descrita por Roxburg como de muy alta distribución natural en el sureste asiático. Se le encuentra desde el nivel del mar hasta los 1800 msnm en diversas zonas climáticas y edáficas. Se ha introducido con éxito en diversos países tropicales, incluyendo Centroamérica, donde se le encuentra principalmente en las zonas de vida bosque muy húmedo tropical, bosque húmedo tropical y bosque seco tropical. Se desarrolla con éxito en ecosistemas que van de los 24 a los 35 grados

Celsius, precipitaciones anuales de 1000 a 3000 milímetros y desde 0 a 500 msnm.

Como principales factores limitantes para el establecimiento de plantaciones de Melina están los suelos. Es imprescindible que sean bien drenados, profundos y que permitan el desarrollo radical. La especie es también susceptible a la competencia de malezas, principalmente gramíneas.

La especie ha sido utilizada con éxito para la producción de leña, debido a que quema rápido y presenta un poder calorífico alrededor de 20000 kJ/kg. La madera de esta especie aserrada tiene buena trabajabilidad, durabilidad y ausencia de distorsiones dimensionales, se usa en fabricación de muebles, instrumentos musicales, cajonería, postes para cerca y todo tipo de construcciones rurales aún en exteriores. Se han logrado resultados muy satisfactorios con la producción de pulpa para papel así como en la industria de chapas y contrachapados.

El valor promedio de peso específico (densidad básica) de la Gmelina es de 0.37 con un rango de 0.29 a 0.44. Este valor va en aumento de la médula hacia la corteza.

Se ha encontrado que a mayor peso específico mayor es la longitud de fibra y que a mayor altura en el tronco, disminuye el peso específico de la madera, en una proporción de un 3 % (Ref. 3)

La longitud de la fibra de la madera de Melina va en aumento de la médula hacia la corteza. En los primeros años de edad es de 5 a 8 mm y aumenta de 10 a 14 mm después del cuarto año, cuando ya puede ser utilizada para pulpa y papel.

La madera es de color amarillento grisáceo o blanco rosáceo. En condición seca, no se diferencia la albura del durámen. El grano es recto en lo usual con individuos de grano moderadamente entrecruzado y a veces rizado.

El parénquima es apotroqueal difuso, paratroqueal vasicéntrico con 2 a 5 células de ancho y formado por bandas traqueales a ciertos intervalos.

En la mayoría de los casos la madera presenta porosidad, anchor, aunque algunos árboles de esta especie se tiene madera con porosidad difusa. Los anillos de crecimiento no están bien delimitados, siendo posible observarlos en las secciones de mayor diámetro. Los poros, visibles a simple vista, son de tamaño mediano a pequeño y presentan gran contenido de tálides. Los radios, visibles a simple vista son uniseriados y multiseriados.

El módulo de ruptura verde es de 378.8 kg/cm^2 con un rango de 294 a 469. El módulo de elasticidad verde es de 4200 y seco es de 9600 kg/cm^2 . La especie presenta madera juvenil en los primeros 3 o 4 años, edad en la que comienza la formación de madera adulta. Esta especie contiene más extraíbles solubles en alcohol que la mayoría de latifoliadas tropicales (2.9 a 5.7 %). El contenido total de lignina es de un 29.7 %.

La especie es de secado lento y no presenta problemas de agrietamiento durante el proceso, si se aplica un programa de secado. Para tablas de 38 mm de espesor se comienza con 71° C . Piezas de 1.6 a 2.54 cm tardan de 70 a 100 días para secar al aire libre. Los valores de contracción al secado son de 0.8 % radial y 1 % tangencial (Greaves, 1981, citado por MURILLO, O. 1991). La albura puede ser talada con los métodos de célula llena.

El lento proceso de secado y el alto contenido de extraíbles hacen difícil el uso de preservantes. El durámen no permite la impregnación de preservantes. La compresión perpendicular al grano, en condición verde, es de 2.62 kg/cm² y en condición seca es de 2.97 kg/cm². La compresión paralela al grano, en condición verde, es de 27.7 kg/cm² y de 32.5 kg/cm² en condición seca.

La madera de Melina es de fácil aserrío tiene buena trabajabilidad y produce una superficie lisa de buen acabado. El grano entrecruzado y los nudos pueden reducir las características benéficas de esta propiedad.

La madera es fácil de debobinar en la industria de chapas, laminar de 1.6 y 1.8 mm de espesor, son fáciles de manipular, permanecen planas y lisas después del secado. Se pueden pegar fácilmente (Ref. 3)

Presenta resistencia a la humedad ya que contiene en sus tejidos ceras, grasas, y sustancias resinosas. La empresa Stone Forestal, que opera en Costa Rica y en la Simpson Company que opera en Guatemala, tienen como objetivo la producción de materia prima para la producción de papel. La empresa Scot Paper, en Costa Rica, basa parte de la producción de papeles para usos domésticos, en pulpa de madera de Melina. (Ref. 3).

La empresa Jari Forestal, localizada en la rivera del río del mismo nombre en la amazonia brasileña, usa el 50 % de materia prima que consume de melina y tiene una repoblación en torno de medio millón de hectáreas de melina.

Como es de conocimiento público el proyecto de Simpson en Izabal, Guatemala, fue exitoso silviculturalmente al haber podido establecer y manejar

en torno de 60000 hectáreas y un fracaso en administrar la relación con la opinión pública.

Al marcharse esa empresa dejó establecido un buen número de hectáreas de Melina que en la actualidad representan una oportunidad pues se dispone de un buen volumen de material leñoso que puede ser aprovechado, lo que es una necesidad ambiental y económica.

Este proyecto, al estudiar la madera juvenil de Melina dará información útil para su aprovechamiento racional en Guatemala.

En la India a esta especie se le aprecia para la producción de chapas y láminas contrachapadas de buena calidad, al ser pulida y barnizada. Para contrachapados es una especie que produce un producto de poco peso y de buena apariencia. Vale acotar que se encuentra en esta industria un problema relevante que es la baja calidad en rectitud y forma del fuste.

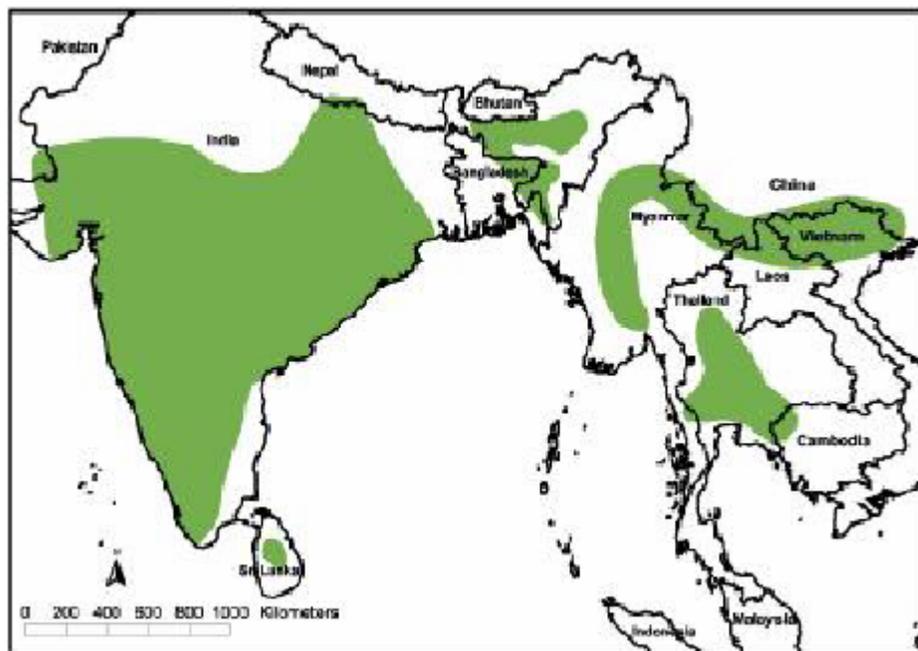
La Melina ha sido utilizada como leña en Malawi, Sierra Leona y Nigeria. En Costa Rica ha usado como tal salineras. Poder calórico bueno (alrededor de 20000 kj/kg o 4800 kcal/kg). Produce carbón que arde bien y sin humo, pero con abundante ceniza. En Costa Rica, madera de 34 meses rindió 19124 kj/kg y un 0.81 % de cenizas. La madera es susceptible al ataque de termitas.

1.2.3 Distribución natural

En su área de distribución natural se desarrolla en hábitats que varían desde húmedos hasta secos. Se encuentra en forma natural principalmente en las selvas mixtas de Birmania, asociado con *Tectona grandis*, *Terminalia*

tomentosa, varias especies latifoliadas y bambúes. Su máximo desarrollo lo alcanza en los bosques más húmedos de Birmania, sobre todo en valles húmedos y fértiles, en estas condiciones puede crecer hasta los 1260 m de altitud. La *Gmelina arborea* es nativa de India, Bangladesh, Sri Lanka, Myanmar, Tailandia, sur de China, Laos, Camboya y Sumatra en Indonesia y es una importante fuente maderera en las regiones tropicales y subtropicales de Asia. Naturalmente se desarrolla entre las latitudes 5° N -30° N, desde el sudeste asiático, incluyendo Pakistán hasta Camboya y China meridional.

Figura 4. Distribución natural de la Melina (*Gmelina arborea* Roxb.)



Fuente: Ref. 3

1.2.4 Lugares de introducción a nivel mundial

La especie ha sido introducida en muchos países tropicales incluyendo Filipinas, Malasia, Brasil, Gambia, Costa Rica, Burkina Faso, Costa de Marfil,

Nigeria y Malawi; también es común en Cuba, Colombia, Brasil, Venezuela, Guatemala y en la zona tropical de México.

1.2.5 Lugares de introducción en Centroamérica

En América Central existe un total de 225 000 ha de plantaciones forestales, de las cuales 52000 ha (23%) han sido plantadas con melina (*Gmelina arborea*). Esta ha sido plantada con propósitos comerciales tanto en Costa Rica como en Guatemala. (Alfaro y de Camino, 2002). El proyecto Madeleña del CATIE promovió en la década de los 90 el establecimiento de plantaciones con la especie en Panamá, Nicaragua, El Salvador y Honduras, pero principalmente con propósitos demostrativos y para producir madera y leña para consumo local. En Guatemala, la plantación más importante pertenece a la Compañía Simpson, la cual estableció sus plantaciones con la meta de producir virutas para hacer pulpa. El área total plantada es de 3 100 has y la compañía está utilizando la Melina para fabricar pallets (cajas para exportar frutas y verduras).

Hasta el momento la madera de melina en América Central, no compite con las especies nativas de bosque. Sin embargo, el aumento en las restricciones en el uso del bosque nativo ha provocado una reducción de la disposición de esa materia prima, originando la necesidad de buscar fuentes de maderas alternativas y la melina podría ser una posibilidad.

1.2.6 Descripción de la especie

La *Gmelina arborea* es una especie de rápido crecimiento, oportunista en los bosques húmedos y se clasifica como una pionera de vida larga. Su capacidad de rebrote es excelente y los brotes presentan un crecimiento rápido y vigoroso. Es caducifolia, en las zonas secas, puede llegar a medir 30 m de altura y presentar más de 80 cm de diámetro. Crece usualmente con un fuste limpio de 6 hasta 9 m y con una copa cónica.

Copa: Presenta una copa amplia en sitios abiertos, pero en plantación su copa es densa y compacta.

Corteza: lisa o escamosa, de marrón pálida a grisácea; en árboles de 6-8 años de edad se exfolia en la parte engrosada de la base del tronco y aparece una nueva corteza, de color más pálido y lisa.

Raíz: Presenta un sistema radical profundo, aunque puede ser superficial en suelos con capas endurecidas u otros limitantes de profundidad.

Fuste: Tiene un fuste marcadamente cónico, por lo regular de 50-80 cm de diámetro, en ocasiones hasta de 143 cm, sin contrafuertes pero en ocasiones engrosado en la base.

Hojas: Grandes (10-20 cm de largo), simples, opuestas, enteras, dentadas, usualmente más o menos acorazonadas, de 10-25 cm de largo y 5-18 cm de ancho, decoloradas, el haz verde y glabra, el envés verde pálido y aterciopelado, nerviación reticulada, con nervios secundarios entre 3 y 6 pares y estípulas ausentes. Usualmente, la especie bota las hojas durante los meses de

enero o febrero en casi todas las regiones donde se cultiva. Las hojas nuevas se producen el marzo o a principios de abril.

Flores: Numerosas, amarillo-anaranjadas, en racimos, monoicas perfectas, cuya inflorescencia es un racimo o panícula cimosa terminal, cáliz tubular, corola con 4-5 sépalos soldados a la base del ovario, de color amarillo brillante, cáliz 2.5 cm de largo y 4 estambres. La floración ocurre justo cuando las hojas han caído o cuando las nuevas hojas comienzan a desarrollarse. En su área de distribución natural la melina florece los meses de febrero a abril. En Centroamérica la floración se presenta, usualmente, entre diciembre y febrero pero en general, en América tropical florece de febrero a marzo, prolongándose en ocasiones hasta abril. La *G. arborea* inicia su época de floración y fructificación entre los 6-8 años, sin embargo en algunas plantaciones en Costa Rica florece a partir del tercer año.

Frutos: Es un fruto carnoso tipo drupa, de forma ovoide u oblonga, carnoso, succulento, con pericarpo coriáceo y endocarpo óseo, de color verde lustroso, tornándose amarillo brillante al madurar, momento en el que caen al suelo, lo que facilita su recolección. Entre los frutos caídos naturalmente del árbol, los más indicados de recolectar son los de color verde amarillento, debido a que tienen el mayor porcentaje de germinación.

Semillas: Las semillas de esta especie se encuentran formando parte del endocarpo del fruto, son de forma elipsoidal, comprimidas, de 7-9 mm de largo; testa color café, lisa, opaca, membranosa, muy delgada; el embrión es recto, comprimido, de color amarillo-crema y ocupa toda la cavidad de la semilla; los cotiledones son dos, grandes, planos, carnosos y elipsoidales; la radícula es inferior y corta. Hay de 1 a 4 semillas por fruto, con promedio de 2.2 semillas

/fruto, aunque se ha demostrado que el número de semillas por fruto varía dependiendo del origen de la fuente semillera.

1.2.7 Características y propiedades de la madera:

La madera presenta un color amarillento pálido, en ocasiones con tonalidades blancas, amarillas, cremas y rosadas. Existe poca diferenciación entre albura y duramen, lo que hace que el color sea uniforme.

1.2.8 Sitios óptimos de desarrollo

Los mejores sitios para melina se ubican en las partes bajas de los terrenos, donde por lo general tienen mayor disponibilidad de agua y nutrientes y los sitios con buenos contenidos de calcio y magnesio y los ubicados en áreas donde el uso anterior era charral o cultivos agrícolas.

Las plantaciones de melina no prosperan en suelos muy erosionados o compactados, de topografía quebrada y muy superficial, en esos sitios los árboles muestran características indeseables como fustes torcidos, poca altura, muy ramificados y aspecto arbustivo, por esta razón, se sugiere plantar esta especie en suelos profundos, húmedos pero bien drenados y sin obstáculos de desarrollo radical.

1.2.9 Requerimientos ambientales

A continuación se presenta un cuadro que resume las necesidades ambientales para el buen crecimiento de la *Gmelina arborea* en nuestro medio.

Tabla II. Requerimientos ambientales

Parámetro ambiental	Ámbito
Distribución altitudinal	0 – 900 (0-600) (msnm)
Precipitación	1000-4000 (2000-2500) (mm)
Temperatura	18-38 (24-29) (°C)
Régimen de lluvia	8-9 meses de lluvia con 3-4 meses secos
Temperamento	Heliófila
Zonas de vida	Bosque seco tropical, bosque húmedo y muy húmedo tropical
Textura de suelos	Franca y franca arcillosa, no crece bien en suelos arcillosos
pH de suelos	5-6
Topografía del terreno	Terrenos planos a ondulados
Pendientes del terreno	No superiores a 30%
Profundidad efectiva de suelos (cm)	Mínima de 60, óptima de más de 100
Pedregosidad	Preferiblemente en terrenos sin pedregosidad
Fertilidad	Prefiere suelos fértiles

Continúa

Resistencia a vientos	Es una especie intolerante a vientos fuertes
Humedad del suelo	No soporta suelos inundados, ni siquiera en forma temporal

Fuente: Ref. 3

1.2.10 Usos recomendados

1.2.10.1 Usos de la madera

La madera es utilizada para aserrío, construcciones rurales y construcción en general, tarimas, leña, muebles, artesanía, cajonería, pulpa para papel, contrachapados, embalajes, postes, tableros, carpintería, tableros y aglomerados.

En la construcción se utiliza en cercas, columnas sólidas, pisos, molduras, mostradores, puertas, rodapié, tablilla, vigas sólidas, vigas laminadas, columnas laminadas, tableros laminados, marcos de puertas y ventanas y contrachapado (Ref.11). En mueblería se utiliza en archivadores, bancas, camas, cómodas, juegos de comedor, juego de sala, mesas, sillas, sillones, trinchantes, escritorios y estantes para oficina. Además se emplea para hacer artesanías, lápices, fósforos, paletas para helados y mondadientes.

1.2.10.2 Otros usos de la especie

Por su virtud de rápido crecimiento, es una especie de uso múltiple que presenta gran potencial agroforestal, puede emplearse como cerca viva, cortina rompevientos y linderos maderables.

Por su ritmo de crecimiento tan acelerado no permite asociados con cultivos, a no ser que estos sean establecidos bajo la modalidad taungya, esto es que se siembren junto a la especie y por única vez, entre ellos destacan el maíz y el frijol.

Su leña es buena, quema sin humo pero deja muchas cenizas, su carbón es de calidad aceptable y es uno de los mejores árboles para pulpa y papel; sus hojas dan un forraje apreciado por el ganado, la corteza, raíces y frutos presentan propiedades medicinales, es una excelente especie melífera, y se puede plantar como ornamental.

1.3 Fundamentación teórica de la metodología

1.3.1 Calcinación

La calcinación es el proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, pero por debajo de su entalpía o punto de fusión, para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química. El proceso, que suele llevarse a cabo en largos hornos cilíndricos, tiene a menudo el efecto de volver frágiles las sustancias.

Los objetivos de la calcinación suelen ser:

- eliminar el agua, presente como humedad absorbida, agua de cristalización (como en la conversión del hidróxido férrico en óxido férrico);
- eliminar el dióxido de carbono (como en la calcinación de la piedra caliza en cal en un horno de cal), el dióxido de azufre u otro compuesto orgánico volátil;
- para oxidar (calcinación oxidante) una parte o toda la sustancia (usado comúnmente para convertir menas sulfurosas a óxidos en el primer paso de recuperación de metales como el zinc, el plomo y el cobre);
- para reducir (calcinación reductora) metales a partir de sus menas (fundición).

Hay unas pocas finalidades más para las que se emplea la calcinación en casos especiales (por ejemplo, el carbón animal). Las reacciones de calcinación pueden incluir disociación térmica, incluyendo la destilación destructiva de los compuestos orgánicos (es decir, calentar un material rico en carbono en ausencia de aire u oxígeno, para producir sólidos, líquidos y gases). Ejemplos de otras reacciones de calcinación son la concentración de alúmina calentando bauxita, cambios de estado polimórficos como la conversión de anatasio en rutilo, y las recristalizaciones térmicas como la desvitrificación del cristal. Se suelen someter a procesos de calcinación materiales como los fosfatos, la alúmina, el carbonato de manganeso, el coque de petróleo y la magnesita marina.

1.3.2 Lixiviación

La lixiviación es un proceso en el cual se extrae uno o varios solutos de un sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido.

Algunos ejemplos son:

- El azúcar se separa por lixiviación de la remolacha con agua caliente.
- Los aceites vegetales se recuperan a partir de semillas, como los de soya y de algodón mediante la lixiviación con disolventes orgánicos.
- La extracción de colorantes se realiza a partir de materias sólidas por lixiviación con alcohol o soda.

1.3.3 Secado

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. El secado es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones y con frecuencia, el producto que se extrae de un secador para empaquetado.

Existen varios tipos de operaciones de secado, que se diferencian entre sí por la metodología seguida en el procedimiento de secado; puede ser por eliminación de agua de una solución mediante el proceso de ebullición en ausencia de aire; también puede ser por eliminación de agua mediante

adsorción de un sólido, y por reducción de del contenido de líquido en un sólido, hasta un valor determinado mediante evaporación en presencia de un gas.

Los sólidos que se secan pueden tener formas diferentes -escamas, gránulos, cristales, polvo, tablas o láminas continuas- y poseer propiedades muy diferentes.

El producto que se seca puede soportar temperaturas elevadas o bien requiere un tratamiento suave a temperaturas bajas o moderadas. Esto da lugar a que en el mercado exista un gran número de tipos de secadores comerciales. Las diferencias residen fundamentalmente en la forma en que se mueven los sólidos a través de la zona de secado y en la forma en la que se transmite calor.

1.3.4 Gravimetría (Análisis gravimétrico)

En química, el análisis gravimétrico consiste en determinar la cantidad proporcionada de un elemento, radical o compuesto presente en una muestra, eliminando todas las sustancias que interfieren y convirtiendo el constituyente o componente deseado en un compuesto de composición definida, que sea susceptible de pesarse. Los cálculos se realizan con base en los pesos atómicos y moleculares, y se fundamentan en una constancia en la composición de sustancias puras y en las relaciones ponderales (estequiometría) de las reacciones químicas.

Método por precipitación: En este el analito es convertido en un precipitado poco soluble, luego se filtra, se purifica, es convertido en un producto de composición química conocida y se pesa. Para que este método pueda aplicarse se requiere que el analito cumpla ciertas propiedades:

- Baja solubilidad
- Alta pureza al precipitar
- Alta filtrabilidad
- Composición química definida al precipitar

Método por volatilización: En este método se miden los componentes de la muestra que son o pueden ser volátiles. El método será directo si evaporamos el analito y se hace pasar a través de una sustancia absorbente que ha sido previamente pesada así la ganancia de peso corresponderá al analito buscado; el método será indirecto si volatilizamos el analito y pesamos el residuo posterior a la volatilización así pues la pérdida de peso sufrida corresponde al analito que ha sido volatilizado. El método por volatilización solamente puede utilizarse si el analito es la única sustancia volátil o si el absorbente es selectivo para el analito.

1.3.5 Volumetría (Análisis volumétrico)

El proceso de adición de volúmenes de la disolución conocida se denomina valoración. Generalmente la disolución con el reactivo conocido (disolución patrón) se coloca en una bureta y la disolución del analito en un Erlenmeyer. La disolución patrón se añade gota a gota hasta que ha reaccionado con todo el analito. Entonces se mide el volumen consumido y mediante un cálculo estequiométrico sencillo se puede calcular la concentración del compuesto problema.

Se llama punto final al final de la valoración, que se aprecia por un cambio brusco de alguna propiedad de la disolución en el Erlenmeyer, generalmente un cambio de color que se ve a simple vista. Para que se

produzca este cambio es preciso agregar a la disolución del Erlenmeyer una pequeñísima cantidad de una sustancia llamada indicador.

El indicador se elige de tal forma que el *punto final* coincida (o sea muy cercano) al *punto de equivalencia*. El punto de equivalencia es cuando la cantidad de equivalentes del titulante es igual a la de la especie titulada.

2. METODOLOGÍA

2.1 Metodología de Investigación

2.1.1 Localización

La finca de la recolección de las muestras se encuentra en el municipio de Morales, Izabal. Morales está ubicado a 39 metros sobre el nivel del mar, con una latitud de 15°28'30" y longitud de 88°49'40".

2.1.2 Recursos

Infraestructura Física:

Laboratorio de Análisis Físicoquímico de la Sección de Química Industrial del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Humanos:

- Investigador: Francisco José Paz Fong
- Asesora: Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales
- Co - asesor: Ing. For. MSc. José Mario Saravia Molina

Físicos:

REACTIVOS (Hojas de seguridad)

- Ácido Acético glacial (CH_3COOH). Envase: 2.5L. Casa proveedora MERCK KGaA. http://www.utm.csic.es/documentacion/garciadelcid/acido_acetico.htm

- Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) al 96% grado reactivo. Densidad 1.84 kg/L. Peso molecular 98.08 g/mol. Envase: 2.5L. Casa proveedora MERCK KGaA. http://www.cisproquim.org.co/HOJAS_SEGURIDAD/Acido_sulfurico.pdf
- Agua desmineralizada, marca Salvavidas.
- Alcohol etílico (C_2H_5OH) al 95% grado reactivo. Densidad 0.75 kg/L. Peso molecular 46.07 g/mol. Envase de 2.5 L. Casa proveedora MERCK KGaA. http://www.fquim.unam.mx/sitio/pcivil_02.asp
- Hidróxido de Sodio ($NaOH$) grado analítico. Peso molecular 40 g/mol. Envase 1 Kg. Casa proveedora MERCK KGaA. http://www.fquim.unam.mx/sitio/pcivil_02.asp
- Índigo de carmín grado analítico ($C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$). Peso molecular 466.36 g/mol. Envase 25g. Casa proveedora MERCK KGaA. <http://www.panreac.com/new/esp/fds/ESP/X251246.htm>
- n-hexano (C_6H_{14}) grado reactivo. Envase de 4L. Código h1055-4. Peso molecular 86.18 g/mol. Casa proveedora RGH. http://www.fquim.unam.mx/sitio/pcivil_02.asp
- Permanganato de Potasio ($KMnO_4$) grado analítico. <http://www.fquim.unam.mx/sitio/uploads/pdfs/hoja15.pdf>
- Sílice. Casa proveedora MERCK KGaA.
- Sulfito de Sodio (Na_2SO_3) grado analítico. Envase 500 g. Peso molecular 126 g/mol. Casa proveedora MERCK KGaA. <http://foros.ceride.gov.ar>

EQUIPO

- Bomba de vacío, marca Gast, modelo 0523-V4F-6588DX, vacío hasta 30 inHg, manómetros analíticos.
- Campana de extracción de 110 V y 900 Watts, marca Serproma, de motor con capacidad de $\frac{3}{4}$ Hp.
- Computadora con procesador Pentium 4.
- Horno de secado. Marca Serproma. Modelo WJACO73. 220V. 0 A. 12000 W. Serie 2000.

- Horno eléctrico con recirculación Cole Parmer de 120 V y 800 W. 50/60 Hz.
- Horno eléctrico de flujo convectivo por gravedad marca Termolyne.
- Impresora Canon PIXMA iP1300.
- Molino de martillos, motor Kohlbach (modelo 184T).
- Mufla marca Termolyne 1400 de hasta 1100°C.
- Planchas de calentamiento con agitación, marca Corning, modelo Pc-400, 120 V/100 V, rango 0-480°C, 0-1100 rpm.
- Tamiz No. 40 en escala Tyler (Tyler Screen Scale Equivalent, USA; Standard Testing Sieve, Soltest, Inc.)

Instrumentos de medición

- Balanza Adventurer OHAUS con capacidad máxima de 150 g y exactitud de 3 decimales.
- Medidor de humedad OHAUS con capacidad máxima de 200 g y precisión de 0.0001 g.

MATERIALES

Cristalería

- Balones de 100, 250, 500 y de 1000 mL, marca Kimax.
- Cajas Petri, diámetro de 10 cm.
- Condensadores de bola y de serpentín, 20/40.
- Crisoles de porcelana.
- Desecadora marca Fisherbrand.
- Equipos de extracción Soxhlet, con balón esmerilado de 500 mL y condensador, marca Comin-Pirex.
- Filtro de Porcelana.
- Kitasato de 1000 mL.

- Varillas de agitación.
- Viales color ámbar de 8 mL.

Instrumentos de Medición

- Beakers con capacidad de 50, 100, 250, 500 y de 1000 mL, marca Pyrex.
- Buretas de 25 mL y 10 mL.
- Pipetas de 1, 5, 10, y de 50 mL.
- Probetas de 10, 50, 100, 250 y 500 mL.
- Termómetros (Mercurio, con escala de 0 – 100 °C, del tipo inmersión total y parcial)

Otros Accesorios

- Agitadores magnéticos.
- Caja de Papel Filtro Whatman No 4.
- Dedales de extracción de celulosa marca Whatman No. de catálogo 2800339, 35 mm. de diámetro externo, 33 mm. de diámetro interno, 94 mm de longitud.
- Embudo de metal.
- Mangueras de hule.
- Manta color marfil, apertura de 0.25 mm² aproximadamente.
- Papel Parafilm.
- Perillas de succión.
- Pesa muestra de aluminio.
- Pinzas de metal, larga y corta.
- Pissetas.
- Soporte universal

2.2 Metodología Experimental

2.2.1 Obtención y preparación de las Muestras

La recolección de muestras se llevó a cabo por medio del INAB en una finca ubicada en Morales, Izabal.

Las muestras de madera se tomaron de 9 árboles de la misma especie a tres diferentes alturas provenientes del primer clareo (4 – 7 años). Las muestras se limpiaron de polvo y otras impurezas, eliminando la corteza de las mismas. Después de secar la madera al ambiente, ésta se molió, haciéndolo en un molino de martillos trifásico de 5 caballos de fuerza en la carpintería del área de prefabricados CII/USAC. El aserrín obtenido se secó primero al ambiente y luego en el horno eléctrico ubicado en la planta piloto hasta obtener un % de humedad inferior a 5, para luego ser tamizado con un tamiz No. 40, de secciones de 0.42 mm por 0.42 mm. Las muestras se almacenaron en bolsas herméticas debidamente identificadas por árbol y altura.

La caracterización química de la materia prima, para obtener el porcentaje de celulosa, lignina, extraíbles, taninos, cenizas y humedad, se realizó utilizando metodología de normas ASTM D1105-06, D1106-56, D1103-60, D1102-56, y finalmente los componentes obtenidos se colocaron en viales color ámbar debidamente identificados.

2.2.2 Caracterización Química de la Madera

Dicha caracterización se realizó en base a normas ASTM (American Society for Testing and Materials) y la combinación de las normas ANSI y la adaptación correspondiente, las cuales se mencionan a continuación. (Ref. 2).

2.2.3 Determinación de Humedad

Se utilizó una balanza analítica de humedad según procedimiento de uso de dicha balanza.

Alcance

El método abarca la determinación del contenido de humedad en madera.

Principio

El contenido de humedad (cH) es la cantidad de agua que existe en una pieza de madera, expresada como un porcentaje del peso que tendría ésta en condición totalmente anhidra.

Aparatos

Medidor de humedad OHAUS con capacidad máxima de 200 g y precisión de 0.0001 g.

Muestra

El equipo es especial para determinar humedad en base húmeda y se necesita 2 g de aserrín seco y tamizada con un tamiz No. 40.

Procedimiento

1. Programar la balanza de humedad a una temperatura de 105°C y un tiempo de 15 minutos.
2. Tarar el plato destinado para colocar la muestra.
3. Abrir la balanza y pesar 2 gramos de la muestra.
4. Cerrar la balanza.
5. Esperar los 15 minutos programados.
6. Tomar nota del % de humedad.

2.2.4 Determinación de Taninos

Alcance

El método abarca la determinación de taninos en madera.

Principio

La estructura del tanino posee grupos oxidrilo, por ser polifenoles, que a su vez reaccionan con el ion sodio del sulfito, permitiendo así solubilizar a los taninos en solución acuosa con el sulfito de sodio.

Aparatos

Se necesitaron beackers, bureta, probeta, earlenmeyers, planchas con agitación, termómetros. Balanza analítica, sensible a 0.1mg, horno con temperatura controlada entre 100 y 105°C y desecadora.

Reactivos

Sulfito de sodio, sodio sulfito anhidro (106657 Merck KGaA) al 4% en solución acuosa. Índigo de Carmín (104724 Merck KGaA). Permanganato de potasio en solución 0.1 N Titrisol (109935 Merck KGaA).

El Índigo de Carmín se preparó de la siguiente manera: disolver 6 g de Na Indigotin Disulfonato en 500 mL de agua, calentar por una hora y luego enfriar. Agregar 50 mL de ácido sulfúrico, diluir a 1 L y filtrar.

Muestra

La muestra se obtuvo de aserrín seco, reducido por molino y tamizado por medio de un tamiz No. 40.

Procedimiento

Extracción con Maceración Mecánica (Extracto tánico)

1. Preparar una solución acuosa al 4% en peso de sulfito de sodio.
2. Tomar 4 g de madera seca y tamizada, colocarlos en un beacker de 100 mL.

3. Agregar un volumen adecuado de la solución de sulfito de sodio, hasta cumplir una relación entre 3:1 a 4:1. En caso de ser necesario, agregar más solución hasta homogenizar.
4. Calentar la mezcla durante 45 minutos con agitación a 70°C, sin pasarse de dicha temperatura.
5. Filtrar la muestra con una manta. Llevar el material soluble a un beacker de 50 mL y evaporar en un secador eléctrico. Transferir el material sólido a un pesa muestra y secar hasta peso constante.

Determinación de % de Taninos. Método de Tara en vaina.

1. Tomar 1 g del extracto obtenido (extracto tánico) y colocarlo en un earlenmeyer de 250 mL, agregar 100 mL de agua destilada y agitar hasta disolver.
2. Colocar la muestra en una plancha de calentamiento y llevar a ebullición por 4 horas a reflujo.
3. Tomar 12.5 mL de la solución líquida y adicionar 10 mL de indicador índigo de carmín, luego adicionar 375 mL de agua destilada.
4. Titular con permanganato de potasio 0.1 N hasta observar un cambio de color amarillo.
5. Preparar un blanco con agua, adicionando todos los reactivos en las mismas condiciones.
6. El porcentaje de taninos en madera se obtiene por:

$$\%Tanino = \frac{0.1N(mlo - mlb) \left(\frac{Pfg}{1eq} \right) \left(\frac{1eq}{1000meq} \right)}{4g} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

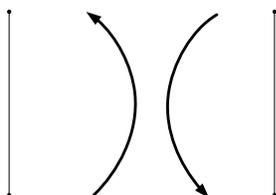
mlo = mililitros utilizados de permanganato de potasio

mlb = mililitros del blanco obtenidos

Pfg = Peso fórmula en gramos del tanino

#e' = Número de electrones intercambiados (2e')

Según Redox el intercambio de electrones está dado por:



Se tiene que en el punto de equivalencia los miliequivalentes de permanganato de potasio son iguales a los miliequivalentes de taninos, por lo tanto:

$$1meqKMnO_4 = 1meq \text{ tanino}$$

$$0.1N(mlo - mlb) = \frac{4.2g \text{ tanino}}{1000} \times \frac{\#e'}{Pfg} \times \frac{1000meq}{1eq} \times \frac{12.5mL}{100mL} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$Pfg = \frac{4.2g \text{ tanino}(2e')(12.5mL)}{0.1N(mlo - mlb)100mL}$$

Nota: La ecuación se obtuvo en base a los 4 g de muestra iniciales y a la siguiente relación: 4,2 mg de tanino = 1mL 0.1 N de una solución de permanganato de potasio.

2e'

Recomendación: Validar el método de determinación de taninos para posteriores estudios, ya que se está determinando el peso fórmula del tanino asumiendo que el intercambio de electrones en la oxidación es de 2.

Tanino rec
-COOH 1e'
-OH 1e'

2.2.5 Determinación de Extraíbles

Para ello se siguió la designación ANSI/ASTM D 1105-56, llamada "Preparación de Madera Libre de Extraíbles". (Ref. 2)

Alcance

El método abarca la determinación de madera libre de extraíbles.

Principio

Son sustancias solubles en solventes neutros y que no son parte de la madera.

Aparatos

Equipo de extracción Soxhlet, dedales de porosidad media, balanza analítica sensible a 0.1 mg. Horno con temperatura controlada entre 100 y 105°C y desecadora. También pinzas de metal largas, papel Parafilm, teflón y grasa para cristalería.

Reactivos

Alcohol etílico al 95%, etanol absoluto (100983 Merck KGaA); n-Hexano al 95% (104368 Merck KGaA).

Muestra

La muestra se obtuvo de aserrín seco, reducido por molino y tamizado por un tamiz No. 40.

Procedimiento

Según la Norma ANSI/ASTM D 1105-56, llamada "Preparación de Madera Libre de Extraíbles". (Ref. 2)

2.2.6 Determinación de Lignina

Para ello se siguió la norma ANSI/ASTM D 1106-56, llamada "Lignina en madera". Antes de determinar el porcentaje de celulosa se debe determinar el contenido de lignina en la madera, ya que el método para determinar celulosa es indirecto y el dato de lignina permite obtener contenido de celulosa en material libre de extraíbles. (Ref. 2).

Alcance

El método abarca la determinación directa de lignina en madera por gravimetría.

Principio

La lignina es el residuo insoluble que queda al hidrolizar los carbohidratos por medio del trato con ácidos fuertes. Por ello se trabaja madera libre de extraíbles, ya que algunos extraíbles pueden permanecer insolubles al ataque ácido. Los tratamientos preliminares para eliminar extraíbles que aún permanecen son ataque con alcohol, para remover taninos catecol; mezcla benceno-alcohol o hexano, para remover resinas, ceras, grasas y aceites; y en algunos casos con agua caliente para remover materiales solubles en agua.

Aparatos

Sistema a reflujo de balón de fondo plano con condensador, mangueras, plancha de calentamiento para ebullición, teflón, cronómetro, pipetas, perillas de succión, plancha con agitación, bomba de vacío. Balanza analítica, sensible a 0.1 mg, horno para secar con temperatura controlada de 80 y 120°C. Desecadora, guantes y lentes protectores.

Reactivos

Ácido sulfúrico al 72%, preparado a partir de ácido sulfúrico al 95-97%, gravedad específica a 20/4°C 1.6338 (100732 Merck KGaA): verter 184 ml del ácido en 66 mL de agua desmineralizada, con agitación lenta, en baño con agua fría (CUIDADO, LIBERA MUCHO CALOR). Estandarizar la solución con una de NaOH, con el indicador naranja de metilo.

Muestra

La muestra es obtenida de madera libre de extraíbles (revisar el método anterior de madera libre de extraíbles).

Procedimiento

Según la norma ANSI/ ASTM D 1106-56, llamada “Lignina en madera”

2.2.7 Determinación de Celulosa

Para ello se siguió la norma ANSI/ASTM D 1103-60, llamada “Alfa-celulosa en Madera”. Tal norma indica que se debe tratar madera libre de lignina pero el procedimiento se discontinuó, entonces se aplicó la norma y por diferencia con el dato de lignina anterior se obtendrá la celulosa presente en la madera. (Ref. 2)

Alcance

El método abarca la determinación indirecta de celulosa de la madera.

Principio

La celulosa es un polisacárido, formado principalmente por glucosa, de modo que por su gran estructura resiste el ataque alcalino, en cambio la hemicelulosa no.

Aparatos

Se necesitaron beackers, cronómetro, pipetas, perillas de succión, varilla de agitación, balde para baño María, balones aforados, bomba de vacío, balanza analítica sensible a 0.1mg, horno para secar con temperatura controlada de 100 y 105°C y desecadora. Guantes y lentes protectores.

Reactivos

Hidróxido de sodio en lentejas puro (106462 Merck KGaA), ácido acético (108450 Merck KGaA)

Muestra

La muestra es obtenida de madera libre de extraíbles (revisar el método de madera libre de extraíbles).

Procedimiento

Según la Norma ANSI/ASTM D 1103-60, llamada “Alfa-celulosa en Madera”.

2.2.8 Determinación de Cenizas (ANSI/ASTM D1102-56)

Para ello se siguió la norma ANSI/ASTM D 1102-56, llamada “Cenizas en Madera”. (Ref. 2)

Alcance

El método abarca la determinación de cenizas en madera, residuo presente como porcentaje en peso después de la oxidación de 585 a 600°C.

Principio

Los materiales no volátiles de la madera se resisten a la oxidación a alta temperatura, por lo tanto la calcinación elimina estos materiales volátiles de un cuerpo determinado.

Aparatos

Crisoles de porcelana o silica con capacidad de 30mL (preferible) o más, horno mufla con pirómetro para mantener la temperatura, balanza analítica sensible a 0.1 mg, horno para secar y desecadora. También pinzas de metal largas.

Muestra

La muestra se obtiene de aserrín seco, reducido por molino y tamizado por medio de un tamiz No. 40.

Procedimiento

Según la norma ANSI/ASTM D 1102-56, llamada “Cenizas en Madera”. (Ref. 2)

2.3 Diseño Experimental

2.3.1 Diseño de tratamientos

El experimento se desarrolló utilizando una variable independiente (unifactorial), en este caso la altura del árbol Melina. El arreglo es en un solo sentido. Para la variable de altura de toma de muestra se utilizó madera del árbol Melina (*Gmelina arborea*) tomada a lo largo del árbol a 1.3 m del suelo

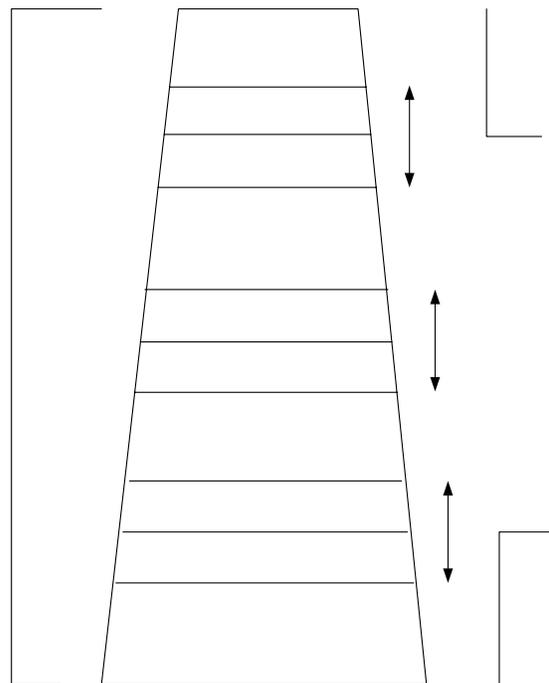
(DAP = diámetro a la altura del pecho) o basal, a la altura comercial del fuste (D6) o apical y a una altura media entre el DAP y el D6.

El número de tratamientos realizados se determinan de la siguiente manera:

3 alturas para la muestra = 3 niveles o tratamientos

Para cada tratamiento se llevaron a cabo 9 repeticiones para la determinación de las 5 variables de respuesta: taninos, extraíbles, lignina, celulosa y ceniza. Las corridas que se realizaron son 27 (9×3) para la especie a estudiar. Se utilizó el método unifactorial en un solo sentido por ser concreto y sencillo.

Figura 5. Origen de las muestras a tres diferentes alturas del tronco



Fuente: Ref. 4

donde 1, 2, y 3 son las alturas de las muestras tomadas, cada una de un tamaño de 1.3 m.

2.3.2 Análisis Estadístico

Para cada componente químico a determinar se utilizó un análisis de varianza por medio de un diseño unifactorial en un solo sentido completamente aleatorio con la distribución de Fisher, esto debido a que se tratan más de dos niveles. Siendo unifactorial por ser solo la especie, se tienen tres tratamientos o niveles, en este caso alturas, y nueve repeticiones, en este caso árboles de la misma especie. El arreglo matricial es de veintisiete series para cada componente a determinar. Los datos se arreglaron como sigue:

Tabla III. Variables para el diseño unifactorial

Tratamientos	No. de observaciones			Total	Promedio
1	$Y_{1,1}$	$Y_{1,2}$	$Y_{1,3}$	Y_1	y_1
2	$Y_{2,1}$	$Y_{2,2}$	$Y_{2,3}$	Y_2	y_2
3	$Y_{3,1}$	$Y_{3,2}$	$Y_{3,3}$	Y_3	y_3
A	$Y_{a,1}$	$Y_{a,2}$	$Y_{a,3}$	Y_a	y_a
				Y	Y

Fuente: Ref. 12

Donde:

Y_a = es el total de las observaciones bajo el i-ésimo tratamiento

y = es el promedio de las observaciones bajo el i-ésimo tratamiento

Y_1 = es la suma de todas las observaciones

El procedimiento para el diseño consiste en seleccionar una repetición completa del experimento, con un solo factor con a niveles. Las observaciones pueden representarse por medio de un modelo estadístico lineal.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, a ; j = 1, 2, \dots, N$$

Donde:

y_{ij} = observación

μ = media general

τ_i = efecto del tratamiento i ésimo

ε_{ij} = error aleatorio

Como el interés es probar la igualdad de los efectos del tratamiento, siendo

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$
$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ al menos una } i$$

Las operaciones para el análisis de varianza se resumen en la siguiente tabla, así como las fórmulas para el cálculo de suma de cuadrados.

Los tratamientos o alturas serán 3, adoptando la variable a ; las repeticiones o árboles de la misma especie serán 9, adoptando la variable N .

Tabla IV. Análisis de Varianza para el Diseño Unifactorial

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media Cuadrática	F_o
Tratamientos	$\sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{N} - \frac{y^2}{aN}$	$a - 1$	$\frac{(SS_{tratamientos})}{(a - 1)}$	$\frac{(MS_{tratamientos})}{(MS_E)}$
Error	SS_E (por sustracción)	$N - a$	$\frac{(SS_E)}{(N - a)}$	
Total	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^N y_{ij}^2 - \frac{y^2}{aN}$	$N - 1$		

Fuente: Ref. 12

La hipótesis nula de ningún efecto de tratamiento se probó mediante la razón de Fisher, que se define como:

$$F = \frac{MS_{tratamientos}}{MS_E} \quad (\text{Ecuación 6})$$

donde: $MS_{tratamientos}$ es la media cuadrática de los tratamientos y MS_E es la media cuadrática del error; y que para un nivel de confianza $\alpha = 0.05$ y con 2 grados de libertad para tratamientos (3-1) y 24 para el error (27-3) se tiene un valor de F de 3.40, el cual será comparado con los valores de F_o menores a F comprueba la hipótesis nula y el rechazo de la hipótesis alternativa.

3. RESULTADOS

Tabla V. Resultados generales de la composición química de la madera de Melina (*Gmelina arborea Roxb.*) en función de cada sección del tronco estudiada y su estimación global

- **Altura Basal**

Árbol	Celulosa	Lignina	Extraíbles	Taninos	Cenizas
1	60.39	22.2	9.47	0.578	0.9
2	66.75	19.9	11.47	1.712	0.5
3	59.37	23.3	8.67	1.586	0.9
4	50.2	28.7	8.4	0.819	0.5
5	50.31	27.1	12.8	1.103	0.9
6	56.99	26.5	10.4	0.473	0.4
7	58.69	19.9	10.93	1.439	0.8
8	57.98	22.8	13.33	1.029	0.9
9	56.04	22.8	11.33	1.355	1.2
Promedio	57.41	23.69	10.76	1.12	0.78
Desviación estándar +/-	5.08	3.11	1.71	0.44	0.26

- **Altura Media**

Árbol	Celulosa	Lignina	Extraíbles	Taninos	Cenizas
1	62.09	22.5	10.53	1.302	0.6
2	67	22.8	9.33	1.554	0.5
3	60.55	24.5	8.4	1.397	1.1
4	56.39	25.1	11.33	1.187	0.6
5	52.15	27.1	12.8	1.176	0.4
6	62.46	22.7	10	1.229	0.4
7	64.17	23.3	10	1.239	0.6
8	56.23	24.5	12.13	1.281	0.7
9	59.08	23.9	8.4	1.029	1
Promedio	60.01	24.04	10.32	1.27	0.66
Desviación estándar +/-	4.57	1.47	1.54	0.15	0.25

Continúa

- **Altura Apical**

Árbol	Celulosa	Lignina	Extraíbles	Taninos	Cenizas
1	56.55	23.6	10.67	0.588	0.8
2	64.24	20.5	10.53	1.502	0.9
3	61.08	23.9	13.6	1.397	0.4
4	50.61	27.2	9.47	0.903	0.6
5	53.77	24.4	10.53	1.481	0.4
6	57.89	22.7	10.8	1.575	0.4
7	53.37	31.3	8.93	1.134	0.9
8	62.03	22.7	12.27	1.103	1
9	57.28	24.2	11.2	1.407	0.9
Promedio	57.42	24.50	10.89	1.23	0.70
Desviación estándar +/-	4.45	3.11	1.39	0.33	0.25

- **Promedios Globales**

Parámetro	% Celulosa	% Lignina	% Extraíbles	% Taninos	% Cenizas
Promedio	58.28	24.08	10.66	1.21	0.71
Desviación estándar +/-	4.60	2.54	1.48	0.31	0.24

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales

Figura 6. Distribución de los datos de celulosa en función de las diferentes secciones del tronco de los árboles de Melina (*Gmelina arborea* Roxb.)

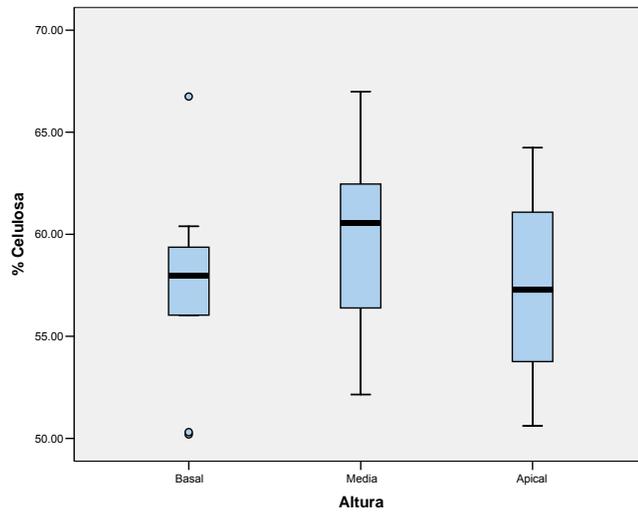


Figura 7. Distribución de los datos de lignina en función de las diferentes secciones del tronco de los árboles de Melina (*Gmelina arborea* Roxb.)

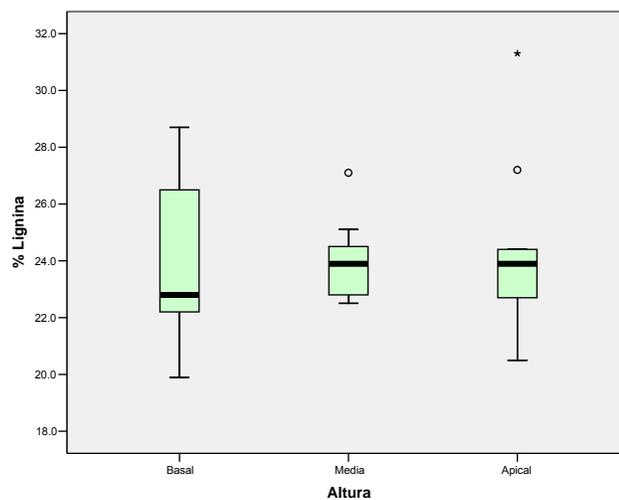


Figura 8. Distribución de los datos de extraíbles en función de las diferentes secciones del tronco de los árboles de Melina (*Gmelina arborea Roxb.*)

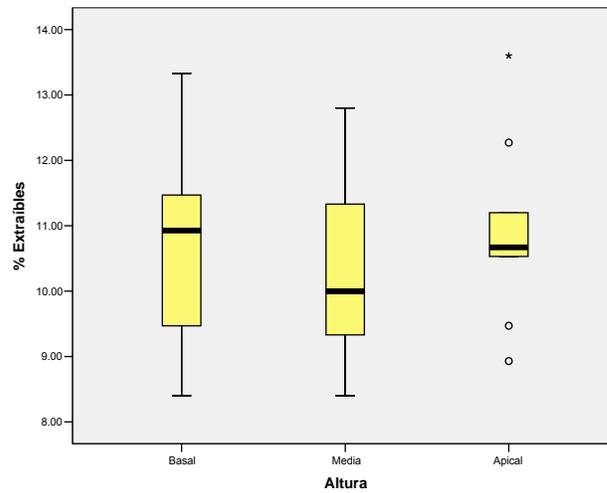


Figura 9. Distribución de los datos de taninos en función de las diferentes secciones del tronco de los árboles de Melina (*Gmelina arborea Roxb.*)

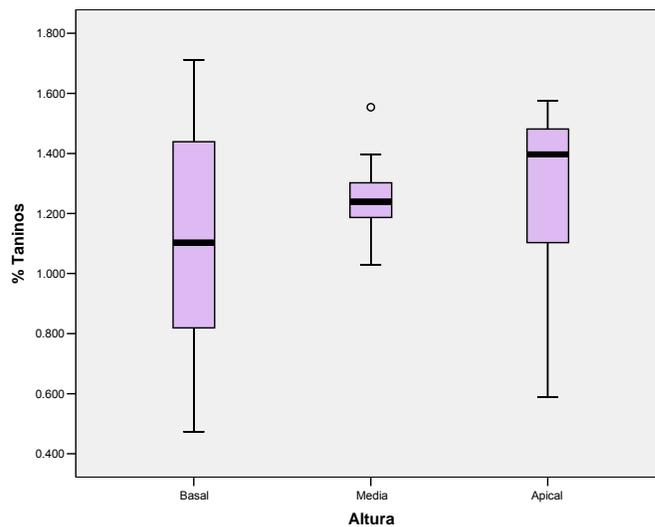


Figura 10. Distribución de los datos de cenizas en función de las diferentes secciones del tronco de los árboles de Melina (*Gmelina arborea* Roxb.)

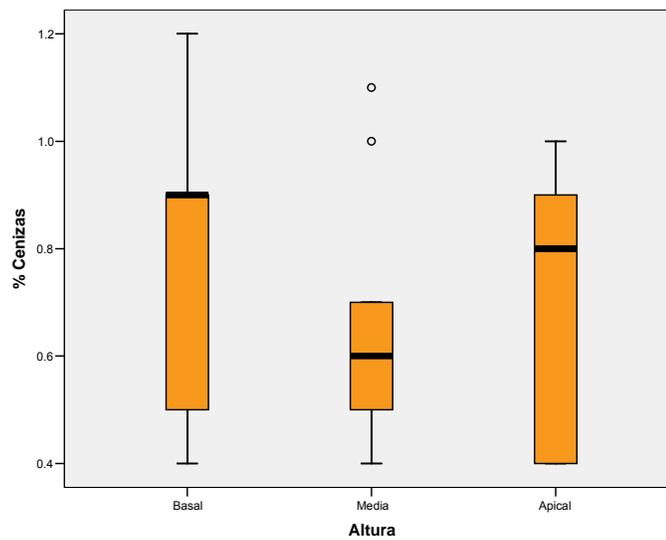


Tabla VI. Valores obtenidos de F para cada componente

Componente	Fo
Celulosa	2.940
Lignina	0.247
Extraíbles	0.356
Taninos	0.660
Cenizas	0.838

Fuente: Análisis Estadístico

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo se caracterizó químicamente la madera de Melina (*Gmelina arborea Roxb.*), determinando los siguientes componentes: celulosa, lignina, extraíbles, taninos y cenizas.

Las muestras de madera se obtuvieron de una plantación ubicada en el municipio de Morales, del departamento de Izabal. Éstas se molieron, tamizaron y luego secaron para obtener un porcentaje de humedad menor a 5, con el objeto de no alterar los resultados de los ensayos practicados a cada una de las muestras.

La tabla 5 muestra los resultados generales de la composición química de la especie tratada. De esta tabla se observa que la concentración de celulosa se encuentra entre 50 y 67% en peso, lignina entre 20 y 31 %, extraíbles entre 8 y 14 %, taninos entre 0.47 y 1.7 %, y cenizas entre 0.4 y 1.2 %. Se trataron veintisiete muestras, nueve árboles de cada cual se tomaron tres muestras a diferentes alturas, siendo éstas la basal o de diámetro a la altura del pecho (DAP), media y apical o de punta. Las alturas se denominan como 1, 2 y 3 o basal, media y apical.

Se analizaron las muestras y se determinaron los porcentajes de cada componente para cada una de las muestras. Con los resultados obtenidos se realizó un análisis de varianza para un sistema unifactorial en un solo sentido completamente aleatorio por medio de la distribución de Fisher (Ref.12).

Con los datos que se obtuvo para la celulosa se concluye que en promedio no hay diferencia significativa con respecto a las alturas del árbol, como se puede observar en la tabla VI y figura 6. Esto se respalda con los datos de la tabla XI, en donde se muestran los resultados del análisis de varianza, en donde se tiene que el valor observado para la prueba de Fisher es de 2.943, siendo menor al valor tabulado de 3.4, con lo cual determinamos que no existe diferencia significativa de las muestras de los árboles a diferentes alturas. La celulosa es el componente que en mayor cantidad se presenta en la madera sin importar la altura. También se observa que en promedio, en la altura 2 se encuentra en mayor proporción este componente.

El análisis de varianza para la lignina se encuentra en la tabla XII, de lo cual se muestra que este componente no varía significativamente en función de las diferentes secciones (alturas) del árbol; ya que el valor observado para la prueba de Fisher es menor que el valor tabulado, siendo los valores 0.247 y 3.4 respectivamente. En la tabla VII y figura 7 se muestran los valores medios de la composición de lignina para las diferentes alturas, siendo la altura 3 la que se encuentra en mayor proporción con variaciones de 0.32 y 0.46 con las alturas 1 y 2 respectivamente.

La tabla XIII presenta los resultados del análisis de varianza para los extraíbles en la cual se muestra que no existe variación significativa en función de las diferentes secciones del árbol, ya que el valor observado para la prueba de Fisher es de 0.3456, el cual es menor al valor tabulado de 3.4, con lo cual aceptamos la hipótesis nula. En la tabla VIII y figura 8 observamos los valores promedio tienen poca variación; siendo estos 10.76, 10.32 y 10.89, para las alturas 1,2 y 3 respectivamente. De estos valores se tiene que en la altura 3 se encuentra en promedio la mayor cantidad de extraíbles, y no presentan proporcionalidad.

En la tabla IX y figura 9 se presentan los valores promedio de taninos en la madera, observamos que son valores bajos debido a que los taninos se encuentran en su mayoría en la corteza del árbol, no en su madera; y el presente estudio evalúa la madera. Los valores son 1.12, 1.27 y 1.23 para las alturas 1, 2 y 3 respectivamente; de los cuales no se observa una variación significativa en función de la altura del árbol. Esto se comprueba mediante el análisis de varianza que se muestra en la tabla XIV, en donde se tiene que el valor observado de la distribución de Fisher es 0.66, el cual es menor al valor tabulado de 3.4.

La tabla XV muestra los resultados del análisis de varianza para cenizas, en el cual se aprueba la hipótesis nula, la cual nos dice que no existe variación significativa del componente en función de la altura del árbol. Así también en la tabla X y figura 10 se muestran los valores promedio para las tres alturas, los cuales están entre 0.66 y 0.78.

En general se puede decir que al aplicar el método estadístico de análisis de la varianza para poder determinar si las diferencias obtenidas entre las medias de cada variable con respecto a la posición de la parte del árbol de donde fueron extraídas las muestras, son significativas o no, se ha encontrado que en todas las variables: celulosa, extraíbles, lignina, taninos, y cenizas, la parte del árbol de donde se extraiga la corteza, no mostró diferencias significativas, debido a que los valores obtenidos de la distribución de Fisher son menores al valor tabulado.

CONCLUSIONES

1. La madera del primer clareo de Melina (*Gmelina arborea* Roxb), presenta los contenidos globales promedio de celulosa, 58.28+/-4.6%; lignina, 24.08+/-2.54%; extraíbles, 10.66+/-1.48%; taninos, 1.21+/-0.31% y cenizas, 0.71+/-0.24%.
2. No existe diferencia significativa en cada uno de los parámetros de composición a una misma sección del tronco del árbol.
3. El contenido de celulosa, extraíbles, lignina, taninos y cenizas es el mismo a lo largo de todo el fuste de los árboles de Melina (*Gmelina arborea* Roxb).
4. No se encontró diferencia significativa en la composición de la madera de los árboles de (*Gmelina arborea* Roxb), en las diferentes secciones del tronco evaluadas.
5. La aplicación de las normas de análisis utilizadas es efectiva, y los valores promedio con su desviación estándar se encuentran dentro de los valores referidos en la literatura.
6. Ningún parámetro evaluado muestra diferencias significativas, ya que los valores de F_o son menores a F ; y el que estuvo más cercano en diferencia significativa fue la celulosa, y el menor la lignina.

RECOMENDACIONES

7. Realizar estudios sobre este tipo de madera en función de diferentes edades y regiones de cultivo del árbol, incluyendo aspectos económicos sobre las posibilidades de aprovechamiento industrial.
8. Buscar alternativas sobre los métodos utilizados para determinar los componentes químicos en la madera, para lograr ahorrar recursos y tiempo; así como la validación de los métodos mediante la inter-comparación.
9. Evaluar y comparar la composición química porcentual de la madera en otras especies forestales de Guatemala.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Fonseca Maldonado, Mario Roberto. Determinación de la Composición Química de la Madera de Pino Candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore) Procedente de la Finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz. Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Guatemala 2006. pp. 1-109.
2. Meltzer, Robert L. **1979 Annual Book of ASTM Standards**. Parte 22-Madera y Adhesivos. Estados Unidos de América: Sociedad Americana de Ensayos y Materiales, 1979. pp. D 1109-60, D 1103-60, D 1105-56, D 1106-56.
3. Colección de Guías Silviculturales. **Melina, especie de árbol de uso múltiple en América Central**. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 1991. pp. 3-14.
4. Tsoumis, George. **Science and technology of wood**. Aristotelian University, Thessaloniki, Greece: Editorial Van Nostrand Reinhold, New York. pp. 54.
5. Díaz, A. **Ciencia de la madera**. Ministerio de Educación Superior. La Habana, 1986. pp. 195.
6. Otero, M. **Celulosa e papel. Tecnología de fabricação da pasta celulósita**. Sao Paulo, 1988. pp. 45-68.

7. Echenique, R. **Ciencia y Tecnología de la madera I**. Textos Universitarios. Universidad Veracruzana, México, 1993.
8. Tamchuk, R. I. y Tamchuk, G. N. **El follaje y su utilización en la agricultura**. Edit. Lesnaya Prom, 1973. pp. 360.
9. Emilianova, I. Z. **Control químico-técnico de las producciones hidrolíticas**. Edit. Lesnaya Prom. Moscú, 1969. pp. 366.
10. Yagodin, V. I. **Fundamentos de la Química y la Tecnología para el tratamiento del follaje**. Ed. Leningrad. Universitieta, 1981. pp. 47-50.
11. Moya, R. **Evaluación de las características y propiedades tecnológicas para la melina (*Gmelina arborea*) provenientes de plantaciones forestales**. ITCR, Cartago. pp. 80.
12. Montgomery, Douglas C. y William W. Hines. **Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Administración**. Tercera edición. Editorial Continental. México 1994. pp. 412, 417.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. <http://www.ecoportal.net/content/view/full/39302> Julio 2007
2. http://html.rincondelvago.com/madera_8.html Julio 2007
3. <http://es.wikipedia.org/wiki/Madera> Julio 2007
4. <http://www.papelnet.cl/madera/madera.htm> Julio 2007
5. <http://es.wikipedia.org/wiki/Lignina> Julio 2007
6. <http://es.wikipedia.org/wiki/Celulosa> Julio 2007
7. <http://es.wikipedia.org/wiki/Tanino> Julio 2007
8. <http://es.wikipedia.org/wiki/Lixiviaci%C3%B3n> Julio 2007
9. http://es.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1lisis_gravim%C3%A9trico Julio 2007
10. http://es.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1lisis_volum%C3%A9trico Julio 2007

BIBLIOGRAFÍA

1. Chang, Raymond. **Química**. Séptima Edición. Editorial McGraw-Hill. México 2002.
2. Geankoplis, C. J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**. Tercera edición. Editorial CECSA. México 1999.
3. Kern, Donald Q. **Procesos de Transferencia de Calor**. Editorial CECSA. México 2001.
4. Treybal, Robert E. **Transferencia de Masa**. Segunda Edición. México: Editorial McGraw-Hill.

APÉNDICE A

DATOS CALCULADOS

Tabla VI. Datos calculados para celulosa

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	60.39	66.75	59.37	50.2	50.31	56.99	58.69	57.98	56.04	516.72	57.41
2	62.09	67	60.55	56.39	52.15	62.46	64.17	56.23	59.08	540.12	60.01
3	56.55	64.24	61.08	50.61	53.77	57.89	53.37	62.03	57.28	516.82	57.42
										1573.66	58.2837

Fuente: datos originales

Tabla VII. Datos calculados para lignina

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	22.2	19.9	23.3	28.7	32.4	26.5	19.9	22.8	22.8	218.5	24.28
2	22.5	22.8	24.5	25.1	27.1	22.7	23.3	24.5	23.9	216.4	24.04
3	23.6	20.5	23.9	27.2	24.4	22.7	31.3	22.7	24.2	220.5	24.5
										655.4	24.27

Fuente: datos originales

Tabla VIII. Datos calculados para extraíbles

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	9.47	11.47	8.67	8.4	12.8	10.4	10.93	13.33	11.33	96.8	10.76
2	10.53	9.33	8.4	11.33	12.8	10	10	12.13	8.4	92.92	10.32
3	10.67	10.53	13.6	9.47	10.53	10.8	8.93	12.27	11.2	98	10.89
										287.72	10.66

Fuente: datos originales

Tabla IX. Datos calculados para taninos

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	0.578	1.712	1.586	0.819	1.103	0.473	1.439	1.029	1.355	10.09	1.12
2	1.302	1.554	1.397	1.187	1.176	1.229	1.239	1.281	1.029	11.39	1.27
3	0.588	1.502	1.397	0.903	1.481	1.575	1.134	1.103	1.407	11.09	1.23
										32.58	1.21

Fuente: datos originales

Tabla X. Datos calculados para cenizas

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	0.9	0.5	0.9	0.5	0.9	0.4	0.8	0.9	1.2	7	0.78
2	0.6	0.5	1.1	0.6	0.4	0.4	0.6	0.7	1	5.9	0.66
3	0.8	0.9	0.4	0.6	0.4	0.4	0.9	1	0.9	6.3	0.70
										19.2	0.71

Fuente: datos originales

APÉNDICE B

DATOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Tabla XI. Resultados del análisis de varianza para celulosa

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media Cuadrática	F	Sig.
Árbol	421.673	8	52.709	7.682	.000
Altura	40.387	2	20.194	2.943	.082
Error	109.777	16	6.861		
Total	571.837	26			

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XII. Resultados del análisis de varianza de lignina

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media Cuadrática	F	Sig.
Árbol	75.587	8	9.448	1.572	.210
Altura	2.976	2	1.488	.247	.784
Error	96.184	16	6.012		
Total	174.747	26			

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XIII. Resultados del análisis de varianza de extraíbles

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media Cuadrática	F	Sig.
Árbol	22.691	8	2.836	1.288	.316
Altura	1.567	2	.783	.356	.706
Error	35.231	16	2.202		
Total	59.489	26			

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XIV. Resultados del análisis de varianza de taninos

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media Cuadrática	F	Sig.
Árbol	1.325	8	.166	2.128	.095
Altura	.103	2	.051	.660	.530
Error	1.245	16	.078		
Total	2.673	26			

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XV. Resultados del análisis de varianza de cenizas

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media Cuadrática	F	Sig.
Árbol	.860	8	.108	2.615	.048
Altura	.069	2	.034	.838	.451
Error	.658	16	.041		
Total	1.587	26			

Fuente: Análisis Estadístico

APÉNDICE C

PROCEDIMIENTOS EN LOS ANÁLISIS QUÍMICOS

Figura 11. Equipo utilizado para lograr el tamaño de partícula deseado, tamiz 40 escala Tyler en la preparación de las muestras.



Fuente: Francisco Paz

Figura 12. Cristalería diversa para la determinación de celulosa, lignina, extraíbles y taninos.



Fuente: Francisco Paz

Figura 13. Proceso para la determinación de cenizas



Fuente: Francisco Paz

Se coloca la cantidad aproximada de la muestra dentro de un pesa muestra, y luego se pesa en la balanza analítica.



Fuente: Francisco Paz

Luego la muestra es colocada en un crisol previamente calcinado y tarado, y el mismo es introducido dentro de la mufla para calcinar las muestras y obtener las cenizas.

Figura 14. Proceso para la determinación de humedad



Fuente: Francisco Paz

La determinación de la humedad se hace mediante el equipo denominado, balanza de humedad; en donde únicamente es necesario colocar dos gramos de la muestra dentro de la balanza y programarla para la medición.

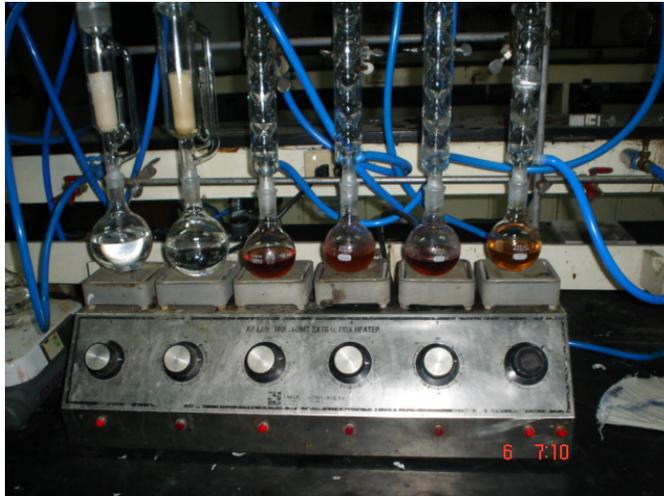
Figura 15. Proceso para la determinación de extraíbles



Fuente: Francisco Paz

Se pesa la muestra, la cual es colocada dentro de un dedal, y éste es puesto en sistema de extracción Soxhlet durante 12 horas con solvente n – hexano y luego 12 horas con alcohol etílico. La muestra se seca y se pesa.

Figura 16. Proceso para la determinación de taninos



Fuente: Francisco Paz

Ver procedimiento. El extracto obtenido se disuelve en una cantidad de agua y se coloca en un sistema a reflujo. A partir de aquí se toman las muestras para la titulación con permanganato de potasio e índigo de carmín como indicador, para determinar el porcentaje de taninos contenidos en la madera de Melina.

Figura 17. Otros equipos utilizados



Fuente: Francisco Paz

Equipo de vacío y campana de extracción.



Fuente: Francisco Paz

Plancha eléctrica.