



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

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MADERA DEL PRIMER RALEO DE
PINO CARIBE (*Pinus caribaea* (Morelet) var. hondurensis (Barret y Golfari))
A NIVEL LABORATORIO, PROVENIENTE DE LA FINCA SEMUC 6,
EL ESTOR, IZABAL.**

ERICKSON ROBERTO ESCOBAR TOLEDO

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

Guatemala, noviembre de 2005.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MADERA DEL PRIMER RALEO DE
PINO CARIBE (*Pinus caribaea* (Morelet) var. hondurensis (Barret y Golfari))
A NIVEL LABORATORIO, PROVENIENTE DE LA FINCA SEMUC 6, EL
ESTOR, IZABAL.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ERICKSON ROBERTO ESCOBAR TOLEDO

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

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

Guatemala, noviembre de 2005.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	--
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert de León Morales
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
SECRETARIO	Inga. Marcia Ivonne 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:

Caracterización química de la madera del primer raleo de Pino Caribe (*Pinus caribaea* (Morelet) var. *Hondurensis* (Barret y Golfari)) a nivel laboratorio, proveniente de la finca Semuc 6, El Estor, Izabal.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 1 de agosto de 2005.

Erickson Roberto Escobar Toledo

DEDICATORIA

A:

DIOS

Por ser mi guía y protector en el transcurso de mi vida. Por darme la oportunidad de compartir bellos momentos con mis familiares y amigos. Gracias por todas las bendiciones y si he de nacer en otra vida, te pido que sea la misma.

MIS PADRES

Gladys Beatriz Toledo Solórzano de Escobar y Erickson Efraín Escobar Antillón, gracias por su amor, comprensión y apoyo incondicional en todo momento, los amo.

MI HERMANO

Pablo Omar Escobar Toledo, por comprenderme y por ser mi mejor amigo.

LAURA SOFÍA

MONROY H.

Gracias por tu apoyo, cariño y motivación en el transcurso de estos años y gracias por ser mi mejor amiga.

JENNY TOLEDO

SOLÓRZANO

(Q. E. P. D.)

Por ser la luz que al ver el cielo ilumina nuestra familia.

AGRADECIMIENTO

A:

Mi abuela Carmen Solórzano, gracias por el apoyo y cariño en los momentos difíciles.

Mis tíos Waleska Toledo, Roberto Toledo, Dorcas Toledo, Fredy Gómez, Romeo Toledo, Julio Hernández, Yanina de Hernández, gracias por su apoyo y cariño.

Mis primos y primas Alfredo, Elisama, Julio, Dana, Bris, Gaby, Josué, Betty, Luis, Joel y Andrés, gracias por los momentos que hemos vivido juntos.

Mi abuelo Roberto Toledo, gracias por su apoyo y cariño.

Inga. Telma Cano Gracias por creer en mí y por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo y por su apoyo incondicional.

Ing. César García Por su apoyo y confianza en la revisión de este trabajo.

Familia Monroy Hernández Por su apoyo y motivación en el transcurso de estos últimos años.

Mis amigos

Jorge Ramos, Franty Miranda, Alejandra Pinto, Ronald Murga, Mario Fonseca, Aníbal Aja, Claudia Morales, Gustavo Hidalgo, por su amistad, motivación y ayuda en el transcurso de la carrera.

**Mis compañeros
de cierre**

Por su amistad y ayuda en el transcurso de la carrera.

**Mis compañeros de
Química Industrial**

Por su apoyo y amistad en el transcurso de este año.

**Ing. José Mario
Saravia**

Por su apoyo y respaldo en el trabajo realizado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
HIPÓTESIS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Estructuras y composición de la madera	1
1.1.1 Estructura macroscópica	1
1.1.2 Estructura microscópica	4
1.1.2.1 Componentes microscópicos	5
1.1.3 Composición química de la madera	6
1.1.4 Propiedades fisicoquímicas de la madera	10
1.1.5 Propiedades físicas y humedad	10
1.2 Principales componentes químicos de la madera	13
1.2.1 Polisacáridos Estructurales: Holocelulosa	13
1.2.1.1 Celulosa	13
1.2.1.2 Hemicelulosas	16
1.2.1.3 Sustancias pécticas	17
1.2.2 Componente no carbohidrato: Lignina	18

1.2.3 Componentes no Estructurales	22
1.2.3.1 Taninos	22
1.2.3.2 Sustancias extraíbles	26
1.2.3.3 Componentes inorgánicos y cenizas	29
1.3 Generalidades de la especie Caribe (<i>Pinus Caribaea</i>)	30
1.3.1 Distribución y características principales	30
1.3.1.1 Descripción botánica	31
1.3.1.2 Características, suelo, propiedades y usos	31
1.3.2 Turno de corte y producción	34
1.4 Fundamentos teóricos en base a la metodología	34
1.4.1 Gravimetría	34
1.4.2 Volumetría	35
1.4.3 Secado	36
1.4.4 Calcinación	37
1.4.5 Lixiviación	38
2. METODOLOGÍA	
2.1. Metodología de Investigación	41
2.1.1 Localización	41
2.1.2 Recursos	42
2.2. Metodología Experimental	46
2.2.1 Preparación de las muestras	46
2.2.2 Determinación de Extraíbles	46
2.2.3 Determinación de Taninos	48
2.2.4 Determinación de Lignina	51
2.2.5 Determinación de Celulosa	53
2.2.6 Determinación de Cenizas	56
2.2.7 Determinación de Humedad	58

2.3. Diseño Experimental	60
2.3.1 Diseño de Tratamientos	60
2.3.2 Análisis Estadístico	62
3. RESULTADOS	65
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
5. CONCLUSIONES	75
6. RECOMENDACIONES	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	81
BIBLIOGRAFÍA	83
APÉNDICE	
A. Datos Calculados	85
B. Datos Análisis Estadístico	87
C. Fotos de la Investigación	91
D. Datos Originales	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

No.	FIGURAS	Página
1.	Partes macroscópicas de la madera	3
2.	Estructura microscópica de la madera	5
3.	Esquema general de los componentes químicos de la madera	7
4.	Porción de la estructura de la cadena celulosa	14
5.	Celulosa vista desde un microscopio	15
6.	Porción estructural de la lignina	20
7.	Estructura de los taninos	23
8.	Origen de las muestras a tres diferentes alturas	61
9.	Concentración promedio de celulosa y lignina	66
10.	Concentración promedio de cenizas y taninos	66
11.	Concentración promedio de extraíbles y humedad	67
12.	Concentración de celulosa en base a la altura	71
13.	Concentración de extraíbles en base a la altura	73
14.	Concentración de cenizas en base a la altura	74
15.	Madera inmersa en solución de NaOH (det. celulosa)	91
16.	Filtrado de la mezcla (det. celulosa)	91
17.	Producto seco (det. celulosa)	92
18.	Determinación de lignina	92
19.	Secuencia para la cuantificación de taninos	93
20.	Muestras de extracto tánico seco	94
21.	Muestras de madera y mufla para la calcinación (det. cenizas)	94
22.	Muestras a calcinar y cenizas como producto	95

TABLAS

No.		Página
I.	Composición química de la madera (% en peso)	8
II.	Variables para el diseño unifactorial	62
III.	Análisis de varianza para el diseño unifactorial	63
IV.	Resultados Generales de la caracterización química del Pino Caribe	65
V.	Datos Calculados para lignina	85
VI.	Datos Calculados para celulosa	85
VII.	Datos Calculados para extraíbles	85
VIII.	Datos Calculados para taninos	86
IX.	Datos Calculados para cenizas	86
X.	Datos Calculados para humedad	86
XI.	Resultados del Análisis de Varianza para lignina	87
XII.	Resultados del Análisis de Varianza para celulosa	87
XIII.	Resultados del Análisis de Varianza para extraíbles	87
XIV.	Resultados del Análisis de Varianza para taninos	88
XV.	Resultados del Análisis de Varianza para cenizas	88
XVI.	Resultados del Análisis de Varianza para humedad	88
XVII.	Concentración promedio de los componentes determinados	89
XVIII.	Datos Originales para la determinación de celulosa y lignina	97
XIX.	Datos Originales para la determinación de taninos y extraíbles	98
XX.	Datos Originales para la determinación de cenizas y humedad	99

LISTA DE SÍMBOLOS

F_o	Fisher observada.
F	Fisher tabulada.
FODECYT	Fondo para la Ciencia y la Tecnología.
PINFOR	Programa de Incentivos Forestales.
SSA	Suma de cuadrados para tratamientos o regiones.
SSE	Suma de cuadrados para el error.
SST	Suma de cuadrados total.
n	Repeticiones u observaciones.
N	Total de las observaciones.
H_o	Hipótesis nula.
H_a	Hipótesis alternativa.
μ_i	Media para cada parámetro.

g	Gramos.
ml	Militros.
m	Metros.
%	Porcentaje.
°C	Grado Celsius .
S	Sumatoria.
cm	Centímetros.
mm	Milímetros.
L	Litros.
msnm	Metros sobre el nivel del mar.
pH	Potencial de hidrógeno.
Yi	Sumatoria de los totales de las observaciones.
y	Sumatoria de los promedios de las observaciones.

GLOSARIO

Aceites esenciales	Constituyen una mezcla de sustancias volátiles, en donde predominan los terpenos y terpenoides oxigenados (alcoholes y ácidos).
Ácidos grasos	Compuestos orgánicos pertenecientes a los ácidos carboxílicos. Presentes en aceites y grasas como mezclas de ésteres grasos y glicerina.
Alcaloides	Componentes distribuido ampliamente en la planta, constituidos heterocíclicamente conteniendo nitrógeno.
Calcinación	Proceso en donde un cuerpo se somete al calor para eliminar las sustancias volátiles.
Colofonia	Resina sólida, producto de la destilación de la trementina, empleada en farmacia entre sus usos.
Higroscópico	Que tiene la propiedad de ceder o ganar humedad en intercambio con la humedad existente en el medio ambiente que la rodea, hasta alcanzarse un estado de equilibrio entre el valor de la humedad relativa del aire y el contenido de humedad de la madera.

INAB	Siglas para Instituto Nacional de Bosques.
Oleoresina	Líquido procedente de varias plantas, en donde en un aceite volátil se disuelve resina.
Terpenos	Son hidrocarburos de composición $C_{10}H_{16}$ (derivados del isopreno C_5H_{10}). En los aceites esenciales aparecen monoterpenos.
Tropolones	Polifenoles contenidos en los extraíbles de la madera.

RESUMEN

Se caracterizó químicamente la madera del primer raleo de la especie *Pinus caribaea* (Morelet) var. *Hondurensis* (Barret y Golfari), de seis años de edad, proveniente de la Finca Semuc 6, situada en el municipio de El Estor, del departamento de Izabal.

Las muestras de madera utilizadas fueron molidas en el taller de Carpintería del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería y tamizadas en una malla 40 mesh, recolectando la fracción que pasó por ella.

Los ensayos químicos realizados son los siguientes: Preparación de madera libre de Sustancias extraíbles según norma ANSI/ASTM D 1105-56, determinación de Alfa celulosa en madera según norma ANSI/ASTM D 1103-60, Lignina en madera según norma ANSI/ASTM D 1106-56, Cenizas en madera según norma ANSI/ASTM D 1102-56, Taninos en madera según tesis de Ingeniería Química (ver Bibliografía) y contenido de humedad en base húmeda.

Se analizaron 9 árboles a 3 diferentes alturas, siendo altura d. a. p. (diámetro a la altura del pecho 1.30 m) o basal, altura comercial media y alta o apical.

Para el Pino Caribe (*Pinus caribaea* (Morelet) var. *Hondurensis* (Barret y Golfari)) se obtuvieron los siguientes resultados: la concentración de celulosa se encuentra entre un 46 % y 56 % en peso, la lignina se encuentra entre 25 % y 30%, las sustancias extraíbles se encuentran entre 7 % y 12 %, los taninos puros se encuentran entre 0.03 % y 0.06 % y las cenizas se encuentran entre 0.30 % y 0.70 %.

La concentración de taninos no presentó una variación significativa en función de la altura. El porcentaje de taninos obtenido se reportó por debajo de 0.1 % en peso, debido a que se trabajó sólo con la madera del pino y no con la corteza donde se encuentran los taninos en mayor concentración.

Se determinó que la concentración de los extraíbles no varía significativamente en función de la altura. La concentración de humedad no presentó variación significativa en función de la altura. La concentración de lignina no presentó variación significativa según la variación de alturas. La celulosa también no presentó una variación significativa en su concentración en función de la altura, indicando que en cualquier parte del árbol se puede encontrar celulosa en una cantidad similar, así como en el caso del resto de los componentes. Las cenizas no variaron significativamente en función de la altura, obteniendo datos menores del 1 % en peso.

La caracterización química de la madera del Pino Caribe no demostró variación significativa en la concentración de sus componentes químicos en función de la altura, por lo tanto se aprobó la hipótesis nula, H_0 .

OBJETIVOS

- **General**

Determinar la composición química de la madera del primer raleo de pino caribe (*Pinus caribaea* (Morelet) var. hondurensis (Barret y Golfari)) a nivel laboratorio, proveniente de la plantación de la finca Semuc 6, El Estor, Izabal, como parte del proyecto “Estudio tecnológico integral de la madera y corteza del primer raleo de 4 especies de pino cultivadas con fines industriales”.

- **Específicos**

1. Determinar la composición química de la madera del Pino caribe (*Pinus caribaea* (Morelet) var. hondurensis (Barret y Golfari)), aislando y cuantificando sus componentes principales, los cuales son α -celulosa, lignina, extraíbles, taninos y cenizas.
2. Evaluar el efecto que tiene la altura a la cual se toma la muestra sobre la composición de compuestos químicos para el árbol de Pino caribe (*Pinus caribaea* (Morelet) var. hondurensis (Barret y Golfari)).

HIPÓTESIS

No existen diferencias significativas en la concentración de los compuestos químicos seleccionados en función de la altura del árbol del Pino Caribe (*Pinus caribaea* (Morelet) var. hondurensis (Barret y Golfari)), especie forestal subtropical nativa de Guatemala.

Hipótesis estadística

Hipótesis nula: (H₀)

No existe diferencia significativa en la concentración, como porcentaje en peso, de los componentes químicos seleccionados a diferentes alturas del fuste o tronco, de una especie forestal subtropical de Guatemala.

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

Hipótesis alternativa: (H_a)

Si existe diferencia significativa en la concentración, como porcentaje en peso, de los componentes químicos seleccionados a diferentes alturas o para alguna de las alturas del fuste, de una especie forestal subtropical de Guatemala.

$$\exists_{i=1,2,3} / \mu_i \neq \mu$$

INTRODUCCIÓN

La madera contiene una gran variedad de compuestos orgánicos, pero siempre hay compuestos de mayor importancia por su abundancia en la misma. La madera se compone en su mayor parte de celulosa, polisacárido considerado como el componente orgánico más abundante en el planeta. La lignina es un polímero fenólico de gran estructura y peso molecular, constituye el segundo componente más abundante en la madera.

Los extraíbles son compuestos orgánicos de gran variedad, que se encuentran en cantidades relativamente menores a los compuestos anteriores y son constituidos por resinas, polifenoles, gomas, azúcares entre otros. El grupo de polifenoles más significativo son los taninos, que precipitan a las proteínas y evitan la putrefacción de las pieles por medio del curtimiento.

Las cenizas se encuentran en mínimas cantidades y están constituidos por componentes inorgánicos, tales como magnesio, sílice, calcio y otros minerales. La humedad de la madera constituye el contenido de agua en la materia misma y se puede representar su contenido en base húmeda o base seca.

El bosque guatemalteco tiene un uso insostenible y no presenta la relevancia económica que se espera, pues solo aporta el 2 % del PIB en Guatemala, a pesar de las características del suelo y clima, de la enorme biodiversidad y otros muchos recursos con que cuenta la nación.

Los bosques de pinos cubren aproximadamente 16,000 kilómetros cuadrados de la superficie del país, por ello es de vital importancia realizar estudios de las potencialidades del contenido de componentes químicos en la madera, ya que esto permite optimizar la gran variedad de usos que puedan presentar, como es el caso de la fabricación del papel o para la construcción.

La presente investigación busca la generación de información para la especie mencionada en cuanto a su caracterización química, siendo parte del proyecto No. 03-03 FODECYT, el cual trata de la caracterización de las propiedades químicas, físicas, anatómicas y mecánicas de cuatro especies de pino con fines industriales, una de ellas es el Pino Caribe.

La información que se genere por medio de este documento, con los otros componentes, físico, mecánico y anatómico, servirá para realizar una posterior evaluación del uso industrial de la madera de la especie a tratar para así poder ampliar el campo en donde se ha utilizado y tratar de dar el uso correcto a la madera.

1. MARCO TEÓRICO

La madera es un material complejo, con propiedades y características que dependen no sólo de su composición sino de su constitución, de la manera en que están colocados u orientados los diversos elementos que la forman.

La madera no es un material homogéneo, está formado por diversos tipos de células especializadas que forman tejidos. Estos tejidos sirven para realizar las funciones fundamentales del árbol; conducir la savia, transformar y almacenar los alimentos y por último formar la estructura resistente o portante del árbol.

1.1 Estructuras y composición de la madera

La madera es una sustancia fibrosa, organizada, esencialmente heterogénea, producida por un organismo vivo que es el árbol. Sus propiedades y posibilidades de empleo son, en definitiva, la consecuencia de los caracteres, organización y composición química de las células que la constituyen.

1.1.1 Estructura macroscópica

La observación de un trozo de madera permite ver los diversos elementos característicos que la forman, y además, apreciar que no se trata de un material homogéneo. Si se observa el tronco de un árbol, se ve que tiene forma casi cilíndrica o troncocónica y que está formado por sucesivas capas superpuestas o anillos.

En primer lugar se aprecia que entre la madera y la corteza existe una capa generatriz, llamada cambium, que produce madera hacia el interior y corteza hacia el exterior. En cada período vegetativo se forma una nueva capa o anillo que cubre la anterior. Dentro de cada capa se observan dos zonas bien diferenciadas, la formada al principio del período vegetativo con células de paredes delgadas que se denomina madera de primavera, y la formada durante el verano, con células de paredes gruesas, llamada madera de verano.

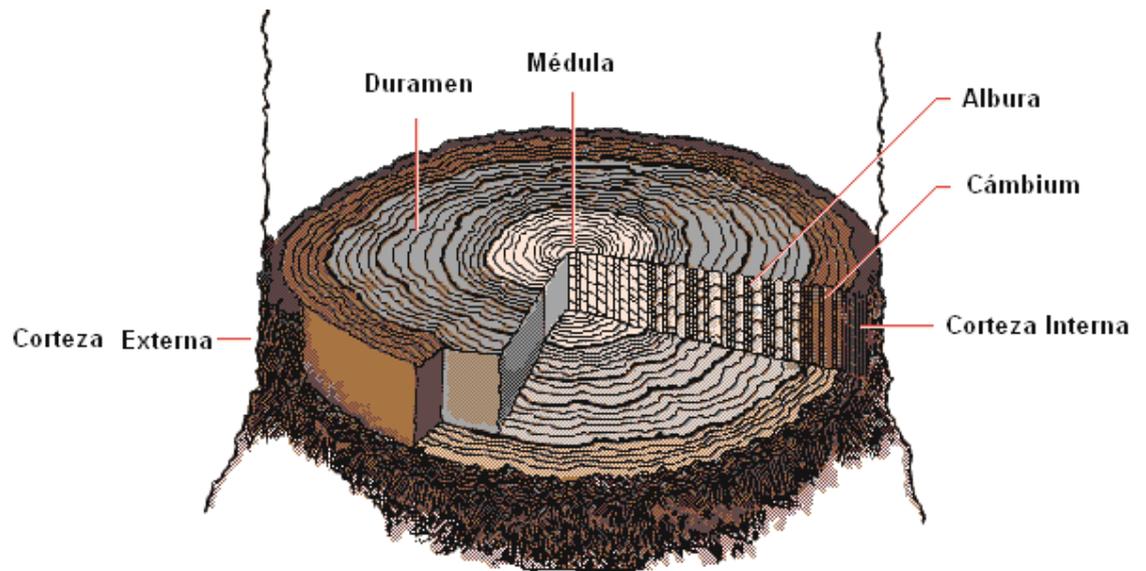
Esta diferencia entre las dos zonas, hace fácilmente distinguible en la sección transversal, una serie anillos de crecimiento, cada uno de los cuales corresponde a un período vegetativo de la vida del árbol, representando el crecimiento anual, por lo que su número indica la edad del árbol.

La médula es la parte central del árbol. Constituida por tejido flojo y poroso. Tiene un diámetro muy pequeño. Madera vieja y normalmente agrietada. Se suele desechar en los procesos de elaboración de la madera.

El duramen es la madera de la parte interior del tronco. Constituido por tejidos que han llegado a su máximo desarrollo y resistencia (debido al proceso de lignificación.) De coloración, a veces, más oscura que la exterior. Madera adulta y compacta. Es aprovechable.

La duraminización (transformación de albura a duramen) de la madera se caracteriza por una serie de modificaciones anatómicas y químicas, oscurecimiento, aumento de densidad y mayor resistencia frente a los ataques de los insectos.

Figura 1. Partes macroscópicas de la madera. (Ref. Electrónica 4)



La albura se encuentra en la parte externa del tronco, bajo la corteza. Constituida por tejidos jóvenes en período de crecimiento. Contiene mucha savia y materias orgánicas. De coloración más clara que el duramen, más porosa y más ligera, con mayor riesgo frente a los ataques bióticos.

El cambium es la capa existente entre la albura y la corteza, constituye la base del crecimiento en especial del tronco, generando dos tipos de células: hacia el interior: Madera (albura) y hacia el exterior: Liber.

El liber es la parte interna de la corteza. Es filamentosa y poco resistente. Madera embrionaria viva. La corteza es la capa exterior del tronco. Tejido impermeable que recubre el liber y protege al árbol. Los radios leñosos son bandas o láminas delgadas de un tejido, cuyas células se desarrollan en dirección radial, o sea, perpendicular a los anillos de crecimiento. Ejercen una función de trabazón.

Los radios almacenan y difunden las materias nutritivas que aporta la savia descendente. Contribuyen a que la deformación de la madera sea menor en dirección radial que en la tangencial. Son más blandos que el resto de la masa leñosa. Por ello constituyen las zonas de rotura a compresión, cuando se ejerce el esfuerzo paralelamente a las fibras.

1.1.2 Estructura microscópica

Como se ha visto la madera no es un material homogéneo, está formado por diversos tipos de células especializadas que forman tejidos. Estos tejidos sirven para realizar las funciones fundamentales del árbol; conducir la savia, transformar y almacenar los alimentos y formar la estructura resistente o portante del árbol. La heterogeneidad de la madera será, en parte, la causa de sus propiedades.

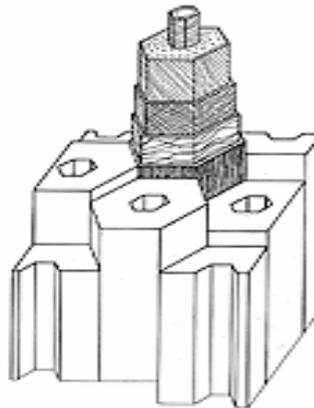
Se puede considerar la madera como un conjunto de células alargadas en forma de tubos, paralelos al eje del árbol, muy variables, tanto en longitud y forma, como en el espesor de sus paredes y en las dimensiones interiores. Estas células están unidas entre sí por una sustancia llamada materia intercelular o laminilla media, y a su vez trabadas por otro tipo de células, colocadas perpendicularmente a las anteriores y en el sentido radial del tronco, formando los llamados radios leñosos.

Las paredes de los tubos están formadas por una serie de capas compuestas por microfibrillas de celulosa enrolladas helicoidalmente alrededor del eje con inclinación diferente en cada capa, y todas ellas, embebidas en un material amorfo. Prácticamente insoluble, que es la lignina.

Todo ello hace de la madera un material resistente y ligero, que puede competir favorablemente con otros materiales utilizados en la construcción, en cuanto a la relación resistencia-peso específico.

Es muy habitual asimilar estas células a un pilar hueco de hormigón armado, en la que la lignina, hace las veces de hormigón y las microfibrillas de celulosa las del acero.

Figura 2. Analogía de la estructura microscópica de la madera con el concreto armado. (Ref. Electrónica 2)



1.1.2.1 Componentes microscópicos

En el sentido axial se distingue:

a) Fibras alargadas, de pared gruesa formadas por células que se han prolongado afinándose en las puntas, constituyendo los tejidos de sostén, es decir, la estructura y la parte resistente de la madera. En las coníferas estas células son las mismas que sirven para permitir la circulación de los fluidos.

b) Vasos y poros de pared delgada (tejido vascular), formando los órganos de conducción o vehículo de la savia ascendente o bruta; los poros de la madera aparecen en sección transversal (pequeños agujeros), y en sección longitudinal (pequeñas estrías).

c) Células de parénquima, son cortas y poco abundantes. Difunden y almacenan en todo el espesor del árbol la savia descendente o elaborada.

El parénquima constituye una especie de tejido conjuntivo (tegumental o de defensa), que vincula entre sí a los otros tejidos y que está formado por células poliédricas de paredes celulósicas delgadas y esponjosas.

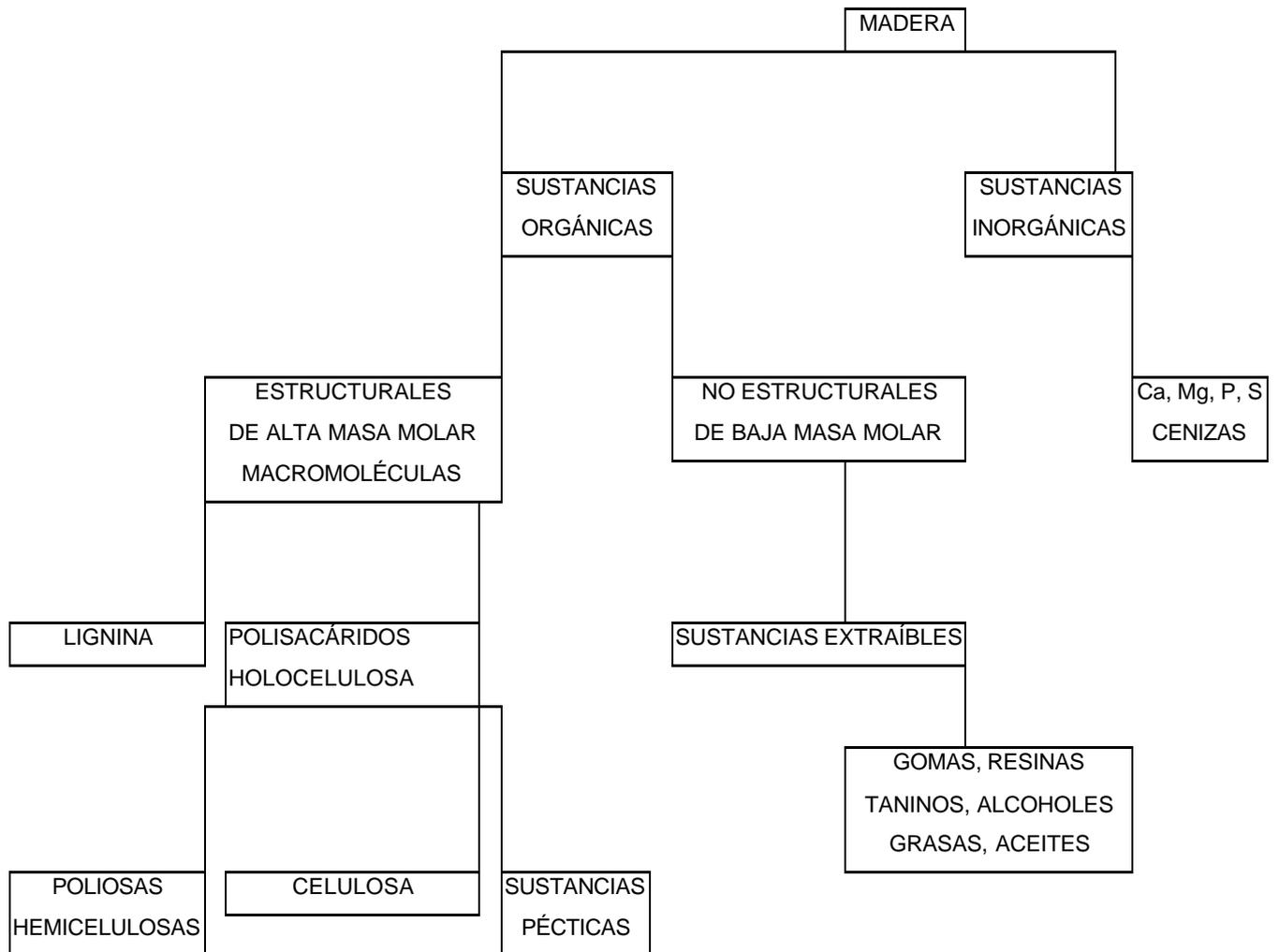
En el sentido radial hay menos células, y estas se disponen por bandas o láminas delgadas (radios medulares), intercaladas entre las fibras y los vasos, a los que cruzan en ángulo recto, dirigiéndose desde la corteza hasta el centro del árbol. En esas bandas de células llamadas radios celulares o mallas, almacenan y difunden, como las células del parénquima, las materias nutritivas que arrastra la savia descendente. En ciertas especies se encuentran en ambos sentidos, axial y radial, unos canales secretores de resina.

1.1.3 Composición química de la madera

La madera es uno de los recursos más antiguos en la historia del ser humano, e inclusive en la prehistoria. No hay diferencia importante entre la madera en general. Según Tsoumis, los principales elementos químicos de la madera son carbono (C = 49-50 %), hidrógeno (H = 6 %) y oxígeno (O = 44-45 %); pequeñas cantidades de nitrógeno (N = 0.1-1 %) también están presentes. Algunos minerales, en pequeña cantidad, que se encuentran en la madera son calcio (Ca), potasio (K) y magnesio (Mg), encontrados en las cenizas; también se cuenta con fósforo (P), azufre (S) y sodio (Na).

Los elementos de carbono, hidrógeno y oxígeno se combinan para formar los componentes principales de la madera, siendo celulosa, hemicelulosas (poliosas) y lignina; también contiene pequeñas cantidades de sustancias pécticas. Cada uno de los componentes mencionados consta de un gran número de compuestos químicos.

Figura 3. Esquema general de los componentes químicos de la madera.
(Ref. Electrónica 3)



Según Bland, la madera está formada por componentes estructurales y no estructurales, los estructurales son los que componen la pared celular y los no estructurales son denominados como sustancias extraíbles.

Según Fengel, entre los compuestos orgánicos extraíbles se pueden encontrar hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, fenoles, aldehídos, cetonas, ácidos alifáticos, ceras, glicéridos, y compuestos nitrogenados.

Según Tsoumis, tabla 4-1. "Composición Química de Maderas", la proporción de los componentes de la madera en base a 153 especies botánicas a temperatura ambiente es la siguiente:

Tabla I. Composición química de la madera (% en peso)

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. 5.

La celulosa está compuesta por moléculas de glucosa $(C_6H_{12}O_6)_n$, monosacárido formado por fotosíntesis de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico. La n representa el grado de polimerización o número de monómeros de glucosa por cadena de celulosa y en promedio se encuentra entre 8,000 y 10,000 monómeros por cadena.

La hemicelulosa, así como la celulosa y las sustancias pécticas, son carbohidratos y constituyen la holocelulosa; son sustancias compuestas de carbono, hidrógeno y oxígeno, en donde los dos últimos elementos se encuentran en las mismas proporciones que en la molécula de agua. El grado de polimerización de la hemicelulosa es menor que para celulosa, y está constituida de varios monosacáridos, tales como manosa (de 6 carbonos) y xilosa (de 5 carbonos) principalmente.

Las sustancias pécticas son carbohidratos que se encuentran en las membranas de células hembra jóvenes. Según reportes, la cantidad de sustancias pécticas en maderas viejas es nula, pero opiniones dicen que las hay en pequeñas proporciones.

La separación de hemicelulosa y celulosa se hace en base a la solubilidad en solución acuosa al 17.5 % en peso de hidróxido de sodio (NaOH), en donde la holocelulosa se subdivide en α -celulosa (sinónimo de celulosa), insoluble en dicha solución, cuando β - y γ -celulosa son solubles en ella (hemicelulosas).

La lignina es el componente de la pared celular, producida solamente por células vivas. Es interesante que la lignina ocurre en asociación con la celulosa, en cambio la celulosa se puede encontrar casi pura en la naturaleza, como el caso del algodón.

La lignina no es un carbohidrato, predominantemente es de naturaleza aromática. Sin embargo, la estructura y reactividad de la lignina no son completamente conocidas, y su aislamiento es un problema, ya que ambas características cambian al momento de su determinación por el tipo de método empleado, y las condiciones no siempre son las mismas. Difiere en composición entre coníferas notablemente.

1.1.4 Propiedades fisicoquímicas de la madera

Los árboles no podrían alcanzar tanta altura si sus troncos no estuvieran impregnados de lignina, cuya propiedad de aglutinamiento proporciona la dureza y rigidez necesaria a los haces de fibras celulósicas.

Según Tancredi, la pared secundaria, que constituye la mayor parte de la madera, contiene cerca del 75 % de la lignina. Esta sustancia da a la pared celular una gran resistencia, dureza e impermeabilidad, lo que va a permitir en futuras aplicaciones, desarrollar sobre ella un proceso regulado de gasificación y la creación de poros, obteniéndose carbón activado.

Según Díaz, a modo de resumen, podemos añadir que en las coníferas la relación lignina-hemicelulosa-celulosa es de 30:20:50 % en masa y en las latifoliadas la relación es en igual orden, de 20:30:50.

1.1.5 Propiedades físicas y humedad

Dado que la madera es un material formado por fibras orientadas en una misma dirección, es un material anisótropo, es decir, que ciertas propiedades físicas y mecánicas no son las mismas en todas las direcciones que pasan por un punto determinado, si no que varían en función de la dirección en la que se aplique el esfuerzo.

Se consideran tres direcciones principales con características propias:

- Dirección axial: Paralela a las fibras y por tanto al eje del árbol. En esta dirección es donde la madera presenta mejores propiedades.
- Dirección radial: Perpendicular al axial, corta el eje del árbol en el plano transversal y es normal a los anillos de crecimiento aparecidos en la sección recta.
- Dirección tangencial: Localizada también en la sección transversal pero tangente a los anillos de crecimiento o también, normal a la dirección radial.

La humedad es la propiedad más importante, pues influye sobre todas las demás, propiedades físicas, mecánicas, mayor o menor aptitud para su elaboración, estabilidad dimensional y resistencia al ataque de organismos.

El agua es el vehículo de transporte que utilizan las plantas para su alimento, esto, unido a la higroscopicidad de la madera, hace que esta tenga normalmente en su interior cierta cantidad de agua, que es necesario conocer antes de su uso, debido a las modificaciones que produce en las características físicas y mecánicas.

La higroscopicidad hace que la madera en condiciones normales de uso siempre contenga una cierta cantidad de agua en las paredes de las células que la conforman pero además y lo más importante, es que la variación de esa cantidad de agua tiene grandes implicaciones en las demás propiedades como son:

- Su resistencia mecánica, su aptitud para el trabajo con máquinas y herramientas, su aptitud para recibir acabados y adhesivos, el poder calorífico que puede generar.

- Su resistencia al ataque de hongos cromógenos (manchadores) y xilófagos (de pudrición), en el peso y, sobre todo, en los cambios dimensionales que sufre la madera a consecuencia precisamente de la variación en su contenido de humedad.

La madera en servicio presenta un contenido de humedad que generalmente oscila entre 6 y 18 % en base seca, dependiendo del tipo de uso, de si está expuesta a la intemperie y dependiendo de la época del año; dicha variación de humedad en la madera puede ocasionar, entre otros aspectos, los inconvenientes o problemas en un mueble si no se encuentra la madera a su contenido de humedad en equilibrio y si no se toman las debidas medidas previsoras.

El agua en la madera, puede estar presente de tres formas diferentes:

- Agua de constitución o agua combinada: Es aquella que entra a formar parte de los compuestos químicos que constituyen la madera. Forma parte integrante de la materia leñosa (de su propia estructura), y no se puede eliminar si no es destruyendo al propio material (por ejemplo, quemándola).
- Agua de impregnación o de saturación: Es la que impregna la pared de las células rellenando los espacios submicroscópicos y microscópicos de la misma. Se introduce dentro de la pared celular, siendo la causa de la contracción de la madera cuando la pierde (desorción) y de su expansión o hinchamiento cuando la recupera (sorción: retención de agua). Se puede eliminar por calentamiento con temperaturas de 60 a 85° C, por tiempos de 2 a 6 horas.

- Agua libre: Es la que llena el lumen de las células o tubos (vasos, traqueidas, etc.) Es absorbida por capilaridad. El agua libre, una vez perdida por la madera, ya no puede ser recuperada a partir de la humedad atmosférica. Para recuperarla, habrá de ser por inmersión directa en el agua.

El agua libre trata de ocupar físicamente los huecos, y por consiguiente no influye en la hinchazón o merma de la madera ni en las propiedades mecánicas.

Las dos últimas, impregnación y libre son las que constituyen la humedad de la madera. La humedad es la cantidad de agua que contiene la madera expresada en % de su peso en estado anhidro o húmedo. (Ref. 8. Internet)

1.2 Principales componentes químicos de la madera

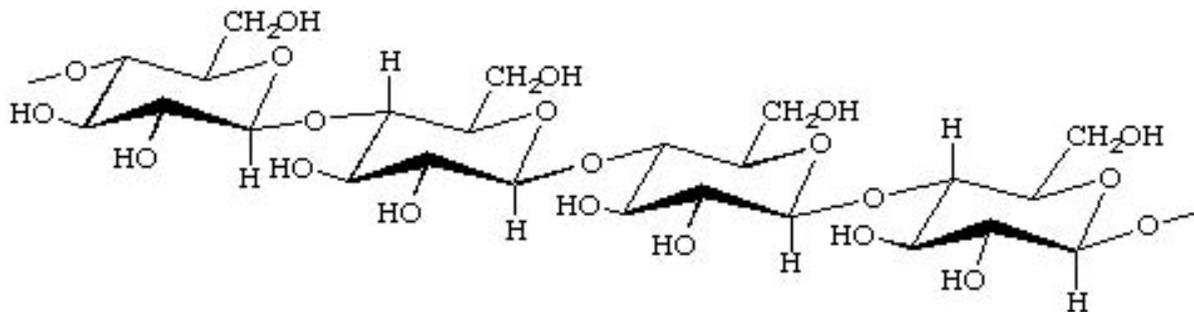
1.2.1 Polisacáridos Estructurales: Holocelulosa

La holocelulosa es la fracción total hidrocarbonada de la madera, conteniendo celulosa, hemicelulosa y sustancias pécticas . Su contenido oscila entre 69 al 91 por ciento del total de las sustancias de la pared celular libre de extraíbles.

1.2.1.1 Celulosa

Según Marx- Figini, la celulosa es el homopolisacárido que se encuentra en mayor proporción en la madera, es una estructura básica de las células de las plantas y la sustancia más importante producida por este organismo vivo siendo el principal componente de la pared celular.

Figura 4. Porción de la estructura de la cadena celulosa. (Ref. Electr. 7)



A. Estructura

La celulosa consiste en unidades de anhidro- β - D(+) glucopiranosas en conformación C_1 , unidas por enlaces glicosídicos β -1-4, por lo que se puede describir como un polímero lineal de glucanos. El grado de polimerización “n” es del orden de los 15,000, lo que equivale a una masa molar en el orden de los 2.3 millones.

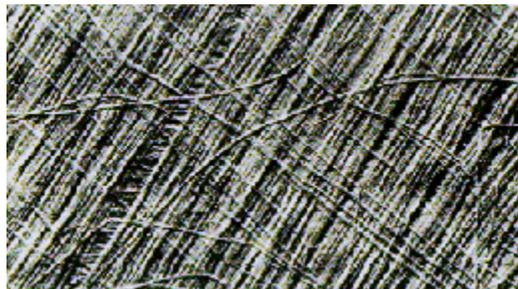
Debido al tipo de enlace (β -1-4) la molécula de celulosa tiene una forma lineal, estabilizada por la formación de numerosos puentes de hidrógeno intracadenales e intercadenales. Entre 40 y 70 moléculas se encuentran agrupadas en fibrillas elementales de un espesor de 3.5 y 7.5 nm y una longitud de varios μ m.

Según Guardiola, J.L.y Amparo, las moléculas de celulosa están orientadas longitudinalmente formando un agregado cristalino fuertemente ordenado, en el que todas las moléculas presentan la misma polaridad, lo que indica que tienen su extremo reductor orientado hacia el mismo extremo de la microfibrilla.

En estos agregados las moléculas de celulosa no están unidas covalentemente, estabilizándose su estructura solamente por puentes de hidrógeno (C_3-C_6) y (C_2-C_5), que aunque muy débiles individualmente, su elevado número hace de la fibra de celulosa una estructura muy firme y poco sensible a la degradación.

Según Coronel, E. Q., la celulosa está constituida por varias cadenas de celobiosa, formada por agrupaciones beta glucosa, cada una de las cuales contiene tres oxidrilos (OH) eterificables por los alcoholes o esterificables por los ácidos. La cristalinidad de la celulosa se encuentra en función de la gran cantidad de puentes de hidrógeno, hecho que además explica por qué la celulosa no es soluble en los sistemas de solventes usuales. Ella es la responsable de determinadas propiedades físicas y mecánicas de las maderas por constituir el material de sostén del árbol, dándole resistencia y tenacidad.

Figura 5. Celulosa vista desde un microscopio. (Ref. Electrónica 7)



B. Propiedades

Las propiedades más importantes de la celulosa se relacionan, en primer lugar, con la susceptibilidad de la molécula a la hidrólisis y, en segundo lugar, con su capacidad de absorber agua.

La celulosa puede presentarse en dos variedades: la celulosa ordinaria que es la natural, y la celulosa mercerizada que resulta de tratar la celulosa ordinaria por álcalis concentrados eliminando luego por loción el álcali fijado.

Por la acción de la sosa cáustica sobre la celulosa en disolución concentrada y fría, la masa se hincha y se vuelve transparente, formándose la llamada sodiocelulosa que por la acción del agua en abundancia se transforma en hidrocélulosa, propiedad que se usa en la mercerización del algodón.

Los usos de la celulosa son muy importantes, en donde se emplea para fabricar papel, diferentes tejidos, explosivos, celuloide, cera artificial, piezas para maquinaria, eléctrica y general, barnices, impermeables etc., pero para llegar a ser tan versátil se requirieron varios años de investigación y mejoramiento no solo de los métodos de obtención sino también y muy importantemente de las materias primas.

1.2.1.2 Hemicelulosas

Las poliosas o hemicelulosas son heteropolisacáridos de alta masa molar, que se encuentran constituidos por diferentes unidades de monosacáridos: pentosas, hexosas y ácidos urónicos, enlazados entre sí por enlaces glicosídicos, formando estructuras ramificadas y en general amorfas. Pueden ser clasificadas como pentosanos y hexosanos, aunque también se clasifican en dependencia de su origen, su composición estructural y solubilidad en álcalis.

A. Estructura

Las maderas están conformadas por azúcares neutros de seis átomos de carbono: glucosa, manosa, galactosa y de cinco átomos de carbono: la xilosa y arabinosa. Algunas poliosas contienen adicionalmente ácido urónico.

Se pueden encontrar los mananos, glucomananos, glucanos, xiloglucanos, ramnogalactouronanos, y en los xilanos encontramos los arabinoxilanos y O-acetil- 4- O- metilglucuronoxilano. Las hemicelulosas se encuentran asociadas con la celulosa mediante fuertes interacciones polisacárido – polisacárido.

B. Propiedades

Según Fuller, la función de las hemicelulosas en la madera parece ser de intermediario entre la celulosa y la lignina, tal vez facilitando la incrustación de las microfibrillas. Probablemente no exista enlace químico alguno entre las hemicelulosas y la celulosa, mas suficiente adhesión mutua que es fortalecida por los puentes de hidrógeno y las fuerzas de Van der Walls. Si son muy ricas en ácidos urónicos se llaman hemicelulosas ácidas; si no lo son, se denominan hemicelulosas neutras.

1.2.1.3 Sustancias pécticas

Son polisacáridos ramificados, formados por unidades de ácido galacturónico, que a veces pueden incluir moléculas de otros monosacáridos, como fructosa, xilosa y ramnosa.

Lo que las diferencia de las hemicelulosas es su alto contenido en ácido galacturónico.

El peso molecular de las pectinas es habitualmente alto, como corresponde a su estructura formada por cientos o hasta 1,000 unidades de monosacáridos. Si bien se encuentran en todas las plantas, los cítricos y las manzanas son especialmente ricas en pectinas. También las contienen las hojuelas del salvado, la cebada y las legumbres.

1.2.2 Componente no carbohidrato: Lignina

Las ligninas son fracciones no carbohidratadas de la madera libre de extraíbles, extremadamente complejas y difíciles de caracterizar. Constituyen un polímero aromático, heterogéneo, ramificado, donde no existe ninguna unidad repetida definidamente.

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. 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 unidades de masa atómica.

Según Fengel, esta sustancia amorfa es localizada como componente de la lámina media y también en la pared secundaria. Durante el desarrollo de la célula, la lignina es incorporada como último componente de la pared celular interpenetrando las fibrillas y fortaleciendo la pared celular.

Se caracteriza por ser un complejo aromático del que existen muchos polímeros estructurales (ligninas). 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.

La separación de la lignina conlleva una degradación de su estructura por lo que resulta difícil obtener una lignina idéntica a la que se encuentra en la madera (lignina nativa) aunque la separación cuidadosa de la lignina se considera representativa de la lignina total en la madera. Los contenidos de lignina varían con la morfología de la fibra.

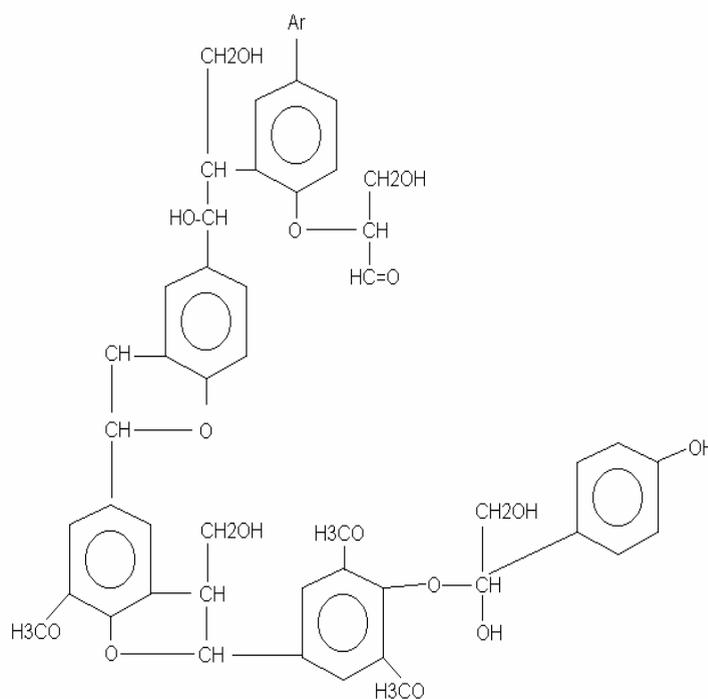
A. Estructura

La molécula de lignina es una macromolécula, 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 heterogeneidad.

Por esta razón no es posible describir una estructura definida de la lignina; sin embargo, se han propuesto numerosos modelos que representan una “aproximación” de dicha estructura.

Está formada por la polimerización deshidrogenativa al azar de alcoholes parahidroxicinámicos (alcohol p-cumarílico, alcohol coniferílico y alcohol sinapílico), en reacción catalizada por enzimas vía radicales libres. Las unidades de fenil propano (C_9) se unen por enlaces C-O-C y C-C, presentando en su estructura grupos hidroxilos, carbonilos, metoxilos y carboxilos.

Figura 6. Porción estructural de la lignina. (Ref. Electrónica 8)



Su estructura es rígida como modelo material. Sakakibara, K., (1980), describió un modelo para la lignina de maderas blandas. Este demuestra una sección con 28 unidades de C₉ con elementos estructurales alternativos avalados por datos analíticos. El más reciente modelo de lignina es el expresado por Glasser, W.G. (1981). Este modelo comprende 94 unidades correspondiendo a la masa molar total de más de 17,000 y es basado en un amplio rango de determinaciones analíticas.

B. Propiedades

Las ligninas son polímeros insolubles en ácidos y en álcalis fuertes, que no se digieren ni se absorben y tampoco son atacados por la microflora del colon. 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.

Según Browning, B.L. y Carballo, L.R., las ligninas poseen propiedades aglutinantes que conforman la consistencia fibrosa de las maderas (revistiendo las células del xilema), donde realizan la función mecánica de sostén. Su composición depende de muchos factores, entre ellos, el método utilizado para aislarlas, la especie que se estudie, la edad, parte del árbol, condiciones ambientales en que se ha desarrollado el árbol, etc.

1.2.3 Componentes no Estructurales

1.2.3.1 Taninos

Los taninos son compuestos polifenólicos muy astringentes y de gusto amargo. Se dividen en hidrolizables y condensados. Industrialmente se han utilizado sus propiedades para curtir pieles, al eliminar el agua y las proteínas de las fibras musculares.

La importancia de los taninos en el mundo vegetal es su capacidad para proteger las plantas contra las heridas que sufren y el hecho de que les protegen de los ataques exteriores, porque resultan tóxicos para los microorganismos o herbívoros y porque no son digeribles para estos últimos.

Según Prance y Prance, la técnica del curtido es conocida desde 1,000 años A.C., pero es hasta el período 1790-1800, en Francia, cuando se aíslan y descubren los químicos base para curtir pieles.

Los taninos son ácidos muy astringentes, propiedad que los ha identificado como ingredientes útiles en la medicina tradicional; también se utilizan en la preparación de alimentos, maduración de frutas; ingredientes de bebidas como la cocoa, el té y el vino tinto.

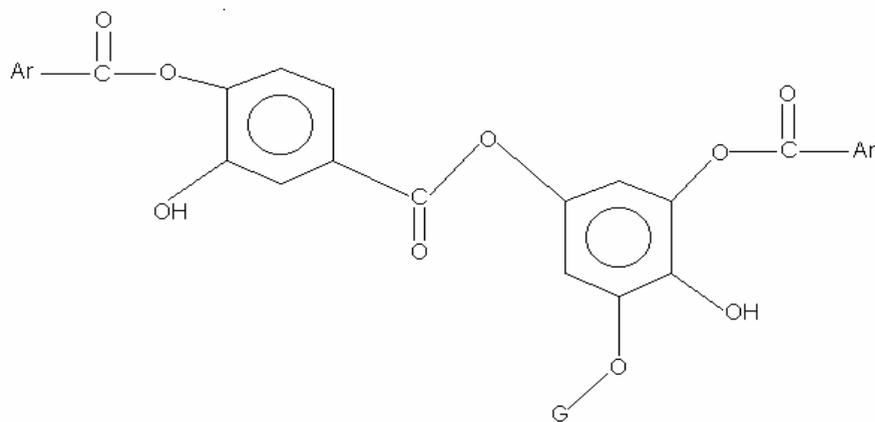
B. Propiedades

Los taninos son sustancias que se producen en diversas partes de las plantas, como son: corteza, frutos, hojas, raíces y semillas; a pesar de tener un origen común, la especificidad de las plantas le da a los taninos diferencias en color, calidad y concentración. Los taninos son el resultado de la combinación de un fenol y un azúcar.

A. Estructura

La estructura aproximada de los taninos se presenta a continuación:

Figura 7. Estructura de los taninos. (Ref. Electrónica 6)



AR = Representación aproximada de la estructura de un tanino, unida a cadenas similares representadas por Ar. El tanino puede estar unido a glucósidos representados por G en alguna parte de su estructura.

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.

Cuando los taninos se mezclan con sales de hierro se produce un colorante de color azul-verdoso, mismo que es la base para la producción de tintas. Según Prance y Prance, 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, Fagaceae, Rhyzophoraceae y Myrtaceae.

Asimismo la precipitación de los alcaloides tras un envenenamiento atenúa la toxicidad de los taninos. Estas virtudes se deben a la propiedad que tienen de combinarse a otras sustancias (proteínas, fibras, alcaloides, gelatinas, etc.) para originar reacciones fenólicas. Las plantas que tienen taninos y esencias (savia, menta) son muy útiles como antisépticos y antiinflamatorios en casos de bronquitis, hemorroides, etc.

Desde el punto de vista biológico los taninos son sustancias complejas producidas por las especies vegetales que cumplen funciones antisépticas o de conservación. La clasificación de los taninos se hace con base en los siguientes dos criterios: Productos resultantes de la destilación seca: taninos hidrolizables y taninos condensados. Origen: taninos fisiológicos y taninos patológicos.

Los taninos cumplen una función cicatrizante al acelerar la curación de las heridas y hemostática, al detener el sangrado. La cicatrización se produce por la formación de las costras al unirse las proteínas con los taninos y crear un medio " seco" que impide el desarrollo de las bacterias. Al reducir la apertura de los vasos sanguíneos ayudan a la coagulación de la sangre y, por tanto, contribuyen a la curación de las heridas.

C. Clasificación

C.1 Taninos Hidrosolubles 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). Cuando se destilan en seco producen pirogalol.

A su vez se dividen en:

C.1.1 Galotaninos, caracterizados por la presencia de ácido galotánico, es común en las agallas del encino y en la raíz del zumaque;

C.1.2 Elagitaninos, su componente principal es el ácido elágico, se obtienen de plantas como el dividivi y el microbálano.

C.2 Taninos no Hidrosolubles ó Condensados: Por hidrólisis dan azúcar y ácido elágico. Se presentan generalmente en la madera, la corteza y las raíces de plantas como el quebracho, caña agria, eucalipto, oyamel y el mangle, entre otras; están constituidos por unidades flavonoides, las cuales soportan diversos grados de condensación, carbohidratos y restos de aminoácidos .

Los taninos fisiológicos son el resultado de las funciones metabólicas de la planta. Taninos patológicos, son una respuesta al ataque de insectos, ya sea por ovoposición o por picadura.

1.2.3.2 Sustancias extraíbles

Además de celulosa, hemicelulosas y lignina, los árboles contienen otras sustancias en menor proporción, que no entran en la composición de las paredes celulares. Estos son los extractivos, sustancias extraíbles o simplemente extraíbles. Químicamente están compuestos por hidrocarburos alifáticos y aromáticos, terpenos, fenoles, ácidos grasos y resinosos, resinas, grasas, esterinas, aceites esenciales y otros. Las sustancias extraíbles de los árboles constituyen una fuente importante de fitoquímicos.

La cantidad y composición de ellos depende de la especie, la parte del árbol, la época del año, las condiciones de crecimiento y otros factores. 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 o extraíbles.
- Sustancias volátiles, porque muchas de estas sustancias son volátiles o imparten características de olor a la madera.

Como se mencionó anteriormente, 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.

Según Emilianova, 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.

A. 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 fenolicas, azúcares (mono y oligosacáridos) y cenizas (macro y microelementos).

B. Solubles en disolventes orgánicos

Según Tamchuk, en disolventes orgánicos fundamentalmente se extraen grasas, resinas y ácidos grasos, ésteres de estos ácidos, cera, fitoesterinas. 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.

Según Jolkin, los aceites esenciales 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 lactonas. Los terpenos son hidrocarburos de composición $C_{10}H_{16}$ (derivados del isopreno C_5H_{10}). En los aceites esenciales aparecen monoterpenos, diterpenos ($C_{20}H_{32}$) y sesquiterpenos ($C_{15}H_{24}$). Según Vidorov, por sustancias extraíbles de la madera 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.

Los azúcares, el almidón y algunos compuestos nitrogenados se encuentran en la albura. Las sustancias fenolicas 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. Estos constituyentes son responsables de algunas características de las plantas como resistencia natural a la pudrición, sabor y propiedades abrasivas.

Las gomas son polisacáridos muy complejos que no forman parte de la pared celular sino que, en la planta, suelen destinarse a reparar áreas dañadas. Presentan una alta viscosidad. Su estructura está formada por largas cadenas de ácido urónico, xilosa, arabinosa o manosa. Entre las más conocidas se encuentran la goma guar, la goma arábica, la de karaya y la de tragacanto.

1.2.3.3 Componentes inorgánicos y cenizas

Los componentes inorgánicos o sustancias minerales, varían en el árbol en dependencia de la parte que se estudie: Altos contenidos pueden encontrarse en las hojas, ramas, corteza, raíces, por lo que es común encontrar diferencias entre las maderas de latifoliadas y las de coníferas; diferencias existen entre la madera joven y vieja. Las condiciones del suelo y la edad influyen en los contenidos de sustancias minerales, según plantea Carballo, L. R. (1990).

Cuando la madera está seca y calentada alrededor de 280° C, comienza espontáneamente a fraccionarse, produciendo carbón más vapor de agua, ácido acético y compuestos químicos más complejos, fundamentalmente en la forma de alquitranes y gases no condensables, que consisten principalmente en hidrógeno, monóxido y bióxido de carbono.

Se deja entrar aire en el horno o fosa de carbonización para que parte de la madera se quemé, y el nitrógeno de este aire estará también presente en el gas.

El oxígeno del aire se consume en la quema de parte de la madera, arriba de la temperatura de 280° C liberando energía, por lo que se dice que esta reacción es exotérmica.

Este proceso de fraccionamiento espontáneo o carbonización, continúa hasta que queda sólo el residuo carbonizado llamado carbón vegetal. A menos que se proporcione más calor externo, el proceso se detiene y la temperatura alcanza un máximo de aproximadamente 400° C. Sin embargo, este carbón contiene todavía apreciables cantidades de residuos alquitranosos, junto con las cenizas de la madera original.

Usualmente se lleva a cabo la producción de cenizas en un rango de 580° a 600° C según las normas para su determinación. El contenido de cenizas en el carbón es de alrededor del 30% en peso, y el balance es carbono fijo, alrededor del 67-70%.

1.3 Generalidades de la especie Caribe (*Pinus caribaea* (Morelet) var. hondurensis (Barret y Golfari)) (Ref. 1 y 6)

Es originaria del Caribe y es el pino más plantado en el mundo tropical y subtropical incluyendo América Latina. La madera es de buena calidad y abastece al mercado interno.

1.3.1 Distribución y características principales

Su diámetro de 1 metro, es de copa cónica y fuste recto y cilíndrico. Requiere de suelos franco-arcilloso, profundos, que mantengan buenos drenajes, produciendo con mas rapidez en suelos con mejor textura.

1.3.1.1 Descripción botánica

- A. Género:** Pinaceae
- B. Nombre científico:** *Pinus caribaea* (Morelet.) var. hondurensis (Barret y Golfari).
- C. Sinónimo:** *Pinus caribaea* Morelet., *Pinus bajamensis* (Griseb.), *Pinus hondurensis* Look.
- D. Nombres comunes:** *Sachaj, Huhug* (Maya), *pino blanco, pino colorado, pino de ocote blanco, pino de Pelón, pino de Poptún* (Guatemala); *Pitch pine, White pine, Yellow pine* (Belice); *pino de la costa, pino curtidor* (Honduras); *pino caribe* (Costa Rica); *pino caribeño de Honduras* (América Latina); *Caribbean pine* (Países de habla inglesa).

1.3.1.2 Características, suelo, propiedades y usos

A. Características del pino: Árbol de hasta 45 metros de altura y 100 cm. de diámetro. El fuste es recto y cilíndrico, con una copa rala. La corteza es grisácea en árboles jóvenes (6 - 7 años); rugosa, resquebrajada en surcos y de color oscuro en árboles adultos.

Las hojas son agujas verdes de 1 a 1.5 mm. de ancho. De largo cuenta de dos a cinco canales resiníferos internos. Las semillas son ovoides de 6.5 mm. de largo, 3.5 mm. de ancho y 2 mm. de grosor; de color pardo a castaño. Se estiman de 50,000 a 60,000 semillas por kilogramo.

B. Características de la madera: La madera tiene una coloración clara, con tonalidades que van desde amarillo, amarillo-naranja en la albura y naranja oscuro a café rojizo en el duramen; su gravedad específica es de 0.55 a 0.62 g/cm³.

Es utilizada en la producción de postes, leña y carbón. Otros usos son para la fabricación de papel, láminas, muebles, para la construcción, bates, papel kraft y periódico, corrugado y mangos para herramientas entre otros.

C. Distribución: El pino caribe se encuentra de forma natural en la vertiente atlántica del istmo centroamericano, desde Orange Wallt en Belice hasta Bluefields, Nicaragua.

Esta conífera es la que más se ha sembrado en el mundo tropical y subtropical o templado. Se adapta bien a una gran variedad de sitios, incluyendo los degradados, con condiciones limitantes para otras especies.

D. Suelos: Esta especie puede desarrollarse sobre suelos poco fértiles, con drenajes buenos en las regiones del interior, hasta deficientes en las llanuras costeras de su distribución natural.

El pH es ácido, variando de 4.3 en Nicaragua, hasta 6.5 en Honduras. Generalmente no crece en suelos con drenajes defectuosos, como por ejemplo sitios bajos y planos, con una capa dura e impermeable.

E. Altitud: En su región crece desde niveles cercanos al mar, en llanuras costeras, hasta alcanzar elevaciones máximas de 850 metros sobre el nivel del mar, en Honduras y Belice.

F. Temperatura: En el área de distribución natural existen grandes variaciones de temperatura, pero las heladas no se presentan. En el litoral, la temperatura media anual varía entre los 24-27° C; en cambio en regiones del interior fluctúa entre 20 a 24° C.

G. Precipitación: Fluctúa en su hábitat natural entre 1,000 y 1,800 mm., con áreas de apenas 660 mm., hasta zonas de 3,900 mm. en regiones costeras. En regiones tropicales para climas húmedos, su crecimiento es bueno, pero ciertas procedencias tienden a formar “cola de zorro”.

H. Manejo: Dependiendo del objetivo de plantación, se debe seleccionar el manejo y densidad inicial de la plantación. En la plantación de árboles para pulpa, leña, postes pequeños, entre otros, se recomienda plantar 1,600 árb/ha, a un espaciamiento inicial de 2.5 X 2.5 m. Dependiendo de la calidad del sitio, la cosecha final se hace entre los ocho y 12 años, sin necesidad de raleos.

Si el fin es el aserrío y postes de gran dimensión, suelen plantarse 1,100 árb/ha a 3X3 m, aplicando podas sobre los mejores árboles en los primeros años, un primer raleo al cierre de las copas y continuando con un plan de raleos hasta que quedan para la corta final de 250 a 400 árb/ha, los cuales pueden ser aprovechados entre los 15 y 25 años, según calidad de sitio.

1.3.2 Turno de corte y producción

La plantación debe ralearse no teniendo valor comercial el producto de éste raleo, debiendo terminar la plantación con 250 a 400 árboles por hectárea, con un turno de aprovechamiento de 20 años. Rinde entre 20 y 25 m³/ha/año.

La producción comercial aprovechable por hectárea es de 250 m³., con una altura promedio del árbol de 15 metros y un diámetro promedio (d. a. p.) de 0.35 metros. Ello impulsa proyectos que utilicen pino Caribe como materia prima, entre los que se cuentan la construcción de viviendas con componentes de madera.

1.4 Fundamentos teóricos en base a la metodología (Ref. 4 e Internet 9)

1.4.1 Gravimetría

La determinación gravimétrica se refiere al método de análisis cuantitativo que se basa en la determinación de la composición de una sustancia problema midiendo el peso de la masa obtenida en el experimento. La masa es la cantidad de sustancia contenida en un cuerpo. El peso es la fuerza con que el cuerpo presiona el lugar de reposo.

En la determinación gravimétrica se emplea la balanza analítica, permitiendo así que las mediciones de la masa sean precisas. Según Kreshkov, las determinaciones gravimétricas se dividen en: Primer tipo, el componente a determinar es separado cuantitativamente de la sustancia y se pesa. Segundo tipo, el componente a determinar se elimina por completo y el residuo se pesa. Tercer tipo, el componente a determinar se convierte cuantitativamente en un compuesto químico, en forma que pueda ser separado y pesado.

Según los métodos propuestos, la determinación gravimétrica cubre la mayoría de los procedimientos para la caracterización química de la madera. Los procedimientos que aplican gravimetría son la determinación de celulosa, lignina, extraíbles, humedad y cenizas.

1.4.2 Volumetría

La determinación volumétrica consiste en un método de análisis cuantitativo en que la medición de la masa se efectúa por medio de la medición de volúmenes. El método consiste en una disolución preparada a partir de una muestra pesada de una sustancia que se somete al análisis, se agrega la disolución de concentración conocida hasta que las sustancias combinadas interaccionen completamente.

Cuando las sustancias que interaccionan se consumen por completo, se denomina el punto de equivalencia, haciendo notar que la reacción llegó al punto final, y en este momento las cantidades de sustancias que entraron en la reacción son estrictamente equivalentes.

Las condiciones para satisfacer de forma adecuada la reacción determinante son las siguientes: La reacción debe ser prácticamente irreversible, el punto final de la reacción debe ser lo suficientemente perceptible procurando una verificación rápida de la reacción y la variación de las condiciones externas no debe alterar el proceso.

Según Kreshkov, los métodos se pueden clasificar en función del tipo de reacción química utilizada: de oxidación-reducción, de neutralización alcalina o ácida, de precipitación y en formación de complejos.

Según el procedimiento de determinación de taninos el método volumétrico será el adecuado, siendo de oxido-reducción por el efecto del permanganato de potasio en una solución de extracto tánico, midiendo así el volumen de titulante utilizado, haciendo las mediciones respectivas.

1.4.3 Secado

Es el proceso en donde se elimina agua de un cuerpo en cantidades relativamente pequeñas. También se refiere a la eliminación de otros líquidos tales como orgánicos. Casi siempre se elimina el agua en forma de vapor con aire, siendo a temperatura ambiente o por aire caliente.

Los procesos de secado se dividen principalmente en dos: tipo continuo, en donde el material a secar se pasa en el equipo de secado sin interrupciones; por lotes, cuando una cantidad específica de material es secado por flujo de aire en estado estacionario.

También se pueden clasificar en base a las condiciones de extracción de vapor y transferencia de calor. En primer lugar se tiene un proceso en donde la materia es sometida a calor por contacto directo con aire caliente y el agua es removida por el vapor contenido en el mismo aire expulsado. En segundo lugar se tiene secado al vacío, en donde el agua se evapora a presiones bajas, y el calor recibido es indirecto por contacto con una pared conductora en donde existe también la manifestación de radiación.

En tercer lugar, el agua se sublima directamente de un material congelado, por medio del vapor de agua que se forma a bajas temperaturas; proceso conocido como liofilización.

El secado será vital para obtener resultados confiables, debido a que el agua es el principal componente que altera las propiedades de la madera; se empleará para secar la madera a tratar, el aserrín previo a los muestreos, así como el secado de los componentes para su determinación gravimétrica.

1.4.4 Calcinación

La calcinación permite eliminar sustancias volátiles fuertemente absorbidas por un cuerpo, en donde se necesita que el mismo esté libre de componentes ajenos al mismo. Por medio de la calcinación se obtiene un producto de composición conocida y constante.

Las razones de calcinar son la imposibilidad de asegurar una forma de composición constante del precipitado por simple secado, el empleo de electrolitos volátiles a altas temperaturas y la eliminación del agua retenida por oclusión o por fuerte adsorción al material.

Las termobalanzas permiten investigar temperaturas óptimas de calcinación, así como intervalos de temperatura que posibiliten el proceso para resultados esperados. El instrumento mide con exactitud la masa de un precipitado conforme al aumento de temperatura, desde temperaturas ambiente hasta más de los mil grados Celsius.

El material que contenga el cuerpo analizado debe soportar las temperaturas de calcinación, como ejemplo el uso de crisoles en lugar de papel filtro. El valor de la temperatura debe ser el óptimo, debido a que a mayor temperatura el precipitado puede tener pérdida por sublimación, volatilización o por descomposición.

El caso más común de alteración al precipitado es la adsorción de humedad, que se presenta en la mayoría de precipitados recién secados, así como adsorción de dióxido de carbono de la atmósfera, que se evita con desecadoras con atmósfera libre del gas. Por ello se deben agregar los precipitados a desecadoras con suficiente material desecante, como sílica gel, para evitar que el agua altere los resultados.

1.4.5 Lixiviación

La lixiviación es la disolución de uno o más compuestos de interés de una mezcla sólida por medio del contacto con un solvente líquido. Recibe el nombre de colada cuando se separaba un álcali a partir de cenizas de madera.

Cuando se habla de extracción se aplica a las operaciones de separación que utilizan métodos de transferencia de masa o mecánicos. La elusión es la operación donde el material soluble está sobre la superficie de un sólido insoluble y se lava con el disolvente.

La operación unitaria de extracción es conocida como extracción líquido-líquido. La lixiviación es una operación de separación sólido-líquido; cuando el agua es el solvente el proceso recibe el nombre de lavado. Ciertos productos orgánicos se separan por medio de lixiviación; en el caso de aceites vegetales son recuperados a partir de semillas, como en el caso del algodón con disolventes orgánicos.

En este caso se aplica para determinar taninos en madera, que se obtienen por lixiviación con soluciones acuosas de sulfito de sodio como solvente. También el caso de la azúcar, en donde se hace una separación de la misma con agua caliente en el caso de la remolacha.

Según Treybal, a temperaturas elevadas la viscosidad del líquido es menor y la difusividad mayor; incrementando la solubilidad del soluto en el solvente incrementando la rapidez del proceso. Por ello la temperatura es importante en el proceso de lixiviación, aunque en ciertos materiales surge una descomposición indeseada del soluto y su procedencia por las altas temperaturas del disolvente.

El material debe tratarse previamente para un buen proceso de lixiviación, esto con lavados previos para retirar sustancias indeseadas que son insolubles en el solvente. Para acelerar y optimizar dicho proceso de muela y tritura el material permitiendo mayor accesibilidad de contacto solvente-soluto por el aumento del área superficial.

Para preparar el sólido se debe tomar en cuenta la proporción de constituyente y solvente adecuada, la distribución del material, tamaño y naturaleza de las partículas y material. Si el material es biológico, las paredes celulares presentan gran resistencia en el proceso, ya que el material contenido forma parte de la composición de dicho material. Por ello se recomienda moler los materiales biológicos debido a lo mencionado con el material anterior.

Los procedimientos de determinación de taninos, celulosa, lignina y extraíbles requieren de esta técnica por medio de diferentes métodos.

2. METODOLOGÍA

2.1 Metodología de investigación

2.1.1 Localización

- La recolección de muestras se llevó a cabo en la finca “Semuc 6”, ubicada en El Estor, Izabal. El acceso se logró gracias a la coordinación con el INAB (Instituto Nacional de Bosques). Dicha finca, según el Atlas del Ministerio de Comunicaciones y Obras públicas, se encuentra en una zona con las siguientes características:

Ubicación: Cabecera municipal costera, altura de 2 metros sobre el nivel del mar (msnm); latitud de 15°31´25”; longitud de 89°20´10”.

Clima: Cálido, sin estación fría y seca bien definidas, muy húmedo.

Vegetación característica: Selva.

Plataforma del Caribe: Llanura costera, región de microclima cálido húmedo, con pendientes planas e inclinadas, de gradientes del 1 al 5 %.

Génesis de los suelos: Elevación mediana, desarrollo sobre serpentinita y rocas asociadas. Poco profundo y arcillosos, de color café o café rojizo. Vegetación natural de pino mezclado con árboles.

Clasificación de los suelos: Franco arcillosos.

Fuente: Instituto Geográfico Nacional

2.1.2 RECURSOS

- La investigación se realizó en el Área de Química Industrial del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Humanos:

- Investigador: Erickson Roberto Escobar Toledo
- Asesora: Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales
- Coasesor: Ing. For. Msc. José Mario Saravia Molina

Físicos:

REACTIVOS

- 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.
- n-hexano (C_6H_{14}) grado reactivo. Envase de 4 L. Código h1055-4. Peso molecular 86.18 g/mol. Casa proveedora RGH.

- Ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 96 % grado reactivo. Densidad 1.84 Kg/L. Peso molecular 98.08 g/mol. Envase: 2.5 L. Casa proveedora MERCK KGaA.
- Ácido acético glacial (CH_3COOH). Envase: 2.5 L. Casa proveedora MERCK KGaA.
- Sulfito de sodio (Na_2SO_3) grado analítico. Envase 500 g. Peso molecular 126 g/mol. Casa proveedora MERCK KGaA.
- Hidróxido de sodio (NaOH) grado analítico. Peso molecular 40 g/mol. Envase 1 Kg. Casa proveedora MERCK KGaA.
- Sílice, casa proveedora Merck KGaA.
- Permanganato de potasio (KMnO_4) grado analítico.
- Índigo de carmín grado analítico. ($\text{C}_{16}\text{H}_8\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8\text{S}_2$). Peso molecular 466.36 g/mol. Envase 25 g. Casa proveedora MERCK KGaA.

EQUIPO

- Molino de martillos, motor Kohlbach (modelo 184T).
- Horno eléctrico de flujo convectivo por gravedad marca Termolyne.
- Balanza Adventurer OHAUS con capacidad máxima de 150 g y exactitud de 3 decimales.
- Horno Cole Parmer de 120 V y 800 W. 50/60 Hz.
- Planchas de calentamiento con agitación, marca Corning, modelo Pc-400, 120V/100V, rango 0-480° C, 0-1100 rpm.
- Bomba de vacío, marca Gast, modelo 0523-V4F-6588DX, vacío hasta 30 in Hg, manómetros analíticos.
- Medidor de humedad OHAUS con capacidad máxima de 200 g y exactitud de 4 decimales.
- Mufla Termolyne de hasta 1100°C.

- 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, 1 Giga,
- Impresora Canon PIXMA

MATERIALES

Cristalería

- Equipos Soxhlet, balón esmerilado de 500 ml y condensador, marca Cornin-Pirex.
- Pipetas de 10 ml, de 50 ml, de 1 ml y de 5 ml.
- Beakers de 100 ml, de 50 ml, de 1000 ml, de 500 ml, de 250 ml, marca Pirex.
- Matraces de 250 ml, de 500 ml, de 1000 ml.
- Balones de 1000 ml, de 500 ml, de 250 ml marca Kimax, de 100 ml.
- Condensadores para balón de 1000 ml, 20/40.
- Varillas de agitación.
- Probeta de 500 ml, de 250 ml, de 100 ml, de 50 ml, de 10 ml.
- Bureta de 25 ml y de 10 ml.
- Desecadora marca Fisherbrand.
- Crisoles de porcelana.
- Cajas Petri, diámetro de 10 cm.
- Kitasato.
- Filtro de porcelana.
- Viales color ámbar de 8 ml.

Otros Accesorios

- 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.
- Pinza larga.
- Pinza corta.
- Caja de Papel Filtro Whatman N. 4.
- Perillas de succión.
- Embudo (metal).
- Termómetros de 0 a 100° C (de inmersión total).
- Manta color marfil, apertura de 0.25 mm² aprox.
- Pesa muestra de aluminio.
- Mangueras de hule.
- Papel Parafilm.

2.2 Metodología experimental

2.2.1 Preparación de las muestras

La recolección de muestras se llevó a cabo por medio del INAB en la finca Semuc 6, ubicada en municipio de El Estor, del departamento de Izabal bajo el proyecto PINFOR del INAB.

Las muestras de madera se tomaron de árboles de la misma especie a tres diferentes alturas. Se tomarán tres muestras de cada árbol provenientes de las distintas alturas. Las muestras se limpiaron de polvo y otras impurezas, eliminando la corteza de las mismas. Después de secar al aire la madera se molió, esto se hizo en un molino de martillos trifásico de 5 caballos de fuerza. El aserrín obtenido se secó al aire, para luego ser tamizado con un tamiz N. 40, o sea de secciones de .42 mm. por .42 mm. Se almacenaron las muestras en bolsas herméticas debidamente identificadas por árbol y altura.

Caracterización química de la madera

2.2.2 Determinación de Extraíbles

Para ello se siguió la designación ANSI/ASTM D1105-56, llamada "Preparación de madera libre de extraíbles". (Ref. 2)

Alcance

El método abarca el trato previo de madera para aplicarla como libre de extraíbles.

Principio

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

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

Aserrín seco, reducido por molino y tamizado por un tamiz N. 40.

Procedimiento

1. Colocar en un dedal 7.5 g de la muestra de madera previamente tamizada, seca y con humedad determinada.
2. Colocar el dedal en el sistema de extracción soxlet, manteniendo una relación en volumen de 3/5 de solvente en el balón. Primero se extrae con hexano durante 12 horas.

3. Luego se realiza una extracción con etanol durante 12 horas. Luego apagar el equipo y esperar a que enfríe el sistema.
4. Secar el contenido del dedal (libre de extraíbles) por 48 horas a temperatura ambiente. Luego transferir el material a una caja Petri previamente tarada y pesar.
5. Secar en un secador eléctrico con recirculación a 80° C +/- 5° C durante 4 horas. Sacar la muestra y transferirla a una desecadora, esperar 15 min., pesar y secar hasta peso constante.
6. El porcentaje de extraíbles se obtiene por:

$$\% \text{ Extraíbles} = (7.5 - \text{P.M.}) / 7.5 * 100 \% \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

P.M. = Peso de la muestra libre de extraíbles, en gramos.

2.2.3 Determinación de Taninos

El procedimiento fue obtenido de las tesis según Mary Orozco y Daniel Gómez. Consta de extracción con maceración mecánica y análisis volumétrico.

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 necesitan beakers, bureta, probeta, earlenmeyers, planchas con agitación, termómetros. Balanza analítica, sensible a 0.1 mg., 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 prepara 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 litro y filtrar.

Muestra

Aserrín seco, reducido por molino y tamizado por medio de un tamiz N. 40.

Procedimiento

Extracción con maceración mecánica

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.

Porcentaje de taninos por el 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. Luego entibiar la muestra.
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 color amarillo.
5. Preparar un blanco con agua, adicionando todos los reactivos en las mismas condiciones y titular sin la muestra.

6. El porcentaje de taninos en madera se obtiene por:

$$\% \text{ tanino} = (\text{mlo} - \text{mlb}) * .105 \quad (\text{Ecuación 2})^*$$

Donde:

mlo = mililitros utilizados de permanganato de potasio

mlb = mililitros del blanco obtenidos

* Nota: La ecuación se obtuvo en base a los 4 g de muestra iniciales y a la siguiente relación: 4.2 mg de tanino = 1 ml * 0.1 N Permanganato de potasio.

2.2.4 Determinación de Lignina

Para ello se seguirá 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, por gravimetría, en madera.

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 y 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 (CUDADO, 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

1. Colocar en un beacker de 100 ml 1 g de madera libre de extraíbles. Agregar 15 ml de ácido sulfúrico al 72 %.
2. Agitar durante 2 horas en baño maría a 20° C, esto en una plancha con agitación.
3. Transferir a un matraz de 1000 ml conteniendo 560 ml de agua destilada, para dar una solución de ácido aproximadamente al 3 %.
4. Hervir a reflujo por 4 horas en un balón con condensador.
5. Decantar hasta dejar una diferencia mínima entre las dos fases.
6. Filtrar la solución obtenida con papel filtro Wathman N. 4 tarado.
7. Lavar con agua caliente y secar hasta peso constante a 80° C +/- 5° C.
8. El porcentaje de lignina se determina por la siguiente ecuación, que es válida solo para la utilización de 1 g. de muestra:

$$\% \text{ Lignina} = (\text{Peso Bruto} - \text{Peso Tara}) * 100 \% \quad (\text{Ecuación 3})$$

2.2.5 Determinación de Celulosa

Para ello se seguirá 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 necesitan beakers, cronómetro, pipetas, perillas de succión, varilla de agitación, balde para baño María, balones aforados, bomba de vacío, balanza analítica, sensible a 0.1 mg., horno para secar con temperatura controlada de 100 y 150° 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

1. Tomar 1 g. de madera libre de extraíbles y transferir a un beacker de 100 ml.
2. Agregar 10 ml de NaOH al 17.5 %, agitar y dejar reposar por 2 min. Luego agitar nuevamente y dejar reposar 3 min.
3. Agregar de nuevo 5 ml de NaOH al 17.5 %, agitar y dejar reposar 5 min.
4. Repetir el paso 3.
5. Agregar de nuevo 5 ml de NaOH al 17.5 %, agitar y dejar reposar 30 min. en baño María a $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.
6. Agregar 30 ml de agua destilada, agitar y dejar reposar por 1 hora.
7. Filtrar al vacío con papel filtro Wathman N. 4 previamente tarado, lavando con una solución preparada de 33 ml de agua destilada y 25 ml de la solución de NaOH al 17.5 %.
8. Luego lavar con 30 ml de agua destilada, y dejar de aplicar vacío. Agregar 15 ml de una solución al 10 % de ácido acético y después de 3 min. aplicar vacío. Luego lavar con 50 ml de agua destilada aplicando vacío.
9. Llevar la muestra a un secador eléctrico contenida en una caja Petri, a una temperatura de $80^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 4 horas. Luego transferir a una desecadora y esperar 15 min. para luego pesar. Repetir el secado hasta peso constante.

10. El porcentaje de celulosa se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{[P.B. - (P.T. + P.L.)] * P.M.L. * 100 \%}{P.M.T.} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

P.B. = Peso bruto de la muestra

P.T. = Peso tara del papel filtro

P.L. = Peso de lignina en 1 g. de madera (procedimiento anterior)

P.M.L. = Peso de madera libre de extraíbles (base de 7.5 g)

P.M.T. = Peso de madera antes de la extracción, 7.5 g

2.2.6 Determinación de Cenizas

Para ello se seguirá la norma ANSI/ASTM D 1102-56, llamada “Cenizas en madera”. (Ref. 2 y Electrónica 1)

Alcance

El método abarca la determinación de cenizas en madera, residuo presente como % 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 sílica con capacidad de 30 ml (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

Aserrín seco, reducido por molino y tamizado por medio de un tamiz N. 40.

Procedimiento

1. Calcinar 1 crisol, adecuado para 1 g. de muestra de madera, a 600° C en una mufla durante 1 hora.
2. Luego retirarlo e introducirlo en una desecadora durante 15 min., para después tararlo. Bajar la temperatura de la mufla por seguridad.
3. Agregar 1 g. de muestra de madera en el crisol, previamente tamizada y seca.
4. Agregar la muestra a la mufla aplicando 100° C y luego aumentar de modo que no haya ignición en la muestra. Debe llegarse a 600° C o un poco menos, pero no pasarse de dicha temperatura.
5. Luego de hora y media revisar la muestra, extrayendo el crisol con una pinza, de modo que el material sea solamente cenizas (color grisáceo blancuzco); de lo contrario mantener la muestra más tiempo en la mufla.
6. Luego llevar la muestra a una desecadora, esperar 15 min. y pesar ágilmente. Repetir hasta peso constante.

7. Luego se obtiene el porcentaje de cenizas por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Cenizas} = (\text{P.B.} - \text{P.T}) * 100 \% \quad (\text{Ecuación 5})^*$$

Donde:

P.B. = Peso bruto

P.T. = Peso tara

* Nota: La ecuación es válida si la muestra de madera utilizada es de 1 gramo.

2.2.7 Determinación de Humedad

Para ello se contará con la ayuda de una balanza analítica.

Alcance

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

Principio

En sí, 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 completa; se representa mediante la siguiente relación:

$$\text{cH} (\%) = \frac{\text{Peso del agua contenida}}{\text{Peso de madera total}} * 100 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Aparatos

Balanza analítica, sensible a 0.1 mg, horno para secar con temperatura controlada de 80 y 120° C y desecadora.

Muestra

El equipo es especial para determinar humedad en base húmeda y solo necesita 1 g de madera seca y tamizada con un tamiz N. 40.

Procedimiento

1. Colocar un crisol con capacidad suficiente para la muestra de aserrín, colocarlo en un horno a 80° C +/- 0.5 durante 2 horas, luego trasladar hacia una desecadora donde se enfriará por 20 minutos.
2. Pesar y anotar; introducir el crisol de nuevo durante 1 hora y luego a la desecadora por 20 minutos, hasta obtener peso constante.
3. Pesar 2 g de muestra y colocarlos en el crisol preparado anteriormente e introducirlo dentro del horno a 80° C +/- 0.5 durante 2 horas, luego trasladar hacia una desecadora donde se enfriará por 20 minutos.
4. Pesar y anotar; introducir el crisol de nuevo durante 1 hora y luego a la desecadora por 20 minutos, hasta obtener peso constante.

5. La humedad se determina por:

$$\% \text{ Humedad} = 100 - (P.B. - P.T.) / P.M. * 100\% \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

P.B. = Peso bruto

P.T. = Peso tara (crisol)

P.M. = Peso de la muestra

2.3 Diseño Experimental

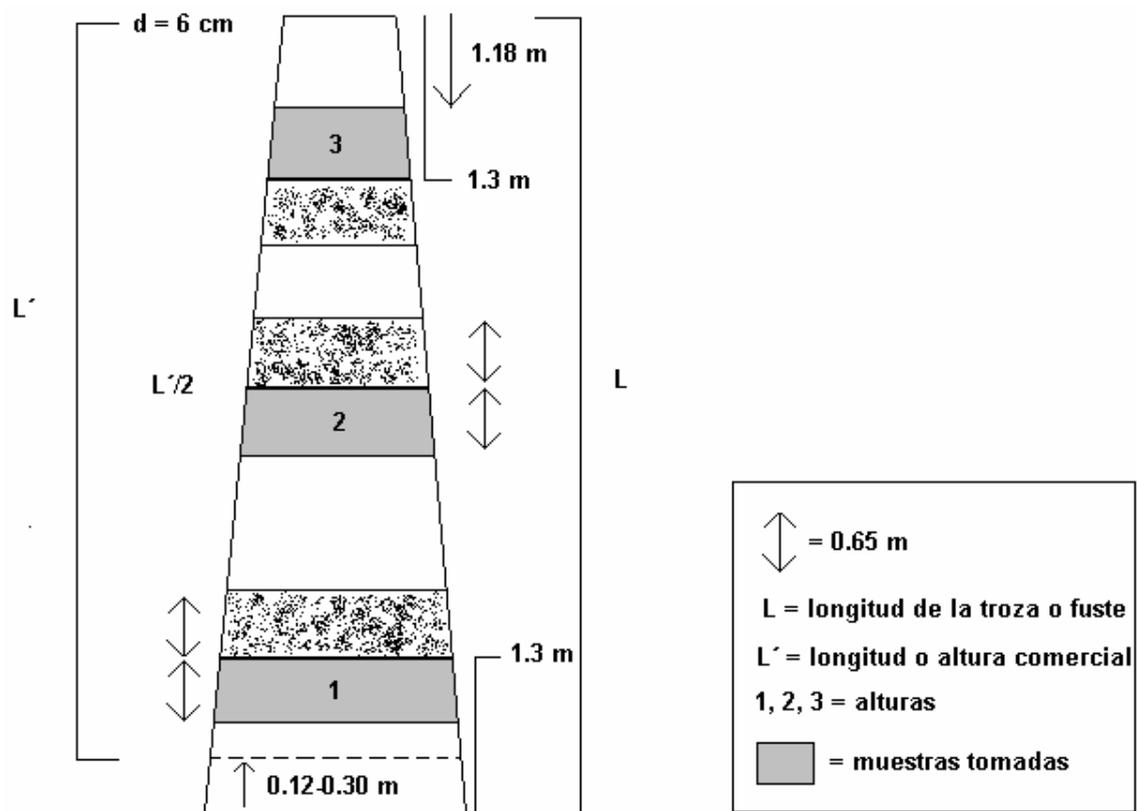
2.3.1 Diseño de tratamientos

Se utilizará una variable independiente (unifactorial), en este caso la altura del pino. El arreglo fue en un solo sentido. Para la variable de altura de toma de muestra se utilizará madera de pino Caribe (*Pinus caribaea*) tomada a lo largo del árbol a 1.30 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 a realizar se determinan de la siguiente manera: 3 alturas para la muestra = 3 niveles o tratamientos

Para cada tratamiento se llevarán a cabo 9 repeticiones para la determinación de las 6 variables de respuesta: contenido de ceniza, humedad, extraíbles, taninos, lignina y celulosa. Las corridas a realizar son 27 (9*3) para la especie a estudiar. Se empleará el método unifactorial en un solo sentido por ser concreto y sencillo.

Figura 8. Origen de las muestras a tres diferentes alturas. (Ref. 3)



2.3.2 Análisis estadístico

Para cada componente químico a determinar se utilizará 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 altura, 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 arreglarán como sigue:

Tabla II. 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_i	y

Fuente: Ref. 3.

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_i = es la suma de todas las observaciones

Generalmente 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.

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

Donde:

y_{ij} = observación

μ = media general

t_i = efecto del tratamiento i ésimo

e_j = error aleatorio

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

$$H_0: t_1 = t_2 = \dots = t_a = 0$$

$$H_1: t_i \neq 0 \text{ al menos una } i$$

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

Tabla III. Análisis de Varianza para el diseño unifactorial

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Fo
<i>Tratamientos</i>	$\sum_{i=1}^a y_i^2 ./N - y^2 ./aN$	$a - 1$	$\frac{(SS_{tratamientos})}{(a - 1)}$	$\frac{(MS_{tratamientos})}{MS_E}$
<i>Error</i>	SS_E (por sustracción)	$N - a$	$\frac{(SS_E)}{(N - a)}$	
<i>Total</i>	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^N y_{ij}^2 - y^2 ./aN$	$N - 1$		

Fuente: Ref. 3.

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

$$F = \frac{MS_{tratamientos}}{MS_E} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

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 Fo que se obtendrán para cada uno de los componentes químicos de la madera a determinar, sabiendo que valores de Fo menores a F comprueban la hipótesis nula y el rechazo de la hipótesis alternativa.

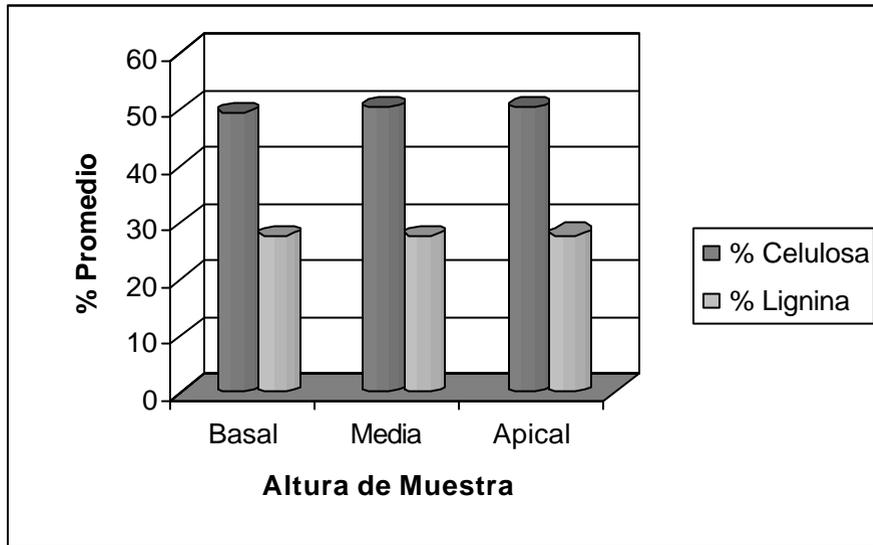
3. RESULTADOS

Tabla IV. Resultados Generales de la caracterización química del Pino Caribe (*Pinus caribaea* (Morelet) var. hondurensis (Barret y Golfari))

Árbol	Altura	% Celulosa	% Lignina	% Extraíbles	% Taninos	% Humedad	% Cenizas
1	<i>Basal</i>	53.01	28.23	9.86	0.0457	8.66	0.67
	<i>Media</i>	54.72	28.22	9.35	0.0509	8.75	0.49
	<i>Apical</i>	52.52	28.65	10.15	0.0404	8.48	0.47
2	<i>Basal</i>	56.60	27.93	9.75	0.0509	8.32	0.36
	<i>Media</i>	51.33	27.24	10.11	0.0492	8.11	0.66
	<i>Apical</i>	50.48	26.89	10.65	0.0378	8.17	0.44
3	<i>Basal</i>	48.33	27.62	9.16	0.0430	8.16	0.45
	<i>Media</i>	51.93	26.91	10.31	0.0512	8.25	0.39
	<i>Apical</i>	49.06	29.02	9.32	0.0509	8.31	0.46
4	<i>Basal</i>	49.37	28.68	9.25	0.0509	9.01	0.48
	<i>Media</i>	51.22	27.67	10.15	0.0536	8.45	0.36
	<i>Apical</i>	53.81	27.23	7.55	0.0509	9.20	0.44
5	<i>Basal</i>	50.05	26.39	8.67	0.0378	8.65	0.45
	<i>Media</i>	49.49	26.95	9.85	0.0509	8.45	0.50
	<i>Apical</i>	52.61	25.37	10.37	0.0378	9.65	0.41
6	<i>Basal</i>	48.10	26.81	12.38	0.0457	8.56	0.46
	<i>Media</i>	48.16	29.20	10.14	0.0582	9.37	0.39
	<i>Apical</i>	49.37	28.80	10.29	0.0562	10.12	0.60
7	<i>Basal</i>	49.02	27.14	11.03	0.0430	9.50	0.47
	<i>Media</i>	49.86	27.22	10.16	0.0509	8.96	0.43
	<i>Apical</i>	49.88	28.41	9.80	0.0536	8.37	0.40
8	<i>Basal</i>	46.03	28.78	11.99	0.0582	9.32	0.45
	<i>Media</i>	48.94	26.38	11.17	0.0536	8.47	0.51
	<i>Apical</i>	48.54	28.50	10.93	0.0404	8.32	0.38
9	<i>Basal</i>	46.88	29.50	10.88	0.0378	8.77	0.39
	<i>Media</i>	48.06	29.07	9.15	0.0457	9.14	0.37
	<i>Apical</i>	48.60	28.85	8.99	0.0404	8.66	0.48

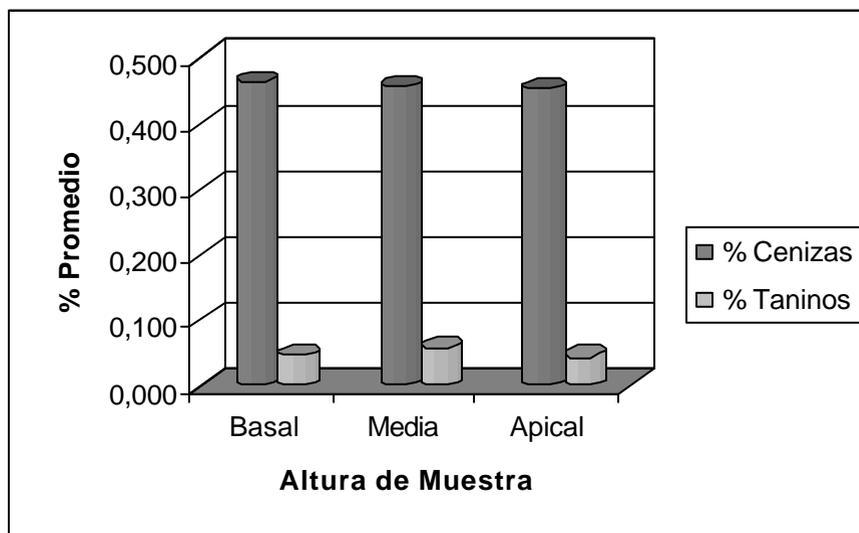
Fuente: Datos Calculados

Figura 9. Concentración promedio de celulosa y lignina en base a la altura del Pino Caribe



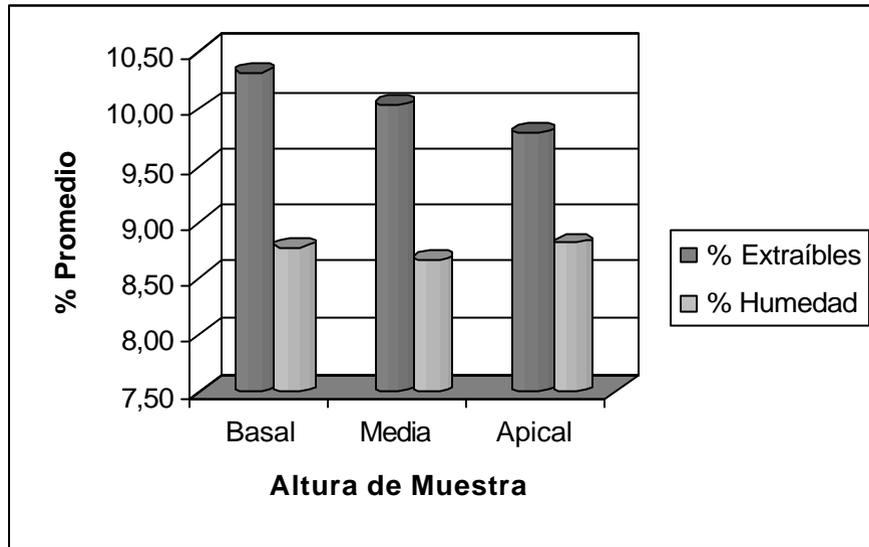
Fuente: Análisis Estadístico

Figura 10. Concentración promedio de cenizas y taninos en base a la altura del Pino Caribe



Fuente: Análisis Estadístico

Figura 11. Concentración promedio de extraíbles y humedad en base a la altura del Pino Caribe



Fuente: Análisis Estadístico

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo de graduación trata la investigación sobre la caracterización química de la madera de Pino Caribe (*Pinus caribaea* (Morelet) var. *Hondurensis* (Barret y Golfari)) en donde se determinaron las concentraciones como porcentaje en peso de cinco componentes químicos, así como el contenido de humedad del mismo. Entre los componentes químicos se tienen las Sustancias Extraíbles o Extrañas, Celulosa, Lignina, Taninos Puros y Cenizas.

La humedad se analiza por aparte ya que no es un componente propio de la estructura de la madera, pero es importante conocer su contenido antes de su uso para evitar problemas que modifiquen las características físicas, mecánicas y químicas que se puedan producir en los tratamientos; por ello para trabajar la madera se requiere un rango de 8 % a 11 % de humedad.

La tabla IV de la sección de Resultados presenta los datos generales para los cinco componentes químicos determinados y el contenido de humedad para las veintisiete muestras tratadas. Se trabajaron 9 árboles de la misma especie y se hizo énfasis en la altura a la cual serían tomadas las muestras, siendo la troza basal de diámetro a la altura del pecho, la troza media y la troza apical o de punta, siendo nombradas como altura 1, 2 y 3 o simplemente basal, media y apical respectivamente.

La concentración de celulosa se encuentra entre el 46 % y 56 % en peso, la lignina se encuentra entre 25 % y 30%, las sustancias extraíbles se encuentran entre 7 % y 12 %, los taninos puros se encuentran entre 0.03 % y 0.06 % y las cenizas se encuentran entre 0.30 % y 0.70 %.

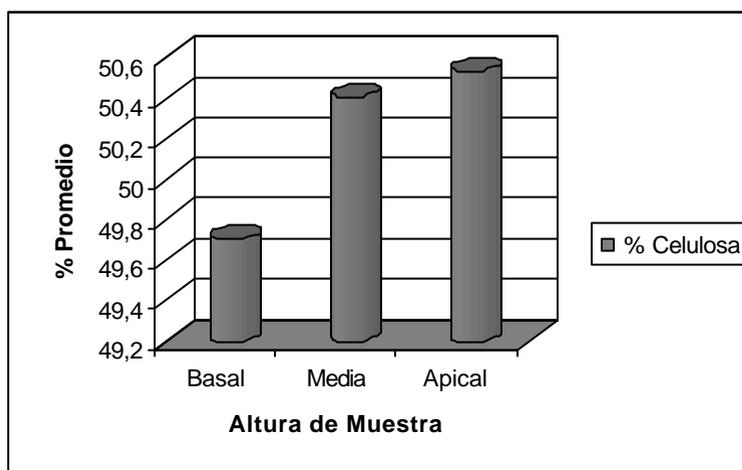
Los resultados obtenidos concuerdan con los rangos registrados en la literatura para coníferas o maderas blandas, figurando el pino entre ellas. Los datos de la tabla I de la sección de Marco Teórico son los siguientes: Celulosa entre 30.1 % y 60.7 %, Lignina entre 21.7 % y 37.0 %, Sustancias Extraíbles entre 0.2 % y 14.4 % y cenizas entre 0.02 % y 1.1 % (Ref. 5).

Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza para un sistema unifactorial por medio de la Distribución de Fisher (Ref. 3). Los datos que se obtuvieron para celulosa indican que en promedio la variación de su contenido con respecto a la altura no es significativa, con ello se indica que la composición de la misma es relativamente la misma en cualquier parte del árbol. Esto denota que siendo el carbohidrato más abundante en la madera, este presenta la resistencia que soporta los tejidos de la planta en distintas alturas de la misma sin importar si es madera blanda o dura.

El resultado es respaldado por el análisis de varianza que se aplicó a los datos obtenidos, datos presentados en la tabla XII del apéndice B. El valor observado para la prueba de Fisher es de 0.2842, siendo menor al valor tabulado de 3.4000, confirmando así que la variación no es significativa; la probabilidad de ocurrencia en cuanto a la hipótesis nula es de 0.7551. Los valores medios de la tabla XVII indican que en la altura 3 se encuentra en mayor cantidad el componente, y le siguen la altura 2 y altura 1.

A continuación se presenta el gráfico del comportamiento del contenido de celulosa en base a la altura, siendo determinadas las variaciones por promedio, pero la variación es tan pequeña que para un análisis general se considera no significativa.

Figura 12. Concentración de celulosa en base a la altura del Pino Caribe



Fuente: Análisis Estadístico

El análisis de varianza para la lignina se muestra en la tabla XI, en donde los datos presentan que la composición de lignina no varía significativamente conforme a la altura. Esto se indica por medio de la comparación de los valores para la prueba de Fisher, dando como resultado la aceptación de la hipótesis nula, H_0 , como en el caso de la composición de celulosa. El valor observado de Fisher es de 0.2153, siendo el valor teórico de Fisher de 3.4000, indicando que el valor observado es menor que el tabulado y por ello la variación no es significativa. La probabilidad de ocurrencia es de 0.8078; es decir, que la probabilidad es alta en cuanto a la hipótesis nula.

La tabla XVII muestra las medias de la composición de lignina para las tres alturas, indicando que hay una mayor cantidad en las alturas 1 y 3, y por una cantidad relativamente pequeña le sigue la altura 2 o media. Considérese que ya se concluyó que a pesar de que hay variación se considera no significativa según el análisis estadístico.

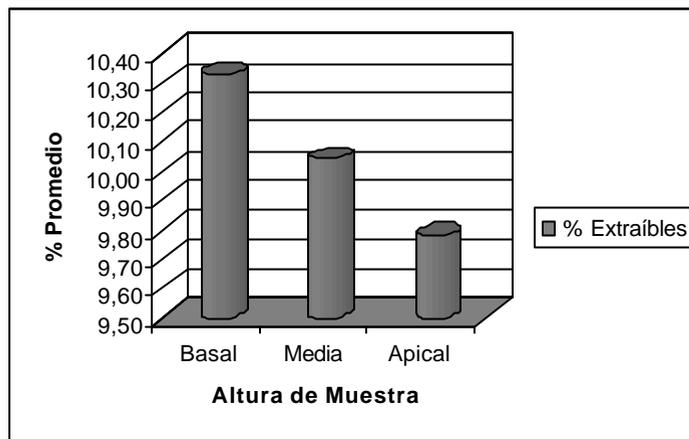
Al igual que la celulosa, la lignina funciona como un pilar para soportar los tejidos de la planta, siendo importante que su concentración se mantenga a pesar de la variación de diámetros de la troza de una altura a otra. Como la parte basal esta presentando mayor contenido que la media se denota la rigidez en la altura 1 para sostener el árbol.

La tabla XIII del apéndice B presenta los resultados del análisis de varianza para las sustancias extraíbles. El valor de Fisher observado es de 0.6479, siendo para el valor de Fisher teórico 3.4000, indicando que el contenido de sustancias extraíbles no varía de forma significativa en función de la altura, con una probabilidad de ocurrencia de 0.5321.

La tabla XVII muestra las medias de los datos, en donde se puede apreciar que a medida que aumenta la altura el contenido de sustancias extraíbles va disminuyendo, tomando en cuenta que no lo hace de manera significativa según el análisis estadístico.

Como muestra la figura 13 el contenido de sustancias extraíbles es inversamente proporcional a la altura. Los factores que rigen la distribución de las sustancias extraíbles son la ubicación geográfica, edad del árbol y la especie.

Figura 13. Concentración de extraíbles en base a la altura del Pino Caribe



Fuente: Análisis Estadístico

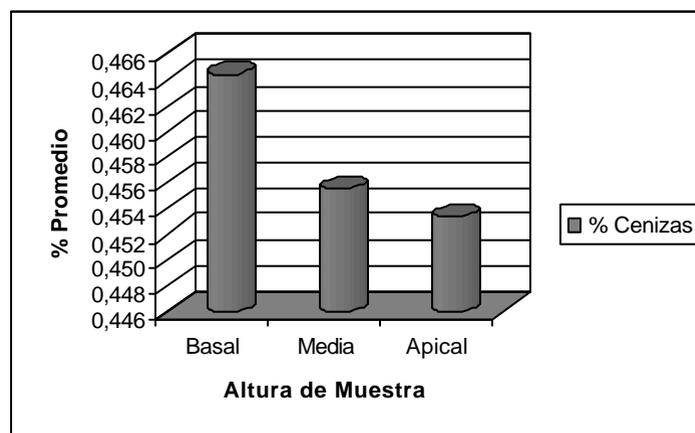
La tabla XIV muestra el análisis de varianza para la concentración de taninos puros. El valor de Fisher observado es de 2.9136, cuando el valor de Fisher teórico es de 3.4000, siendo este último mayor que el valor observado se acepta entonces la hipótesis nula, H_0 , denotando que no hay una variación significativa.

La probabilidad de ocurrencia es de 0.0737, siendo baja debido a la cercanía del valor observado de Fisher con respecto al valor teórico. Los datos obtenidos demuestran que la concentración de taninos libres en madera del Pino Caribe son bajos, como es de esperarse ya que la mayor concentración de taninos se encuentra en la corteza de los árboles.

Los valores medios de taninos puros de la tabla XVII demuestran que los taninos en la madera se concentran en la parte media o altura 2 del árbol.

La tabla XV muestra el análisis de varianza para la concentración de cenizas. El valor de Fisher observado es de 0.0449, siendo el valor de Fisher teórico 3.4000, indicando que el contenido de cenizas no varía de forma significativa en función de la altura, con una probabilidad de ocurrencia de 0.9562 la cual es alta para la aceptación de la hipótesis nula, H_0 . Sin embargo la tabla XVII muestra las medias de los datos, en donde se puede apreciar que la concentración de cenizas es mayor en la altura 1 o basal y va disminuyendo conforme a la altura. Es decir que la concentración de cenizas es inversamente proporcional a la altura, tal como lo muestra la figura 14.

Figura 14. Concentración de cenizas en base a la altura del Pino Caribe



Fuente: Análisis Estadístico

Cabe mencionar que en base al análisis estadístico se concluyó que la variación no es significativa. Sin embargo dicha variación denota que los minerales, determinados de forma general, están constituidos por compuestos de óxidos de metales, los cuales son pesados y se ven regidos por el efecto de la gravedad, ya que a menor altura su concentración es mayor.

5. CONCLUSIONES

1. La celulosa es el componente químico más abundante de la madera del Pino Caribe en cualquier altura, ya que su concentración se encuentra entre 46% y 56 % en peso y no presentó variación significativa en función de la altura del árbol.
2. La lignina es el segundo componente químico en abundancia y su concentración se encuentra entre 25 % y 30 %, sin haber presentado variación significativa en función de la altura.
3. Las sustancias extraíbles se encuentran entre 7 % y 12 % en peso y no presentaron variación significativa en función de la altura. Los valores medios indican que van disminuyendo conforme aumenta la altura, con una diferencia no significativa.
4. Los taninos se encuentran entre 0.03 % y 0.06 % en peso y no presentaron variación significativa en función de la altura, al igual que las cenizas, que se encuentran entre 0.3 % y 0.7 %. Las medias demostraron que las cenizas disminuyen conforme al aumento de altura.
5. La caracterización química de la madera del Pino Caribe no demostró variación significativa de sus componentes químicos en función de la altura, por lo tanto se aprueba la hipótesis nula, H_0 .

6. RECOMENDACIONES

1. Promover la investigación para realizar la caracterización química de otras especies forestales, incluyendo maderas de coníferas y latifoliadas, para comparar las concentraciones de los componentes químicos; también para árboles de la misma especie a partir de diferentes regiones.
2. Hacer un estudio para incrementar la variedad de componentes químicos a analizar, así como los tipos de sustancias extraíbles en la madera, con el objeto de cuantificarlos.
3. Realizar estudios económicos que analicen la factibilidad a escala piloto de la determinación de los componentes químicos de la madera, con el fin de evaluar algún uso industrial, como por ejemplo la fabricación del papel, para su máximo aprovechamiento.
4. Los taninos son importantes en la industria de curtición de pieles, por ello debe promoverse un estudio no solo de la madera sino también de la corteza del árbol para evitar su desperdicio y aprovechar su gran fuente de taninos.
5. Investigar los diversos tipos de métodos para la determinación de los componentes químicos de la madera, con el objeto de optimizar tiempo, recursos y rendimiento para futuras investigaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar Cumes, J. M. **Guía para la identificación de las coníferas de Guatemala.** Sector Público Agrícola. Instituto Nacional Forestal, Unidad Manejo Forestal, Departamento de Reforestación. Guatemala C. A. (S. D. E.) 1976. pp. 5, 6.
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. Montgomery, Douglas C. y William W. Hines. **Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Administración.** 3ra Edición. México: Editorial Continental. 1994. pp. 409-419, 783.
4. Perry, Robert H. Green Don W. **Manual del Ingeniero Químico.** 7ma Edición. México: Editorial McGraw Hill. 1999. pp. 18-44 a 18-48, 18-68 a 18-70, 18-74 a 1876 y 18-92 a 18-100.
5. Tsoumis, George. **Science and Technology of Wood.** 1ra ed. Estados Unidos de América: Editorial Van Nostrand Reinhold New York, 1982. pp. 34-38.
6. Instituto Nacional de Bosques –INAB-. “Ficha Técnica de Especies: Pino Caribe” **Revista del INAB.** (Guatemala) (2): 2. 1999.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. Cenizas en madera.

Bland, D.E., 1985. Emilianova, H., 1995.

<http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/x5595s/X5595S05.htm>

mayo de 2005.

2. Componentes químicos de la madera.

Marx - Figini, 1972. Browning, B.L., 1967. Jolkin, F., 1982. Tamchuk, 1973. Tancredi, N., 1995.

<http://www.comaco.com.mx/boletines/ImportanconocerCH2.pdf#search='humedad%20en%20madera'>

junio de 2005.

3. Composición química de la madera.

Coronel, E.O., 1994. Bland, D.E., 1985. Glasser, W. G., 1981.

Sakakibara, K., 1980.

Profesores Investigadores del Centro de Estudios Forestales y Profesores del Departamento de Química de la Facultad de Forestal y Agronomía de la Universidad de Pinar del Río, Cuba. e-mail orea@af.upr.edu.cu

<<http://www1.monografias.com/trabajos15/composicion-madera/composicion-madera.shtml>>

junio de 2005.

4. Estructura de la madera

www.encarta.com

5. Estudio bibliográfico: Taninos.

Prance y Prance, 1993.

Universidad de Pinar del Río. Cuba.

<<http://www.ecoportal.net/content/view/full/39302>>

mayo de 2005.

6. Importancia de los taninos.

Díaz, A., 1986.

<<http://www.botanical-online.com/medicinalestaninos.htm>>

junio de 2005.

7. Madera y sus componentes.

Guardiola, J.L., 1967. Fengel, D., 1984. Carballo, L.R., 1989.

<<http://es.wikipedia.org/wiki/Lignina>>

abril de 2005.

8. Propiedades químicas y fisicoquímicas de la madera.

Díaz, A., 1986. Hans, B. y Anders, R., 1995.

<<http://www.monografias.com/trabajos15/transformacion-madera/transformacion-madera.shtml>>

mayo de 2005.

9. Química general aplicada a la industria.

Ed.Salvat Editores S.A. Fuller, J. 1993. Yagodin, 1981

<<http://biotecnolocus.com/articulos/celulosa/>>

mayo de 2005.

BIBLIOGRAFÍA

1. Dick, J. G. **Química Analítica**. Traducido por Beatriz S, Hill de V. Tomo II
México: Editorial el Manual Moderno S. A. 1979. 797 pp.
2. Kirk, R. **Enciclopedia de tecnología química**. Edición en Español.
México: Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana. 1961.
3. Kreshkov, A. P. **Curso de química analítica, análisis cuantitativo**. Mir
Moscú, traducido del ruso por S. G. Kará-Murzá, impreso en la URSS.
Traducción en español. Editorial Mir. 1985. 335 pp.
4. McCabe, Warren L., Julian Smith C. y Harriot Meter. **Operaciones unitarias en Ingeniería Química**. 4ta Edición. México: Editorial McGraw Hill. 2000. 1114 pp.
5. S. Hon, David N., Shiraishi Nobuo, **Wood and Cellulosic Chemistry**.
Marcel Dekker, Inc. New York and Basel. United States of America:
Printed in the United States of América, 1991 by Marcel Dekker, Inc.
1018 pp.
6. Treybal, Robert E. **Operaciones de transferencia de masa**. 2da Edición. México: Editorial McGraw Hill. 2000. 862 pp.

7. Gómez Orozco, Edson Daniel. Comparación del porcentaje de extracto tánico de la corteza y de la madera de encino (*Quercus tristis Liebm*) proveniente de un bosque natural. Tesis Ing. Química. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2004. 55 pp.
8. Orozco Escobar, Mary Patricia. Determinación del contenido tánico de la corteza de pino de cumbre (*Pinus rudis E.*) y pino triste (*Pinus Pseudostrobus L.*) mediante extracciones alcalinas con sulfito de sodio (Na_2SO_3), a nivel laboratorio. Tesis Ing. Química. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2003. 60 pp.
9. Suchini, José Manuel. Comparación de rendimientos de dos métodos de extracción de taninos (ácido pinutánico) a partir de la corteza de Pino Caribe (*Pinus Caribaea*) a nivel laboratorio. Tesis Ing. Química. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2002.
10. Investigación Forestal, CONCYT. “Usos maderables del pino Caribe” **Programa de Investigación Forestal.** (Guatemala) (1): 1 y 2. 2002.
11. Rosales Castro, Martha y Rubén F. González Laredo. “Comparación del contenido de compuestos fenólicos en la corteza de ocho especies de pino” **Revista Madera y Bosques.** (Guatemala) (2): 41-49. 2003.

APÉNDICE A

DATOS CALCULADOS

Tabla V. Datos Calculados para lignina

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	28.23	27.93	27.62	28.68	26.39	26.81	27.14	28.78	29.50	251.08	27.90
2	28.22	27.24	26.91	27.67	26.95	29.20	27.22	26.38	29.07	248.86	27.65
3	28.65	26.89	29.02	27.23	25.37	28.80	28.41	28.50	28.85	251.72	27.97
										751.66	27.84

Fuente: Datos Originales

Tabla VI. Datos Calculados para celulosa

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	53.01	56.60	48.33	49.37	50.05	48.10	49.02	46.03	46.88	447.39	49.71
2	54.72	51.33	51.93	51.22	49.49	48.16	49.86	48.94	48.06	453.71	50.41
3	52.52	50.48	49.06	53.81	52.61	49.37	49.88	48.54	48.60	454.87	50.54
										1355.97	50.22

Fuente: Datos Originales

Tabla VII. Datos Calculados para extraíbles

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	9.86	9.75	9.16	9.25	8.67	12.38	11.03	11.99	10.88	92.97	10.33
2	9.35	10.11	10.31	10.15	9.85	10.14	10.16	11.17	9.15	90.39	10.04
3	10.15	10.65	9.32	7.55	10.37	10.29	9.80	10.93	8.99	88.05	9.78
										271.41	10.05

Fuente: Datos Originales

Tabla VIII. Datos Calculados para taninos puros

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	0.0457	0.0509	0.0430	0.0509	0.0378	0.0457	0.0430	0.0582	0.0378	0.4130	0.0459
2	0.0509	0.0492	0.0512	0.0536	0.0509	0.0582	0.0509	0.0536	0.0457	0.4642	0.0516
3	0.0404	0.0378	0.0509	0.0509	0.0378	0.0562	0.0536	0.0404	0.0404	0.4084	0.0454
										1.2856	0.0476

Fuente: Datos Originales

Tabla IX. Datos Calculados para cenizas

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	0.67	0.36	0.45	0.48	0.45	0.46	0.47	0.45	0.39	4.18	0.46
2	0.49	0.66	0.39	0.36	0.50	0.39	0.43	0.51	0.37	4.10	0.46
3	0.47	0.44	0.46	0.44	0.41	0.60	0.40	0.38	0.48	4.08	0.45
										12.36	0.46

Fuente: Datos Originales

Tabla X. Datos Calculados para humedad

Altura	Observaciones									Totales	Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	8.66	8.32	8.16	9.01	8.65	8.56	9.50	9.32	8.77	78.95	8.77
2	8.75	8.11	8.25	8.45	8.45	9.37	8.96	8.47	9.14	77.95	8.66
3	8.48	8.17	8.31	9.20	9.65	10.12	8.37	8.32	8.66	79.28	8.81
										236.18	8.75

Fuente: Datos Originales

APÉNDICE B

DATOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Tabla XI. Resultados del Análisis de Varianza para lignina

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Fo	F	P
Tratamientos	0.5007	2	0.2503	0.2153	3.4000	0.8078
Error	27.9011	24	1.1625			
Total	28.4018	26				

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XII. Resultados del Análisis de Varianza para celulosa

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Fo	F	P
Tratamientos	3.6014	2	1.8007	0.2842	3.4000	0.7551
Error	152.0612	24	6.3359			
Total	155.6627	26				

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XIII. Resultados del Análisis de Varianza para extraíbles

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Fo	F	P
Tratamientos	1.3459	2	0.6729	0.6479	3.4000	0.5321
Error	24.9276	24	1.0387			
Total	26.2735	26				

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XIV. Resultados del Análisis de Varianza para taninos puros

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Fo	F	P
Tratamientos	0.0002	2	0.0001	2.9136	3.4000	0.0737
Error	0.0009	24	0.0000			
Total	0.0011	26				

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XV. Resultados del Análisis de Varianza para cenizas

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Fo	F	P
Tratamientos	0.0006	2	0.0003	0.0449	3.4000	0.9562
Error	0.1662	24	0.0069			
Total	0.1669	26				

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XVI. Resultados del Análisis de Varianza para humedad

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	Fo	F	P
Tratamientos	0.1066	2	0.0533	0.1891	3.4000	0.8289
Error	6.7641	24	0.2818			
Total	6.8707	26				

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XVII. Concentración promedio de los componentes en base a la altura

Altura	% Celulosa	% Lignina	% Extraíbles	% Taninos	% Humedad	% Cenizas
Basal	49.71	27.90	10.33	0.0459	8.77	0.464
Media	50.41	27.65	10.04	0.0585	8.66	0.456
Apical	50.54	27.97	9.78	0.0454	8.81	0.453

Fuente: Análisis Estadístico

APÉNDICE C

C.1 Secuencia para la obtención de celulosa

Figura 15. Madera inmersa en solución de NaOH



Fuente: Erickson Roberto Escobar Toledo



Figura 16. Filtrado de la mezcla; el producto insoluble es celulosa



Fuente: Erickson Roberto Escobar Toledo

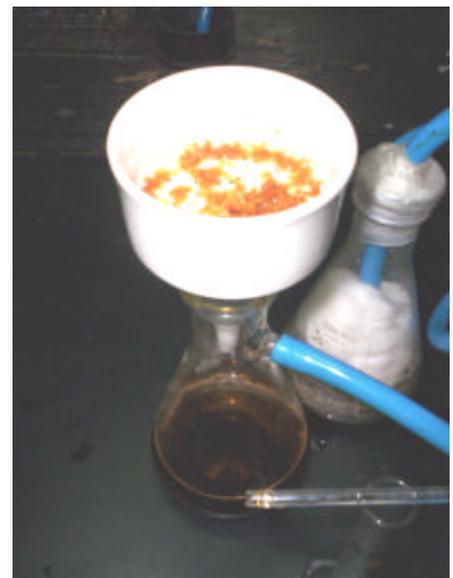


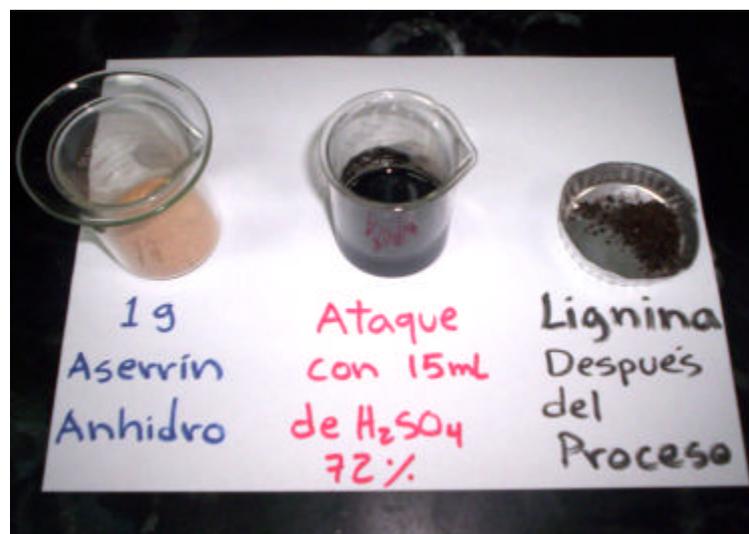
Figura 17. Producto seco



Fuente: Erickson Roberto Escobar Toledo

C.2 Secuencia para la obtención de lignina

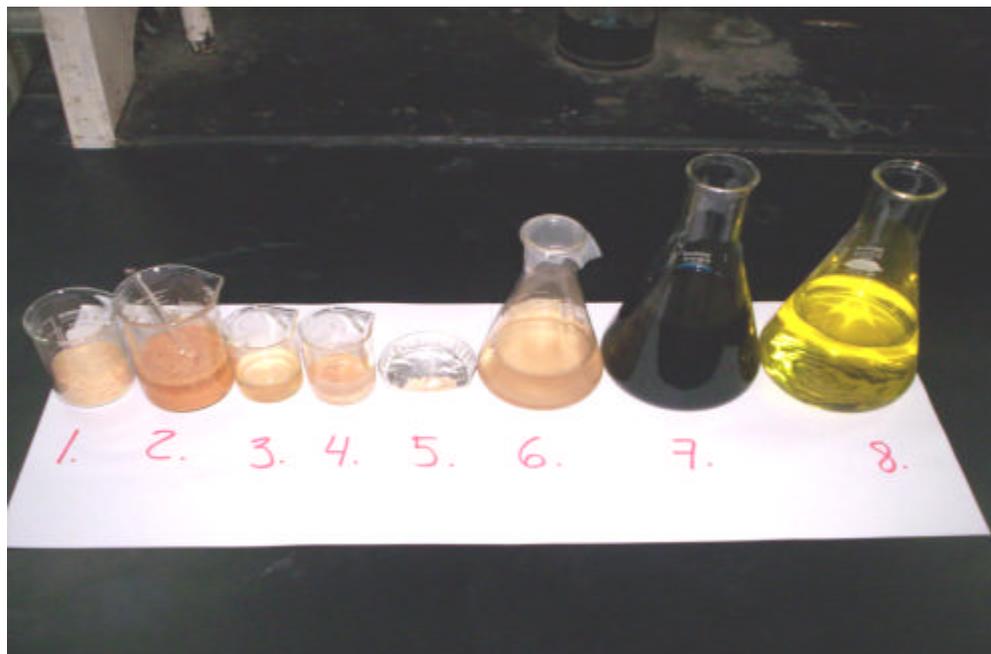
Figura 18. Al agregar ácido a la madera la fracción insoluble es lignina



Fuente: Erickson Roberto Escobar Toledo

C.3 Secuencia para la cuantificación de taninos

Figura 19. Los pasos son: 1. agregar una muestra de madera en un beaker, 2. agregar solución de sulfito de sodio, 3. filtrar y obtener la fracción soluble, 4. evaporar y obtener el extracto tánico seco, 5. tomar cierta cantidad del extracto tánico, 6. disolver en agua destilada y calentar, 7. titular con una solución de permanganato de potasio, 8. cuantificar por medio del volumen utilizado de titulante al llegar al punto final.



Fuente: Erickson Roberto Escobar Toledo

Figura 20. Muestras de extracto tánico seco



Fuente: Erickson Roberto Escobar Toledo

C.4 Secuencia para la obtención de cenizas

Figura 21. Muestras de madera y mufla para la calcinación



Fuente: Erickson Roberto Escobar Toledo

Figura 22. Muestras a calcinar y cenizas como producto



Fuente: Erickson Roberto Escobar Toledo

APÉNDICE D

DATOS ORIGINALES

Tabla XVIII. Datos Originales para la determinación de celulosa y lignina

Árbol	Muestra	P. T. (g)	P. B. (g)	P. N. (g)	P. M. (g)	P. T. M. (g)	% Celulosa	% Lignina
1	<i>Basal</i>	0.52	1.39	0.87	3.98	7.50	53.01	28.23
	<i>Media</i>	0.53	1.40	0.87	4.10	7.50	54.72	28.22
	<i>Apical</i>	0.54	1.41	0.88	3.94	7.50	52.52	28.65
2	<i>Basal</i>	0.53	1.42	0.90	4.25	7.50	56.60	27.93
	<i>Media</i>	0.53	1.40	0.87	3.85	7.50	51.33	27.24
	<i>Apical</i>	0.52	1.38	0.87	3.79	7.50	50.48	26.89
3	<i>Basal</i>	0.54	1.38	0.84	3.62	7.50	48.33	27.62
	<i>Media</i>	0.53	1.38	0.85	3.89	7.50	51.93	26.91
	<i>Apical</i>	0.51	1.37	0.86	3.68	7.50	49.06	29.02
4	<i>Basal</i>	0.53	1.39	0.86	3.70	7.50	49.37	28.68
	<i>Media</i>	0.51	1.39	0.88	3.84	7.50	51.22	27.67
	<i>Apical</i>	0.50	1.38	0.88	4.04	7.50	53.81	27.23
5	<i>Basal</i>	1.17	2.01	0.84	3.75	7.50	50.05	26.39
	<i>Media</i>	1.21	2.05	0.85	3.71	7.50	49.49	26.95
	<i>Apical</i>	0.51	1.38	0.87	3.95	7.50	52.61	25.37
6	<i>Basal</i>	0.56	1.41	0.86	3.61	7.50	48.10	26.81
	<i>Media</i>	0.58	1.44	0.86	3.61	7.50	48.16	29.20
	<i>Apical</i>	0.55	1.42	0.87	3.70	7.50	49.37	28.80
7	<i>Basal</i>	1.20	2.05	0.86	3.68	7.50	49.02	27.14
	<i>Media</i>	1.20	2.05	0.86	3.74	7.50	49.86	27.22
	<i>Apical</i>	1.23	2.10	0.87	3.74	7.50	49.88	28.41
8	<i>Basal</i>	1.18	2.03	0.85	3.45	7.50	46.03	28.78
	<i>Media</i>	1.22	2.07	0.85	3.67	7.50	48.94	26.38
	<i>Apical</i>	1.21	2.08	0.87	3.64	7.50	48.54	28.50
9	<i>Basal</i>	1.19	2.05	0.86	3.52	7.50	46.88	29.50
	<i>Media</i>	1.23	2.08	0.85	3.60	7.50	48.06	29.07
	<i>Apical</i>	1.19	2.04	0.85	3.65	7.50	48.60	28.85

Tabla XIX. Datos Originales para la determinación de taninos y extraíbles

Árbol	Muestra	Vol. (ml)	P. N. (g)	% Taninos	P. M. (g)	P. N. (g)	% Extraíbles
1	<i>Basal</i>	0.69	1.481	0.0457	7.50	6.76	9.86
	<i>Media</i>	0.73	1.498	0.0509	7.50	6.80	9.35
	<i>Apical</i>	0.63	1.702	0.0404	7.50	6.74	10.15
2	<i>Basal</i>	0.73	1.392	0.0509	7.50	6.77	9.75
	<i>Media</i>	0.72	1.541	0.0492	7.50	6.74	10.11
	<i>Apical</i>	0.61	1.678	0.0378	7.50	6.70	10.65
3	<i>Basal</i>	0.66	1.502	0.0430	7.50	6.81	9.16
	<i>Media</i>	0.74	1.515	0.0512	7.50	6.73	10.31
	<i>Apical</i>	0.73	1.258	0.0509	7.50	6.80	9.32
4	<i>Basal</i>	0.73	1.132	0.0509	7.50	6.81	9.25
	<i>Media</i>	0.76	0.976	0.0536	7.50	6.74	10.15
	<i>Apical</i>	0.73	1.783	0.0509	7.50	6.93	7.55
5	<i>Basal</i>	0.61	1.269	0.0378	7.50	6.85	8.67
	<i>Media</i>	0.73	1.538	0.0509	7.50	6.76	9.85
	<i>Apical</i>	0.61	1.170	0.0378	7.50	6.72	10.37
6	<i>Basal</i>	0.69	1.746	0.0457	7.50	6.57	12.38
	<i>Media</i>	0.80	1.500	0.0582	7.50	6.74	10.14
	<i>Apical</i>	0.79	1.608	0.0562	7.50	6.73	10.29
7	<i>Basal</i>	0.66	1.531	0.0430	7.50	6.67	11.03
	<i>Media</i>	0.73	1.515	0.0509	7.50	6.74	10.16
	<i>Apical</i>	0.76	1.727	0.0536	7.50	6.77	9.80
8	<i>Basal</i>	0.80	1.372	0.0582	7.50	6.60	11.99
	<i>Media</i>	0.76	1.527	0.0536	7.50	6.66	11.17
	<i>Apical</i>	0.63	1.235	0.0404	7.50	6.68	10.93
9	<i>Basal</i>	0.61	1.421	0.0378	7.50	6.68	10.88
	<i>Media</i>	0.69	1.509	0.0457	7.50	6.81	9.15
	<i>Apical</i>	0.63	1.451	0.0404	7.50	6.83	8.99

Tabla XX. Datos Originales para la determinación de cenizas y humedad

Árbol	Muestra	P. T. (g)	P. B. (g)	P. N. (g)	% Cenizas	% Humedad
1	<i>Basal</i>	1.2690	1.2757	0.0067	0.67	8.66
	<i>Media</i>	1.2680	1.2729	0.0049	0.49	8.75
	<i>Apical</i>	1.2692	1.2739	0.0047	0.47	8.48
2	<i>Basal</i>	1.2673	1.2709	0.0036	0.36	8.32
	<i>Media</i>	1.2685	1.2751	0.0066	0.66	8.11
	<i>Apical</i>	1.2650	1.2694	0.0044	0.44	8.17
3	<i>Basal</i>	1.2640	1.2685	0.0045	0.45	8.16
	<i>Media</i>	1.2815	1.2854	0.0039	0.39	8.25
	<i>Apical</i>	1.2532	1.2578	0.0046	0.46	8.31
4	<i>Basal</i>	1.2421	1.2469	0.0048	0.48	9.01
	<i>Media</i>	1.2450	1.2486	0.0036	0.36	8.45
	<i>Apical</i>	1.2437	1.2481	0.0044	0.44	9.20
5	<i>Basal</i>	1.2438	1.2483	0.0045	0.45	8.65
	<i>Media</i>	1.2440	1.2490	0.0050	0.50	8.45
	<i>Apical</i>	1.2456	1.2497	0.0041	0.41	9.65
6	<i>Basal</i>	1.2453	1.2499	0.0046	0.46	8.56
	<i>Media</i>	1.2471	1.2510	0.0039	0.39	9.37
	<i>Apical</i>	1.2690	1.2750	0.0060	0.60	10.12
7	<i>Basal</i>	1.2683	1.2730	0.0047	0.47	9.50
	<i>Media</i>	1.2686	1.2729	0.0043	0.43	8.96
	<i>Apical</i>	1.2690	1.2730	0.0040	0.40	8.37
8	<i>Basal</i>	1.2694	1.2739	0.0045	0.45	9.32
	<i>Media</i>	1.2679	1.2730	0.0051	0.51	8.47
	<i>Apical</i>	1.2670	1.2708	0.0038	0.38	8.32
9	<i>Basal</i>	1.2670	1.2709	0.0039	0.39	8.77
	<i>Media</i>	1.2683	1.2720	0.0037	0.37	9.14
	<i>Apical</i>	1.2692	1.2740	0.0048	0.48	8.66