



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

**DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS DE LA
MADERA DE PINO BLANCO (*Pinus pseudostrobus* Lindl)
PROVENIENTE DE LA FINCA LAS VICTORIAS, PATZÚN,
CHIMALTENANGO**

LIZ MARÍA EUGENIA RODRÍGUEZ

Asesorada por Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales
Coasesorada por Ing. For. Msc. José Mario Saravia Molina

GUATEMALA, AGOSTO DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS DE LA
MADERA DE PINO BLANCO (*Pinus pseudostrobus* Lindl)
PROVENIENTE DE LA FINCA LAS VICTORIAS, PATZÚN,
CHIMALTENANGO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LIZ MARÍA EUGENIA RODRÍGUEZ

Asesorada por Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales
Coasesorada por Ing. For. Msc. José Mario Saravia Molina

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

Guatemala, Agosto de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



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. Keneth 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. Sydney Alexander Samuels Milson |
| EXAMINADOR | Ing. José Manuel Tay Oroxóm |
| EXAMINADOR | Ing. Víctor Manuel Monzón Ruiz |
| EXAMINADOR | Inga. Rosa María Girón Ruiz |
| SECRETARIO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINDOR

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

DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS DE LA MADERA DE PINO BLANCO (*Pinus pseudostrobus* Lindl) PROVENIENTE DE LA FINCA LAS VICTORIAS, PATZÚN, CHIMALTENANGO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Química,
con fecha 13 de julio de 2005

Liz María Eugenia Rodríguez

DEDICADO A MI MADRE

SILVIA RODRIGUEZ

*Por ser el pilar de mi vida, porque hoy culmino una etapa más de mi carrera gracias a su gran esfuerzo y apoyo incondicional. Gracias Madre, por haberme dado la vida, por todos tus desvelos y madrugadas, por enseñarme a luchar y perseverar, y por darme la oportunidad de ser una mujer de éxito como lo eres tú. Disfruta este logro porque es de las dos. **Que el Señor te Bendiga.***

AGRADECIMIENTOS A

- Dios y la Virgen María** Por ser la luz que guía mi camino y por darme fuerza en los momentos más difíciles de mi carrera.
- Mi hermano Juan Pablo** Por su cariño y apoyo. Gracias por los buenos momentos que hemos vivido juntos.
- Mis padrinos César Wug (†) Marleny de Wug** Por ser mis segundos padres, por haberme aceptado en su hogar como una hija más y por todo el amor y cariño que siempre me han brindado. Mil gracias.
- Mis primos** Brenda, Omar y Donald, por el cariño que siempre he recibido de ustedes.
- Mis amigas y amigos** Dannia, Mónica, Paty, Karina, Marisol, Silvia, Gustavo, Henry, Daniel, Hamilton, por los momentos alegres y tristes que vivimos en la Universidad. Gracias por compartir conmigo el tesoro más grande que tienen: **Su Amistad.**
- La familia Alemán González** Por abrirme las puertas de su hogar y su corazón, gracias por el apoyo y amor que me han brindado siempre.

Universidad de San Carlos de Guatemala

Por ser parte de mi formación profesional y porque en esta casa de estudios viví los mejores años de mi vida.

Inga. Telma Maricela Cano

Por asesorar este trabajo de graduación y por su apoyo incondicional. Muchísimas gracias.

Ing. César Alfonso García

Por haber revisado el presente trabajo de graduación, por brindarme sus conocimientos y por el apoyo recibido para la elaboración del mismo.

Mis compañeros del Laboratorio de Química Industrial

Por la ayuda prestada durante la realización de la parte experimental de este proyecto. Gracias por su amistad. Éxitos.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-------------|
| INDICE DE ILUSTRACIONES | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VII |
| GLOSARIO | XI |
| RESUMEN | XV |
| OBJETIVOS | XVII |
| HIPÓTESIS | XIX |
| INTRODUCCIÓN | XXI |
| | |
| 1. ANTECEDENTES | 1 |
| | |
| 2. MARCO TEÓRICO | |
| | |
| 2.1 Información general del pino blanco (<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl) | 3 |
| 2.1.1 Taxonomía de la planta | 3 |
| 2.1.2 Descripción botánica | 4 |
| 2.1.3 Ecología de la planta | 7 |
| 2.1.4 Usos | 8 |
| 2.2 La madera, propiedades generales y específicas | 8 |
| 2.3 Composición elemental de la madera | 10 |
| 2.4 Componentes estructurales de la madera | 12 |
| 2.4.1 Celulosa | 12 |
| 2.4.1.1 Estructura química | 13 |
| 2.4.1.2 Reacciones | 16 |
| 2.4.1.3 Propiedades físicas | 18 |
| 2.4.1.4 Análisis | 19 |
| 2.4.1.5 Producción de celulosa en el árbol | 20 |

| | |
|---|----|
| 2.4.1.6 Utilidad de la celulosa | 21 |
| 2.4.2 Lignina | 23 |
| 2.4.2.1 Propiedades generales | 24 |
| 2.4.2.2 Composición y estructura | 25 |
| 2.4.2.3 Fuentes primarias | 26 |
| 2.4.2.4 Utilización de la lignina | 27 |
| 2.5 Componentes extraíbles | 29 |
| 2.5.1 Características generales de los extraíbles | 29 |
| 2.5.2 Clasificación de los extraíbles | 32 |
| 2.5.2.1 Taninos | 32 |
| 2.5.2.2 Terpenoides | 38 |
| 2.5.2.3 Oleorresinas | 41 |
| 2.5.2.4 Aceites esenciales | 44 |
| 2.5.2.5 Saponinas | 45 |
| 2.5.2.6 Fenoles | 45 |

3. METODOLOGÍA

| | |
|--|----|
| 3.1 Localización | 47 |
| 3.2 Recursos humanos | 47 |
| 3.3 Metodología experimental | 47 |
| 3.3.1 Obtención del material | 47 |
| 3.4 Manejo de la fase experimental | 48 |
| 3.4.1 Material y equipo | 48 |
| 3.4.2 Procedimiento para eliminar sustancias extraíbles | 51 |
| 3.4.3 Procedimiento para determinar lignina | 54 |
| 3.4.4 Procedimiento para la determinación de celulosa | 54 |
| 3.4.5 Procedimiento para la determinación de taninos en madera | 56 |
| 3.4.6 Procedimiento para la determinación de cenizas | 57 |
| 3.5 Diseño de tratamientos | 57 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 3.6 Análisis estadístico | 57 |
| RESULTADOS | 61 |
| DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 63 |
| CONCLUSIONES | 69 |
| RECOMENDACIONES | 71 |
| BIBLIOGRAFÍA | 73 |
| APÉNDICES | 75 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | |
|--|----|
| 1. Hojas del pino blanco | 5 |
| 2. Copa del pino blanco | 6 |
| 3. Frutos del pino blanco (bellotas) | 6 |
| 4. Estructura de la madera | 12 |
| 5. Estructura química de la glucosa | 13 |
| 6. Estructura química de la celobiosa | 14 |
| 7. Estructura molecular de la celulosa | 14 |
| 8. Modelo molecular para el enlace de celulosa | 15 |
| 9. Formación de celulosa en el árbol | 21 |
| 10. Celulosa Cruda o Kraft | 23 |
| 11. Celulosa Blanqueada o química | 23 |
| 12. Grupos carbonilos presentes en la lignina | 26 |
| 13. Modelo estructural para la lignina en madera suave | 29 |
| 14. Monómeros precursores de taninos condensados | 37 |
| 15. Dímeros precursores de taninos condensados | 37 |
| 16. Unidad de isopreno | 39 |
| 17. Pirofosfato de isopentenilo | 39 |
| 18. Monoterpenos acíclicos | 40 |
| 19. Sesquiterpenos bicíclicos | 41 |
| 20. Principales monoterpenos en la madera | 42 |
| 21. Ácidos resínicos contenidos en la colofonia | 43 |
| 22. Estructuras de flavonoides | 46 |
| 23. Diagrama de flujo de operación del Soxhlet | 52 |
| 24. Extractores Soxhlet utilizados para las extracciones | 53 |
| 25. Contenido promedio de celulosa y lignina para el Pino Blanco | 62 |

| | |
|---|----|
| 26. Contenido promedio de taninos y cenizas puras para el Pino Blanco | 62 |
| 27. Contenido promedio de lignina presente en el Pino Blanco | 65 |
| 28. Contenido promedio de extraíbles para el Pino Blanco | 66 |
| 29. Contenido promedio de cenizas para el Pino Blanco | 68 |
| 30. Solución de extracto tánico | 86 |
| 31. Solución de extracto tánico con indicador Índigo de Carmín | 86 |
| 32. Primer cambio de color al titular con permanganato de potasio | 87 |
| 33. Segundo cambio de color al titular con permanganato de potasio | 87 |
| 34. Tercer cambio de color al titular con permanganato de potasio | 88 |
| 35. Finalización de la titulación con permanganato de potasio | 88 |
| 36. Muestras de lignina obtenidas en el laboratorio | 89 |
| 37. Muestras de celulosa obtenida en el laboratorio | 89 |
| 38. Muestras de extracto tánico obtenidas en el laboratorio | 90 |

TABLAS

| | | |
|--------|---|----|
| I. | Composición química de la madera (%) | 11 |
| II. | Diferencias entre los extraíbles de coníferas y latifoliadas | 31 |
| III. | Tipos de solvente utilizado para la extracción de taninos | 32 |
| IV. | Clasificación de los terpenoides | 38 |
| V. | Datos requeridos para un experimento con a tratamientos y n repeticioenes | 58 |
| VI. | Análisis de varianza para el diseño de bloques completamente aleatorio | 59 |
| VII. | Resultados generales para los componentes químicos del Pino Blanco (<i>Pinus</i> <i>(Pinus pseudostrobus Lindl)</i> | 61 |
| VIII. | Datos calculados para celulosa | 75 |
| IX. | Datos calculados para lignina | 75 |
| X. | Datos calculados para sustancias extraíbles | 76 |
| XI. | Datos calculados para taninos puros | 76 |
| XII. | Datos calculados para cenizas | 77 |
| XIII. | Datos calculados para humedad | 77 |
| XIV. | Resultados del análisis de varianza para celulosa | 78 |
| XV. | Resultados del análisis de varianza para lignina | 78 |
| XVI. | Resultados del análisis de varianza para extraíbles | 78 |
| XVII. | Resultados del análisis de varianza para taninos | 79 |
| XVIII. | Resultados del análisis de varianza para cenizas | 79 |
| XIX. | Resultados del análisis de varianza para humedad | 79 |
| XX. | Datos obtenidos para la prueba de medias para celulosa | 80 |
| XXI. | Datos obtenidos para la prueba de medias para lignina | 80 |
| XXII. | Datos obtenidos para la prueba de medias para extraíbles | 81 |
| XXIII. | Datos obtenidos para la prueba de medias para taninos puros | 81 |
| XXIV. | Datos obtenidos para la prueba de medias para cenizas | 82 |
| XXV. | Datos obtenidos para la prueba de medias para humedad | 82 |
| XXVI. | Datos originales para celulosa y cenizas | 83 |

| | | |
|---------|---|----|
| XXVII. | Datos originales para lignina y sustancias extraíbles | 84 |
| XXVIII. | Datos originales para taninos puros y porcentaje de humedad | 85 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------------------|---------------------------------------|
| A.C.S | American Chemical Society |
| °C | Grado Celsius |
| cm | Centímetros |
| Fo | Fisher observada |
| Ft | Fisher tabulada |
| FODECYT | Fondo para la ciencia y la tecnología |
| gr/cm³ | Gramos por centímetro cúbico |
| Ha | Hipótesis alternativa |
| Ho | Hipótesis nula |
| Kcal/Kg | Kilocaloría por kilogramo |
| m | Metros |
| mm | Milímetros |

| | |
|--------------|--|
| msnm | Metros sobre el nivel del mar |
| P | Pino |
| pH | Potencial de hidrógeno |
| TAPPI | Technical Association of the Pulp and Paper Industry |
| uma | Unidad de masa atómica |
| % | Porcentaje |
| μ | Media |
| Σ | Sumatoria |

GLOSARIO

| | |
|---------------------------------------|---|
| α -Celulosa | Sinónimo de celulosa. Porción insoluble en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 17.5%. |
| Alifático | Nombre genérico de los compuestos orgánicos. |
| Amorfas | Que carece de forma definida. |
| Astringente | Sustancia que provoca una contracción fibrilar de los tejidos orgánicos. |
| β - Celulosa | Sustancia que se precipita al acidular el filtrado sobrante de la determinación de α - celulosa. |
| γ - Celulosa | Sustancia que queda disuelta en el filtrado sobrante de la determinación de β - Celulosa. |
| Cámbium | Estrato celular responsable del crecimiento secundario de tallo y raíces. |
| Celobiosa | Producto formado a partir de la hidrólisis parcial de la celulosa. |
| Coloide | Suspensión microscópica de partículas, cuyo tamaño está en el rango de 1 nm a 1 μ m. |

| | |
|---------------------------|---|
| Duramen | Parte más seca y compacta del tronco y ramas gruesas de un árbol. |
| Hemicelulosa | Parte de la celulosa que es soluble en una solución de hidróxido de Sodio (NaOH) al 17.5%. |
| Hidrólisis | Descomposición de un compuesto químico por la acción del agua. |
| Higroscópica | Sustancia que es capaz de absorber agua de la atmósfera. |
| Humedad relativa | Relación entre la presión parcial del vapor y la presión de vapor del líquido a la temperatura del gas. |
| Lignina | Sustancia de protección de las membranas de las células de los tejidos de acción mecánica. |
| Maceración | Operación que consiste en sumergir una planta o fragmentos de la planta en un solvente para extraer de éstas en las partes de ella. |
| Oligómeros | Unión de varios monómeros. |
| Ópticamente Activo | Cuando una sustancia afecta el paso de la luz de un plano polarizado en un polarímetro. |

Taninos

Son compuestos polifenólicos amorfos coloidales no cristalizables, de reacción ácida, caracterizados por una acumulación de hidróxidos alifáticos y fenólicos.

Zeolitas

Grupo de minerales, son silicatos aluminocálcicos procedentes de la descomposición hidrotermal de los feldespatos.

RESUMEN

Se caracterizó químicamente la madera de la especie *Pinus pseudostrabus* Lindl (Pino Blanco) de seis años de edad, proveniente de la Finca Las Victorias, situada en el municipio de Patzún del departamento de Chimaltenango.

Las muestras de madera que se utilizaron fueron molidas en el taller de Carpintería del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería y tamizadas en una malla 35 mesh, recolectándose la fracción que pasó por ella. Se realizaron los siguientes ensayos químicos: Preparación de madera libre de sustancias extraíbles según norma ANSI/ASTM D105-56, Lignina en madera según norma ANSI/ASTM D106-56, Determinación de Alfa Celulosa en madera según norma ANSI/ASTM D1103-60, contenido de cenizas a 580°C y determinación del contenido de humedad.

Se analizaron 9 árboles a 3 diferentes alturas, altura dap (diámetro altura de pecho 1.30 m), altura comercial media y alta. El Pino Blanco (*Pinus pseudostrabus* Lindl) presentó los siguientes resultados: para celulosa un promedio de 53% a 55%, lignina 28% a 30%, para sustancias libres de extraíbles 6% a 8%, taninos 0.13% a 0.18% y cenizas 0.3% a 0.5%.

La celulosa no presentó una variación significativa en función de la altura, lo que indica que en cualquier parte del árbol se puede encontrar este componente en una cantidad apreciable.

Se determinó que la lignina varía en función de la altura, presentando una relación inversamente proporcional, es decir, que a mayor altura del árbol, menor contenido de lignina estará presente. Las sustancias extraíbles, al igual que la lignina, varían

significativamente en función de la altura, y presentaron la misma relación que la lignina.

Las cenizas presentaron un comportamiento contrario al de la lignina y sustancias extraíbles; varían directamente en función de la altura del árbol, es decir, que a mayor altura, menor cantidad de minerales está presente.

Para taninos se reportaron porcentajes muy por debajo del 0.1% debido a que se trabajó sólo con la madera y no con la corteza que es donde se encuentra este componente en mayor concentración.

OBJETIVOS

General

Realizar una caracterización química de la madera de pino blanco (*Pinus pseudostrabus* Lindl) en función de la altura del árbol.

Específicos

1. Comparar la cantidad de α -celulosa total en la madera de pino blanco respecto a la altura en que se colecta la muestra de madera.
2. Determinar el porcentaje de lignina presente en la madera de pino blanco en función de la altura en que se colecta la muestra de madera.
3. Determinar el porcentaje de componentes extraíbles que tiene la madera de pino blanco en función de la altura a la cual se colecta la muestra de madera.
4. Cuantificar el porcentaje de taninos puros en la madera de pino blanco en función de la altura de la muestra colectada.
5. Determinar el porcentaje total de cenizas presentes en la madera de pino blanco en función de la altura de la muestra colectada.

HIPÓTESIS

Los componentes químicos de la madera de pino blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl) varían en función de la altura a la cual se colecta la muestra a caracterizar

Hipótesis estadística

Hipótesis nula (H₀):

Los componentes químicos de la madera de pino blanco no varían con la altura del árbol en la que es colectada la muestra.

$$\mu_1 = \mu_2$$

Hipótesis alternativa (H_a):

Los componentes químicos de la madera de pino blanco sí varían con la altura del árbol en la que es colectada la muestra.

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

INTRODUCCIÓN

La madera es un biopolímero tridimensional cuya composición química reporta compuestos esenciales o primarios y compuestos extraños o secundarios. Entre los primeros figura la holocelulosa (celulosa y hemicelulosa) y la lignina y en los segundos extraíbles (solubles en solventes orgánicos) y no extraíbles como compuestos inorgánicos.

La celulosa está formada por celobiosa, es inodora e insípida y es la materia prima principal para la fabricación de pastas y paneles para construcción. Las hemicelulosas son carbohidratos no celulósicos de bajo peso molecular que ayudan en los procesos de refinación de fibras debido a que son moléculas más reactivas y se hidratan más fácilmente.

La lignina es un polímero natural cuyas unidades estructurales se derivan del fenilpropano; es subproducto de los pulpeos químicos de la madera y se utiliza a nivel industrial en la producción de poliuretano.

Los extractos son compuestos solubles en diferentes solventes, por ejemplo: en alcohol-benceno se solubilizan ceras, grasas y resinas; en agua, taninos, gomas, azúcares, materiales colorantes y almidones, estos últimos en agua caliente. Pueden clasificarse en ácidos volátiles, aceites esenciales, ácidos resinosos y polifenoles. El caucho y los taninos usados en la curtición del cuero, son ejemplos de extractos provenientes de maderas de amplio uso comercial a nivel mundial. Los extractos son también de gran importancia para la industria farmacéutica, sanitaria y en perfumería.

Entre los contenidos inorgánicos de la madera se encuentran los cristales y sílice. Los cristales son depósitos en su gran mayoría de sales de calcio, que se encuentran principalmente en células parenquimáticas. Los cristales y depósitos de sílice tienen gran

importancia en la trabajabilidad de la madera y se conocen popularmente como cenizas, se sabe que para maderas duras y suaves su contenido figura entre 0.1% y 1%.

En general, la madera presenta una composición química elemental cualitativa de 50% de carbono, 44% de oxígeno y 6% de hidrógeno. En cuanto a composición química varía entre maderas duras y blandas.

1. ANTECEDENTES

En Guatemala se tiene poca información acerca de las alternativas del uso de la madera de pino; se han documentado algunos proyectos por parte de instituciones gubernamentales pero no se han llevado a cabo. Sin embargo, es en México y América del Sur donde se encuentra la mayor parte de investigaciones relacionadas a la madera. Entre los trabajos de investigación más importantes se encuentran los siguientes:

1. “Determinación de componentes químicos de la madera de cinco especies de encino del estado de Puebla”, realizado por J. Amador Honorato Salazar y Jorge Hernández Pérez, en la ciudad de México en el año 1998. En este trabajo se determinaron los contenidos de celulosa, lignina, pentosanos, extractivos solubles en etanol benceno, ceniza, sílice y taninos en una mezcla de albura duramen.
2. “Polifenoles curtientes en corteza de tres especies forestales peruanas”. Tesis realizada por Jaime Guillermo Guerrero Marina, en la Universidad de Chile, en el año 1997. En este trabajo de investigación, se realizó un estudio sobre los componentes estructurales, cenizas, extraíbles y principalmente los polifenoles curtientes (taninos) presentes en tres especies forestales de Chile.

2. MARCO TEORICO

2.1 Información general del pino blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl)

- ❖ **Nombre Científico:** *Pinus pseudostrobus* Lindl. (Pino triste, pino blanco)

- ❖ **Características:** las bases de las brácteas son esparcidas y frecuentemente adheridas dejando huellas sumergidas en las ramas. Esta característica sirve para diferenciar de la especie de *P. montezumae*, porque esta última tiene retoños gruesos, con una apariencia más o menos rojiza y las partes adherentes de las brácteas son densas, fuertes y persistentes. La madera de esta especie es la más fina de los pinos de Centroamérica, en color es más clara que *P. Oocarpa* y ligeramente más liviana.

- ❖ **Distribución:** se puede encontrar en las partes altas del departamento de Guatemala, en Sacatepéquez, en casi todo el departamento de Chimaltenango, y partes de Totonicapán, Alta Verapaz, San Marcos y Huehuetenango.

2.1.1 Taxonomía de la planta

Reino: Vegetal

División: Pinophyta

Clase: Pinopsida

Orden: Pinales

Familia: Pinaceae

Género: *Pinus*

Especie: *Pseudostrobus*

Nombre común: Pino Triste

Nombre científico: *Pinus Pseudostrobus* Lindl

2.1.2 DESCRIPCION BOTANICA

- ❖ **Dimensión:** árbol de 15 a 45 m de altura. Desde 0.40 m hasta 1.50 m de diámetro

- ❖ **Corteza:** Es de color grisáceo oscuro en la base hasta morena grisácea en la cúspide. En el pie está longitudinalmente agrietada formando espesas y largas placas en ejemplares adultos, mostrando en el fondo de la hendidura una coloración amarillenta, a veces con muy suaves tonalidades rojizas en la parte alta de los árboles jóvenes, ordinariamente protegidas por la copa. En las ramas jóvenes y en el tercio superior de las demás, su color es gris moreno, y en el extremo de las ramas, especialmente en la parte cubierta por las hojas, (en dirección hacia la cima), la corteza es completamente lisa y de color moreno amarillento.

- ❖ **Hojas:** Son de color verde oscuro, acículas en grupos de 4 a 6; de 16 a 35 cm de largo y 0.75 a 1.25 cm de ancho, extendidas. Follaje ordinariamente de dos años, a veces conservando parte del tercero, por lo general cubriendo larga extensión de los ramos, particularmente en ejemplares sacados de su hábitat natural. En ejemplares jóvenes con tres años de follaje muestran sus ramas erguidas casi totalmente cubiertas de hojas rectas o brevemente arqueadas, y en la cúspide, progresivamente en regularización, están elegantemente arqueadas. Tienen fascículos de 4, 5 y 6 agujas, son finas, flexibles, triangulares, catetos interno sub-cóncavo, externos brevemente convexo, finamente aserrados, de color verde claro con tonalidades azuladas, brillantes, de 15 a 32 cm de longitud por 0.7 a 1 mm de espesor.

- ❖ **Vainas:** De 1.5 a 2.6 cm de longitud por 1.6 a 2.1 mm de espesor, de color moreno amarillento, lustrosas las recientes, tornándose oscuras con la edad, hipodermo casi uniforme con leves salientes hacia el clorénquima, 2 a 3 hileras de células gruesas, paredes exteriores de las células endodérmicas engrosadas, canales resiníferos 2 a 3.

Figura 1. Hojas del pino blanco



Fuente: www.papelnet.com

- ❖ **Frutos:** Son conos de forma ovoide a cilíndrica, color café claro, de 7.5 a 15 cm de largo y de 6 a 8 cm de ancho, planos, ápice elongado de hasta 15 cm de largo. Los conos se agrupan de 2 a 3 al final de las ramas.
- ❖ **Fuste:** Ordinariamente recto y a veces ligeramente combado
- ❖ **Copa:** Irregularmente coniforme, desde poco densa hasta medianamente densa. Ramas finas y extendidas, las nuevas tienen un color blanco azulado.
- ❖ **Semilla:** Pequeñas; de 6 mm de largo, café oscuras, con un ala articulada de 20 a 23 mm de largo, la semilla contiene de 6 a 9 cotiledones; ovals, ligeramente comprimidas, como término medio de unos 8 mm de longitud, largamente alargadas.

Figura 2. Copa del pino blanco



Fuente: www.papelnet.com

Figura 3. Frutos del pino blanco (Bellotas)



Fuente: www.infomaniak.com

2.1.3 ECOLOGÍA DE LA PLANTA

❖ **Asociación:** Esta especie está relacionada con la especie *montezumae*, con la cual se tiene cruzamiento y los productos de aquella hibridación, producen variedades muy difícil de identificar y de agrupar. En algunos casos, no es posible a simple vista resolver su identidad. Los largos y delgados retoños entrenodales, la corteza lisa en los árboles jóvenes, ramificación y la parte superior de los fustes, la separa de la especie de *montezumae*. Frecuentemente se asocia con *P. Ayacahuite*

❖ **Requerimientos ambientales**

Elevación mínima: 1500 msnm

Elevación máxima: 3000 msnm

Precipitación mínima: 800 mm

Precipitación máxima: 1500 mm

Temperatura mínima: 12°C

Temperatura máxima: 21°C

Luz: es una especie exigente de luz que resiste las sequías y heladas

Limitaciones: es importante emplearle donde no hay déficit de agua durante el año

❖ **Fenología**

Inicio época floración: noviembre

Final época floración: diciembre

Inicio época fructificación: enero

Final época fructificación: febrero

❖ **Características de la madera de pino blanco**

Color del duramen: amarillo claro

Grano: derecho

Color de albura: amarillo claro

Textura: fina

Brillo o lustre: rayado

Olor: ausente

Sabor: ausente

- ❖ **Propiedades físicas:** Madera moderadamente pesada, peso específico 0.49 a 0.66 g/cm³. Poco pesada en árboles jóvenes, moderadamente liviana.
- ❖ **Propiedades mecánicas:** Es una madera de mediana resistencia y más flexible que Pinus Oocarpa, comparable mecánicamente con P. Maximinoi.

2.1.4 USOS

Artesanías

Cajones acústicos

Canceles

Carpintería en general

Chapas

Construcciones generales

Ebanistería

Instrumentos musicales o partes de estos

Pisos

Paredes interiores

Reforestación

2.2 La madera, propiedades generales y específicas

La madera es una sustancia dura y resistente que constituye el tronco de los árboles; es una sustancia compleja desde el punto de vista anatómico y químico. De la estructura anatómica dependen las propiedades de resistencia mecánica, aspecto, resistencia a la penetración del agua y productos químicos, resistencia a la putrefacción, calidad de la pulpa y la reactividad química. Para usar la madera en la industria química del modo más eficaz, no solamente es preciso conocer las propiedades de las diferentes sustancias que la constituyen, sino también cómo se encuentran distribuidas en las paredes celulares. Las células que constituyen los elementos estructurales de la madera son de formas y tamaños distintos y

crecen íntimamente unidas entre sí. Las células de la madera seca pueden estar vacías o parcialmente ocupadas por depósitos, por ejemplo: gomas o resinas; o por tilosis, que son crecimientos de intrusión de un tipo de célula a otro. Las células largas y puntiagudas se conocen por el nombre de fibras o traqueidas y varían mucho de longitud dentro de un mismo árbol y entre especies distintas. Las fibras de los árboles de madera dura tienen una longitud de 1 mm; las fibras de madera blanda varían de 3 a 8 mm. (Ref. 12)

La madera como tal se usa extensamente en las industrias químicas a causa de sus propiedades físicas y mecánicas; es fuerte, puede trabajarse con herramientas sencillas, resiste los ácidos débiles, es un buen aislante térmico y eléctrico y tiene un coeficiente elevado de resistencia-peso. Como materia prima química, la madera puede usarse para obtener diversos productos. A diferencia de lo que sucede con la mayor parte de las materias primas, la madera es un recurso renovable. (Ref. 7)

Entre las principales propiedades físicas que la madera posee se encuentran:

- ❖ **Resistencia al calor y al fuego:** la madera es muy estable a las temperaturas ordinarias. La degradación de la madera a elevadas temperaturas es un proceso de descomposición de los componentes sólidos en líquidos volátiles y gases y va acompañada de una reducción en el peso, por la cual puede seguirse cómodamente la velocidad de descomposición. La pérdida de peso varía no solo con la temperatura, sino también con el tiempo de calentamiento. Los diferentes componentes químicos de la madera no se descomponen a la misma velocidad. Cuando se calienta la madera, la hemicelulosa¹ se descompone más rápidamente que la α -celulosa²; finalmente, la madera se vuelve más rica en lignina³, se torna más porosa, menos densa y se inflama con mayor facilidad a medida que sufre descomposición térmica, por ello la temperatura de ignición de la madera no es una constante, sino que varía con el tiempo de calentamiento. (Ref. 7)

- ¹ Ver glosario
- ² Ver glosario
- ³ Ver glosario

- ❖ **Resistencia a los agentes químicos y a la pudrición:** la madera se utiliza mucho como material estructural en la industria química por su resistencia a los ácidos débiles, lo cual la hace en mucho, superior al acero común, hormigón, caucho y algunos plásticos. De los ácidos minerales corrientes, el ácido nítrico (HNO_3) es el que ataca más a la madera. Las soluciones alcalinas atacan a la madera más rápidamente que los ácidos de la misma concentración. La madera presta buen servicio en contacto con las salmueras concentradas, pero oxidantes fuertes son perjudiciales. Rara vez se utiliza madera cuando se requiere una resistencia frente al cloro y a las soluciones de hipoclorito. En contacto con el hierro, en condiciones de humedad, la madera puede sufrir un deterioro serio en muy pocos años. La variación de la resistencia al ataque químico depende de la estructura anatómica, que rige la velocidad de penetración del agente químico, y de la composición química de la pared celular, que afecta la velocidad de acción en el punto de contacto. (Ref. 7)

2.3 Composición elemental de la madera

La madera está constituida principalmente por células tubulares orientadas verticalmente (fibras) cementadas por la lámina media. Los componentes químicos se encuentran distribuidos en una red que se entrelaza con esa estructura. La composición elemental de muchas especies de madera es aproximadamente la siguiente: Carbono: 48-50% - Hidrógeno: 6.0-6.2% - Nitrógeno: 0.1-0.3%

Pequeñas cantidades de minerales –principalmente calcio (Ca), potasio (K) y magnesio (Mg)- están presentes en las cenizas de madera. El contenido de cenizas queda entre los límites del 0.2 al 1%. Algunas maderas exóticas pueden llegar al 8% y más todavía. Al describir los componentes químicos de la madera, suele distinguirse entre componentes de la pared celular y materia extraña. Los componentes de la pared celular son la lignina y los polisacáridos totales, constituida por celulosa y hemicelulosa. La materia extraña está constituida por sustancias que pueden separarse por extracción con disolventes no reactivos,

residuos de proteínas del protoplasma de la célula en crecimiento y componentes minerales, algunos muy difíciles de eliminar. (Ref. 14).

Tabla I. Composición química de la madera (%)

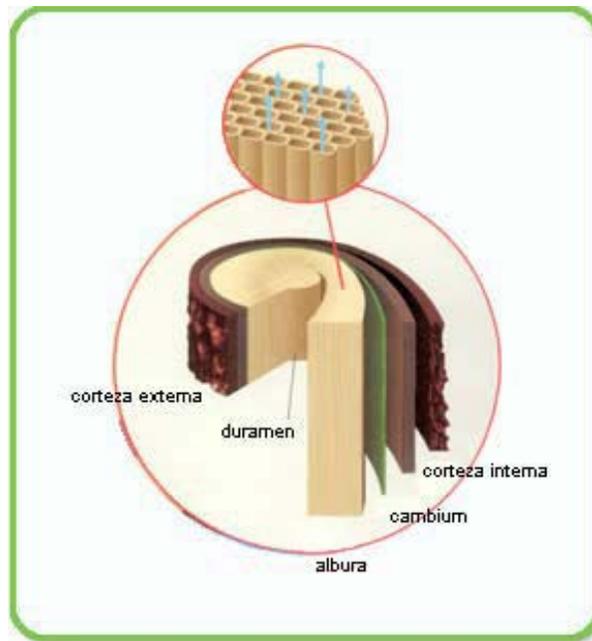
| Componentes | Coníferas | Latifoliadas |
|------------------------------|------------------|---------------------|
| Holocelulosa | 59.8-80.9 | 71.0-89.1 |
| Celulosa | 30.1-60.7 | 31.1-64.4 |
| Poliosas | 12.5-29.1 | 18.0-41.2 |
| Pentosanos | 4.5-17.5 | 12.6-32.3 |
| Lignina | 21.7-37.0 | 14.0-34.6 |
| 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. 12, pag. 35

La madera contiene pequeños tubos que transportan agua desde las raíces a las hojas; estos vasos conductores están dispuestos verticalmente en el tronco y son los que forman su veta. El tronco de un árbol no crece hacia lo alto (excepto en su parte superior), sino a lo ancho, y la única sustancia del tronco destinada a su crecimiento es una fina capa situada entre la corteza y la madera, llamada *cámbium*⁴; a través del cual la savia cruda, produce el tejido fibroso externo, así como la zona interna a través de la cual circula la savia.

• ⁴ Ver glosario

Figura 4. Estructura de la madera



Fuente: www.papelnet.com

2.4 Componentes estructurales

2.4.1 Celulosa

La celulosa es un polisacárido completamente lineal que está compuesto de moléculas de glucosa ($C_6H_{12}O_6$), (un monosacárido formado a través de la fotosíntesis del dióxido de carbono (CO_2)), que se enlaza sucesivamente a través de un enlace glucosídico β (1-4).

Es el principal componente de la membrana celular de la mayor parte de las plantas. Comprende, por lo menos, una tercera parte de toda la materia vegetal y es el más abundante de todos los compuestos orgánicos naturales. Además de hallársela en todas las plantas

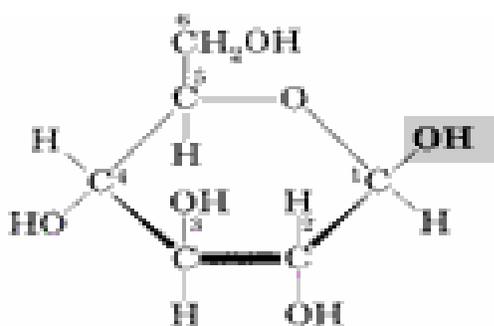
superiores, se presenta también en las formas inferiores de la vida vegetal, como los musgos, helechos, algas y hongos.

Técnicamente se da el nombre de celulosa a las fibras blancas que se obtienen cuando se somete la materia vegetal a tratamientos de purificación mediante los cuales se extraen casi totalmente los demás componentes de la planta.

2.4.1.1 Estructura química

La celulosa está compuesta sólo por unidades de D-glucosa ($C_6H_{12}O_6$) que se unen en una forma 1,4 (el carbono 1 en un anillo al carbono 4 en el siguiente anillo) y que tienen configuración β . Las unidades de glucosa son unidas cuando el agua es eliminada por la combinación de grupos H^+ y OH^- . Cada molécula de glucosa añadida es rotada 180° y la unión de dos unidades de glucosa da como resultado un disacárido llamado celobiosa.⁵

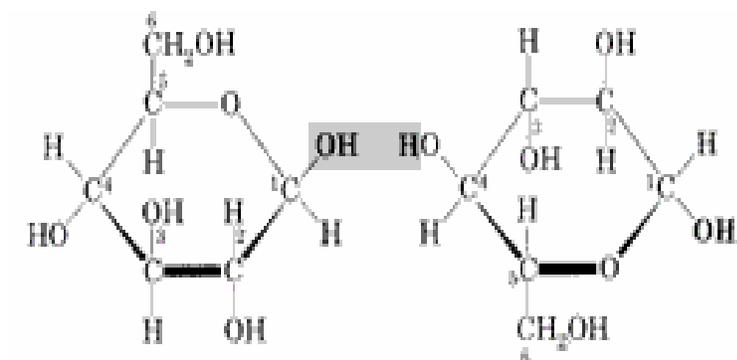
Figura 5 Estructura química de la glucosa



Fuente: www.generalchemistryonline.com

• ⁵ Ver glosario

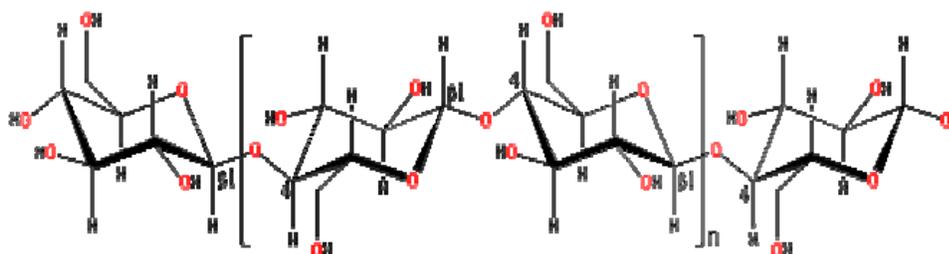
Figura 6. Estructura química de la celobiosa



Fuente: www.generalchemistryonline.com

El proceso de la adición indefinida de unidades de glucosa es llamada polimerización. La fórmula empírica de la celulosa es $(C_6H_{10}O_5)_n$ donde **n** es el grado de polimerización o número de monómeros de glucosa.

Figura 7. Estructura molecular de la Celulosa

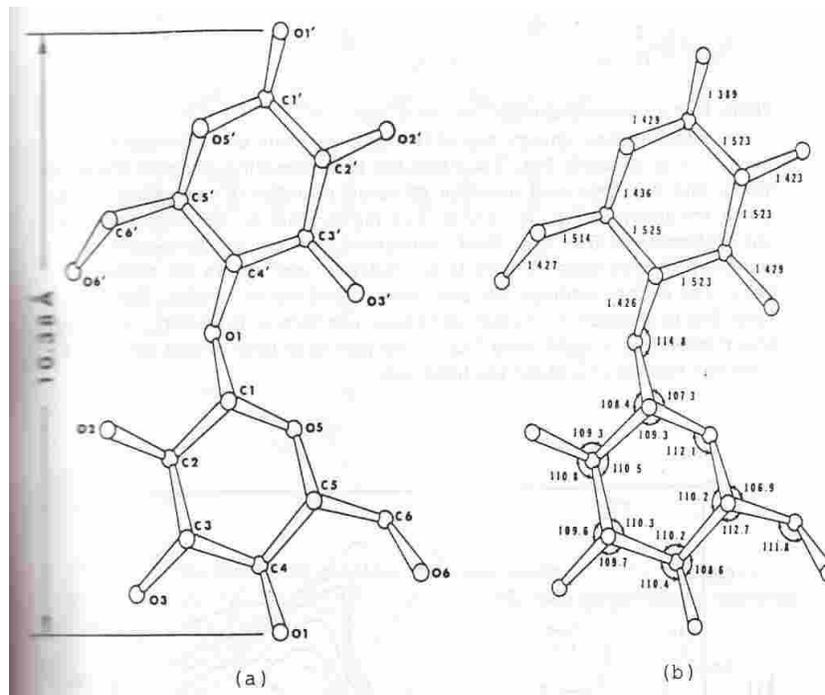


Fuente: www.papelnet.com

Las moléculas de celulosa tienen una fuerte tendencia a formar enlaces por puentes de hidrógeno. Cada unidad de glucosa forma enlaces intermoleculares. La existencia de estos enlaces tiene un efecto importante en la reactividad que presentan las cadenas celulósicas. Los enlaces hidrógeno intermoleculares permiten una estructura fibrilar de alta cristalinidad y son

difíciles de penetrar por disolventes y reactivos. Por el contrario, las zonas relativamente más desordenadas (amorfás⁶) son más susceptibles y más accesibles a las reacciones químicas (Ref. 17)

Figura 8. Modelo molecular para el enlace de celulosa



Fuente: Ref. 6, pag. 92. a) Numeración de átomos en unidades repetidas de celobios
 b) Longitud de enlaces, ángulos y conformación de los enlaces.

El peso molecular de un material celulósico produce efecto importante en algunas de sus propiedades físicas; por ejemplo: dentro de ciertos límites las propiedades mecánicas mejoran cuando se aumenta el peso molecular. Por esta razón, en la industria de la celulosa se considera que la determinación de la viscosidad, que da la medida del peso molecular es uno de los ensayos más importantes de la celulosa. También tiene cierta utilidad práctica la distribución del peso molecular en un material celulósico, ya que de ordinario la fracción de bajo peso molecular produce efecto adverso en las propiedades mecánicas. (Ref. 7)

• ⁶ Ver glosario

2.4.1.2 Reacciones

❖ Degradación.

La designación de la celulosa se puede efectuar por diversos tratamientos, y de ella resulta principalmente la vaporización de moléculas de la cadena de celulosa y la reducción del peso molecular. En algunos procedimientos comerciales se degrada deliberadamente la celulosa para reducir la viscosidad de ésta y de sus derivados y con ello mejorar su manipulación en las operaciones de hilado, rociado de lacas y moldeado.

Cuando se hidroliza parcialmente la celulosa con ácidos, se obtiene “hidrocelulosa” o celobiosa (ver figura 7), cuyas propiedades son determinadas por las circunstancias en que se efectúa la hidrólisis. Las hidrocelulosas suelen tener menos viscosidad y menor resistencia a la tensión, y mayor poder reductor y solubilidad en soluciones alcalinas acuosas que las celulosas con que se preparan. En la formación de hidrocelulosa probablemente la única alteración química es la ruptura de enlaces β -1,4-glucosídicos y la consiguiente producción de cadenas más cortas de celulosa. Si se hace la hidrólisis⁷ con ácidos (hidrólisis total), la celulosa se convierte así cuantitativamente en glucosa ($C_6H_{10}O_5$), (ver figura 6).

La degradación de celulosa por medio de agentes oxidantes se puede efectuar en varias condiciones con la formación de “oxicelulosas”, que difieren notablemente en sus propiedades. En general, se forman oxicelulosas reductoras por oxidación en medio neutro o ácido, y se forman oxicelulosas ácidas en medio alcalino de oxidación.

Si se calientan fibras de celulosa, particularmente a temperatura mayor de 140°C, se reducen la viscosidad y la resistencia a la tracción, se forman grupos reductores y aumenta su solubilidad en álcali. Las temperaturas muy altas destruyen la celulosa. La destilación destructiva al vacío produce β -glucosana, dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), agua (H_2O), metano (CH_3) y etileno ($CH_2=CH_2$).

• ⁷ Ver glosario

La luz disminuye la resistencia a la tracción y la viscosidad de las fibras de celulosa. El curso de la degradación es modificado por la temperatura y la humedad. El oxígeno, los catalizadores metálicos y ciertos colorantes aceleran la degradación por la luz. Las reacciones que se producen en la degradación fotoquímica son muy complejas, pero la principal reacción es la oxidación.

Ciertas bacterias, hongos y protozoos degradan la celulosa. De la clase de microorganismos depende la naturaleza de los productos intermedios (azúcares, ácidos alifáticos⁸ y alcoholes). El dióxido de carbono y el agua son los productos finales de la descomposición de la celulosa por microbios.

❖ **Reacciones por intercambio de bases.**

Los materiales celulósicos se asemejan a las zeolitas⁹ en su propiedad de participar en reacciones de intercambio de cationes, en las que unos iones metálicos son permutados por otros o por iones de hidrógeno. Estas reacciones son reversibles, si bien los cationes multivalentes son retenidos más fuertemente por las fibras de celulosa que los cationes de metales alcalinos. La facultad de intercambio que tienen las fibras celulósicas o purificadas se debe principalmente a las impurezas que contiene, pero esa misma propiedad en celulosas purificadas probablemente es debida a los grupos ácidos que hay en las moléculas de celulosa. Las reacciones de intercambio de cationes de la celulosa son de importancia práctica en las operaciones de lavado que se ejecutan en la fabricación de celulosas químicas, así como por el efecto que producen en el poder de aislamiento (resistencia eléctrica) del papel, propiedad que es más eficaz cuando la celulosa tienen enlazados cationes bivalentes, y lo es menos cuando los cationes son univalentes.

• ⁸ Ver glosario

• ⁹ Ver glosario

2.4.1.3 Propiedades físicas

❖ Porción de humedad.

De igual manera que la mayoría de los sólidos, la celulosa absorbe o libera el vapor de agua y otros vapores que hay en la atmósfera hasta que alcanza el equilibrio. El contenido de humedad en equilibrio de la celulosa varía según las variaciones de la humedad relativa de la atmósfera en que se halla. Con determinada humedad relativa¹⁰, el contenido de humedad que se obtiene en el proceso de deshumedecimiento (desorción) es mayor que el que se alcanza cuando está siendo atraída la humedad (adsorción). La proporción de humedad de la celulosa produce señalado efecto en algunas de sus propiedades. Por ejemplo: si por el secado se elimina toda la humedad, se reduce notablemente la reactividad de las celulosas químicas durante la esterificación. La conductividad eléctrica de la celulosa aumenta considerablemente cuando es mayor el contenido de humedad y en esto se fundan los instrumentos eléctricos con que se mide rápidamente la humedad contenida en la celulosa.

❖ Solubilidad y viscosidad.

No obstante ser higroscópica¹¹, la celulosa no se disuelve en agua, pero sí en soluciones concentradas de ácidos minerales fuertes; por ejemplo: ácido sulfúrico (H₂SO₄) al 72%, ácido clorhídrico (HCl) al 40% y ácido fosfórico (H₃PO₄) al 85%. Experimenta hidrólisis rápida en soluciones de ácidos inorgánicos a la temperatura ordinaria, pero la hidrólisis es muy lenta a bajas temperaturas. El hidróxido de sodio (NaOH), que probablemente es el mejor disolvente entre los hidróxidos alcalinos, produce su máxima acción disolvente en concentración de 8%, a temperatura cerca del punto de congelación de la solución. La potencia disolvente de la solución acuosa de

• ¹⁰ Ver glosario

• ¹¹ Ver glosario

hidróxido de sodio crece un tanto con la adición de óxido de cinc (ZnO). El mejor disolvente de la celulosa es la “solución de hidróxido de cupramonio” $\text{Cu}(\text{NH}_3)\text{OH}$ que se emplea en la fabricación del rayón de cupramonio. El disolvente, que tiene color azul, contiene el complejo $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4(\text{OH})_2$, hidróxido tetraminocúprico o hidróxido cúprico amoniacal, y se prepara disolviendo hidróxido cúprico en solución acuosa de amoníaco o pasando aire por solución acuosa de amoníaco en la que se ponen torneaduras de cobre limpias.

❖ **Densidad.**

De los estudios sobre la estructura de la fibra se deduce que no es uniforme la densidad de celulosa en una sola fibra. El promedio de densidad varía según su procedencia y puede ser modificada por tratamiento químico.

❖ **Propiedades Ópticas.**

Las fibras de celulosa tienen dos índices de refracción, y la diferencia entre las refracciones axial y transversa se llama doble refracción. Las fibras de celulosa son fluorescentes a la luz ultravioleta.

2.4.1.4 Análisis

Los análisis que se han realizado presentan los siguientes componentes en la celulosa:

- ❖ **α -celulosa.** Es la porción que queda sin disolver cuando en circunstancias uniformes se remoja primero el material en solución de 17.5 o 18% de hidróxido de sodio y luego, añadiendo agua a ésta, en solución de hidróxido más diluida de determinada concentración. Se separa por filtración la α -celulosa, se lava, seca y pesa.

- ❖ **β -celulosa¹²**. Es la sustancia que se precipita al acidular el filtrado sobrante de la determinación de α -celulosa.
- ❖ **γ -celulosa¹³**. Es la sustancia que queda disuelta en el filtrado sobrante de la determinación de β -celulosa. Se puede hacer la determinación directa por el método de oxidación, o indirectamente restando del peso de la muestra el peso de las celulosa α y β .
- ❖ **Extracto etéreo**. Es el contenido de grasas, ceras, resinas y sustancias similares y se determina por extracción en un aparato Soxhlet.
- ❖ **Ceniza**. Se puede determinar por cualquiera de los procedimientos conocidos para determinar el contenido de ceniza de sustancias orgánicas. (Ref. 8)

2.4.1.5 Producción de celulosa en el árbol

Las plantas verdes producen en sus hojas las sustancias para su crecimiento mediante el proceso de fotosíntesis, una compleja reacción química que se lleva a cabo en la hoja con ayuda de la clorofila. Consiste en la combinación de la energía de la luz solar, el dióxido de carbono del aire y el agua absorbida del suelo para producir azúcares, tales como la glucosa ($C_6H_{10}O_5$). La glucosa llega al cámbium (capas situadas entre la corteza y la madera del árbol) para ser sintetizada dando origen a la celulosa. La hoja posee una capa protectora externa llamada epidermis que contiene los cloroplastos que absorben el dióxido de carbono necesario para la fotosíntesis.

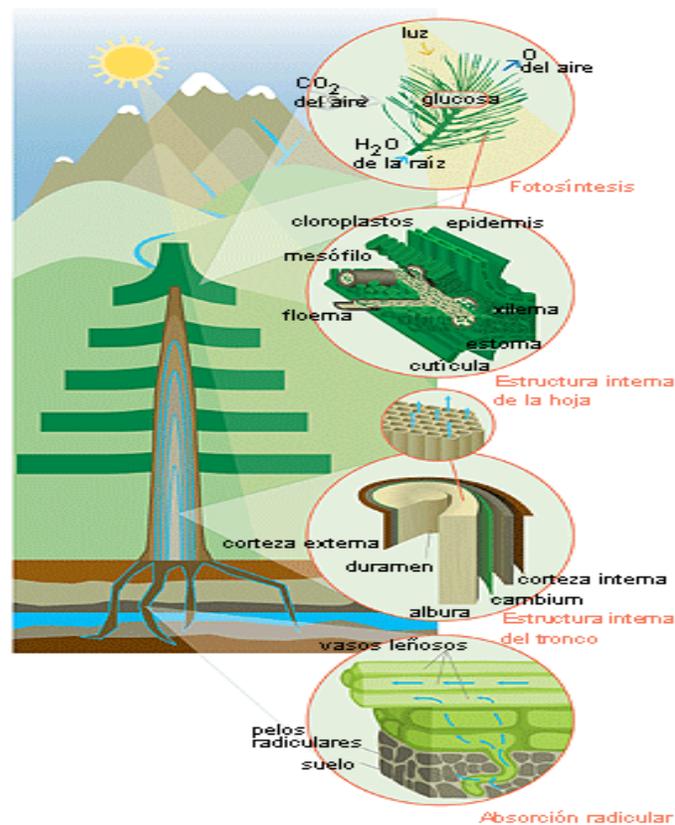
En las superficies de las raíces existen pelos que se extienden por el suelo que absorben el agua y sales minerales mediante un proceso de ósmosis. El agua y los

• ¹² Ver glosario

• ¹³ Ver glosario

minerales en forma de savia fluyen a través de los vasos leñosos, hasta alcanzar las hojas en la cima del árbol.

Figura 9. Formación de celulosa en el árbol



Fuente: www.papelnet.com

2.4.1.6 Utilidad de la celulosa

Para establecer la utilidad y los aportes productivos de la pulpa de la celulosa, es interesante conocer sus usos de acuerdo a la clasificación de las diferentes formas en que ella es producida:

- ❖ **Pulpa celulosa mecánica deshidratada:** obtenida principalmente del pino insigne, consiste en una pasta de madera molida y refinada, a la que se le ha extraído el agua. Se le utiliza como materia prima en la fabricación de papel de diarios, guías de teléfono y volantes. Es 100% madera.

- ❖ **Pulpa Celulosa Kraft blanqueada deshidratada:** producida a partir de pinos o eucaliptos, que han sido sometidos al proceso de producción denominado kraft y posteriormente a un proceso de blanqueo, al que se le ha extraído el agua. Esta celulosa es la más utilizada y se usa como materia prima para la fabricación de diversos papeles finos, de escritura e imprenta.

- ❖ **Pulpa Celulosa Kraft cruda deshidratada:** Es una pasta de celulosa cruda a la que se le ha extraído el agua y que posteriormente no es sometida a un proceso de blanqueo. Constituye la materia prima para la fabricación de papeles de envolver, sacos de papel, cartulinas y cartones.

- ❖ **Fardos de celulosa blanqueada:** constituyen paquetes de láminas de celulosa blanqueada de fibra larga. Constituye la materia prima para la fabricación de papeles finos, de escritura e imprenta. En general, cada fardo pesa aproximadamente 250 kilos.

- ❖ **Pliegos de celulosa blanqueada:** producidos a partir de pino insigne o eucalipto, son láminas de celulosa que han sido blanqueadas mediante un proceso químico. Su forma de lámina facilita su transporte y manipulación. Se utiliza en la fabricación de papeles de escritura e imprenta y cartulinas

Figura 10. Celulosa Cruda o Kraft



Fuente: www.papelnet.com

Figura 11. Celulosa blanqueada o química



Fuente: www.papelnet.com

2.4.2 Lignina

Del latín *lignum* (leño) es, después de la celulosa, el principal componente de la madera. Siempre íntimamente asociada a la celulosa en el tejido leñoso, es probable que esté químicamente combinada con celulosa, carbohidratos u otros componentes. (Ref.7). Es el

segundo polímero más abundante en la superficie de la tierra después de la celulosa y está considerado un heteropolímero amorfo ópticamente inactivo¹⁴. Desde el punto de vista químico, la lignina exhibe un alto grado de variabilidad estructural dependiendo de la especie y el tejido, y también del tipo de célula. La deposición de la lignina en las paredes celulares proporciona rigidez y dureza a los tejidos vegetales, a la vez que los impermeabiliza. Es una sustancia polimérica que tiene grupos hidroxilos (OH) y metoxilos (CH₃O). (Ref. 14) La lignina es el componente de la pared celular que diferencia la madera de otros materiales celulósicos producidos por la naturaleza. Siempre ocurre en asociación con la celulosa, sin embargo, la celulosa puede ser encontrada pura en la naturaleza. No es un carbohidrato, es predominantemente aromático. (Ref. 12)

Algunos usos de la lignina que se fundan en su naturaleza son su conversión en vanilina, en materias curtientes, en dispersantes para reforzar materiales de relleno para el caucho, entre otros.

2.4.2.1 Propiedades generales

Según su origen, tienen densidades de 1.3 a 1.4 y un índice de refracción de 1.6. Su color suele ser pardo, aunque experimentalmente se han hecho muestras de ligninas de colores muy claros. Su insolubilidad en ácido sulfúrico de 72% es la base de una prueba cuantitativa para distinguir las de la celulosa y otros carbohidratos en maderas y pulpas de madera. Las ligninas comerciales son solubles en soluciones alcalinas acuosas, y algunas son también solubles en muchos compuestos orgánicos oxigenados y en aminas. Por el calor, las ligninas no se funden, sino que se reblandecen y después se carbonizan.

• ¹⁴ Ver glosario

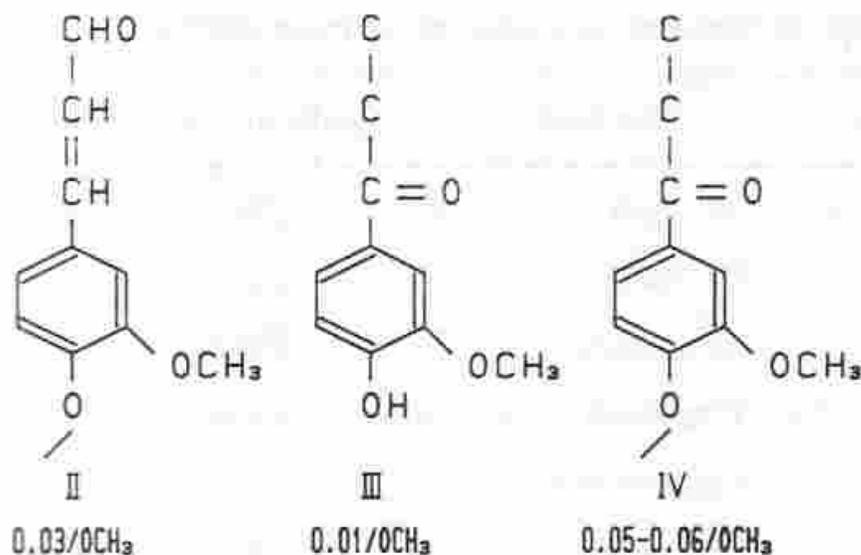
2.4.2.2 Composición y estructura

La composición elemental de las ligninas varía entre 61-65% de carbono (C), 5.0-6.2% de hidrógeno (H), y el resto de oxígeno (O). El calor de combustión se ha cifrado en 6278 kilocal/Kg. Las ligninas consisten en una mezcla de polímeros de un monómero de peso molecular 840-880.

La unidad molecular es de estructura aromática y se caracteriza por un hidroxilo fenólico (C_6H_5OH) y tres o más hidroxilos alcohólicos secundarios (R_2OH) o terciarios (R_3OH). También hay un número variable de metoxilos (CH_3O). El número de metoxilos depende del origen de la lignina y del procedimiento usado para su separación de otros componentes de la madera. Así, las maderas duras dan ligninas que contienen más grupos metoxilos que las maderas blandas. El 20-21% de metoxilo en las ligninas de maderas duras corresponde a seis grupos metoxilos por monómero: el 14-15% de metoxilo en las ligninas de maderas blandas sugiere cuatro grupos metoxilos por monómero. (Ref.4)

El estudio de los espectros de absorción ultravioleta de las ligninas indica un anillo bencénico con un átomo de oxígeno y la presencia de grupos carbonilos o enlaces dobles conjugados con el anillo bencénico. Espectrofotométricamente se ha determinado la presencia de grupos carbonilo a través de la reducción de aldehídos y cetonas en solución alcalina. En adición a estos grupos carbonilo (en total, 0.09 a 0.11/ OCH_3) se determinó que pueden existir conjugados de éstos en proporción más o menos igual a la de los grupos carbonilo (Ref. No. 6).

Figura 12. Grupos carbonilo presentes en la lignina



Fuente: Ref. No. 6, pag. 136

El espectro infrarrojo sugiere también un núcleo aromático y muestra una razón elevada de grupos alifáticos saturados C-H. También aparecen hidroxilos y carbonilos de aldehído o cetona. El estudio con rayos X muestra imágenes típicas de red cristalina de las sustancias orgánicas de peso molecular elevado. La baja viscosidad específica de las soluciones de ligninas indica que el grado de polimerización es mucho menor que el de la celulosa y que los polímeros no están formados por cadenas largas. (Ref. 14)

2.4.2.3 Fuentes primarias

Los árboles son, por supuesto, la fuente más abundante de lignina. Tanto la corteza como la madera contienen lignina. Las maderas coníferas (maderas blandas) suelen contener más lignina, en promedio 28%, que las maderas de los árboles de hoja caediza (maderas duras), que en promedio tienen 24%. La mayor parte de la lignina de la madera se encuentra en la sustancia incrustante que está entre las fibras, las laminillas intermedias y en las paredes

de la célula. La cantidad de lignina varía según la especie del árbol y aun en árboles de la misma especie. El contenido de lignina varía también con otros factores: las células radiales tienen más lignina que el tejido ordinario de la madera; el corazón de la madera contiene más lignina que la albura, y los árboles maduros tienen más lignina que los jóvenes.

2.4.2.4 Utilización de la lignina

Se ha propuesto el uso de la lignina en adhesivos; condensada con aminas y fenoles, es apropiada para pegar chapas de madera en la fabricación de maderas contrachapadas. La lignina obra como adsorbente en gases y soluciones acuosas y puede regenerarse para volverla a usar. Los acumuladores eléctricos tienen una vida mucho más larga y una capacidad mayor, especialmente a temperaturas bajas, cuando se incorpora lignina en las pastas de plomo o en los separadores. Se ha citado el empleo de aglutinantes de lignina para briquetas, artículos cerámicos, machos de fundición. Los cementos fluyen mejor y con menos agua cuando se incluyen derivados de lignina solubles como agentes peptizantes y dispersantes.

Hay inhibidores de corrosión, especialmente para tubos de calderas, basados en una fina película de lignina. Los detergentes hechos con las sales solubles de lignina son compatibles con jabones y eficaces en aguas duras. Los agentes dispersantes hechos con soluciones alcalinas acuosas de lignina tienen varias aplicaciones. Desfloculan las arcillas en cerámica y los pigmentos en las composiciones de látex de caucho. Los lodos de perforación mejoran agregándoles lignina.

Como el quebracho, las soluciones de lignina reducen la viscosidad de los lodos y hacen bajar el punto de gel. En virtud de su naturaleza coloidal, la lignina tiene una acción selladora excelente sobre la pared del orificio y forma barreras impermeables al agua, pero que

hace desaparecer el petróleo. En electrodeposición, se ha propuesto la lignina como coloide¹⁵ estabilizador y para arrastrar las impurezas en soluciones para galvanoplastia.

Las emulsiones son estabilizadas por el uso de lignina. Las emulsiones asfálticas del tipo de rotura lenta son mejoradas por la lignina. Los fungicidas e insecticidas pueden mejorarse usando lignina de tamaño fino. Su insolubilidad en agua y su escaso peso sugieren su uso como portador de ingredientes activos. La lignina no es tóxica, pero sus sales mercúricas son venenos fuertes.

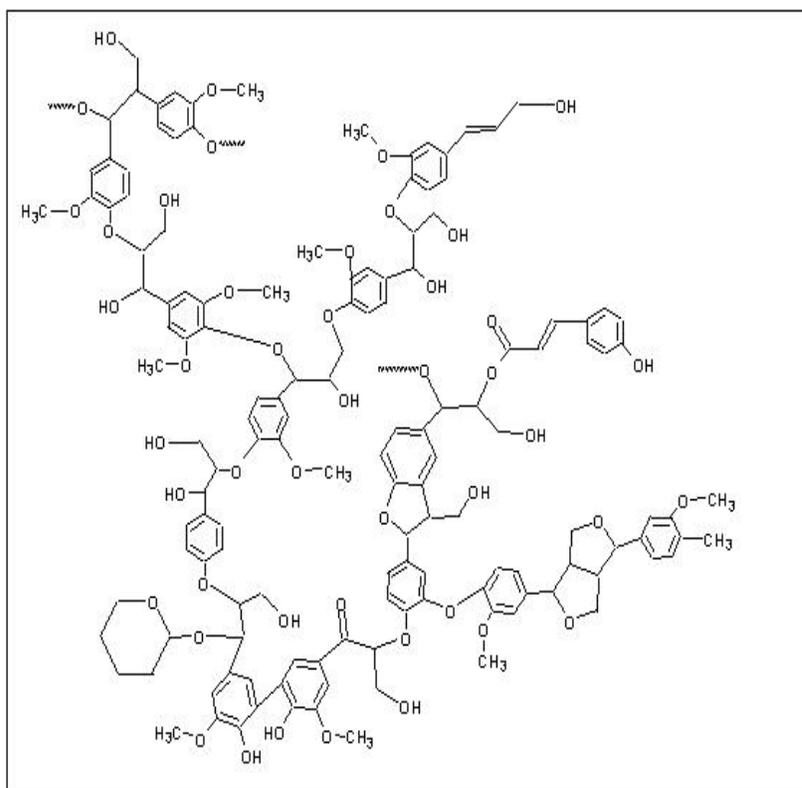
La ayuda para molienda que tiene lignina duplica el rendimiento de la operación para obtener partículas finas. Las tintas que usan lignina en diversos disolventes como vehículo de secado han dado buen resultado. Es también eficaz como dispersante para pigmentos metálicos pesados en tintas de secado rápido. Se han propuesto lacas que utilizan ligninas o sus ésteres o éteres como ingrediente resinoso o como agente endurecedor para la goma laca. Se añade lignina finamente dividida como amortiguador no corrosivo en lubricantes de alta presión.

Los plásticos y las planchas laminadas con lignina han ocupado a muchos investigadores. La lignina puede hacerse reaccionar con aldehídos de manera muy parecida a como reaccionan las sustancias fenólicas, de modo que puede usarse lignina en lugar de una parte de los compuestos fenólicos en las resinas fenol-formaldehído. Para la fabricación de productos laminados, se hacen láminas de pulpa rellena de lignina en una máquina para la fabricación de papel y después se unen aplicando calor y presión, sirviendo la lignina como resina.

La lignina reacciona con las proteínas en medio acuoso para formar coagulados que pueden separarse por filtración o centrifugación continua. Esta es la base de varios procedimientos de separación, purificación y recuperación. Se han hecho trabajos muy importantes de exploración en resinas y plásticos tratando lignina con amidas aromáticas, ácidos policarboxílicos, aldehídos, etc. (Ref. 7)

• ¹⁵ Ver glosario

Figura 13. Modelo estructural para lignina en madera suave



Fuente: www.enviroweb.org/issues

2.5 Componentes Extraíbles

2.5.1 Características generales de los extraíbles

La celulosa, lignina y hemicelulosa son compuestos macromoleculares y son los principales constructores de la pared celular en la madera. En adición a estos compuestos, la madera contiene componentes menores que son solubles en agua y en solventes orgánicos. Estas componentes son llamados “extraíbles”. El contenido de estas sustancias extraíbles en la

mayoría de las maderas es bastante bajo, usualmente abajo del 5% en comparación con los principales componentes.

Las sustancias extraíbles son compuestos moleculares distribuidos en el duramen¹⁶ y corteza del árbol, así como en los canales resiníferos y no se combinan con los constituyentes de la pared celular. Los principales componentes de la madera (lignina y celulosa) contribuyen a las propiedades mecánicas de la madera, sin embargo, las sustancias extraíbles contribuyen a las propiedades como color, olor, durabilidad y algunas otras más. Adicionalmente, las sustancias extraíbles pueden influir en la adhesión, secado y decoloración de la madera. (Ref. 6).

Son de naturaleza muy diferente: fenoles, terpenos, alcaloides, grasas y aún minerales. Además, hay dentro de cada tipo, compuestos particulares. Hay variación en la distribución y cantidad de ellos en el árbol. Así por ejemplo, azúcares, almidones y grasas se concentran en la albura y los compuestos fenólicos en el duramen. También hay variación dentro de la misma madera. Las grasas por ejemplo se concentran en las células parenquimáticas de los radios. Los ácidos resínicos a su vez, son segregados por las células epiteliales de los canales resiníferos.

Diferencias cualitativas y cuantitativas son encontradas entre maderas duras y blandas. Así por ejemplo, los azúcares tienen clara diferencia en su composición, ya que en las maderas suaves son relacionados con funciones fisiológicas, mientras que en maderas duras son formados por la hidrólisis parcial de las hemicelulosas.

Las resinas y grasas consisten en ácidos resínicos y grasos respectivamente. Los ácidos grasos presentes como ésteres con alcoholes así como el glicerol, existen predominantemente

• ¹⁶ Ver glosario

en maderas duras. Por otro lado, los ácidos resínicos libres de ácido carboxílico son frecuentemente más abundantes en madera dura que blanda.

En los polifenoles, la diferencia más significativa es la cantidad en que se encuentra entre las maderas duras y blandas. La mayoría de los polifenoles en madera dura son grandes compuestos moleculares y son difíciles de separar por medio de cromatografía. Generalmente son encontrados exclusivamente en maderas duras.

Tabla II. Diferencias entre los extraíbles de coníferas y latifoliadas

| Sustancia extraíble | Coníferas | Latifoliadas |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Azúcares | Glucosa, fructosa, sucrosa | Xilosa, arabinosa, manosa |
| Resinas y grasas | Ácidos grasos tipo ester | Ácidos resínicos libres de COOH |
| Polifenoles | Pequeñas cantidades | Grandes cantidades |

Fuente: Ref. 6, pag. 218

Para la obtención de material extraíble tanto en corteza como en madera, se recurre principalmente a solventes que arrastran estas sustancias en frío o en caliente y son selectivos según se muestra en la secuencia siguiente:

Tabla III. Tipos de solvente utilizado en la extracción de sustancias extraíbles

| Solvente | Sustancias removidas total o parcialmente |
|---------------------------|--|
| Benceno, éter, cloroformo | Terpenos y derivados: grasas, ceras, ácidos grasos y alcoholes |
| Alcohol, acetona | Polifenoles simples y sus glucósidos, taninos, azúcares |
| Agua fría o caliente | Disacáridos, almidones, gomas, pectinas, taninos y mucílagos |
| Álcali acuoso | Flobafenos, ácidos fenólicos, trazas de lignina, hemicelulosas y suberinas |

Fuente: Guerrero Marina. Ref. 4

2.5.2 Clasificación de los extraíbles

2.5.2.1 Taninos¹⁷

Son compuestos polifenólicos amorfos coloidales no cristalizables, de reacción ácida, caracterizados por una acumulación de hidróxidos alifáticos y fenólicos, y en algunos casos por grupos carboxílicos, elaborados en el interior de las plantas principalmente herbáceas y leñosas, que desempeñan una función bastante heterogénea. A veces como formadores de diversas sustancias (aceites esenciales, resinas, lignina, etc); protectores (propiedades fungicidas y bacteriostáticas, moderador de las oxidaciones, antifermentos); sustancias de reserva, y también son considerados como materiales de desecho. (Ref. 4)

Los taninos han sido descritos como penta-(*m*-digalio) glucosa y por la fórmula empírica C₇₆H₅₂O₄₆. La fórmula molecular es sólo aproximada, aunque se sabe que los taninos

• ¹⁷ Ver glosario

son derivados del ácido gálico. Son conocidos desde hace siglos en su forma bruta por su utilidad para curtir pieles, ya que una solución de este ácido precipita la albúmina.

Los taninos han sido utilizados desde hace mucho tiempo como elementos curtientes de varias pieles de animales, las que luego se destinan para la elaboración de artículos como maletas de viaje, bolsos, zapatos, fundas para armas, monturas para caballerías, entre otros. Se emplean también para preparar tintes negros que sirven para impresiones y en fotografía. Actualmente en algunos países, son utilizados para la fabricación de plásticos y adhesivos por su facilidad de reaccionar con el aldehído fórmico, fabricación de moldes cerámicos y en perforación de pozos petroleros, gracias a su acción dispersante y el control de la viscosidad de los lodos, como desincrustante de calderas de vapor y como clarificadores de vino principalmente como ácido tánico.

Desde el punto de vista farmacológico, son importantes debido a su capacidad de inhibir enzimas digestivas, así como por su interacción con las proteínas, disminuyendo su digestibilidad. Son también antidiarreicos y hemostáticos y últimamente, se reportan propiedades antitumorales, antiviral y otras que dependen de la estructura de cada tanino, aumentando con ello la necesidad de un mayor estudio.

Se localizan en el duramen y la corteza de los árboles, en las raíces, los frutos, corteza, vainas y raíces de casi todos los vegetales. Se extrae mediante repetidas maceraciones¹⁸ en mezclas de alcohol, éter y agua. Cuando los taninos son macerados en agua dan un principio astringente que forma con las pieles un cuerpo imputrescible, esto se debe a que los taninos reaccionan con las proteínas precipitando de sus disoluciones la albúmina, la gelatina, las sales metálicas y los álcalis vegetales, distribuyéndose en forma uniforme por todas las uniones peptídicas, con lo que se logra la transformación de la piel en cuero, tomando un color característico dependiendo del agente curtiente utilizado, dejando inmune contra el ataque de virus, bacterias y hongos, además de no hincharse o hidrolizarse al contacto con el agua. (Ref. 15).

• ¹⁸ Ver glosario

Propiedades y características de los taninos

- ❖ El tanino es un compuesto que se oxida al contacto con el aire y medios alcalinos
- ❖ Es astringente¹⁹
- ❖ Es generalmente amorfo
- ❖ Inodoro
- ❖ Soluble en agua, soluciones hidroalcohólicas (generando coloides), glicerina o propilenglicol y acetona
- ❖ Generalmente insolubles en éter sulfúrico, éter de petróleo o benceno
- ❖ Con las sales de hierro, plomo, cobre, zinc, antimonio, bismuto y mercurio precipitan de sus soluciones. Igualmente ocurre con el agua de cal, el agua de barita, el molibdato de amonio y el tungstato de sodio.
- ❖ Forman precipitados con proteínas, especialmente albúminas y gelatinas
- ❖ Son combustibles con un punto de inflamación de 199°C, una temperatura de auto ignición de 528.5°C
- ❖ Poco tóxicos por ingestión o inhalación. L/D100=0.6 g/kg
- ❖ Ópticamente activos encontrándose para la rotación máxima $[\infty]_D = +76.5$
- ❖ La solución acuosa de tanino posee una conductibilidad eléctrica pequeña

• ¹⁹ Ver glosario

- ❖ Puede medirse mediante espectrofotometría visible aproximadamente con una absorbancia entre 550 y 500 nm (Ref. 15).

A los taninos se les denominan curtientes, por su capacidad de provocar en las fibras de la piel, un aumento de la temperatura de retracción (las fibras de colágeno de la piel se contraen de manera no armónica cuando se les calienta por encima de ciertas temperaturas, siendo ésta más elevada cuando las pieles están curtidas)

Los materiales curtientes se clasifican en 4 tipos:

- ❖ **Curtientes vegetales:** denominados curtientes absolutos porque no necesitan de otros productos auxiliares para curtir pieles.
- ❖ **Curtientes sintéticos:** de poder curtiembre limitado y son usados como productos auxiliares, ya sea para disminuir el tamaño de la molécula de los taninos vegetales facilitando su penetración, mejorar el color del curtido vegetal o mejorar el curtido dando al cuero mayor plenitud.
- ❖ **Curtientes inorgánicos:** dan poca plasticidad de las fibras de cuero, esponjosidad, resbalamiento en superficies húmedas, etc.
- ❖ **Aceites curtientes:** principalmente de pescado, utilizado preferentemente para curtido de pieles tipo gamuza.

Otro tipo de clasificación es:

- ❖ **Taninos pirogénicos:** reaccionan con sales de hierro dando color azul violeta y no precipitan con el agua de bromo. Los anillos bencénicos están unidos por oxígeno.

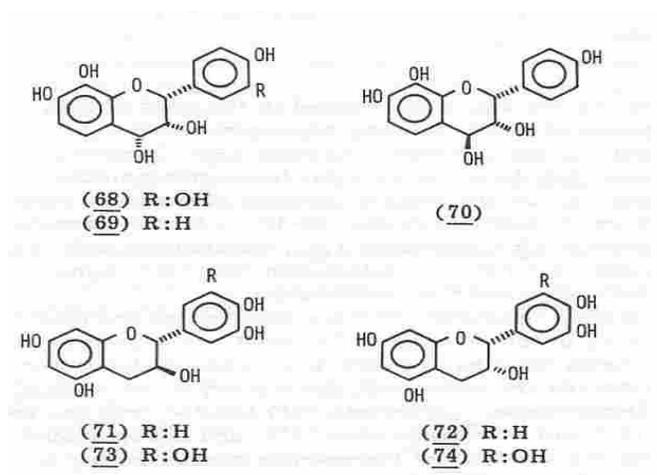
- ❖ **Taninos catéquicos:** reaccionan con sales de hierro dando coloración oscura y precipitando con agua de bromo. Los anillos bencénicos de este grupo están unidos por carbono.
- ❖ **Taninos hidrolizables:** constituidos por monosacáridos especialmente de glucosa esterificados, en una o varias posiciones con ácido gálico o ácidos parecidos, como elágico. Se hidrolizan fácilmente por acción de los ácidos, bases o enzimas, en un azúcar, un polialcohol y un ácido fenilcarboxílico. Dependiendo del tipo de ácido que se produce por la reacción, se subdividen en: galotaninos y elagitaninos. Los núcleos bencénicos están unidos por medio de átomos de oxígeno; dan coloración azul con el cloruro férrico y no precipitan con soluciones de bromo.
- ❖ **Taninos condensados:** son unidades de catequina, la degradación de taninos condensados siempre entrega un polifenol (fluroglucinol, resorcinol o pirogalol) y un ácido fenólico (ácido protocatéquico o ácido gálico), son los taninos más frecuentes y comunes en la corteza de madera.

Con ácidos en caliente, se origina una polimerización progresiva hasta dar taninos amorfos, llamados flobafenos o taninos rojos. Dan coloración verde con cloruro férrico y precipitan con soluciones de bromo. Los taninos condensados se forman por un proceso metabólico, mientras que los taninos hidrolizables no.

Los taninos condensados son formados por la condensación de leucoantocianidinas (Ver figura 15). La condensación de leucoantocianidinas con flavonoles forma oligómeros²⁰ con enlaces entre las posiciones de los carbonos 6 y 8. Los dímeros de los taninos condensados (ver figura 16) son separados de las hojas y frutos de las especies *Quercus petraea* y *Acacia mearnsii*.

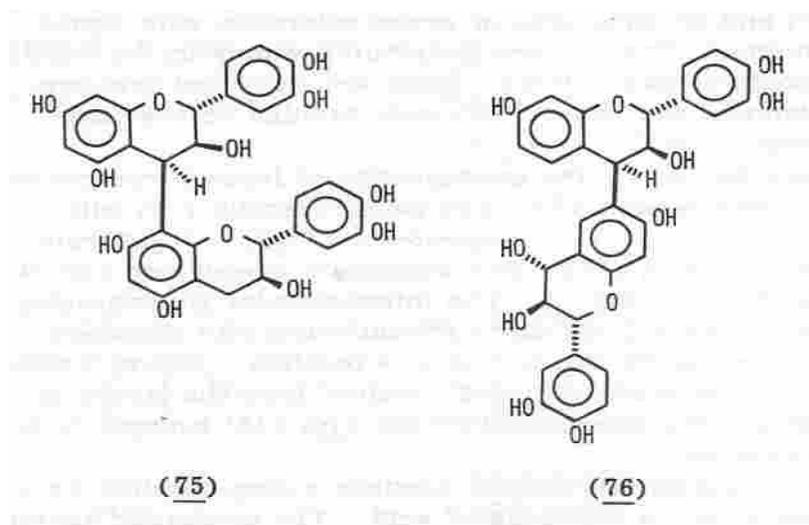
• ²⁰ Ver glosario

Figura 14. Monómeros precursores de taninos condensados



Fuente: Ref. No. 6. (68) Melacidina. (69) Tetracidina. (70) Isotetracidina. (71) + catequiza. (72) – epicatequina. (73) + galocatequina. (74) – epilocatequina.

Figura 15. Dímeros precursores de taninos condensados



Fuente: Ref. 6 (75) catequina. (76) bileucofisetinidina

2.5.2.2 Terpenoides

Son compuestos de una unidad estructural de isopreno que es una unidad de cinco carbonos, con una cadena de cuatro carbonos y una ramificación de un carbono en el carbono 2 (C2) (ver figura 17). Los terpenoides son clasificados en monoterpenos, sesquiterpenos, diterpenos, triterpenos y tetraterpenos de acuerdo al número de unidades de isopreno que contengan. (Ver cuadro No. 3).

En las plantas, los terpenos se sintetizan a través de un intermediario de gran importancia biológica, el pirofosfato de isopentenilo. La mayoría de las estructuras de los terpenos se pueden romper en varias unidades isoprénicas. Los terpenos contienen varios grupos funcionales (C=C, OH, C=O) como parte de su estructura y pueden ser acíclicos o cíclicos.

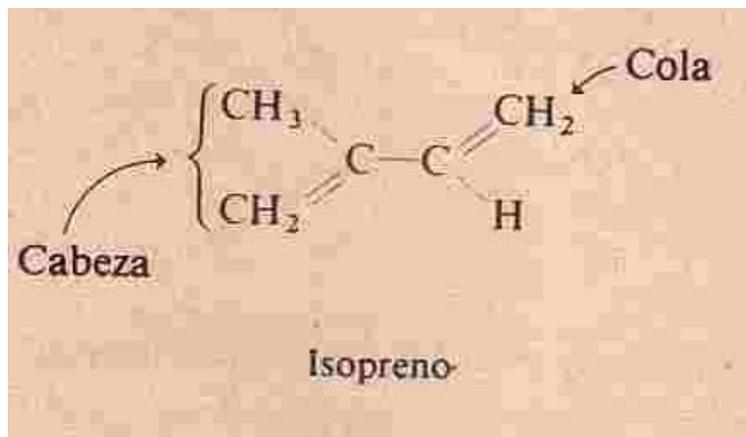
En la naturaleza son muy pocos los compuestos que tienen solamente una unidad isoprénica (C₅), pero son muy comunes aquellos que contienen dos unidades isoprénicas (C₁₀), llamados **monoterpenos**. Como ejemplos están el **geraniol**, **citronelal** y **mirreno** (todos ellos acíclicos), así como **mentol** y **β-pineno** (ambos cíclicos).

Tabla IV. Clasificación de los terpenoides

| Terpenoide | Unidades de isopreno | Número de átomos de carbono | Sustancia |
|---------------|----------------------|-----------------------------|-----------------|
| Monoterpeno | 2 | 10 | Aceite esencial |
| Sesquiterpeno | 3 | 15 | Aceite esencial |
| Diterpeno | 4 | 20 | Resina |
| Triterpeno | 6 | 30 | Saponina |
| Tetraterpeno | 8 | 40 | Carotenoide |

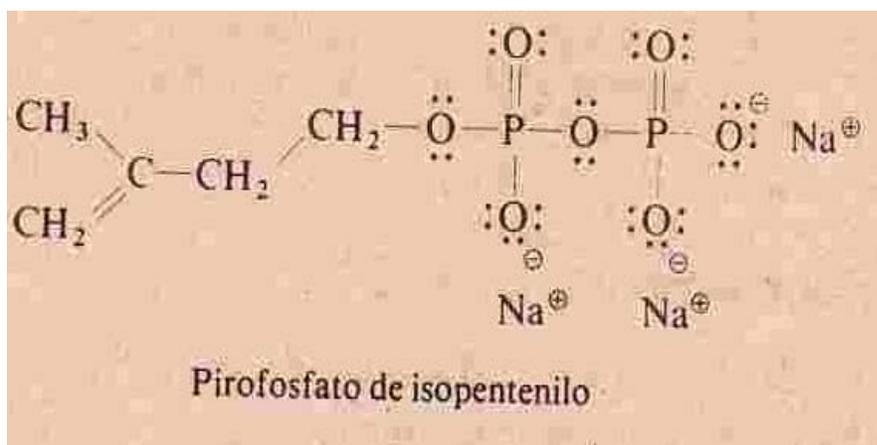
Fuente: Ref. 6 Pag. 231

Figura 16. Unidad de isopreno



Fuente: ref. No.13 pag. 399

Figura 17. Pirofosfato de isopentenilo



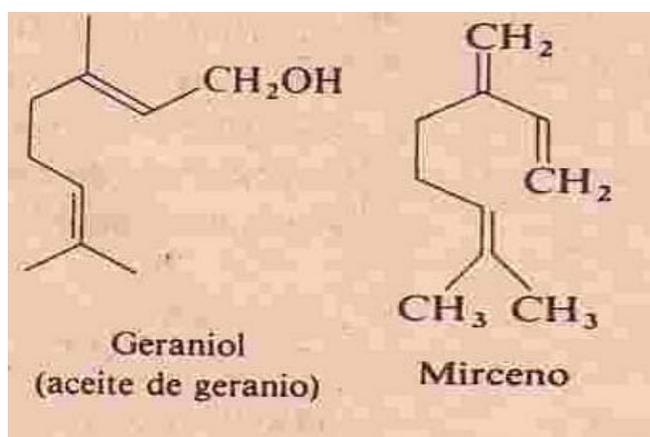
Fuente: ref 14 pag 399

❖ Monoterpenos

Los monoterpenos están compuestos de dos unidades de isopreno y el número de átomos de carbono en la fórmula molecular es de 10. Son volátiles y contribuyen al olor de la madera. Son fácilmente separados de la madera por medio de la destilación con vapor, cuya sustancia aceitosa obtenida es llamada “aceite esencial”. El aceite esencial de las maderas coníferas usualmente contiene cantidades considerables de α -pineno, canfeno, careno y limoneno (ver figura 22).

El geraniol, como su nombre lo indica, se encuentra en el aceite del geranio y también constituye el 50% del aceite de rosas, del extracto de pétalos de rosas. El geraniol es también el precursor biológico del α -pineno, un terpeno que es el componente principal de la trementina. El farnesol, se encuentra en el aceite esencial de las rosas. Ambos, el geraniol y el farnesol, se utilizan en perfumería.

Figura 18. Monoterpenos acíclicos

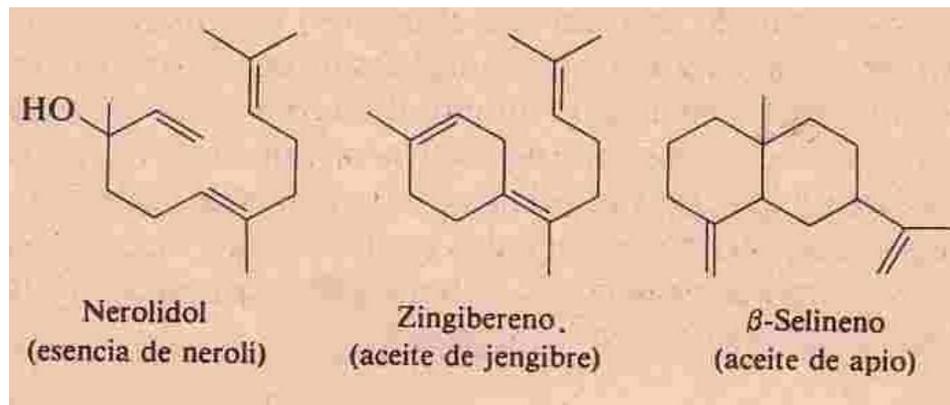


Fuente: ref. 14 pag 400

❖ Sesquiterpenos

Son compuestos de tres moléculas de isopreno que se combinan en la forma cabeza con cola. Son clasificados en tres grupos: sesquiterpenos monocíclicos, sesquiterpenos bicíclicos y sesquiterpenos tricíclicos de acuerdo al número de anillos en la molécula.

Figura 19. Sesquiterpenos bicíclicos



Fuente: Ref. 14 pag 400

2.5.2.3 Oleorresinas

Son extraíbles secretados por la planta, producto del metabolismo ya sea normal o por traumatismo. Las especies más importantes productoras de oleorresinas son del género Pinus. La oleorresina es una solución de terpenos con dos fracciones: líquida y sólida; agua e impurezas:

- Fracción líquida o solvente:** trementina o aguarrás vegetal $\pm 70\%$ del peso total
- Fracción sólida o soluto:** colofonia o pez de castilla $\pm 20\%$ del peso total
- Agua e impurezas:** $\pm 10\%$ del peso total.

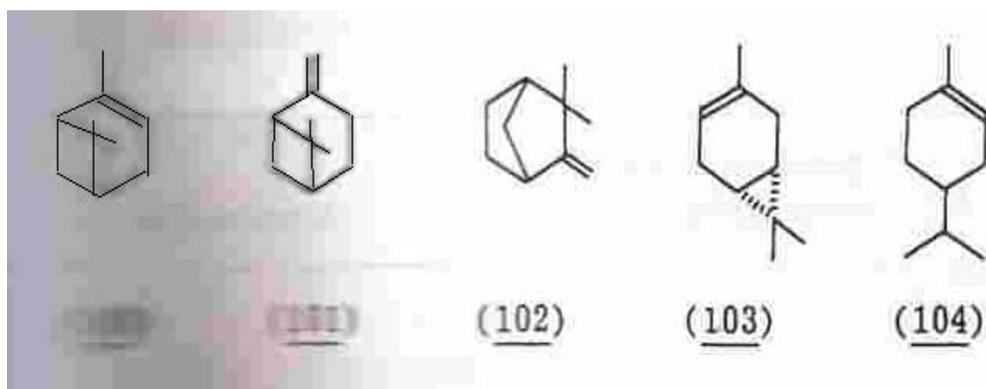
Trementina: es el aceite esencial obtenido de las especies de pino. Es una mezcla de monoterpenos principalmente α -pineno y β -pineno, que son sustancias isómeras. Puede ser producida como un subproducto en el proceso de cocimiento de pulpa al sulfato. También puede ser producida por medio de la destilación de los troncos de pinos. Para distinguir entre estos dos tipos de trementina, la primera es llamada “trementina al sulfato” y la última “trementina de madera”.

En la pulpa al sulfato, el aceite esencial es separado enfriando el gas que la separa con un condensador. La trementina cruda obtenida en esta forma es purificada removiendo las sustancias que le dan olor como el metilmercaptano.

El principal componente de la resina es el α -pineno. Los monoterpenos como β -pineno, canfeno, careno y limoneno (ver figura 19) son también encontrados en varias maderas coníferas. La composición de los monoterpenos difiere entre las diversas especies de maderas.

La trementina es utilizada por la industria cosmética y farmacéutica. Se usa para fabricar aceite de pino. Constituye un 70% del peso. El aceite de pino es una sustancia tenso activa que provoca la flotación de los minerales. Forma burbujas con cargas en cuyo alrededor se pegan los átomos minerales; esto origina una espuma que al barrerla y recogerla, permite recuperar el mineral. Ejemplo: se utiliza en la extracción del cobre.

Figura 20. Principales monoterpenos en la madera



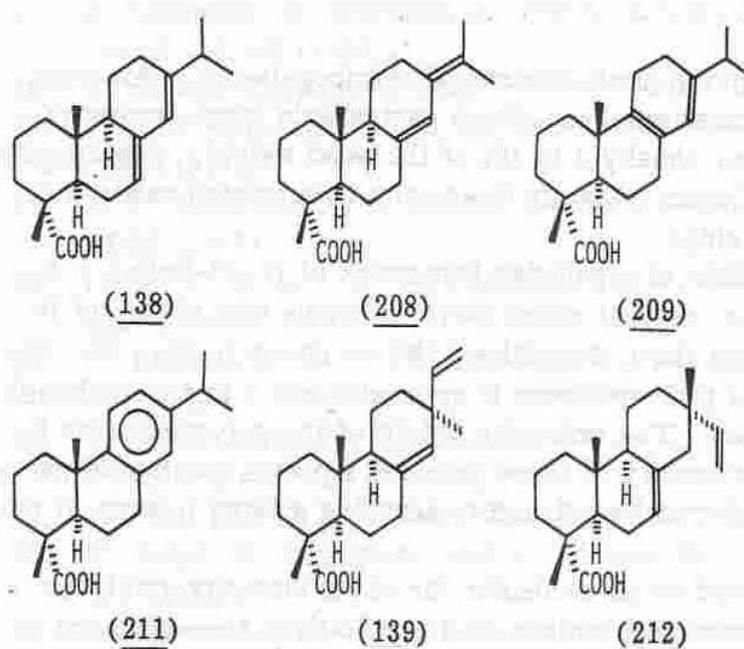
Fuente: Ref. 6 (100) α -pineno (101) β -pineno (102) canfeno (103) careno (104) limoneno

Colofonia o pez de castilla: mezcla de diterpenos (ácidos resínicos) y ácidos grasos. Constituye cerca del 70% del peso total de la resina de pino. Los ácidos resínicos que son los principales componentes de la colofonia, son diterpenos tricíclicos y son divididos en dos

grupos: ácido abiético y ácido pimárico. Las estructuras de los ácidos resínicos contenidos en la colofonia se muestran en la figura No. 23. Estos ácidos resínicos son fácilmente isomerizados y oxidados por el calor.

Un pequeño porcentaje de la colofonia es obtenido por medio de la destilación fraccionada de la trementina de la madera. La colofonia se emplea en papelería, pinturas, barnices, jabones y detergentes. Antiguamente se le utilizaba como impermeabilizante de los barcos de madera. (Ref. 6)

Figura 21. Ácidos resínicos contenidos en la colofonia



Fuente: Ref. 6 pag- 249

2.5.2.4 Aceites esenciales

Los aceites esenciales se originan del metabolismo del árbol. Tienen una función de protección de patógenos y biodeteriodadores. Evitan la evaporación de los tejidos. Están en hojas, corteza y madera. Los aceites esenciales se usan para elaborar productos de sanidad: desinfectantes, insecticidas, jabones, dentríficos, pinturas y barnices.

Por hidrogenación se obtienen de los aceites esenciales: productos colorantes, curtientes, preservantes de alimentos y bebidas, etc. Son sustancias terpénicas con las siguientes características:

- ❖ La mayoría tiene un punto de ebullición superior a 100°C
- ❖ Poseen una alta presión de vapor a temperatura ambiente. Una pequeña cantidad basta para sentir el aroma. Las maderas viejas encapsulan los aceites esenciales.

- ❖ Destilan con vapor

- ❖ Muchos de ellos son odoríferos, lo que se asocia con el olor de la madera fresca.

Las especies típicas productoras de aceites esenciales son los Eucaliptos. De estos los más comercializados son:

- a) *Cineol*: se utiliza en la industria farmacéutica. Es desmanchador. Se usa en medicina. También se utiliza para la obtención de productos alimentarios.
- b) *Felandreno*: se utiliza industrialmente como solvente. También en la flotación de minerales. Se utiliza además, par la elaboración del mentol sintético.
- c) *Terpineol*: usado mucho en perfumería.
- d) *Eudesmol*. Se usa en la industria como fijador de perfumes
- e) *Piperitona*: se utiliza para obtener el mentol sintético. Se obtiene de una planta herbácea: *menta piperita*. Da un aroma similar a la lavanda. (Ref. 4).

2.5.2.5 Saponinas

Corresponden a sustancias de naturaleza esferoidal y a sustancias de naturaleza triterpénica. Son glucósidos de triterpenos. Las saponinas triterpénicas son pentacíclicas. Están presentes en la mayoría de las especies vegetales. Forman abundante espuma en soluciones acuosas. Al bajar la tensión superficial del agua promueven la formación de abundante espuma. Esta propiedad permite varios usos, ejemplo:

- ❖ Espumante de bebidas como cerveza y champagne
- ❖ Extintores de incendio
- ❖ Jabones, detergentes y espumas para afeitarse

- ❖ Como expectorante

- ❖ Como repelente e insecticida

- ❖ Coadyuvante para vacunas. Se coloca en esta sustancia el producto de algunas vacunas

2.5.2.6 Fenoles

Los fenoles son sustancias cuya estructura presenta unidades aromáticas cíclicas. Los fenoles se clasifican en fenoles simples, estilbenos, lignanos, flavonoides y polifenoles.

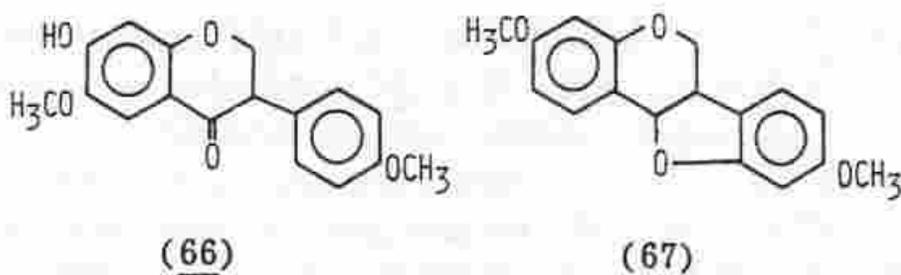
- ❖ **Fenoles simples:** aparecen en poca cantidad. Están presentes en extractos de maderas de coníferas latifoliadas. Probablemente son productos de degradación de la lignina o de otros fenoles que se hidrolizan durante la extracción. Poseen función de tipo alcohol, aldehído y ácido.

❖ **Estilbenos:** son diméricos, compuestos de dos estructuras simples. Poseen un doble enlace en una corta cadena hidrocarbonada que une ambos anillos. Poseen fuerte fluorescencia bajo la luz ultravioleta. Tienen como fórmula general $C_6C_2C_6$. Uno de los estilbenos más conocidos es la pinosilvina y su éter monometílico. Están presentes en el duramen y corteza de varios pinos. Como reaccionan con la bencidina, permiten el reconocimiento del duramen en éstas especies. La pinosilvina y el éter monometílico, también ocasiona algunos problemas en el pulpaje al sulfito, puesto que condensan con la lignina.

La pinosilvina además, presenta una actividad fungicida. Inhiben el crecimiento de los hongos sobre la madera. Su presencia proporciona durabilidad natural.

❖ **Flavonoides:** están distribuidos en todo el reino vegetal. Muchos de ellos están presentes en los extractos de la madera. Algunos de ellos determinan el color de una madera en particular. Muchos tintes y pigmentos naturales son flavonoides. En muchas ocasiones están como productos incoloros.

Figura 22. Estructuras de flavonoides



Fuente: ref. 6 pag. 224 (66) afromosina. (67) homterocarpina

3. METODOLOGÍA

3.1 Localización

La parte experimental del proyecto se realizó en los laboratorios del Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química y en la Sección de Química Industrial, del Centro de Investigación de Ingeniería –CII- Edificio T-5.

3.2 Recursos humanos

Investigadora: Liz María Eugenia Rodríguez

Asesora: Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales

Coasesor: Ing. For. M. Sc. José Mario Saravia Molina

3.3 Metodología experimental

3.3.1 Obtención del material

La madera de pino se obtuvo de la finca “Las Victorias” ubicada en el municipio de Patzún, Chimaltenango, km. 60 carretera Interamericana. Se seleccionaron 9 árboles a 3 diferentes alturas, (la edad de los árboles es de 6 años aproximadamente), se tomaron muestras de madera que se descortezaron y dejaron libres de impurezas como polvo, musgo, etc. para luego ser molidas en el taller de carpintería del Centro de Investigaciones de Ingeniería. El secado de las muestras molidas se realizó en el secador eléctrico de flujo transversal de bandejas ubicado en la planta piloto del Centro de Investigaciones de Ingeniería, esto permitió eliminar la mayor parte de humedad que éstas tenían, luego se

pasaron por un tamiz de 420 micrones para obtener muestras listas para iniciar el análisis químico.

La descripción de la región donde se colectaron las muestras es la siguiente:

- ❖ Coordenadas de muestreo: altitud 2220 msnm, latitud 14°40'55", longitud 91°00'55"
- ❖ Clima: Bosque húmedo con invierno seco y clima semifrío. Temperatura de 11.8°C
14.9°C
- ❖ Génesis del suelo: suelo desarrollado sobre ceniza volcánica a elevaciones altas
- ❖ Clasificación del suelo: suelo franco arcilloso
- ❖ Zona de vida vegetal: montano bajo húmedo (Ref. 2)

3.4 Manejo de la fase experimental

3.4.1 Material y equipo

- ❖ Computadora Celeron AMD
- ❖ Impresora Compaq IJ-1200
- ❖ Fotocopias, bibliografía
- ❖ Internet
- ❖ Papelería y útiles de oficina

Fase experimental

- ❖ Balanza Adventurer OHAUS con capacidad máxima de 150 g y exactitud de 3 decimales

- ❖ Horno eléctrico Cole Parmer de 120 V y 800 W. 50/60 Hz
- ❖ Mufla marca termolyne hasta 1100°C
- ❖ Campana de extracción de 110 V y 900 Watts
- ❖ Medidor de humedad
- ❖ Horno eléctrico de flujo convectivo por gravedad marca termolyne
- ❖ Tamiz U.S. Standard Sieve Series. Especificaciones ASTM: 420 micrones, No. 40 escala Tyler. 35 mesh.
- ❖ 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.
- ❖ Extractor Soxhlet
- ❖ Papel filtro
- ❖ Pizetas
- ❖ Pinzas de metal
- ❖ Papel parafilm
- ❖ Agitadores magnéticos
- ❖ Mangueras de hule
- ❖ Crisoles de porcelana
- ❖ Soporte universal

Cristalería

- ❖ Buretas de 25 ml
- ❖ Pipetas serológicas marca superior de 5, 10 y 20 ml
- ❖ Probetas de 10, 50 y 250 ml
- ❖ Varillas de agitación
- ❖ Beakers marca pirex de 50, 100, 200 y 500 ml
- ❖ Balones aforados de 250 y 500 ml marca kimax

- ❖ Cajas de petri
- ❖ Tubos de ensayo
- ❖ Viales color ámbar de 8 ml
- ❖ Condensadoras de bola y de serpentín, 20/40
- ❖ Desecadora fisherbrand

Reactivos

- ❖ Etanol absoluto (C_2H_5OH). Densidad: 0.75 kg/l. Peso molecular 46.07 g/mol. Envase de 2.5 l. Casa proveedora MERCK
- ❖ Hexano (C_6H_{14}). Presentación del envase: 4 l. Código h1055-4. Peso molecular 86.18 g/mol. Casa proveedora RGH
- ❖ Acido sulfúrico (H_2SO_4) de 95% a 97% diluido al 72%. Densidad= 1.84 kg/l. Peso molecular 98.08 g/mol. Presentación del envase: 2.5 l. Casa proveedora MERCK
- ❖ Acido Acético (CH_3COOH) al 10%. Presentación del envase: 2.5 l. Casa proveedora MERCK
- ❖ Sulfito de Sodio (Na_2SO_3) al 2%. Presentación del envase: 500 g. Peso molecular 126 g/mol. Casa proveedora: MERCK
- ❖ Hidróxido de Sodio ($NaOH$) al 10% y 17.5%. Peso molecular 40 g/mol. Presentación del envase: 1 kg. Casa proveedora MERCK
- ❖ Permanganato de potasio ($KMnO_4$) 2M
- ❖ Índigo de carmín ($C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$). Peso molecular: 466.36 g/mol. Presentación del envase: 25 g. Casa proveedora: MERCK

3.4.2 Procedimiento para eliminar sustancias extraíbles en la madera

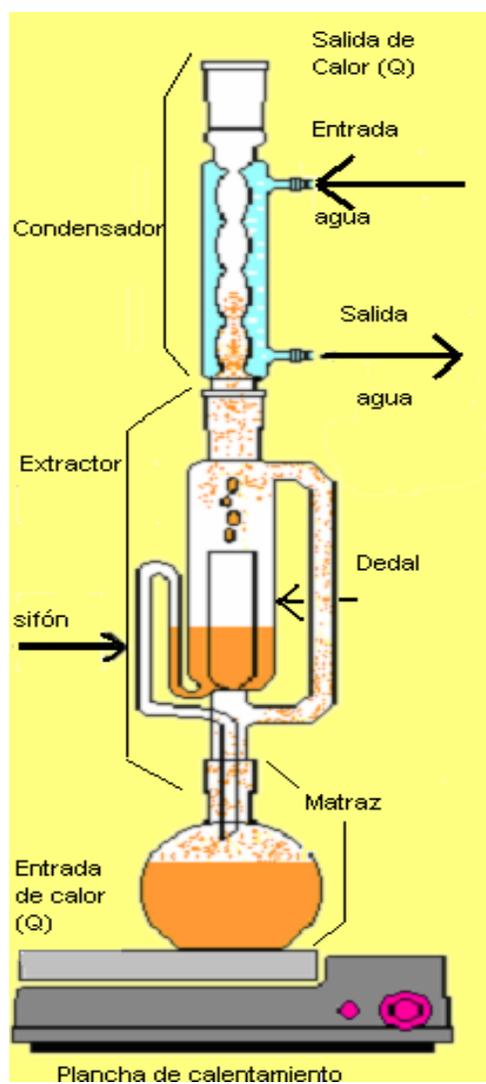
Esta es la base de todos los análisis que se realizaron a las muestras colectadas, ya que permitió eliminar las sustancias que estaban presentes en menor proporción en la madera, logrando con esto, determinar la cantidad de componentes estructurales que la misma posee. Para tal efecto se utilizó un método de extracción sólido-líquido que hace uso del extractor Soxhlet. Este extractor consta de cuatro partes o unidades principales, siendo estas: condensador, unidad de extracción, matraz y dedal; adicionalmente se necesitaron mangueras y plancha de calentamiento.

Para realizar una extracción Soxhlet se colocó una cantidad de madera seca (con humedad entre 10% y 12%) y tamizada en el dedal de celulosa, seguidamente se depositó en la unidad de extracción y se adaptó al matraz que contenía el solvente que separó las sustancias extraíbles, cuando este solvente llegó a su punto de ebullición, formó vapor que ascendió por la pared interna del extractor.

En la parte superior de la unidad de extracción, se conectó el condensador, con su respectiva entrada y salida de agua, cuyo flujo fue en contracorriente. Esta parte del extractor Soxhlet permitió que el vapor que subió por la pared de la unidad de extracción cambiara de fase logrando con esto que cayera a la muestra de madera en forma de gota. El dedal se llenó con el solvente que había sido condensado hasta que alcanzó la altura del sifón en el extractor, luego fue devuelto al matraz para empezar nuevamente el ciclo de extracción.

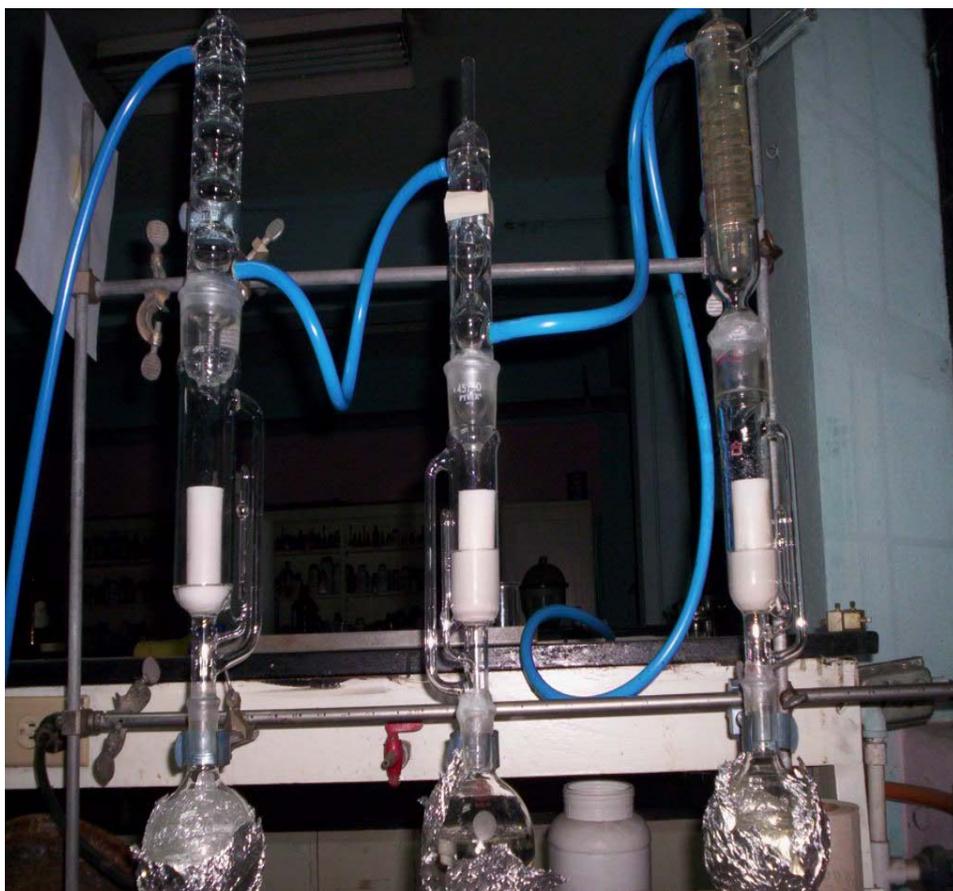
Los solventes que se utilizaron para las extracciones son alcohol etílico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) al 95% y n-hexano (C_6H_{14}). Cada solvente fue utilizado por un período de 12 horas, y posteriormente a la última extracción se dejó secar la muestra de madera al aire libre hasta que logró peso constante. Seguido de esto, la muestra estaba lista para poder aplicar los métodos que permitieran determinar la cantidad presente de componentes estructurales.

Figura 23. Diagrama de flujo de operación del Soxhlet



Fuente: Recinos Mendoza, pag.27

Figura 24. Extractores Soxhlet utilizados para las extracciones



Fuente: Liz María Eugenia Rodríguez

El procedimiento que se siguió es el siguiente:

- ❖ Se colocó en un dedal previamente tarado 7.5 g de la muestra de madera seca (con humedad de 10% a 12%) y tamizada en el tamiz No. 40 escala Styler
- ❖ Se colocó el dedal en el sistema de extracción Soxhlet (ver figura 25) manteniendo una relación de $\frac{3}{4}$ de solvente con respecto al balón.
- ❖ Se realizó la primer extracción con hexano por un período de 12 horas
- ❖ Se realizó la segunda extracción con etanol por un período de 12 horas
- ❖ Se secó el contenido del dedal (libre de sustancias extraíbles) por un período de 18 horas a temperatura ambiente. Luego se procedió a pesar. Se anotó el peso y se le restó el peso inicial del dedal para obtener el peso real de las sustancias extraíbles. Se dejó

en un horno eléctrico por un período de 3 horas y se volvió a pesar hasta que llegó a peso constante.

3.4.3 Procedimiento para determinar Lignina

- ❖ Se colocó en un beacker de 100 ml 1 g de sustancia libre de extraíbles
- ❖ Se agregó 15 ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄) al 72%
- ❖ Se agitó durante 2 horas en baño maría a 20°C (se necesitó plancha con agitación)
- ❖ Se transfirió a un matraz de 500 ml conteniendo 330 ml de agua destilada, lo cual dio una solución de ácido al 3%
- ❖ Se hirvió a reflujo por 4 horas
- ❖ Se decantó hasta dejar una diferencia mínima entre las dos fases
- ❖ Se filtró la solución obtenida con papel filtro No. 50 previamente tarado
- ❖ Se lavó con agua caliente
- ❖ Se secó a 105°C ± 3°C hasta peso constante
- ❖ El porcentaje de lignina obtenido se determinó con la siguiente ecuación

$$\% \text{ Lignina} = \left(\frac{\text{Peso de lignina seca (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} \right) * 100 \quad [\text{Ec. No. 1}]$$

3.4.4 Procedimiento para la determinación de celulosa

- ❖ Se pesó 1 g de la sustancia libre de extraíbles y se transfirió a un matraz de 100 ml.
- ❖ Se agregó 10 ml de hidróxido de sodio (NaOH) al 17.5% y se dejó reposar 5 min. El recipiente que contiene la solución de hidróxido de sodio debe estar en baño maría al igual que la muestra de madera
- ❖ Se agregó de nuevo 5 ml de hidróxido de sodio (NaOH) al 17.5%, se agitó y se dejó reposar 5 min.

- ❖ Se agregó de nuevo 5 ml de hidróxido de sodio (NaOH) al 17.5%, se agitó y se dejó reposar 30 min.
- ❖ Se añadió 30 ml de agua destilada, se agitó y dejó reposar 1 hora en baño maría a 25°C
- ❖ Luego se filtró al vacío con papel filtro previamente tarado y usando un embudo de porcelana. Se realizaron lavados con una solución de 30 ml de agua y 25 de hidróxido de sodio al 17.5%
- ❖ Se lavó con 30 ml de agua destilada y con la ayuda de una varilla de agitación para un mejor lavado, teniendo cuidado de no romper el papel filtro
- ❖ Se agregó 15 ml de ácido acético (CH₃COOH) al 10% en vol sin aplicar vacío hasta cumplir 3 minutos de reposo. Luego se lavó con 50 ml de agua destilada y se aplicó vacío
- ❖ Se transfirió el material insoluble con el papel filtro a un crisol o caja petri para ser secado en horno entre 60°C y 85°C. Se tomó el peso cada cierto tiempo hasta que permaneció constante
- ❖ El porcentaje de celulosa se calculó de la siguiente forma:

$$\% \text{ Celulosa} = \left(\frac{[P.M. * (P.P.F. + P.L)] * (P.L.E)}{P.T.M.} \right) * 100 \quad [\text{Ec. No.2}]$$

Donde:

P.M.= peso anhidro de la muestra tratada más tara del papel filtro

P.P.F.= peso del papel filtro

P.L.= peso de lignina obtenido en la muestra

P.L.E.= peso de madera libre de extraíbles

P.T.M.= peso de madera total, antes de la extracción de sustancias extraíbles

3.4.5 Procedimiento para la determinación de taninos en madera

- ❖ Se colocó 4 g de madera seca (con humedad de 10% a 12%) y tamizada en tamiz No. 40 escala Styler
- ❖ Se agregó un volumen adecuado (lo necesario para que la solución pueda agitarse) de solución acuosa de sulfito de sodio (Na_2SO_3) al 4%
- ❖ Se calentó la mezcla a una temperatura máxima de 70°C y se agitó durante 45 min.
- ❖ El filtrado (extracto tánico) se secó en el secador eléctrico y se pesó hasta lograr peso constante. El porcentaje de extracto tánico se calculó así:

$$\% \text{ Extracto tánico} = \left(\frac{\text{Peso del extracto tánico}}{\text{Peso original de la muestra}} \right) * 100 \quad [\text{Ec.No. 3}]$$

- ❖ Se pesó 1 g del extracto tánico, se transfirió a un matraz de 250 ml conteniendo 100 ml de agua destilada, se agitó para disolver la muestra
- ❖ Se calentó la muestra hasta ebullición por un período de 4 horas. Se agregó agua para mantener el volumen
- ❖ Se tomó 25 ml de la solución líquida, se adicionaron 10 ml de indicador de índigo de carmín y 375 ml de agua destilada
- ❖ Se tituló con permanganato de potasio (KMnO_4) 0.1 N hasta observar cambio de color a amarillo
- ❖ Se preparó un blanco con agua y se realizó la titulación
- ❖ Para calcular el peso de taninos puros presentes en la muestra de madera se utilizó la siguiente relación:

$$4.2 \text{ mg taninos puros} = 1 \text{ ml de } \text{KMnO}_4$$

- ❖ El índigo de carmín se preparó de la siguiente manera: se disolvió 6 g de reactivo en 500 ml de agua, se calentó para que se disolviera, se enfrió y se agregó 50 ml de ácido sulfúrico, se diluyó a un volumen 1000 ml y se filtró

3.4.6 Procedimiento para la determinación de Cenizas

- ❖ Se calcinaron los crisoles a 600°C por 1 hora
- ❖ Luego se retiraron e introdujeron en una desecadora por 15 minutos para ser pesados. Se bajó la temperatura de la mufla a 0°C
- ❖ Se agregó 1 g de madera seca a cada crisol identificando el número de muestra
- ❖ Se agregó las muestras a la mufla y se aplicó de 580°C-600°C sin pasar del rango por 1 hora y media hasta que las muestras contuvieran solo cenizas
- ❖ Se retiraron los crisoles con la muestra y se agregaron a una desecadora por 15 minutos para luego ser pesados.
- ❖ El porcentaje de ceniza se determinó así

$$\% \text{ Ceniza} = \left(\frac{\text{P.C.}}{\text{P.M.S.}} \right) * 100 \quad [\text{Ec. No.4}]$$

Donde:

P.C. = peso se cenizas

P.M.S.=peso de madera seca

3.5 Diseño de tratamientos

Para la evaluación estadística se utilizó un diseño en bloques completamente al azar con un arreglo combinatorio de 3 niveles y 9 repeticiones, resultando 27 tratamientos con 6 variables de respuesta.

3.6 Análisis estadístico

Se utilizó el análisis de varianza para cada componente químico determinado. De esta manera se analizó un factor con tres niveles y nueve repeticiones para tener un arreglo

matricial de veintisiete observaciones para cada componente a determinar. Los datos quedaron de la siguiente forma:

Tabla V. Datos requeridos para un experimento con a tratamientos y n repeticiones

| Tratamientos | No. de observaciones | | | Total | Promedio |
|--------------|----------------------|-----------|-----------|-------|-------------|
| 1 | $Y_{1,1}$ | $Y_{1,2}$ | $Y_{1,3}$ | Y_1 | \bar{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 |
| 4 | $Y_{4,1}$ | $Y_{4,2}$ | $Y_{4,3}$ | Y_4 | y_4 |
| a | $Y_{a,1}$ | $Y_{a,2}$ | $Y_{a,3}$ | Y_a | y_a |
| | | | | Y_i | \bar{y} |

Donde:

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

\bar{y} = es el promedio de las observaciones bajo el i-ésimo tratamiento, similarmente sea Y la suma de todas las observaciones y \bar{y} la media general de las observaciones.

El cuadro No. 5 presenta las fórmulas que se utilizaron para realizar los cálculos del análisis de varianza.

Tabla VI. Análisis de varianza para el diseño de bloque completamente aleatorio

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Media cuadrática | Fo |
|----------------------------|--|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Tratamientos | $\sum_{i=1}^a \frac{y_{i.}^2}{b} - \frac{y_{..}^2}{ab}$ | a-1 | $\frac{SS_{tratamientos}}{a-1}$ | $\frac{M_{Stratamientos}}{MS_E}$ |
| Bloques | $\sum_{j=1}^b \frac{y_{.j}^2}{a} - \frac{y_{..}^2}{ab}$ | b-1 | $\frac{SS_{bloques}}{b-1}$ | |
| Error | SS _E (por sustracción) | (a-1)(b-1) | $\frac{SS_{bloques}}{(a-1)(b-1)}$ | |
| Total | $\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{ab}$ | ab-1 | | |

Fuente: Montgomery Douglas. Pag. 437

La hipótesis nula de ningún efecto de tratamiento ($H_0: \tau_i=0$) se probó mediante la razón de Fisher, que se define como: $F = \frac{MS_{tratamientos}}{MS_E}$ 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 y 16 para bloques reportó un valor de 3.63.

RESULTADOS

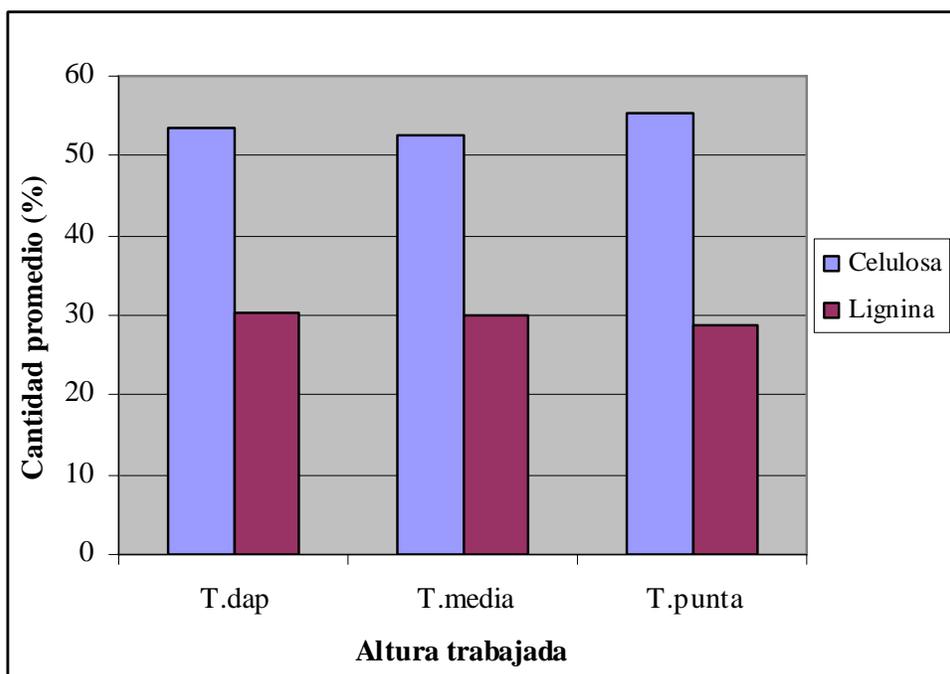
Tabla VII. Resultados Generales para los componentes químicos del Pino Blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl)

| ÁRBOL | ALTURA* | % CELULOSA | % LIGNINA | % TANINOS PUROS | % CENIZAS | % HUMEDAD |
|----------|---------|------------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| 1 | 1 | 56.805 | 29.50 | 0.184 | 0.2 | 8.53 |
| | 2 | 54.561 | 29.40 | 0.131 | 0.2 | 7.75 |
| | 3 | 56.127 | 27.60 | 0.368 | 0.2 | 8.54 |
| 2 | 1 | 53.243 | 29.30 | 0.158 | 0.2 | 8.48 |
| | 2 | 54.112 | 29.10 | 0.079 | 0.6 | 8.68 |
| | 3 | 56.730 | 28.30 | 0.158 | 0.6 | 8.22 |
| 3 | 1 | 54.894 | 29.70 | 0.163 | 0.6 | 7.98 |
| | 2 | 52.648 | 29.30 | 0.152 | 0.5 | 6.96 |
| | 3 | 57.124 | 28.50 | 0.173 | 0.6 | 7.99 |
| 4 | 1 | 55.606 | 28.20 | 0.184 | 0.1 | 8.12 |
| | 2 | 44.945 | 30.70 | 0.226 | 0.3 | 8.53 |
| | 3 | 54.864 | 30.10 | 0.314 | 0.4 | 6.67 |
| 5 | 1 | 52.031 | 31.00 | 0.247 | 0.3 | 8.18 |
| | 2 | 53.253 | 30.00 | 0.100 | 0.6 | 7.58 |
| | 3 | 55.529 | 29.70 | 0.131 | 0.4 | 7.52 |
| 6 | 1 | 52.783 | 32.40 | 0.223 | 0.6 | 8.45 |
| | 2 | 50.947 | 31.90 | 0.131 | 0.4 | 8.11 |
| | 3 | 52.837 | 30.10 | 0.210 | 0.7 | 8.3 |
| 7 | 1 | 51.789 | 31.00 | 0.106 | 0.1 | 8.53 |
| | 2 | 53.652 | 30.10 | 0.142 | 0.7 | 7.75 |
| | 3 | 52.129 | 29.00 | 0.142 | 0.8 | 8.54 |
| 8 | 1 | 50.767 | 31.80 | 0.163 | 0.2 | 8.48 |
| | 2 | 53.458 | 28.90 | 0.100 | 0.5 | 8.68 |
| | 3 | 56.364 | 27.00 | 0.105 | 0.5 | 8.22 |
| 9 | 1 | 53.474 | 30.10 | 0.110 | 0.4 | 7.98 |
| | 2 | 55.510 | 29.80 | 0.131 | 0.2 | 6.96 |
| | 3 | 56.937 | 29.70 | 0.105 | 0.7 | 7.58 |

Fuente: Datos Calculados

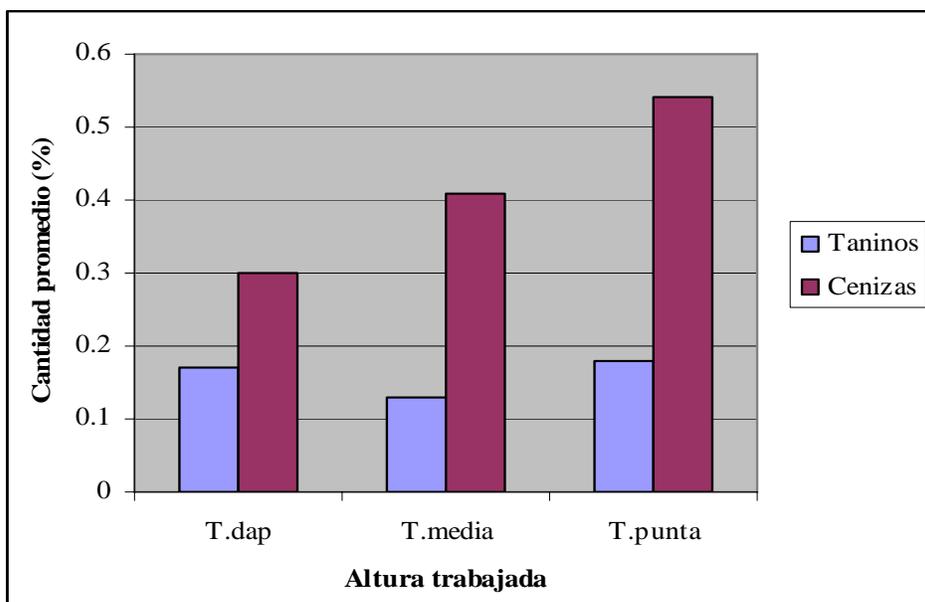
- * 1 = dap: diámetro a la altura del pecho (1.30 m)
- 2 = media: altura comercial media
- 3 = punta: altura apical

Figura 25. Contenido Promedio de Celulosa y Lignina para el Pino Blanco



Fuente: Análisis Estadístico

Figura 26. Contenido promedio de Taninos Puros y Cenizas para el Pino Blanco



Fuente: Análisis Estadístico

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo de graduación se determinaron cinco componentes químicos de la madera de Pino Blanco (*Pinus pseudostrabus* Lindl) entre los que figuran: Celulosa, Lignina, Sustancias Extraíbles (ceras, resinas, gomas, aceites, alcaloides, grasas, azúcares entre otros), Taninos Puros y Sustancias Inorgánicas o Cenizas. También se determinó el porcentaje de humedad que poseían las muestras de madera con que se trabajó; esto último con la finalidad de establecer si estaban entre el rango necesario de humedad (10% a 12%) para poder iniciar los tratamientos químicos que permitieran llegar a la cuantificación de cada componente.

La tabla VII de la sección de resultados muestra los datos generales para los cinco componentes químicos y el contenido de humedad para cada una de las veintisiete muestras tratadas. Para cada uno de los nueve árboles trabajados, se trató con tres diferentes alturas, siendo éstas: Troza del diámetro a la altura del pecho (dap), Troza media y Troza de punta, y que a lo largo del informe se denominarán como altura 1, altura 2 y altura 3 respectivamente. De ésta tabla se puede observar que la celulosa está entre 50% y 56%, la lignina está entre 28% y 30%, las sustancias extraíbles están en un rango de 6% a 8, los taninos puros están entre 0.1% y 0.25%, y las cenizas figuran entre 0.1% y 0.80%. *Estos resultados obtenidos tienen relación con los registrados en la literatura para coníferas, ya que el pino figura entre ellas. Los datos que se tienen son los siguientes: Celulosa está entre 50% a 60%, Lignina entre 25% y 35%, Sustancias Extraíbles figura entre 1% y 10% y Cenizas está entre 0.2% y 1% (Ref. 14). Conclusión 1 y 2.*

Se realizó un análisis de varianza para cada una de las variables trabajadas. Los datos que se obtuvieron para la celulosa indican que en promedio no hubo variación entre alturas, y que la composición es relativamente la misma en cualquier parte del árbol, lo cual es de esperar, ya que este es el componente que se encuentra en mayor cantidad en los árboles,

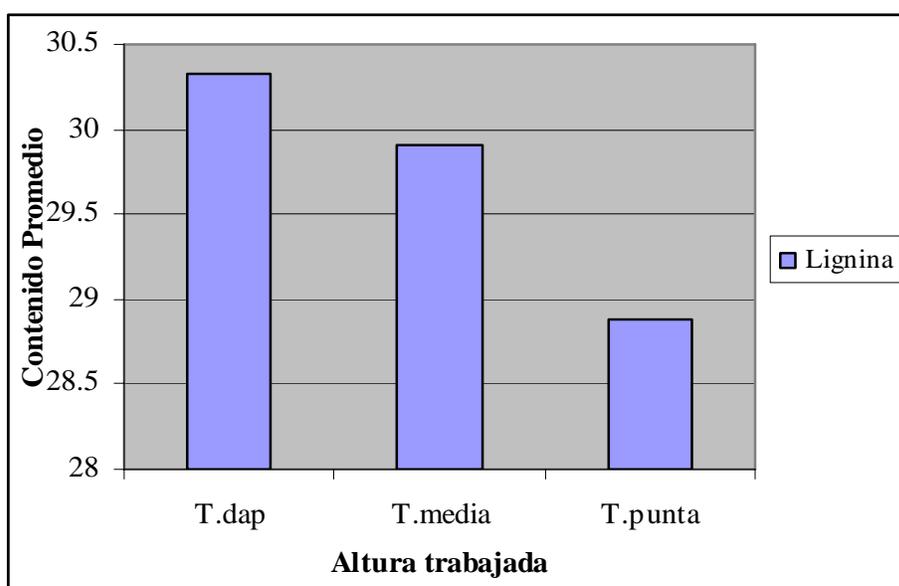
independientemente de que sea madera dura o blanda. Esto se respalda con el resultado del análisis de varianza que se aplicó a los datos obtenidos, cuyos resultados se presentan en la tabla XIV del apéndice B. Aquí el valor observado (3.568) para la prueba de Fisher es menor al dato tabulado (3.63), lo que confirma que no existe variación. Sin embargo, los resultados de la prueba de medias que se presentan en la tabla (XXI) indican que en la altura 3 se encuentra mayor cantidad de este componente, y que le siguen en orden descendente, las alturas 1 y 2. Es importante mencionar que estas variaciones son determinadas desde el punto de vista estadístico, pero que la variación es tan pequeña que para efectos generales se considera que no es significativa. Los resultados promedio del contenido de celulosa para las tres diferentes alturas trabajadas se muestran en la figura 25.

La tabla XV del apéndice A presenta el análisis de varianza para la lignina. *Los resultados allí presentados indican que a diferencia de la celulosa, la lignina sí varía en función de la altura; esto se puede ver al realizar la comparación entre los valores obtenidos para la prueba de Fisher, que es la que determina si existe variación o no de acuerdo a la hipótesis planteada.* *Conclusión 3.* Para el caso de la lignina, el valor teórico de Fisher sigue siendo de 3.63 y el observado es de 5.40, lo que indica que el valor observado es mayor al tabulado, por lo que en principio se puede decir que sí hay variación, aunque no se sepa con precisión en que parte del árbol se da el cambio.

La descripción de la lignina indica que es un componente que está presente en las paredes celulares de los árboles y que exhibe un alto grado de variabilidad estructural dependiendo de la especie y el tejido, así como también del tipo de célula. La deposición de la lignina en las paredes celulares proporciona rigidez y dureza a los tejidos vegetales, a la vez que los impermeabiliza. Es por eso que se conoce como uno de los componentes estructurales de la madera, por lo que es lógico pensar que en la parte más baja del árbol, la lignina se encuentre en mayor cantidad, permitiendo con esto que la base sea mucho más fuerte y resistente que la parte media y alta.

La prueba de medias aplicada a los datos de lignina indica que en promedio existe mayor cantidad de este componente en la altura 1, una cantidad media en la altura 2 y una cantidad relativamente menor en la altura 3. Se encuentra una relación inversamente proporcional, ya que a mayor altura del árbol, hay menor cantidad de lignina. (Estos datos se presentan en la tabla XXI). Se determinó también que la mayor variación se dio entre la altura 1 y 2, y que para la altura 2 y 3 la variación no fue tan alta. Estos resultados concuerdan con la descripción de este componente, ya que por naturaleza debe dar resistencia al árbol, concentrándose así en la parte más baja del mismo. La figura No. 27 muestra de forma más clara la variación que se dio para cada altura

Figura 27. Contenido promedio de lignina para el Pino Blanco

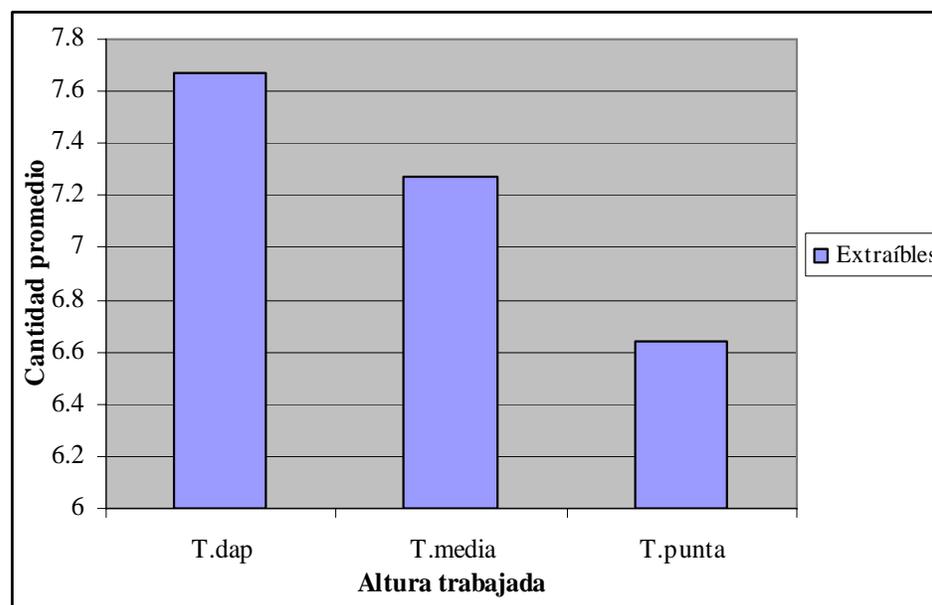


Fuente: Análisis estadístico

La tabla XVI del apéndice A presenta los resultados del análisis de varianza para las sustancias extraíbles. De ella se puede observar que el valor teórico correspondiente a la prueba de Fisher (3.63) es menor al valor experimental u observado (15.396), lo que indica que el contenido de sustancias extraíbles varía en función de la altura a la que se está trabajando. Para determinar con mayor precisión qué altura es la que varía en contenido de extraíbles, se aplicó a los datos obtenidos la prueba de medias o prueba de Tukey. La tabla

XXII ilustra estos resultados y de ella se puede observar que la variación máxima está entre la altura 2 y 3, (cabe mencionar que el cambio de letra reportado para los tratamientos implica variación; este criterio se utilizó para el análisis de todos los componentes) ya que la diferencia en contenido es de 0.63% en comparación con 0.48% permitido que corresponde a la diferencia mínima significativa. También puede observarse que en promedio entre la altura 1 y 2 no existe una variación considerable pues se reporta una diferencia de 0.40%. Sin embargo, a nivel general, la composición química de sustancias extraíbles presenta una relación inversamente proporcional a la altura, ya que en promedio a mayor altura, existe menor cantidad de sustancias extraíbles; esta tendencia puede apreciarse de mejor manera en la figura No. 28. Conclusión 4.

Figura 28. Contenido promedio de Extraíbles para el Pino Blanco



Fuente: Análisis Estadístico

Según Díaz “Existe una variación en la concentración de los extraíbles a lo largo del tronco del árbol y entre este y las ramas. Cuando se estudia la estructura de la madera se observa que las grasas se localizan en las células parenquimatosas, especialmente en los rayos parenquimatosos, mientras que la resina es secretada por las células epiteliales y se depositan en los canales resiníferos” (Ref.17).

La distribución de los extraíbles está regida por una serie de factores entre los que se pueden destacar los de significado genético y ecológico. Su composición y cantidad relativa dependen de diversos factores como especie, edad y región.

Para los taninos puros, se determinó que no existe una variación significativa entre las alturas, ya que el valor observado para la prueba de Fisher (2.469) es menor al valor tabulado (3.63) de la misma. Sin embargo, la prueba de medias (ver tabla XXIII) indica que en la altura 3 se puede encontrar mayor cantidad de taninos, y que le sigue en orden descendente la altura 1 y por último la altura 2. Para considerar que existe una variación significativa en la composición de taninos se trabajó con una diferencia mínima permitida de 0.06% y la comparación de la alturas 3 con 1 presenta una diferencia de 0.01%, así también la comparación entre alturas 1 con 2 reporta 0.03% de diferencia, lo que conlleva a decir que en promedio no hubo variación entre alturas. El comportamiento del contenido promedio de taninos puros se puede observar en la figura 26.

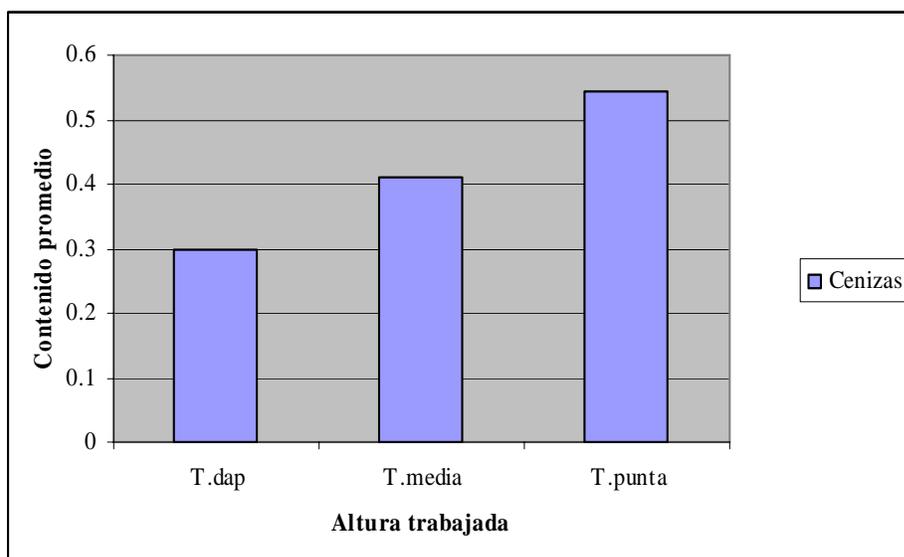
Es importante mencionar que para la determinación de taninos puros se trabajó con la madera del árbol, no así con la corteza, que es donde se encuentra la mayor cantidad de éstos. Es por esta razón que se obtuvieron datos tan bajos y difíciles de reportar, pues figuran entre 0.1% y 0.25% comparados con 20% a 40% que presenta la corteza de los árboles.

Conclusión 5.

Existen dos métodos para la determinación de taninos; uno de ellos es el “Método de Stiasny” que es un método gravimétrico, es decir, que los resultados se reportan en peso. El otro método se conoce como “Método de tara en Vaina” y éste es el método que se utilizó en este trabajo para la determinación de taninos. El método de tara en vaina es volumétrico, es decir, que a diferencia del gravimétrico, los resultados se reportan en volumen. (Ver metodología). Son dos las razones principales por las que se utilizó el método volumétrico: primero, porque debido a la mínima cantidad de extracto tánico que se encuentra en la madera, fue imposible llegar a una cantidad considerable que permitiera obtener un dato en peso, y segundo porque el método volumétrico requiere de una titulación con permanganato de

potasio (KMnO_4), esto permitió que los cambios que se fueron dando a lo largo de la titulación fueran claros y fáciles de apreciar. En el apéndice E se presenta la secuencia de la titulación del extracto tánico.

Figura 29. Contenido promedio de cenizas para el pino blanco



Fuente: Análisis Estadístico

La cantidad de cenizas que se reporta corresponde a un valor global, es decir que no se analizó el tipo de mineralización (óxido de potasio K_2O , óxido de magnesio MgO , etc.) que está presente en las muestras de madera. Sin embargo de la figura 29 se puede decir que los datos obtenidos presentaron una variación significativa en relación a las alturas, con la diferencia que la relación que se encontró para este componente es directamente proporcional a la altura, es decir, a mayor altura, mayor cantidad de sustancias inorgánicas habrá. *La inferencia estadística establece que el cambio más importante ocurrió entre la altura de punta y la altura media, y que la comparación entre la altura media y la altura baja no presentó cambio significativo. Conclusión 6.*

CONCLUSIONES

1. La celulosa no presentó variación significativa en función de la altura del árbol. Es el componente químico que se encuentra en mayor cantidad ya que figura entre 50% y 55%, lo que indica que es posible encontrarla en forma abundante en cualquier altura.
2. La lignina presentó una relación inversamente proporcional a la altura y es el segundo componente químico más abundante que se encuentra en la madera de pino. Está presente en un rango de 28% a 30%.
3. La lignina por ser componente estructural de la madera y dar resistencia a la misma, se encuentra en mayor cantidad en la parte más baja del árbol o troza dap (diámetro a la altura del pecho) ya que en promedio se registró un 30.33% para la misma, mientras que altura de punta presenta un 28%.
4. Se determinó que las sustancias extraíbles varían en forma inversamente proporcional a la altura del árbol en que se colectó la muestra. Figuran entre el 6% y 8%.
5. Los taninos puros en la madera de pino presentan una concentración muy baja, figuran en un rango de 0.13% a 0.18%, por lo que es difícil determinar un método directo que permita llegar a un valor apreciable.
6. Las cenizas presentaron variación directamente proporcional a la altura, figuran en un rango de 0.3% a 0.5%, indicando en troza de punta (o parte alta) se encontrará mayor cantidad de minerales que en la troza dap (o parte baja).

RECOMENDACIONES

1. Realizar una caracterización química con otras especies forestales para comparar las cantidades en que están presentes los diversos componentes.
2. Comparar con árboles de la misma especie forestal pero de distinto lugar para determinar si existe variación en los componentes.
3. Evaluar algún uso industrial para los distintos componentes químicos que la madera posee con la finalidad de aprovecharla al máximo.
4. Establecer la rentabilidad que tiene el proceso de separación de componentes químicos de la madera y las posibles alternativas que se puedan presentar para el uso adecuado de la madera.
7. Para determinar taninos es mejor utilizar un método volumétrico a uno gravimétrico, ya que el primero permite ver claros cambios de viraje en la solución tratada.

BIBLIOGRAFÍA

1. **AGUILAR L.** “Análisis Químico de Maderas de diferentes especies forestales”. Serie Tecnológica Agraria. Vol. 2 Ed. INIA Madrid 1976
2. **BAUM** Stuart. “Introducción a la química orgánica y biológica”. Ed. CECSA, 5ª. Reimpresión. México 1992
3. **GÓMEZ** Orozco Edson Daniel. “Comparación del porcentaje de extracto tánico de la corteza y de la madera de encino (*Quercus tristic Liebm*) proveniente de un bosque natural”. Guatemala, noviembre de 2004.
4. **GUERRERO** Marina Jaime Quillermos. “Polifenoles curtientes en corteza de tres especies forestales peruanas.” Universidad de Chile, octubre de 1997
5. **HART** Harold. “Química orgánica.” Novena edición. Ed. Mc Graw Hill. España 1995.
6. **HON** David. N. Shiraishi Nobro. “Wood and Cellulosic Chemistry”. Ed. Marcel Dekker Inc.
7. **INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL.** “Atlas Nacional de Guatemala”. Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas.
8. **KIRK** Raymond, Othmer Donald. Enciclopedia de Tecnología Química. Ed. UTEHA. Tomos IV, X. Impreso en México. 1962.
9. **MILLAR** Irwin. “Probabilidad y estadística para Ingenieros”. Freund John E. Ed. Prentice Hall. Tercera edición. México 1986.
10. **MONTGOMERY** Douglas. “Diseño y Análisis de experimentos”. Ed. Iberoamericana.

11. **RECINOS** Mendoza, Gustavo Adolfo. **“Evaluación del rendimiento de concretos obtenidos en la secuencia extrativa por lixiviación mediante técnica soxhlet con tres solventes (hexano, etanol y agua) a partir del fruto de arrayán (*Myrica cerífera* L.) recolectados de los bosques naturales del área nor-central de Guatemala”**. Tesis de Ingeniero Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, mayo 2004.

12. **REYES** Castañeda, Pedro. **“Diseño de experimentos aplicados”** Ed. Trillas, México 1982. 344 pp.

13. **SIU** Hwei. **“Probability, Random Variables, & Random Processes.”** Shaum’s Outline Series. Ed. Mc Graw Hill. Estados Unidos 1997.

14. **TSOUMIS** George. **“Science and technology of Wood. Structure, properties, utilization”**. Ed. Van Nostrand.

15. **WINGROVE** Alan **“Química Orgánica.”** Ed. Harla. México 1984.

16. <http://www.griuruguay.com/gti/lignina.htm>

17. <http://www.botanik.uni-bonn.de/conifers/pi/pin/index.htm>

18. <http://www.papelnet.cl/madera/madera.htm>

APÉNDICE A

DATOS CALCULADOS

Tabla VIII. Datos calculados para la celulosa

| ALTURA | No. de árbol (y _j) | | | | | | | | | Σ _j | - y _i |
|---------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|---------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | |
| 1 | 8.53 | 8.48 | 7.98 | 8.12 | 8.18 | 8.45 | 8.53 | 8.48 | 7.98 | 74.73 | 8.30 |
| 2 | 7.75 | 8.68 | 6.96 | 8.53 | 7.58 | 8.11 | 7.75 | 8.68 | 6.96 | 71 | 7.89 |
| 3 | 8.54 | 8.22 | 7.99 | 6.67 | 7.52 | 8.3 | 8.54 | 8.22 | 7.58 | 71.58 | 7.95 |
| Σ _i | 24.82 | 25.38 | 22.93 | 23.32 | 23.28 | 24.86 | 24.82 | 25.38 | 22.52 | 217.31 | 24.15 |
| - Y _j | 8.27 | 8.46 | 7.64 | 7.77 | 7.76 | 8.29 | 8.27 | 8.46 | 7.51 | 72.44 | 8.05 |

Fuente: Datos Originales

Tabla IX. Datos calculados para la lignina

| ALTURA | No. de árbol (y _j) | | | | | | | | | Σ _j | - y _i |
|---------------------|--------------------------------|------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|---------------------|
| | 1 | 2 | y _i | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | |
| 1 | 29.5 | 29.3 | 29.7 | 28.2 | 31 | 32.4 | 31 | 31.8 | 30.1 | 273 | 30.33 |
| 2 | 29.4 | 29.1 | 29.3 | 30.7 | 30 | 31.9 | 30.1 | 28.9 | 29.8 | 269.2 | 29.91 |
| 3 | 27.6 | 28.3 | 28.5 | 30.1 | 29.7 | 30.1 | 29 | 27 | 29.7 | 260 | 28.89 |
| Σ _i | 86.5 | 86.7 | 87.5 | 89 | 90.7 | 94.4 | 90.1 | 87.7 | 89.6 | 802.2 | 89.13 |
| - Y _j | 28.83 | 28.9 | 29.17 | 29.67 | 30.23 | 31.47 | 30.03 | 29.23 | 29.87 | 267.4 | 29.71 |

Fuente: Datos Originales

Tabla X. Datos calculados para sustancias extraíbles

| | No. de árbol (y _j) | | | | | | | | | Σ _j | - |
|----------------|--------------------------------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|----------------|
| ALTURA | 1 | 2 | y _i | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | y _i |
| 1 | 7.93 | 8.36 | 6.96 | 7.01 | 7.25 | 7.56 | 7.52 | 9.66 | 6.84 | 69.10 | 7.68 |
| 2 | 7.68 | 7.97 | 6.65 | 6.95 | 6.57 | 6.52 | 6.85 | 9.55 | 6.71 | 65.45 | 7.27 |
| 3 | 6.92 | 7.00 | 6.51 | 6.69 | 6.36 | 5.48 | 6.75 | 7.60 | 6.51 | 59.81 | 6.65 |
| Σ _i | | | | | | | | | | | |
| | 22.53 | 23.33 | 20.12 | 20.65 | 20.19 | 19.56 | 21.12 | 26.80 | 20.05 | 194.36 | 21.60 |
| - | | | | | | | | | | | |
| Y _j | 7.51 | 7.78 | 6.71 | 6.88 | 6.73 | 6.52 | 7.04 | 8.93 | 6.68 | 64.79 | 7.20 |

Fuente: Datos Originales

Tabla XI. Datos calculados para taninos puros

| | No. de árbol (y _j) | | | | | | | | | Σ _j | - |
|----------------|--------------------------------|------|----------------|------|------|------|------|------|------|----------------|----------------|
| ALTURA | 1 | 2 | y _i | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | y _i |
| 1 | 0.18 | 0.16 | 0.16 | 0.18 | 0.25 | 0.22 | 0.11 | 0.16 | 0.11 | 1.54 | 0.17 |
| 2 | 0.13 | 0.08 | 0.15 | 0.23 | 0.10 | 0.13 | 0.14 | 0.10 | 0.13 | 1.19 | 0.13 |
| 3 | 0.37 | 0.16 | 0.17 | 0.31 | 0.13 | 0.21 | 0.14 | 0.11 | 0.11 | 1.71 | 0.19 |
| Σ _i | | | | | | | | | | | |
| | 0.68 | 0.39 | 0.49 | 0.72 | 0.48 | 0.56 | 0.39 | 0.37 | 0.35 | 4.43 | 0.49 |
| - | | | | | | | | | | | |
| Y _j | 0.23 | 0.13 | 0.16 | 0.24 | 0.16 | 0.19 | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 1.48 | 0.16 |

Fuente: Datos Originales

Tabla XII. Datos calculados para cenizas

| ALTURA | No. de árbol (y _j) | | | | | | | | | Σ _j | - y _i |
|---------------------|--------------------------------|------|----------------|------|------|------|------|------|------|----------------|---------------------|
| | 1 | 2 | y _i | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | |
| 1 | 0.2 | 0.2 | 0.6 | 0.1 | 0.3 | 0.6 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 2.7 | 0.3 |
| 2 | 0.2 | 0.6 | 0.5 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.7 | 0.5 | 0.2 | 3.7 | 0.41 |
| 3 | 0.2 | 0.6 | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.7 | 0.8 | 0.5 | 0.7 | 4.9 | 0.54 |
| Σ _i | 0.6 | 1.4 | 1.7 | 0.8 | 1 | 1.7 | 1.6 | 1.2 | 1.3 | 11.3 | 1.26 |
| - Y _j | 0.2 | 0.47 | 0.57 | 0.27 | 0.33 | 0.57 | 0.53 | 0.40 | 0.43 | 3.77 | 0.42 |

Fuente: Datos Originales

Tabla XIII. Datos calculados para humedad

| ALTURA | No. de árbol (y _j) | | | | | | | | | Σ _j | - y _i |
|---------------------|--------------------------------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|---------------------|
| | 1 | 2 | y _i | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | |
| 1 | 8.53 | 8.48 | 7.98 | 8.12 | 8.18 | 8.45 | 8.53 | 8.48 | 7.98 | 74.73 | 8.30 |
| 2 | 7.75 | 8.68 | 6.96 | 8.53 | 7.58 | 8.11 | 7.75 | 8.68 | 6.96 | 71 | 7.89 |
| 3 | 8.54 | 8.22 | 7.99 | 6.67 | 7.52 | 8.3 | 8.54 | 8.22 | 7.58 | 71.58 | 7.95 |
| Σ _i | 24.82 | 25.38 | 22.93 | 23.32 | 23.28 | 24.86 | 24.82 | 25.38 | 22.52 | 217.31 | 24.15 |
| - Y _j | 8.27 | 8.46 | 7.64 | 7.77 | 7.76 | 8.29 | 8.27 | 8.46 | 7.51 | 72.44 | 8.05 |

Fuente: Datos Originales

APÉNDICE B

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Tabla XIV. Resultados del Análisis de Varianza para Celulosa

| Fuente de variación | Sumatoria de cuadrados | Grados de libertad | Media cuadrática | Fo | Ft |
|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------|-------------|
| Altura | 37.76206156 | 2 | 18.881 | 3.568 | 3.63 |
| Repeticiones | 50.086482 | 8 | 6.2608 | | |
| Error | 84.67455911 | 16 | 5.2922 | | |
| Total | 172.5231027 | 26 | | | |

Fuente: Sección de Análisis Estadístico

Tabla XV. Resultados del Análisis de Varianza para Lignina

| Fuente de Variación | Sumatoria de cuadrados | Grados de libertad | Media cuadrática | Fo | Ft |
|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------|-------------|
| Altura | 9.9288889 | 2 | 4.9644 | 5.402 | 3.63 |
| Repeticiones | 16.313333 | 8 | 2.0392 | | |
| Error | 14.704444 | 16 | 0.919 | | |
| Total | 40.946667 | 26 | | | |

Fuente: Sección de Análisis Estadístico

Tabla XVI. Resultados del Análisis de Varianza para Extraíbles

| Fuente de variación | Sumatoria de cuadrados | Grados de libertad | Media cuadrática | Fo | Ft |
|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------|-------------|
| Altura | 4.8602 | 2 | 2.43 | 15.396 | 3.63 |
| Repeticiones | 14.2747 | 8 | 1.784 | | |
| Error | 2.52551 | 16 | 0.158 | | |
| Total | 21.6604 | 26 | | | |

Fuente: Sección de Análisis Estadístico

Tabla XVII. Resultados del Análisis de Varianza para Taninos

| Fuente de Variación | Sumatoria de cuadrados | Grados de libertad | Media cuadrática | Fo | Ft |
|---------------------|------------------------|--------------------|------------------|-------|------|
| | | | | 2.469 | 3.63 |
| Altura | 0.0152156 | 2 | 0.008 | | |
| Repeticiones | 0.0506852 | 8 | 0.006 | | |
| Error | 0.0493108 | 16 | 0.003 | | |
| Total | 0.1152116 | 6 | | | |

Fuente: Sección de Análisis Estadístico

Tabla XVIII. Resultados del Análisis de Varianza para Cenizas

| Fuente de variación | Sumatoria de cuadrados | Grados de libertad | Media cuadrática | Fo | Ft |
|---------------------|------------------------|--------------------|------------------|------|------|
| | | | | 5.17 | 3.63 |
| Altura | 0.26963 | 2 | 0.135 | | |
| Repeticiones | 0.414074 | 8 | 0.052 | | |
| Error | 0.417037 | 16 | 0.026 | | |
| Total | 1.100741 | 26 | | | |

Fuente: Sección de Análisis Estadístico

Tabla XIX. Resultados del Análisis de Varianza para Humedad

| Fuente de variación | Sumatoria de cuadrados | Grados de libertad | Media cuadrática | Fo | Ft |
|---------------------|------------------------|--------------------|------------------|------|------|
| | | | | 1.99 | 3.63 |
| Altura | 0.89525185 | 2 | 0.4476 | | |
| Repeticiones | 3.33954074 | 8 | 0.4174 | | |
| Error | 3.60254815 | 16 | 0.2252 | | |
| Total | 7.83734074 | 26 | | | |

Fuente: Sección de Análisis Estadístico

APÉNDICE C

PRUEBA DE TUKEY PARA LOS DISTINTOS COMPONENTES

Tabla XX. Datos obtenidos para la prueba de Medias para Celulosa

| Tratamiento* | Media | Resultado |
|---------------------|--------------|------------------|
| 3 | 55.405 | A |
| 1 | 53.488 | B |
| 2 | 52.565 | B |

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XXI. Datos obtenidos para la prueba de Medias para Lignina

| Tratamiento* | Media | Resultado |
|---------------------|--------------|------------------|
| 1 | 30.333 | A |
| 2 | 29.911 | B |
| 3 | 28.889 | B |

Fuente: Análisis Estadístico

-
- * Los tratamientos corresponden a las alturas trabajadas:
 - 1 = dap: diámetro a la altura del pecho (1.30 m)
 - 2 = media: altura comercial media
 - 3 = punta: altura apical
 -

Tabla XXII. Datos obtenidos para la prueba de Medias para Extraíbles

| Tratamiento * | Media | Resultado |
|----------------------|--------------|------------------|
| 1 | 7.6784 | A |
| 2 | 7.276 | A |
| 3 | 6.6460 | B |

Fuente: Análisis Estadístico

Tabla XXIII. Datos obtenidos para la prueba de Medias para Taninos Puros

| Tratamiento * | Media | Resultado |
|----------------------|--------------|------------------|
| 3 | 0.1859 | A |
| 1 | 0.1708 | A |
| 2 | 0.1324 | A |

Fuente: Sección de Análisis Estadístico

-
- * Los tratamientos corresponden a las alturas trabajadas:
 - 1 = dap: diámetro a la altura del pecho (1.30 m)
 - 2 = media: altura comercial media
 - 3 = punta: altura apical
 -

Tabla XXIV. Datos obtenidos para la prueba de Medias para Cenizas

| Tratamiento * | Media | Resultado |
|--------------------------|--------------|------------------|
| 3 | 0.5444 | A |
| 2 | 0.4444 | B |
| 1 | 0.3000 | B |

Fuente: Sección de Análisis Estadístico

Tabla XXV. Datos obtenidos para la prueba de Medias para Humedad

| Tratamiento * | Media | Resultado |
|--------------------------|--------------|------------------|
| 1 | 8.3033 | A |
| 3 | 7.9533 | A |
| 2 | 7.8889 | A |

Fuente: Sección de Análisis Estadístico

-
- * Los tratamientos corresponden a las alturas trabajadas:
 - 1 = dap: diámetro a la altura del pecho (1.30 m)
 - 2 = media: altura comercial media
 - 3 = punta: altura apical
 -

APÉNDICE D

DATOS ORIGINALES

Tabla XXVI. Datos Originales para celulosa y cenizas

| Árbol | Muestra* | P. M. ANHID | P.P.F | P.L | P.L.E | P.T.M | % CELULOSA | % CENIZAS |
|----------|----------|----------------|-------|-------|-------|-------|---------------|--------------|
| 1 | 1 | 1.412 | 0.5 | 0.295 | 6.905 | 7.5 | 56.81 | 0.2 |
| | 2 | 1.395 | 0.51 | 0.294 | 6.924 | 7.5 | 54.56 | 0.2 |
| | 3 | 1.399 | 0.52 | 0.276 | 6.981 | 7.5 | 56.13 | 0.2 |
| 2 | 1 | 1.394 | 0.52 | 0.293 | 6.873 | 7.5 | 53.24 | 0.2 |
| | 2 | 2.066 | 1.187 | 0.291 | 6.902 | 7.5 | 54.11 | 0.6 |
| | 3 | 2.098 | 1.205 | 0.283 | 6.975 | 7.5 | 56.73 | 0.6 |
| 3 | 1 | 2.084 | 1.201 | 0.293 | 6.978 | 7.5 | 54.89 | 0.6 |
| | 2 | 2.064 | 1.203 | 0.297 | 7.001 | 7.5 | 52.65 | 0.5 |
| | 3 | 1.420 | 0.524 | 0.285 | 7.012 | 7.5 | 57.12 | 0.6 |
| 4 | 1 | 1.420 | 0.54 | 0.282 | 6.974 | 7.5 | 55.61 | 0.1 |
| | 2 | 1.290 | 0.506 | 0.301 | 6.979 | 7.5 | 44.94 | 0.3 |
| | 3 | 1.430 | 0.535 | 0.307 | 6.998 | 7.5 | 54.86 | 0.4 |
| 5 | 1 | 1.390 | 0.519 | 0.310 | 6.956 | 7.5 | 52.03 | 0.3 |
| | 2 | 1.395 | 0.525 | 0.300 | 7.007 | 7.5 | 53.25 | 0.6 |
| | 3 | 1.419 | 0.529 | 0.297 | 7.023 | 7.5 | 55.53 | 0.4 |
| 6 | 1 | 1.390 | 0.495 | 0.324 | 6.933 | 7.5 | 52.78 | 0.6 |
| | 2 | 1.362 | 0.498 | 0.319 | 7.011 | 7.5 | 50.95 | 0.4 |
| | 3 | 1.384 | 0.524 | 0.301 | 7.089 | 7.5 | 52.84 | 0.7 |
| 7 | 1 | 1.400 | 0.53 | 0.310 | 6.936 | 7.5 | 51.79 | 0.1 |
| | 2 | 1.400 | 0.53 | 0.294 | 6.986 | 7.5 | 53.65 | 0.7 |
| | 3 | 1.370 | 0.51 | 0.301 | 6.994 | 7.5 | 52.13 | 0.8 |
| 8 | 1 | 1.380 | 0.5 | 0.318 | 6.775 | 7.5 | 50.77 | 0.2 |
| | 2 | 1.390 | 0.51 | 0.289 | 6.784 | 7.5 | 53.46 | 0.5 |
| | 3 | 1.400 | 0.52 | 0.270 | 6.93 | 7.5 | 56.36 | 0.5 |
| 9 | 1 | 1.412 | 0.54 | 0.298 | 6.987 | 7.5 | 53.47 | 0.4 |
| | 2 | 1.412 | 0.52 | 0.297 | 6.997 | 7.5 | 55.51 | 0.2 |
| | 3 | 1.390 | 0.48 | 0.301 | 7.012 | 7.5 | 56.94 | 0.7 |

-
- * 1 = dap: diámetro a la altura del pecho (1.30 m)
 - 2 = media: altura comercial media
 - 3 = punta: altura apical

Tabla XXVII. Datos originales para lignina y sustancias extraíbles

| Árbol | Muestra* | PESO (G) | % LIGNINA | peso (g) | % extraíbles |
|----------|----------|----------|-----------|----------|--------------|
| 1 | 1 | 0.295 | 29.50 | 6.905 | 7.933 |
| | 2 | 0.294 | 29.40 | 6.924 | 7.680 |
| | 3 | 0.276 | 27.60 | 6.981 | 6.920 |
| 2 | 1 | 0.293 | 29.30 | 6.873 | 8.360 |
| | 2 | 0.291 | 29.10 | 6.902 | 7.973 |
| | 3 | 0.283 | 28.30 | 6.975 | 7.000 |
| 3 | 1 | 0.293 | 29.30 | 6.978 | 6.960 |
| | 2 | 0.297 | 29.70 | 7.001 | 6.653 |
| | 3 | 0.285 | 28.50 | 7.012 | 6.507 |
| 4 | 1 | 0.282 | 28.20 | 6.974 | 7.013 |
| | 2 | 0.301 | 30.10 | 6.979 | 6.947 |
| | 3 | 0.307 | 30.70 | 6.998 | 6.693 |
| 5 | 1 | 0.310 | 31.00 | 6.956 | 7.253 |
| | 2 | 0.300 | 30.00 | 7.007 | 6.573 |
| | 3 | 0.297 | 29.70 | 7.023 | 6.360 |
| 6 | 1 | 0.324 | 32.40 | 6.933 | 7.560 |
| | 2 | 0.319 | 31.90 | 7.011 | 6.520 |
| | 3 | 0.301 | 30.10 | 7.089 | 5.480 |
| 7 | 1 | 0.310 | 31.00 | 6.936 | 7.520 |
| | 2 | 0.294 | 29.40 | 6.986 | 6.853 |
| | 3 | 0.301 | 30.10 | 6.994 | 6.747 |
| 8 | 1 | 0.318 | 31.80 | 6.775 | 9.667 |
| | 2 | 0.289 | 28.90 | 6.784 | 9.547 |
| | 3 | 0.270 | 27.00 | 6.93 | 7.600 |
| 9 | 1 | 0.298 | 29.80 | 6.987 | 6.840 |
| | 2 | 0.297 | 29.70 | 6.997 | 6.707 |
| | 3 | 0.301 | 30.10 | 7.012 | 6.507 |

-
- * 1 = dap: diámetro a la altura del pecho (1.30 m)
 - 2 = media: altura comercial media
 - 3 = punta: altura apical

Tabla XXVIII. Datos originales para taninos puros y porcentaje de humedad

| Árbol | Muestra* | vol KMnO ₄ (ml) | peso (g) | % Taninos Puros | % HUMEDAD |
|----------|----------|-------------------------------|-------------|--------------------|--------------|
| 1 | 1 | 1.8 | 0.008 | 0.163 | 8.53 |
| | 2 | 1.5 | 0.006 | 0.131 | 7.75 |
| | 3 | 1.75 | 0.007 | 0.158 | 8.54 |
| 2 | 1 | 1.75 | 0.007 | 0.158 | 8.48 |
| | 2 | 1.5 | 0.006 | 0.131 | 8.68 |
| | 3 | 1.75 | 0.007 | 0.158 | 8.22 |
| 3 | 1 | 1.8 | 0.008 | 0.163 | 7.98 |
| | 2 | 1.4 | 0.006 | 0.121 | 6.96 |
| | 3 | 1.85 | 0.008 | 0.168 | 7.99 |
| 4 | 1 | 2 | 0.008 | 0.184 | 8.12 |
| | 2 | 1.6 | 0.007 | 0.142 | 8.53 |
| | 3 | 1.65 | 0.007 | 0.147 | 6.67 |
| 5 | 1 | 2 | 0.008 | 0.184 | 8.18 |
| | 2 | 1.4 | 0.006 | 0.121 | 7.58 |
| | 3 | 1.65 | 0.007 | 0.147 | 7.52 |
| 6 | 1 | 1.95 | 0.008 | 0.179 | 8.45 |
| | 2 | 1.5 | 0.006 | 0.131 | 8.11 |
| | 3 | 1.85 | 0.008 | 0.168 | 8.3 |
| 7 | 1 | 1.85 | 0.008 | 0.168 | 8.53 |
| | 2 | 1.6 | 0.007 | 0.142 | 7.75 |
| | 3 | 1.6 | 0.007 | 0.142 | 8.54 |
| 8 | 1 | 1.8 | 0.008 | 0.163 | 8.48 |
| | 2 | 1.4 | 0.006 | 0.121 | 8.68 |
| | 3 | 1.65 | 0.007 | 0.147 | 8.22 |
| 9 | 1 | 1.85 | 0.008 | 0.168 | 7.98 |
| | 2 | 1.5 | 0.006 | 0.131 | 6.96 |
| | 3 | 1.65 | 0.007 | 0.147 | 7.58 |

-
- * 1 = dap: diámetro a la altura del pecho (1.30 m)
 - 2 = media: altura comercial media
 - 3 = punta: altura apical

APÉNDICE E

Secuencia en una titulación de taninos con Permanganato de Potasio

Figura 30. Solución de extracto tánico



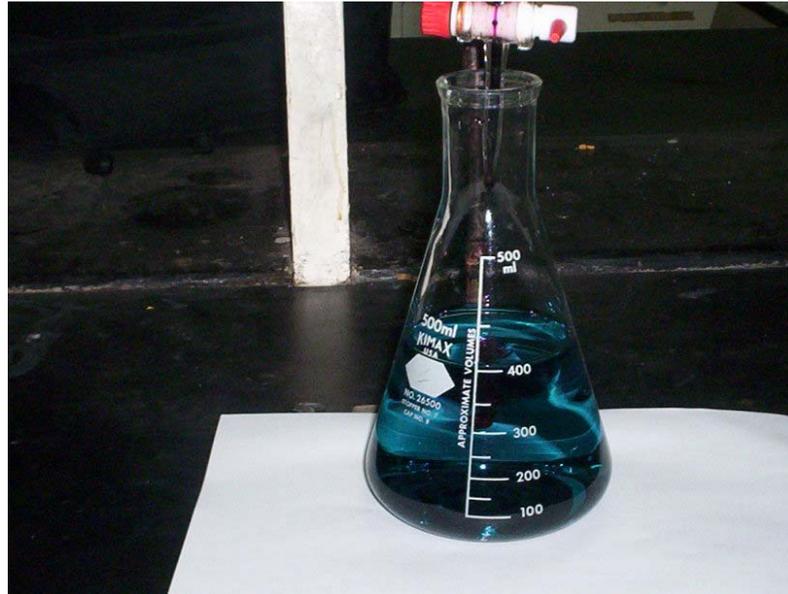
Fuente: Liz María Eugenia Rodríguez

Figura 31. Solución de extracto tánico con indicador Índigo de Carmín



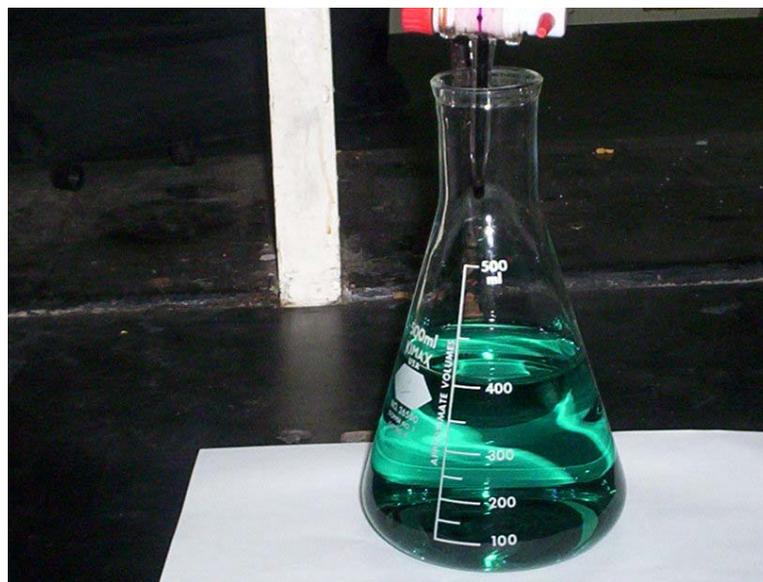
Fuente: Liz María Eugenia Rodríguez

Figura 32. Primer cambio de color al agregar permanganato de potasio



Fuente: Liz María Eugenia Rodríguez

Figura 33. Segundo cambio al titular con permanganato de potasio



Fuente: Liz María Eugenia Rodríguez

Figura 34. Tercer cambio en la titulación con permanganato de potasio



Fuente: Liz María Eugenia Rodríguez

Figura 35. Finalización de la titulación con permanganato de potasio



Fuente: Liz María Eugenia Rodríguez

Figura 36. Muestras de lignina obtenidas en el laboratorio



Fuente: Liz María Eugenia Rodríguez

Figura 37. Muestras de celulosa obtenida en el laboratorio



Fuente: Liz María Eugenia Rodríguez

Figura 38. Muestras de extracto tánico obtenidas en el laboratorio



Fuente: Liz María Eugenia Rodríguez