

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Agroforestal

Determinación de las principales propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Cordia dodecandra* (Siricote), *Mastichodendron capiri* var. *Tempisque* (Tempisque), *Bucida buceras* (Pucte), *Swartzia cubensis* (Lora-sangre), y *Astronium graveolens* (Jobillo)

Trabajo de graduación presentado por Luis Gerardo Bonilla Hidalgo para
optar al grado académico de
Licenciado en Ingeniería Forestal

Guatemala

2007

**Determinación de las principales propiedades físicas y mecánicas de la
madera de *Cordia dodecandra* (Siricote), *Mastichodendron capiri* var.
Tempisque (Tempisque), *Bucida buceras* (Pucte), *Swartzia cubensis*
(Lora-sangre), y *Astronium graveolens* (Jobillo)**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Agroforestal

Determinación de las principales propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Cordia dodecandra* (Siricote), *Mastichodendron capiri* var. *Tempisque* (Tempisque), *Bucida buceras* (Pucte), *Swartzia cubensis* (Llora-sangre), y *Astronium graveolens* (Jobillo)

Trabajo de graduación presentado por Luis Gerardo Bonilla Hidalgo para
optar al grado académico de
Licenciado en Ingeniería Forestal


Guatemala

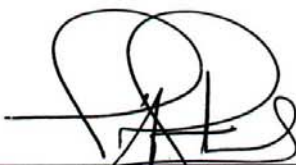
2007

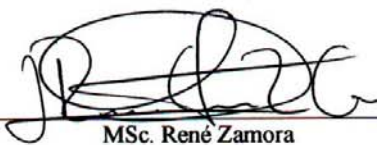
Vo. Bo. :

(f) 
MSc. René Zamora

Tribunal:

(f) 
Inga. Lis Lima

(f) 
MSc. César Castañeda

(f) 
MSc. René Zamora

Fecha de aprobación: Guatemala de la Asunción, 26 de Octubre de 2007

PREFACIO

Quisiera agradecer al Departamento de Ingeniería Forestal y al Departamento de Ingeniería Civil, por su gran apoyo en la realización de éste documento, y al Proyecto de Investigación Forestal del Instituto Nacional de Bosques (INAB-CATIE), por impulsar el desarrollo de estudios que puedan generar avances en el sector forestal, y al mismo tiempo involucrar a las nuevas generaciones de profesionales que egresan de las diferentes instituciones académicas.

Me gustaría agradecerle a Dios, por permitirme concluir una etapa más de mi vida, a mi padre, que ha sido un gran apoyo y una gran inspiración, a mi madre y a mis hermanos que con su incondicional amor y paciencia, me han ayudado a superar todas las pruebas. Finalmente a mis amigos, por su gran ayuda y cariño siempre que los he necesitado, gracias.

CONTENIDO

	Página.
PREFACIO.....	ii
LISTA DE CUADROS.....	vii
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	ix
RESUMEN.....	xi
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	2
III. MARCO TEÓRICO.....	3
A. Propiedades básicas de la madera.....	3
1. Anisotropía.....	3
2. Higroscopicidad.....	3
3. Polaridad.....	4
B. Propiedades físicas de la madera.....	5
1. Características organolépticas.....	5
a. Olor.....	5
b. Sabor.....	5
c. Color.....	5
d. Grano.....	6
e. Textura.....	7
2. Contenido de humedad.....	7
3. Contracción.....	8

4. Relación contracción tangencial y radial.....	9
5. Densidad.....	9
6. Posibles usos de la madera según sus propiedades físicas.....	11
a. Estructuras.....	11
b. Encofrados.....	12
c. Carpintería de obra.....	12
d. Pisos.....	12
e. Mangos de herramientas.....	12
f. Durmientes postes y pilotes.....	12
C. Propiedades mecánicas.....	13
1. Propiedades elásticas.....	14
2. Módulo de elasticidad.....	15
3. Módulo de ruptura.....	15
4. Flexión estática.....	16
5. Compresión paralela a la fibra.....	17
6. Compresión perpendicular a la fibra.....	19
7. Prueba de dureza.....	19
8. Prueba de corte.....	19
D. Análisis estadístico para pruebas físicas y mecánicas de la madera.....	20
E. Determinación de esfuerzos básicos.....	22
1. Factor de corrección por variabilidad.....	22
2. Corrección de esfuerzos por disminución de la resistencia de la madera sujeta a cargas estáticas por largo tiempo	23
3. Factor de corrección por grado de sazónamiento de la madera.....	23

4. Factor de seguridad.....	23
5. Resumen de corrección para obtener los esfuerzos básicos.....	23
F. Posibles usos según las propiedades mecánicas.....	24
IV. METODOLOGÍA.....	25
A. Elección de especies.....	25
B. Lugar de recolección.....	25
C. Recolección de las muestras.....	25
1. Identificación de las muestras.....	25
2. Selección y número óptimo de árboles.....	26
3. Marcado y extracción de los árboles.....	26
4. Aserrado de las muestras.....	26
D. Determinación de las propiedades físicas.....	27
1. Características organolépticas.....	27
2. Peso específico.....	28
3. Contenido de humedad.....	29
4. Contracciones.....	29
E. Determinación de las propiedades mecánicas.....	30
1. Compresión paralela a la fibra.....	30
2. Compresión perpendicular a la fibra.....	30
3. Prueba de dureza.....	31
4. Flexión estática.....	32
5. Prueba de corte.....	33
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
A. Jobillo (<i>Astronium graveolens</i>).....	34

1. Descripción botánica del Siricote.....	34
2. Propiedades físicas de la madera del Jobillo.....	35
3. Propiedades mecánicas de la madera del Jobillo.....	37
B. Tempisque (<i>Mastichodendron capiri</i> var. <i>Tempisque</i>).....	38
1. Descripción botánica del Tempisque.....	38
2. Propiedades físicas del Tempisque.....	39
3. Propiedades mecánicas de la madera del Tempisque.....	41
C. Llorá-sangre (<i>Swartzia cubensis</i>).....	42
1. Descripción botánica del Llorá-sangre.....	42
2. Propiedades físicas de la madera de Llorá-sangre.....	43
3. Propiedades mecánicas de la madera.....	45
D. Pucte (<i>Bucida buceras</i>).....	46
1. Descripción botánica del Pucte.....	46
2. Propiedades físicas de la madera del Pucte.....	47
3. Propiedades mecánicas de la madera del Pucte.....	48
E. Siricote (<i>Cordia dodecandra</i>).....	50
1. Descripción botánica del Siricote.....	50
2. Propiedades físicas de la madera del Siricote.....	51
3. Propiedades mecánicas del Siricote.....	52
VI. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES.....	54
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	56
VIII. APÉNDICES.....	58
A. Fotografías de las especies estudiadas.....	59
B. Calibración de la compresora manual.....	62

LISTADO DE CUADROS

Cuadro	Página.
3.1. Clasificación de la madera según contracción (Benítez, 1988).....	9
3.2. Clasificación de la madera según relación (CT/CR), Casasola (1998).....	10
3.3. Clasificación de la madera según su peso específico (Benítez, 1988).....	11
3.4. Requerimientos de resistencia de acuerdo al uso de la madera.....	24
4.5. Medidas de las piezas a utilizar en las diferentes pruebas.....	27
5.6. Características organolépticas del Jobillo.....	35
5.7. Contenido de humedad y pesos del Jobillo.....	35
5.8. Valores de contracción del Jobillo.....	36
5.9. Esfuerzos últimos y básicos del Jobillo.....	37
5.10. Medidas de flexión estática en el Jobillo.....	37
5.11. Características organolépticas del Tempisque.....	39
5.12. Contenido de humedad y pesos del Tempisque.....	39
5.13. Valores de contracción del Tempisque.....	40
5.14. Medidas de flexión estática del Tempisque.....	41
5.15. Medidas de flexión estática del Tempisque.....	41
5.16. Características organolépticas del Lloro-sangre.....	43
5.17. Contenido de humedad y pesos del Lloro-sangre.....	43
5.18. Valores de contracción del Lloro-sangre.....	44
5.19. Esfuerzos últimos y básicos del Lloro-sangre.....	45
5.20. Medidas de flexión estática del Lloro-sangre.....	45
5.21. Características organolépticas del Pucte.....	47
5.22. Contenido de humedad y pesos del Pucte.....	47

5.23	Valores de contracción del Pucte.....	47
5.24	Esfuerzos últimos y básicos del Pucte.....	48
5.25	Medidas de flexión estática del Pucte.....	49
5.26	Características organolépticas del Siricote.....	51
5.27	Contenido de humedad y pesos del Siricote.....	51
5.28	Valores de contracción del Siricote.....	52
5.29	Esfuerzos últimos y básicos del Siricote.....	52
5.30	Medidas de flexión estática en el Siricote.....	53

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura.	Página.
3.1 Ejes de la madera (Amburguey <i>et al.</i> 1999).....	3
3.2 Escala Munsell (Globe, 2003).....	6
3.3 Contracción característica y distorsión de las piezas planas, cuadradas y redondas afectadas por la dirección de los anillos de crecimiento (Amburgey <i>et. al.</i> 1999)	9
3.4 Diagrama-esfuerzo deformación.....	13
3.5 Diagrama carga-deformación.....	14
3.6 Diagrama del ensayo de la flexión.....	16
3.7 Posibles fallas de la flexión estática.....	17
3.8 Representación esquemática del ensayo de compresión paralela a la fibra.....	18
3.9 Tipos de falla en la madera bajo compresión paralela a la fibra.....	18
3.10 Representación esquemática del ensayo de compresión perpendicular a la fibra	19
3.11 Probeta y herramienta para el ensayo de corte.....	20
4.12 Prueba de compresión paralela a la fibra en Pucte.....	30
4.13 Ensayo de compresión perpendicular a la fibra en Jobillo.....	31
4.14 Ensayo de dureza en una pieza de Llorá-sangre.....	31
4.15 Ensayo de flexión para el Tempisque.....	33
4.16 Ensayo de corte sobre una probeta de Jobillo.....	33
5.17 A, rama con hojas; B, flor masculina; C, flores femeninas, del Jobillo.....	34
5.18 Relación entre la contracción y humedad del Jobillo.....	36
5.19 A; rama con inflorescencia; B, infrutescencia del Tempisque.....	38
5.20 Relación entre la contracción y humedad del Tempisque.....	40

5.21 Relación entre la concentración y humedad del Lloro-sangre.....	42
5.22 A, rama de la parte inferior del árbol; B, inflorescencia; C, flor del Pucte.....	46
5.23 Relación entre la concentración y humedad del Pucte.....	48
5.24 Prueba de flexión estática del Pucte.....	49
5.25 A, rama con flores; B, fruto; C, haz de una hoja del Siricote.....	52

RESUMEN

Guatemala, siendo un país con una alta vocación forestal, actualmente cuenta con muy pocos estudios, los cuales permitan dar a conocer el potencial comercial, industrial y tecnológico de las diferentes especies forestales con las cuales cuenta el país. A raíz de esto y a través del Proyecto CATIE-INAB-Investigación Forestal, se propuso la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de las siguientes especies: *Cordia dodecandra* (Siricote), *Mastichodendron capiri* var. *Tempisque* (Tempisque), *Bucida buceras* (Pucte), *Swartzia cubensis* (Llora-sangre), y *Astronium graveolens* (Jobillo).

En el caso de las pruebas físicas, se determinó el contenido de humedad de las especies, la densidad aparente, la densidad específica al 12 y al 8 % de humedad así como las contracciones en los diferentes ejes (Tangencial, Radial y Axial). Por otra parte, se realizaron pruebas mecánicas de flexión estática, compresión paralela y perpendicular a la fibra, pruebas de corte y dureza. Todos las pruebas se llevaron acabo bajo los estándares de la (ASTM, American Society for Testing and Materials).

Con base a las pruebas realizadas, se pudo establecer que el Tempisque fue la madera más pesada de las cinco especies evaluadas, y el Llora-sangre la menos pesada. En general las especies se catalogaron como “extremadamente pesadas”, a excepción del Llora-sangre que se posicionó dentro de las maderas “pesadas”. Las cinco especies cuentan con maderas estables, que permiten realizar trabajos pesados. En el caso del Siricote, podría reemplazar a la caoba y al cedro si el color no es relevante para el cliente. Dentro de las cinco especies la madera más difícil de trabajar es el Pucte, y la madera que cuenta con mayor cantidad de usos fue el Jobillo, debido a sus características organolépticas, físicas y mecánicas, esta madera puede ser utilizada para fabricar productos especiales tales como arcos de caza, hasta pisos exóticos para residencias exclusivas.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, a pesar de las vastas deforestaciones, especialmente de los bosques naturales, Guatemala sigue siendo uno de los países más ricos en diversidad de especies forestales. Existen ya algunos estudios de las propiedades físicas y mecánicas, especialmente de las primarias o comerciales, mas no existe una variedad de documentos que respalden las diferentes propiedades y usos de especies secundarias como las expuestas en ésta investigación, que en muchos casos por sus características podrían llegar a sustituir algunas de las especies primarias.

En Guatemala, el mayor consumo de madera se utiliza con fines industriales o energéticos. El volumen promedio de madera cosechada de 1,999 al 2,001 con destino a la industria forestal nacional, fue de 575,000 m³, sin incluir la madera ilícita, que abarca alrededor del 30-50% del volumen cosechado por año (FAO, 2004). Debido a la alta demanda industrial de materia prima, es de suma importancia encontrar alternativas viables que permitan suplir los diferentes mercados tanto a nivel nacional como a nivel mundial, no sólo en cuestiones de volumen sino en cuestiones de calidad.

Algunas de las especies evaluadas en este documento pudieron ser comparadas con documentos elaborados por la FAO en el año de 1958, que en general muestran el mismo comportamiento hacia las diferentes pruebas físicas y mecánicas realizadas. En base a los resultados se pueden observar y en ciertos casos confirmar, la calidad y el potencial con el cual cuentan el jovillo, el tempisque, el siricote, y los más comercializados como lo son el Pucte y el Lloro-sangre.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo General

Determinar las principales propiedades físico-mecánicas de las maderas de *Cordia dodecandra* (Siricote), *Mastichodendron capiri* var. *Tempisque* (Tempisque), *Bucida buceras* (Pucte), *Swartzia cubensis* (Llora-sangre), y *Astronium graveolens* (Jobillo).

B. Objetivos Específicos

1. Determinar las siguientes propiedades físicas de las especies seleccionadas: Peso específico, densidad, contracción longitudinal, contracción radial, contracción tangencial, contenido de humedad
2. Determinar las siguientes propiedades mecánicas de las especies seleccionadas: flexión, estática, compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra, corte, y dureza.
3. Brindar recomendaciones y usos de las especies en base a los resultados obtenidos de las pruebas físicas mecánicas.
4. Describir las características organolépticas de cada especie.

III. MARCO TEÓRICO

A. Propiedades Básicas de la Madera

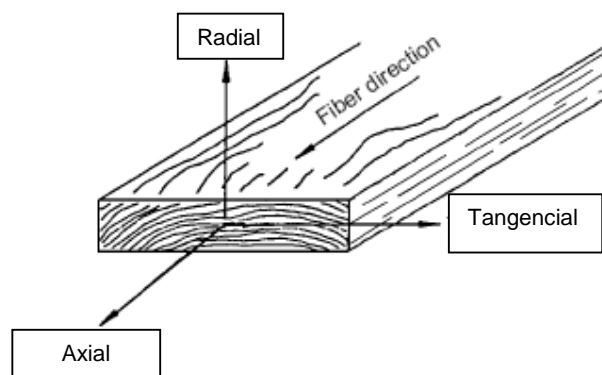
1. **Anisotropía.** La madera no es un material homogéneo, sino un material muy diferente según el plano o la dirección que se considere. Como resultado de esa desigual configuración, presenta un desigual comportamiento (Vignote y Jiménez, 1996).

Para dar una idea de cómo se comporta, la madera resiste de entre 20 y 200 veces más en el sentido del eje del árbol, que en el sentido transversal del árbol (Vignote y Jiménez, 1996).

Este comportamiento tan desigual de la madera, hace obligado denominar de forma diferente, los planos y las direcciones que se consideren (Vignote y Jiménez, 1996).

- Dirección axial: la del eje del árbol.
- Dirección radial: la dirección de los radios, perpendicular al eje del árbol.
- Dirección tangencial: la dirección tangencial al árbol, perpendicular al eje del árbol.

Figura 3.1. Ejes de la madera



(Amburgey *et al.* 1999)

2. **Higroscopicidad.** La madera contiene huecos en el lumen celular, entre las microfibrillas y entre las fibrillas elementales (Vignote y Jiménez, 1996).

El hueco del lumen celular es relativamente tan grande, que su fuerza capilar no es suficiente como para captar agua de la atmósfera, llenándose sólo de agua, cuando la madera se sumerge en ella (Vignote y Jiménez, 1996).

Por el contrario, los huecos entre las microfibrillas y las fibrillas elementales son tan pequeños que originan fuerzas de Van der Waals, capilares y de adhesión superficial suficientes como para captar agua de la atmósfera que le rodea. Como, por otra parte, la atmósfera tiene

una fuerza desecante, dependiente de la temperatura, humedad relativa y presión a la que se encuentra, es también capaz de captar agua de la pared celular de la madera. Dependiendo de la fuerza de uno y otro, la madera capta o cede agua. Esta propiedad de los cuerpos de establecer intercambio de humedad con el ambiente se denomina higroscopicidad (Vignote y Jiménez, 1996).

Resumiendo, se puede establecer que el agua puede estar contenida en la madera en las siguientes formas:

- Agua de sorción: Es la que está retenida por fuerzas de tipo Van der Waals, consecuencia de los grupos polares activos de la pared celular. Esta agua es el que más fuertemente queda retenido por la pared celular. La madera puede llegar a contener un 8 % de peso de agua respecto del peso de la madera seca, como consecuencia de esta fuerza (Vignote y Jiménez, 1996).
- Agua de adsorción: Es el agua que queda retenido en la pared celular como consecuencia de la fuerza de adhesión superficial. La madera puede llegar a contener hasta un 6 a un 8 % de peso de agua respecto del peso de la madera seca, debido a la adhesión superficial (Vignote y Jiménez, 1996).
- Agua de condensación o capilar: Es la retenida por fuerzas capilares, provocadas por los espacios entre microfibrillas. La madera puede llegar a contener entre un 14 a un 16 % de peso de agua respecto del peso de la madera seca, en estos capilares (Vignote y Jiménez, 1996).
- Agua libre: Es la contenida en el lumen de las células prosenquimatosas. Su fuerza de retención es muy pequeña, de forma que no puede captar agua de la atmósfera, solo puede introducirse si se produce una inmersión de la madera en agua (Vignote y Jiménez, 1996).

3. Polaridad. La madera tiene carácter polar y por tanto tiene afinidad con los productos polares como puede ser el agua, los pegamentos de carácter polar, los barnices (Vignote y Jiménez, 1996).

B. Propiedades físicas de la madera

1. **Características organolépticas.** Son aquellas que se determinan a través de la observación, la degustación y el olfato, con finalidad de identificación y reconocimiento, tanto en el campo como a la hora del aserrado y secado. A la madera se le puede determinar su olor, sabor, color, textura y grano (Lima, 2003).

a. **Olor.** Durante el corte de los árboles, su manejo y su aserrado, es posible detectar el olor que ésta pueda desprender. Este olor es producido por diferentes sustancias volátiles contenidas en las maderas. Para fines prácticos, el olor de la madera puede ser ausente o no distintivo, aromático o desagradable (Benítez y Montesinos 1988).

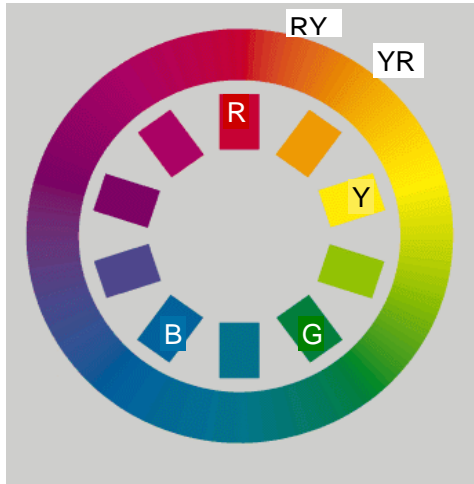
b. **Sabor.** Efecto que en el sentido del gusto, producen algunas sustancias contenidas en las células de la madera. De la misma manera que el olor, el sabor de la madera puede saberse si se degusta el aserrín de la misma. Debe tenerse mucho cuidado con aquellas que presenten olor desagradable, ya que puede contener elementos tóxicos. El sabor puede definirse como ausente o no distintivo, amargo, dulce, salado o picante, aunque depende mucho del criterio del observador (Benítez y Montesinos 1988).

c. **Color.** Para la determinación del color, es necesario referirse a una escala específica, de tal forma que se eviten confusiones. El código Munsell bajo cada color en la tabla de colores, es una notación universal que describe el color. El primer conjunto de números y letras representa el Matiz (hue), que es la posición del color en la rueda de colores (Y = amarillo, R = rojo, G = verde, B = azul, YR = amarillo-rojo, RY = rojo-amarillo) (Globe 2003).

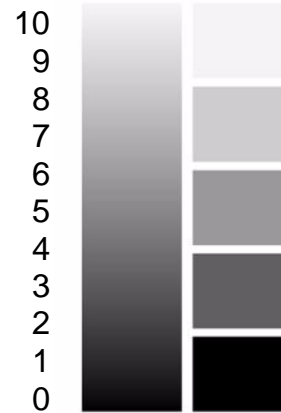
El número que sigue es el Valor (value), que indica la claridad del color. El rango de valores va desde cero para negro puro hasta diez para blanco (Globe 2003).

El último número se conoce como el Cromo (chroma) que describe la intensidad del color. Colores de valores pequeños de cromo se les dice colores débiles, mientras que a los de valores altos se les dice colores altamente saturados o fuertes. La escala comienza en cero para los colores neutrales, pero no hay un final arbitrario para la escala (Ver figura 2) (Globe 2003).

Figura 3.2 Escala Munsell (Globe 2003)

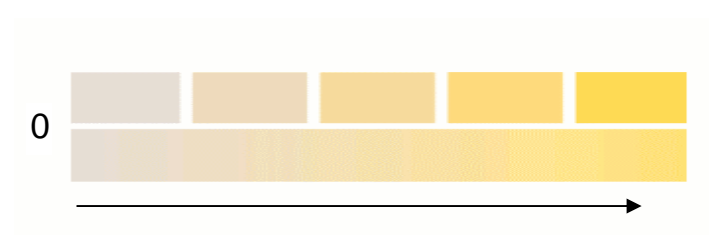


Matiz (hue)



Valor (value)

Cromo (chroma)



d. **Grano.** Es la dirección o alineamiento que tienen en un plano longitudinal leñoso sus elementos constitutivos, en especial los alargados verticalmente; como son las fibras y los vasos en las latifoliadas y las traqueidas en las coníferas. Este puede ser principalmente:

- Recto (derecho): cuando la dirección de los elementos es sensiblemente paralelo al eje del árbol.
- Oblicuo: cuando la dirección de los elementos se desvía de la dirección del eje del árbol, formando con él, ángulos agudos.
- Espiralado: cuando el hilo forma una espiral a través del eje.

e. **Textura.** Se refiere al tamaño de los elementos constitutivos del leño, especialmente los parenquimáticos, vasculares y fibrosos. Según Benítez y Montesinos (1988), la textura puede ser:

- Gruesa: elementos constitutivos amplios. Fibras con diámetro tangencial grande de más de 250 micras, radios leñosos grandes y parénquima grande.
- Fina: elementos constitutivos pequeños. Fibras menores de 150 micras de diámetro tangencial, parénquima escaso y abundante tejido fibroso.
- Mediana: término medio entre las dos anteriores.
- Homogénea uniforme: cuando los elementos constitutivos del leño sean grandes o pequeños, no presentan grandes variedades en todas las superficies longitudinales del leño.
- Heterogénea: cuando las variaciones entre los elementos constitutivos del leño son grandes (madera tardía y temprana diferenciada).

2. Contenido de humedad. El contenido de humedad de la madera está definido como el peso de agua en la madera expresado en porcentaje del peso de la madera seca (Amburgey *et al.* 1999).

Se dice que una madera tiene una humedad del H% cuando, si la madera pesa P_o cuando está seca, el peso del agua es $H * P/100$. Pudiéndose expresar de la siguiente manera:

$$H = \frac{P_H - P_o}{P_o} * 100$$

siendo: P_H : el peso de la madera al H% de humedad.

En los árboles, el contenido de humedad puede variar de un 30 hasta más de 200% del peso de la madera. En las maderas suaves, el contenido de albura es usualmente mayor que el contenido de duramen. En las maderas duras, la diferencia en el contenido de humedad entre la albura y el duramen depende de la especie. Estos valores son considerados típicos pero existe una variación considerable entre árboles de la misma especie. Inclusive existe variabilidad en el contenido de humedad entre tablas individuales cortadas del mismo árbol (Amburgey *et al.* 1999).

El estudio tecnológico de las relaciones entre el agua y la madera, es seguramente, el más importante de todos los que dependen de este material, ya que la humedad de la madera influye de forma determinante en la concepción de procesos tales como el aserrado, el desenrollado, el cepillado, el encolado, el barnizado, etc. Respecto del comportamiento, la humedad es un factor determinante en su durabilidad, en su resistencia, peso, y sobre todo en sus dimensiones (Vignote y Jiménez, 1996).

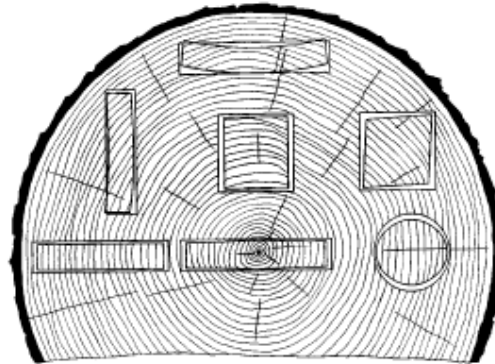
Se denomina Humedad de Equilibrio Higroscópico (HEH), la humedad de la madera a la que se equilibran la fuerza desecante de esta con la de la atmósfera. También se puede definir como el porcentaje de humedad que alcanzaría una madera a lo largo del tiempo, sometida a unas ciertas condiciones de humedad y temperatura del medio ambiente (Vignote y Jiménez, 1996).

La HEH máxima que puede tener una madera, cuando se la expone a un ambiente saturado de humedad, es del 30%, ésta es la humedad que satura todos los huecos existentes entre las fibrillas elementales, entre las microfibrillas y entre las fibras que componen la pared celular. A este punto de humedad se le denomina Punto de Saturación de la Fibra (PSF) (Vignote y Jiménez, 1996).

3. Contracción. La madera es dimensionalmente estable cuando el contenido de humedad es más grande que el punto de saturación de la fibra. La madera cambia sus dimensiones mientras gana o pierde humedad por debajo de ese punto. Se contrae cuando pierde humedad de las paredes celulares y se hincha cuando gana humedad. Esta contracción e hinchazón pueden resultar en torceduras, rajaduras o aflojamiento de las manijas de las herramientas, boquetes en los pisos de madera, o problemas de funcionamiento que detraen de la utilidad del producto de madera. Por esto, es importante que estos fenómenos sean entendidos y considerados cuando puede afectar el resultado del producto en donde la madera es utilizada (Amburgey *et al.* 1999).

Con respecto a las características de la contracción, la madera es un material anisotrópico. Se contrae más en la dirección de los anillos de crecimiento (tangencialmente), alrededor de la mitad de este encogimiento se da a través de los anillos (radialmente), y sólo se encoge un poco a lo largo del grano (axialmente). Los efectos combinados de la contracción radial y tangencial pueden alterar la forma de la pieza de madera por la diferencia en la contracción y en la curvatura de los anillos anuales. Esto se puede observar a continuación:

Figura 3.3 Contracción característica y distorsión de piezas planas, cuadradas y redondas afectadas por la dirección de los anillos de crecimiento. La contracción tangencial es el doble de la contracción radial (Amburgey *et al.* 1999).



La contracción de la madera está afectada por un número de variables. En general, una contracción más grande está asociada con una mayor densidad. El tamaño y la forma de la pieza pueden afectar la contracción, así como la velocidad de secado para ciertas especies (Amburgey *et al.* 1999).

Por lo tanto al hacer referencia a contracciones, se ha tenido en cuenta la siguiente clasificación:

Cuadro 3.1. Clasificación de la madera según el tipo de contracción presentada por Benítez y Montesinos (1988).

Clasificación	Radial	Tangencial	Volumétrica
Muy baja	0 – 2.0	0 – 3.5	0 – 5.5
Baja	2.1 – 3.0	3.6 – 5.0	5.6 – 8.0
Mediana	3.1 – 4.0	5.1 – 6.5	8.1 – 10.5
Alta	4.1 – 5.0	6.5 – 8.0	10.6 -13.0
Muy alta	> 5.1	> 8.1	> 13.1

4. Relación contracción tangencial y radial (CT/CR). Es un índice de la estabilidad dimensional de la madera; al acercarse a uno, la madera es más estable y tiene buen comportamiento durante el secado. Tomando como base esta relación, las maderas pueden clasificarse de acuerdo a la siguiente tabla:

Cuadro 3.2. Clasificación de la madera según relación CT / CR utilizada por Arostegui *et al.* y citada por Casasola (1988).

Clasificación	Relación (CT/CR)
Maderas estables no se agrietan ni deforman.	De 1 a 1.5
Estables, muy pocas grietas (muy leve atención al secado).	De 1.51 a 2
Moderadamente estables, pocas grietas y deformaciones (leve atención al secado).	De 2.1 a 2.5
Inestable, presencia de grietas (atención al secado).	De 2.51 a 3
Muy inestable, fuertes grietas y deformaciones (secado cuidadoso).	Mayor de 3

5. Densidad (ρ). Es la relación entre el peso P y el volumen V de una madera

$$\rho = P/V$$

Como el peso y el volumen de una madera está afectado por el porcentaje de humedad, al hablar de densidad se debe siempre determinar la humedad a la que está hecha la medida, es decir que se debe hablar de densidad de la madera a una determinada humedad como puede ser el 0% (densidad anhidra), del 12% (humedad normal) o a otra humedad de la madera (Vignote y Jiménez, 1996).

$$\rho_h = P_h/V_h$$

El peso específico normal de la madera es muy variable según especies. Así, existen maderas que apenas tienen una densidad de 0.2 gr/cc (madera de balsa) a maderas de 1.4 gr/cc (madera de quebracho, o madera de palo de hierro). La máxima densidad teórica que puede tener una madera es de 1.54 gr/cc, dado que esta es la densidad de la pared celular (Vignote y Jiménez, 1996).

A pesar de las grandes variaciones de densidad, se puede calificar a la madera como un material ligero, si se la compara con otros materiales, tales como el hormigón (2.2 gr/cc) o el acero (7.8 gr/cc) (Vignote y Jiménez, 1996).

Se denomina densidad específica de una madera, a la relación entre el peso seco P_0 de la madera y el volumen V_v de la madera cuando ésta tiene una humedad superior al punto de saturación de la fibra (Vignote y Jiménez, 1996).

$$\rho_e = P_o/V_v$$

Además de la importancia que tiene en sí, el peso específico, la densidad es una propiedad física importante porque es un índice muy bueno de todas las propiedades de la madera (Vignote y Jiménez, 1996).

Maderas ligeras, son maderas de tonos claros, blandas, poco resistentes pero elásticas, poco durables, muy fáciles de trabajar, con tacto vasto (Vignote y Jiménez, 1996).

Maderas pesadas, son maderas oscuras, duras, muy resistentes pero frágiles, muy durables, difíciles de trabajar, con tacto muy fino (Vignote y Jiménez, 1996).

Utilizando el peso específico, las maderas pueden clasificarse de acuerdo al siguiente cuadro:

Cuadro 3.3 Clasificación de la madera según su peso específico presentada por Benítez y Montesinos (1988).

Peso específico	Clasificación
Menor de 0.20	Extremadamente liviana
De 0.20 a 0.25	Excesivamente liviana
De 0.25 a 0.30	Muy liviana
De 0.30 a 0.36	Liviana
De 0.36 a 0.42	Moderadamente liviana
De 0.42 a 0.50	Moderadamente pesada
De 0.50 a 0.60	Pesada
De 0.60 a 0.72	Muy pesada
De 0.72 a 0.86	Excesivamente pesada
Mayor de 0.86	Extremadamente pesada

6. Posibles usos de la madera según propiedades físicas.

a. Estructuras

Peso seco de 0.4 a 0.8 gr/cm³.

Contracción volumétrica menor del 12%.
Relación CT/CR igual o menor de 2.0.
Resistente al ataque de hongos e insectos o fácil de tratar.

b. Encofrados

Moldes o revestimientos de madera en que se hace el vaciado de las piezas de cemento armado, capaz de soportar con total seguridad todas las cargas verticales y los esfuerzos horizontales.

Peso seco de 0.4 a 0.6 gr./cm³.
Contracción volumétrica igual o menor de 1.6%.
Baja absorción de humedad.
Adecuada resistencia mecánica.
Trabajabilidad fácil.

c. Carpintería de obra

Comportamiento bueno al trabajo con máquinas de carpintería.
Estabilidad dimensional.
Contracción volumétrica igual o menor del 12%.
Relación CT/CR igual o menor de 2.0.
Apariencia buena.
Liviana a moderadamente pesada.
Textura media a fina y uniforme.

d. Pisos

Peso seco igual o mayor de 0.7 gr./cm³.
Contracción volumétrica del 10% al 15%.
Buena apariencia.

e. Mangos de herramientas, artículos deportivos

Peso específico al 12% de humedad de 0.55 a 0.65 gr./cm³.
Grano recto.
Buena apariencia.
Fácil de trabajar mecánicamente.

f. Durmientes, postes y pilotes

Peso específico al 12% de humedad mayor de 0.6 gr./cm³.

En consecuencia, el módulo de elasticidad es el valor con el que se representa la rigidez de un material (Craig, 2002).

- Ductibilidad: Los materiales que pueden resistir una gran deformación unitaria antes de romperse consideran como materiales dúctiles; los que fallan con valores pequeños de deformación unitaria se clasifican como materiales frágiles (Craig, 2002).

1. Propiedades elásticas. La madera sometida a cargas tiene un comportamiento denominado visco-elástico. Ante una cierta carga inferior al límite elástico, se deforma, perdiendo la deformación cuando cesa la carga (Vignote y Jiménez, 1996).

Figura 3.5. Diagrama Carga-Deformación



(Vignote y Jiménez, 1996).

Las diferentes características de comportamiento que presenta la madera respecto de cualquier otro tipo de material elástico son las siguientes:

- La deformación ante una cierta carga, aumenta con el tiempo. Es decir, si cargamos una madera con 10 kg durante unos instantes, la deformación que presenta es del orden de 2.5 veces menos que si la carga se mantiene durante varios años (Vignote y Jiménez, 1996).
- El valor de la deformación en el estado plástico, es muy elevado respecto de cualquier otro material. Es decir, la madera es muy deformable (Vignote y Jiménez, 1996).

2. Módulo de elasticidad (Ley de Hooke). La ley de Hooke establece que el esfuerzo unitario en un material es proporcional a la deformación unitaria que le acompaña, siempre que dicho esfuerzo no exceda de un cierto valor. Si, por ejemplo, el esfuerzo unitario es duplicado o triplicado, la deformación unitaria acompañante también se duplica o se triplica. Esta ley no es más que un enunciado del hecho experimentalmente determinado de que la primera parte de la gráfica deformación-esfuerzo (Figura 3.4) es una línea recta. La ley puede ser expresada matemáticamente como sigue:

$$\delta/\epsilon = \text{una constante.}$$

(Seely, 1954)

Se ha encontrado experimentalmente que los materiales usados en la mayor parte de los miembros sometidos a cargas, trabajan elásticamente solamente para los esfuerzos correspondientes a la porción recta del diagrama de deformación-esfuerzo, y por esto, se dice frecuentemente que la ley de Hooke se aplica únicamente al intervalo elástico del material. Pero en dicho intervalo elástico se aplica a esfuerzos y deformaciones de compresión, de tracción y cortantes (Seely, 1954).

El módulo de elasticidad de un material se define por el valor numérico de la relación constante para dicho material del esfuerzo unitario a la deformación unitaria que le acompaña. Así, se designa por el símbolo E, puede definirse por la expresión:

$$E = \delta/\epsilon \quad (\text{Seely, 1954})$$

en donde δ es el esfuerzo unitario de tensión y está dado por la siguiente fórmula:

$$\delta = P/a$$

P = carga (lbs) y a = área (pulg)

(Seely, 1954)

y ϵ es la deformación unitaria y está dada por la siguiente fórmula:

$$\epsilon = e/l$$

e = deformación (pulg) y l = longitud (pulg)

(Seely, 1954)

3. Módulo de ruptura. Por observación de la figura 3.4, es evidente que con un esfuerzo unitario dado en la fibra exterior de la viga, el momento resistente es mayor cuando el esfuerzo unitario varía que lo que sería si el esfuerzo unitario variara en razón directa de la distancia al eje neutro. Por lo tanto, el momento resistente en una viga, cuando es esforzada más allá del límite de proporcionalidad, es mayor que el hallado por medio de la fórmula SI/c al sustituir S por el esfuerzo unitario dado. En consecuencia, si en la fórmula de flexión $M=SI/c$, se sustituye por la resistencia a la ruptura del material, el valor resultante de M será menor que el momento máximo que puede resistir la viga (Seely, 1954).

Las pruebas efectuadas con vigas de diversos materiales han demostrado que el momento flexionante máximo que puede resistir una viga, puede ser del 20 al 100% mayor (dependiendo del material y de la forma de las secciones transversales) que el valor de M hallado por medio de la fórmula de flexión al sustituir s por la resistencia máxima del material (Seely, 1954).

El valor de s hallado por medio de la fórmula de flexión, sustituyendo M por el valor del máximo momento flexionante que resiste una viga al ser probada a la ruptura, se llama módulo de ruptura del material a la flexión. Así, lo representaremos por s_r , tenemos

$$s_r = M_{\text{máx.}} c/I \quad (\text{Seely, 1954}).$$

donde M = momento flexionante y I = momento de inercia de la sección transversal (Seely, 1954).

4. Flexión estática. El diagrama que se muestra en la figura 4, comienza con una línea recta que va del origen A al punto C , lo que significa que la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria en esta región, es lineal y proporcional (su razón permanece constante). Más allá del punto C , la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación ya no existe; por esto, el esfuerzo en C se llama *límite proporcional*. La pendiente de la línea recta AC se llama módulo de elasticidad (UVG 2003).

Figura 3.6. Diagrama del ensayo de flexión.

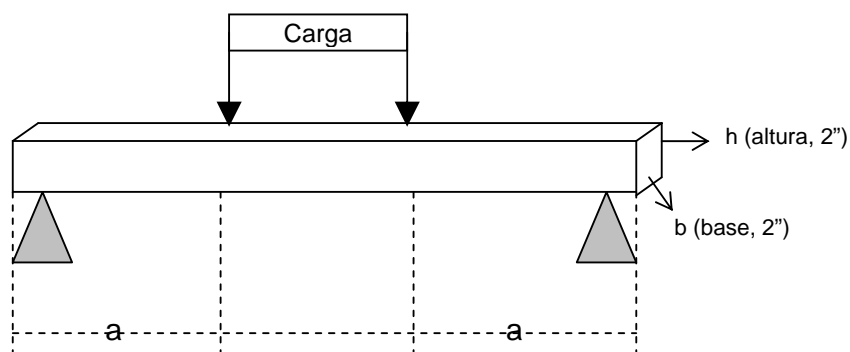
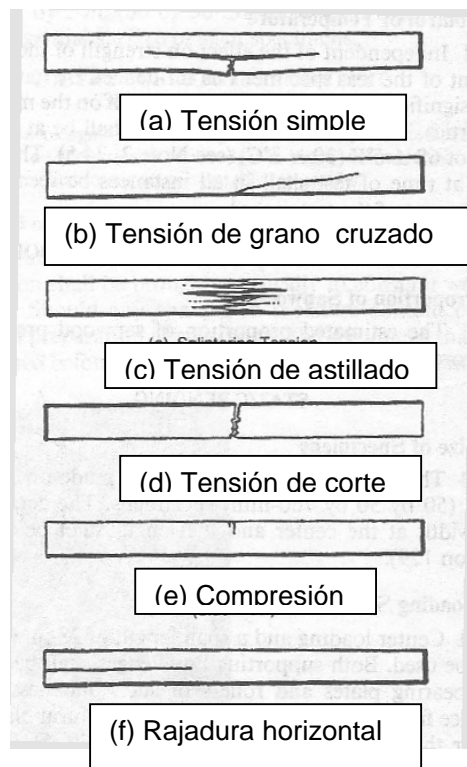


Figura 3.7. Posibles fallas de la flexión estática



(González, 2005)

5. Compresión paralela a la fibra. El objetivo de este ensayo es la determinación de la resistencia y rigidez a compresión paralelo a la fibra de la madera de un lote considerado homogéneo (Gómez, 2005).

La resistencia a la compresión paralela a la fibra (f_{c0}) está dada por la máxima tensión de compresión que puede actuar en un cuerpo de prueba con sección transversal cuadrada de 2 pulg de lado y 8 pulg de altura, y está dada por la siguiente expresión:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0\text{máx}}}{A}$$

(Gómez, 2005)

Donde:

$F_{c0\text{máx}}$ = máxima fuerza de compresión aplicada durante el ensayo

A = área inicial de la sección comprimida

f_{c0} = resistencia a la compresión paralelo a la fibra

El valor característico de resistencia a compresión paralelo a la fibra deberá ser determinado con las expresiones que nos provee la estadística (Gómez, 2005).

La rigidez de la madera en la dirección paralela a la fibra debe ser determinada por su módulo de elasticidad, obtenido en el tramo lineal del diagrama tensión-deformación específica, como lo indica la figura 4. (Gómez, 2005).

Figura 3.8. Representación esquemática del ensayo de compresión paralelo a la fibra.

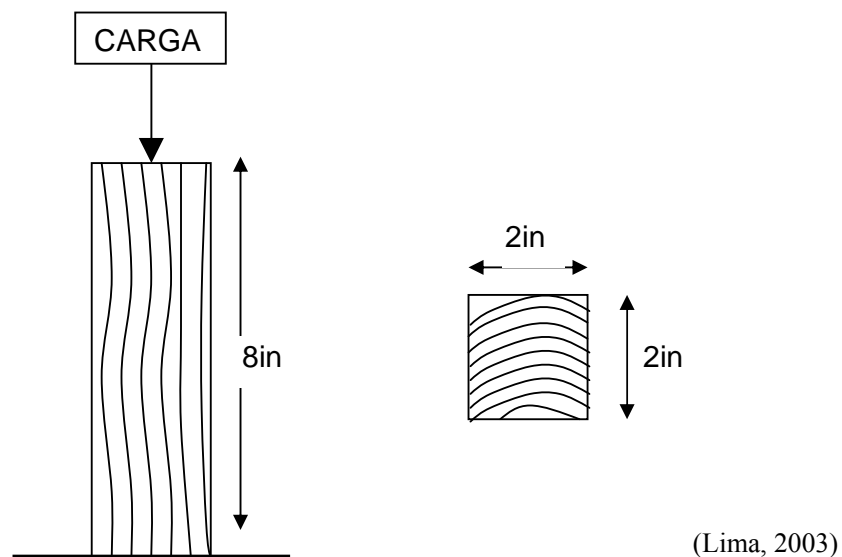
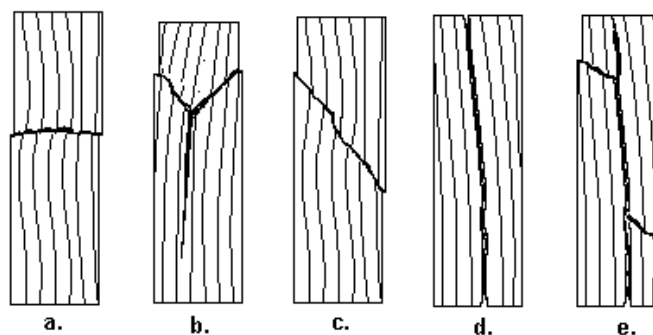


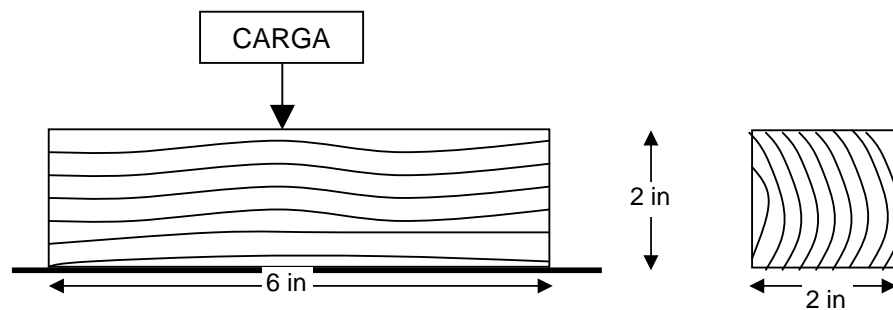
Figura 3.9. Tipos de falla en la madera bajo compresión paralelo a la fibra (ASTM D 143)



- Aplastamiento (plano de ruptura aproximadamente horizontal).
- Grieta cuneiforme (nótese la dirección de la rajadura: radial o tangencial).
- Corte (plano de ruptura en ángulo agudo con la horizontal).
- Rajadura.
- Corte y rajadura paralelos a la fibra (usualmente ocurre en piezas de fibras transversales).

6. Compresión perpendicular a la fibra. El método se basa en aplicar sobre una cara tangencial radial de la probeta, una carga continua de dirección perpendicular a dicha cara, midiendo las deformaciones producidas por la aplicación de la carga hasta llegar al punto de falla de la probeta o en su defecto hasta una deformación máxima de 2,5 mm (Universidad Católica del Norte de Chile, 2005).

Figura 3.10. Representación esquemática del ensayo de compresión perpendicular a la fibra



(Lima, 2003)

7. Prueba de dureza. Es una propiedad que indica la facilidad de penetración de un material en otro. La madera, en relación con otros materiales (acero y hormigón), se puede definir como blanda, que aunque en algunos aspectos se puede considerar un defecto (facilidad de rayado y por tanto pérdida de apariencia de la superficie) tiene como ventaja, su facilidad de procesado (corte, unión) (Vignote y Jiménez, 1996).

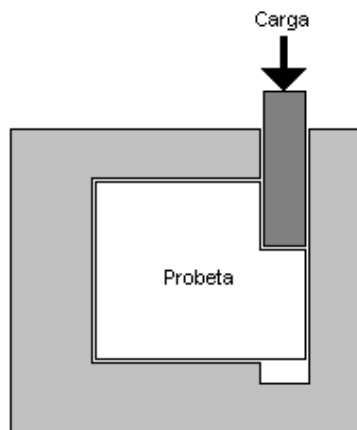
8. Prueba de corte. Un esfuerzo de corte es aquel que actúa paralelamente en un plano, para distinguirlo de los esfuerzos tensivos y compresivos que actúan normalmente en un plano, Las cargas que producen las condiciones de corte de interés principal en el ensayo de materiales con las siguientes:

- Las resultantes de fuerzas paralelas, pero opuestas, actúan a través de los centroides de secciones espaciadas a distancias infinitesimales entre sí. Es concebible, en tales casos, que los esfuerzos de corte sobre las secciones sean uniformes y exista un estado de corte directo puro. Es posible acercarse a esta condición, pero nunca alcanzarla prácticamente. (Davis *et. al*, 1982)

- Las fuerzas opuestas aplicadas son paralelas, actúan normalmente a un eje longitudinal del cuerpo, pero están espaciadas a distancias finitas entre sí. Entonces, además de los esfuerzos cortantes producidos, se establecen esfuerzos flexionantes. En el caso de una viga rectangular sometida a cargas transversales, los esfuerzos cortantes sobre cualquier sección transversal varían en intensidad desde cero en las superficies superiores e inferiores de la viga hasta un máximo en el eje neutro. (Davis *et. al*, 1982)

- Las fuerzas aplicadas son paralelas y opuestas, pero no yacen en un plano que contenga el eje longitudinal del cuerpo; aquí se establece un par que produce una torsión alrededor de un eje longitudinal. (Davis *et. al*, 1982)

Figura 3.11. Probeta y herramienta para el ensayo de corte desarrollada por el Forest Products Laboratory.



(Davis *et. al* 1982)

D. Análisis estadístico para pruebas físicas y mecánicas de la madera

Prácticamente, todos los datos derivados de los ensayos son susceptibles de variar. Los resultados de un ensayo sobre una muestra simple involucran mediciones sujetas a la variación. Los resultados de un ensayo sobre una serie de muestras similares, muestran variación entre éstas (Davis *et al*. 1982).

Por esta razón, una vez efectuados los ensayos a que se ha hecho referencia anteriormente, se procede a llevar a cabo la evaluación de los siguientes parámetros estadísticos para cada especie y para cada ensayo en particular:

1. Se determina la media aritmética (\bar{X}), esto de acuerdo a los resultados obtenidos en cada una de las probetas. La media aritmética es la más extensamente usada de todos los criterios de tendencia central. Constituye el promedio del lenguaje ordinario. Es un promedio calculado y es afectado por cada valor pero muy distorsionado por los inusualmente altos valores de los extremos (Davis *et al.* 1982).
2. Luego se calculó la desviación estándar, S , a través de la siguiente fórmula:

$$S = \frac{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}{n(n-1)}$$

(Davis *et al.* 1982).

Esta es la medida de dispersión más usada y constituye un arreglo especial de la desviación promedio. Los estudios de estadística han demostrado que cuando el número de piezas es pequeño (menor de 25), es más cercanamente correcto dividir por el número de grados de libertad ($n - 1$), en lugar del número total de valores n (Davis *et al.* 1982).

3. Como las comparaciones significativas de las dispersiones no pueden hacerse utilizando mediciones absolutas, una variación expresada como una relación o porcentaje debe determinarse. Por lo común, la que más se usa es la desviación estándar con base en un porcentaje y es usualmente designado v , el coeficiente de variación (Davis *et al.* 1982). Finalmente, se calcula este valor, que viene dado de dividir la desviación estándar dentro del promedio aritmético, así:

$$v = S/\bar{X}$$

(Davis *et al.* 1982).

Donde S es la desviación estándar y \bar{X} el promedio aritmético.

Debe advertirse que cuando la media aritmética es muy pequeña, o inclusive cero, como podría ser en el caso de mediciones de temperaturas, la v resultante sería muy engañosa (Davis *et al.* 1982).

E. Determinación de esfuerzos básicos

Los esfuerzos básicos representan la resistencia permisible de la madera en piezas libres de defectos y sanas. Se calculan multiplicando los valores de esfuerzos de resultados de ensayos por factores de corrección que toman en cuenta:

- La variabilidad de la resistencia de la madera.
- La disminución de la resistencia de la madera por efecto de carga permanente durante un período largo de tiempo;
- Grado de razonamiento de la madera analizada; y
- Factor de seguridad que toma en cuenta la posibilidad de sobrecargas accidentales y la influencia de otros factores no previstos (CTEF 1972).

Se reconoce que algunos esfuerzos, principalmente los de compresión paralela y flexión, se incrementan al secar la madera (ensayos de piezas pequeñas), pero no es recomendable incrementar los esfuerzos básicos para madera seca (piezas mayores de 10 cm. de grosor) porque se considera que buena parte de la madera utilizada en construcción, se coloca verde o poco sazonada y aunque se pusiera seca antes de utilizarla, la pérdida de humedad va acompañada de agrietamientos y combamiento, defectos que contrarrestan el incremento de resistencia debido al secado (CTEF 1972).

El procedimiento para calcular los factores de corrección, utilizados para los esfuerzos básicos es:

1. Factor de corrección por variabilidad

$$V = 1 - C(v/100)$$

Donde V = factor de corrección por variabilidad de resultados.

v = coeficiente de variación en %

C = coeficiente con valor de 1.0 a 1.5 dependiendo de la dispersión de los valores observados y la forma de su distribución. En este estudio se tomó como 1 (CTEF 1972).

- 2. Corrección de esfuerzos por disminución de la resistencia de la madera sujeta a cargas estáticas, por largo tiempo.** Observaciones realizadas en otros países han señalado que la resistencia de la madera sujeta a cargas durante períodos largos de tiempo, sufre una disminución que llega hasta el 40% de su resistencia inicial, por lo que se ha adoptado un factor de corrección con un valor de 2/3.

$$T = 0.67$$

Donde T = factor de corrección por disminución de resistencia de la madera sujeta a cargas permanentes por largos períodos de tiempo (CTEF 1972).

- 3. Factor de corrección por grado de sazónamiento de la madera.** Los incrementos de resistencia son detectados al disminuir la humedad en la madera, bajo su punto de saturación de las fibras. El límite de saturación es del 30% de humedad aproximadamente. Debido a los factores de compensación que existen entre la resistencia de madera verde y resistencia de madera seca, que hacen sus resistencias bastante similares para maderas cuyo contenido de humedad sea mayor o igual al 30%, el factor de corrección por grado de sazónamiento es igual a 1. Para cada especie debe calcularse según su contenido de humedad (CTEF 1972).

- 4. Factor de seguridad.** En esta forma se intenta cubrir el efecto de otros factores que afectan las propiedades mecánicas y que no pueden evaluarse; así como también el riesgo de sobre cargas accidentales no previstas. El factor de seguridad debe ser $\frac{1}{2}$ para efectos conservadores.

$$S = \frac{1}{2} = 0.5 = \text{factor de seguridad}$$

(CTEF 1972).

- 5. Resumen de corrección para obtener los esfuerzos básicos.**

$$\text{Esfuerzo básico} = (X)(V)(T)(S)(H)$$

$$\text{Esfuerzo básico} = (X)(V)(0.67)(0.5)(H)$$

$$\text{Esfuerzo básico} = (X)(V)(H)(0.335)$$

Donde X = promedio aritmético de los resultados de ensayo

V = corrección por variabilidad

T = corrección por disminución de resistencia en madera cargada por largo tiempo = 0.67

S = factor de seguridad = 0.5

H = corrección para adaptar los esfuerzos básicos corregidos según el contenido de humedad

(CTEF 1972).

F. Posibles usos según las propiedades mecánicas.

En general, para todas las aplicaciones mecánicas de la madera interesa que el cociente entre las características mecánicas y el peso específico sea lo más elevado posible, sobre todo en aquellos usos en los que la madera actúa como estructura resistente (Vignote y Jiménez 1996).

En general, se exige gran resistencia mecánica en los siguientes casos:

Cuadro 3.4. Requerimientos de resistencia de acuerdo al uso de la madera

Muebles:	Resistencia a la flexión estática y módulo de elasticidad. Resistencia a la compresión paralela a las fibras. Resistencia a la tracción perpendicular a la fibra. Resistencia a la hienda.
Construcción:	Resistencia a la flexión y módulo de elasticidad. Resistencia a la compresión paralela y perpendicular a las fibras. Resistencia a la tracción perpendicular a la fibra, (caso de madera laminada). Esfuerzo cortante. Resistencia a la hienda, (caso de construcción clavada).
Envases y paletas:	Resistencia a la flexión dinámica.
Traviesas:	Resistencia a la compresión perpendicular a la fibra. Resistencia a la hienda. Resistencia al arranque de tornillos.
Postes:	Resistencia a la flexión estática.
Apeas:	Resistencia a la compresión axial. Módulo de elasticidad.

(Vignote y Jiménez 1996).

IV. METODOLOGÍA

A. Elección de especies.

A raíz del nacimiento de una inquietud por el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de algunas especies forestales, se recurrió al Proyecto CATIE-INAB-Investigación Forestal. Allí, se realizó una revisión de algunos estudios hechos recientemente, por colegas de la Universidad del Valle y otras instituciones, y algunos listados de especies ya estudiadas, se logró formar un listado de especies forestales de interés mutuo siendo para la determinación de sus propiedades físico-mecánicas, siendo estas especies: *Cordia dodecandra* (Siricote), *Mastichodendron capiri* var. *Tempisque* (Tempisque), *Bucida buceras* (Pucte), *Swartzia cubensis* (Llora-sangre), y *Astronium graveolens* (Jobillo).

B. Lugar de recolección

Las muestras necesarias para realizar el estudio fueron colectadas en las cercanías de la aldea Sacpuy del municipio de San Andrés, departamento de Petén. El área está categorizada como Bosque muy húmedo Subtropical (cálido), (bmh-S(c)). El área se encuentra entre 180 y 200 msnm, teniendo a lo largo del año temperaturas mínimas de 14°C y máximas de 39°C, una Humedad Relativa que oscila en un rango de 80 a 95 %, y en algunos meses del año puede llegar hasta un 70%. La precipitación del lugar puede variar de un mínimo de 1,350 mm como ocurrió este año (2007) debido al extenso verano que sufrió la región, hasta un máximo de 2,200 mm, obteniendo así una precipitación media de 1775 mm anuales.

C. Recolección de las muestras

1. Identificación de las muestras. Para la identificación de las especies, se realizó una gira de campo en la cual se contó con la colaboración de un Baquiano conocedor del lugar, en este caso, el propietario de la finca “Guayacán”, proporcionó a uno de sus empleados quien colaboró en la ubicación de las especies y a su identificación de acuerdo a su nombre común. A modo de verificación del material recolectado en campo, se herborizaron muestras de las diferentes especies para su posterior identificación en el herbario de la Universidad del Valle de Guatemala.

2. Selección y número óptimo de árboles. Se escogieron cinco árboles por especie al azar, los cuales fueron seleccionados de acuerdo a los siguientes criterios: respetar un radio de 100 metros entre árbol y árbol; presentar características fitosanitarias buenas, tener el tronco recto, lo más cilíndrico posible; y ser representativo de la especie tanto en altura como en diámetro. Se utilizó una muestra de cinco árboles ya que según Valdez (1988), este número es necesario para obtener un 15% de precisión del valor promedio dándole validez a los resultados obtenidos.

A cada árbol seleccionado se le tomó su Diámetro de Altura a Pecho (DAP) con cinta diamétrica; así mismo se determinó su altura con un hipsómetro. Lo anterior se realizó con la finalidad de obtener la cantidad de metros cúbicos por especie que fueron extraídos para poder tramitar la respectiva licencia de extracción.

3. Marcado y extracción de los árboles. Los árboles fueron escogidos de acuerdo a la metodología antes descrita, procediendo a un proceso de marcado con un spray rojo, colocando un número arábigo (1-5) e inicial del nombre común de la especie. Las letras utilizadas como iniciales fueron: Jovillo (J), Tempisque (T), Pucte (P), Lloro-sangre (LS) y Siricote (S). El spray aplicado en las trozas evito confusiones de reconocimiento en campo, luego de ser ubicados, agilizando de ésta manera su extracción.

Para el proceso de extracción se contaba con la debida licencia forestal, cumpliendo de ésta manera los requisitos de la ley. Para la extracción de los árboles se contó con la ayuda de motosierristas del área y un camión de doble eje para el traslado de la madera.

4. Aserrado de las muestras. Las trozas fueron transportadas a un aserradero de la localidad en donde la madera fue transformada para obtener piezas de 2 x 2” variando únicamente en el largo. El detalle de las medidas se presenta en el cuadro 4.1. En este proceso se tuvo cuidado de seleccionar solo las piezas libre de defectos (nudos, rajaduras, etc.) ya que éstos podrían alterar los resultados.

Cuadro 4.1. Medidas de las piezas a utilizar en las diferentes pruebas

Prueba	Medidas (pulg.)
Peso específico	2 X 2 X 2
Humedad	2 X 2 X 2
Contracción volumétrica	2 X 2 X 2
Módulo de elasticidad	2 X 2 X 30
Módulo de ruptura	2 X 2 X 30
Compresión paralela a la fibra	2 X 2 X 8
Compresión perpendicular a la fibra	2 X 2 X 6
Corte	Ver figura 3.7

Terminado el proceso de aserrado, se procedió a transportar las piezas hacia la Universidad del Valle donde fueron conducidas las pruebas.

Es necesario tomar en cuenta que aunque las medidas establecidas por la ASTM para las propiedades físicas son 2 x 2 x 6", éstas tuvieron que cambiarse a 2 x 2 x 2" ya que dichas medidas no podían ser manejadas por el horno con el que se contaba tanto en el laboratorio de resistencia de materiales del Departamento de Ingeniería Civil, como el horno del Departamento de Ingeniería Forestal.

D. Determinación de las propiedades físicas.

1. Características organolépticas. Las características organolépticas se determinaron mediante la consideración de ciertos parámetros que se expresan a continuación para cada prueba:

- a. Olor: ausente o no distintivo, aromático, desagradable.
- b. Sabor: ausente o no distintivo, amargo, dulce, picante.
- c. Color: en el laboratorio, se utilizó la escala Munsell para determinar el color específico de la madera y no dar lugar a interpretaciones dadas al criterio del observador.
- d. Grano: recto, oblicuo, entrecruzado o espiralado.
- e. Textura: gruesa, fina, mediana; homogénea uniforme o heterogénea.

Para determinar el olor y el sabor de las muestras, se utilizó el aserrín de cada muestra producido al efectuar los cortes, mientras que para determinar el grano, color y textura de las maderas, se procedió a analizar las piezas de madera sólida.

2. Peso específico. Para determinar el peso específico de las maderas se utilizaron 10 probetas de 2 x 2 x 2” por especie. Dichas probetas fueron medidas individualmente utilizando un vernier digital marca Stainless Hardened, modelo Scala 230.203, con una precisión de 0.001 mm y posteriormente fueron pesadas en una balanza electrónica marca Sartorius modelo 2354, con capacidad máxima de 1000 gr y una precisión de 0.01 g.

Se separaron las probetas por especie en grupos de diez, para luego ser numerados del uno al diez, y así poder identificar y marcar los tres ejes de la madera a ser evaluados (A = Axial, T = Tangencial, y R = Radial). Luego de identificar los ejes y marcarlos se realizaron mediciones de los mismos para así poder obtener el volumen de cada probeta y su peso, y así obtener la densidad aparente:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Peso en estado original de humedad}}{\text{Volumen en estado original de humedad}}$$

Al obtener estos datos se colocaron las probetas en un horno a 100°C durante 24 hrs., en bandejas de aluminio ventiladas, para evitar el contacto con las otras especies y poder alterar los datos obtenidos. Luego del secado se procedió a medir las probetas luego de las 24 hrs, lo cual permitió obtener la densidad anhidra:

$$\text{Densidad anhidra} = \frac{\text{Peso en estado seco}}{\text{Volumen en estado seco}}$$

Posteriormente se sumergieron en agua las probetas durante 24 horas con el objetivo de saturar las muestras. Se retiraron las muestras del agua y se limpiaron para retirar el exceso de agua superficial que no fue absorbida. Como en el inicio de las pruebas, las probetas se midieron y pesaron de la misma forma que los días anteriores.

Con los datos obtenidos de las muestras en saturación de la fibra y con los datos de peso anhidro, fue posible realizar modelos de regresión lineal con los cuales fue posible determinar el peso y el volumen a una humedad del 12 y 8 %. A partir de los datos generados, se pudo determinar el peso unitario al 12% ($W_{12\%}$) y el peso unitario al 8% ($W_{8\%}$).

$$W_{12\%/8\%} = \frac{\text{Peso al 12\% de humedad}}{\text{Volumen al 12\% de humedad}}$$

Estos datos obtenidos finalmente permiten comparar el peso específico bajo estándares internacionales en los cuales se utiliza la humedad al 12% como constante para realizar todo tipo de pruebas.

3. Contenido de humedad. El contenido de humedad se determinó a partir de los pesos obtenidos durante la prueba para determinar la densidad específica utilizando la ecuación No. 1.

4. Contracciones. Las contracciones axial, radial y tangencial fueron determinadas a partir de las medidas obtenidas en las mediciones antes mencionadas utilizando las siguientes fórmulas:

a. Contracción radial:

$$C_r = \frac{\text{dimensión radial en verde} - \text{dimensión radial en seco}}{\text{dimensión radial en verde}} \times 100\%$$

b. Contracción tangencial:

$$C_t = \frac{\text{dimensión tan en verde} - \text{dimensión tan en seco}}{\text{dimensión tan en verde}} \times 100\%$$

c. Contracción axial:

$$C_a = \frac{\text{dimensión axial en verde} - \text{dimensión en seco}}{\text{dimensión en verde}} \times 100\%$$

E. Determinación de propiedades mecánicas

1. Compresión paralela a la fibra. Para esta prueba se utilizaron seis probetas de dimensiones de 2"x 2"x 8" a las cuales se les aplicó una carga en la cara axial hasta que la pieza alcanzara el momento de la falla por medio de una compresora hidráulica marca Versa Tester Soiltest, Número de Serie 153. , momento en el cual se anotó la carga y forma de la falla para ser clasificada según la figura 3.9 así como la lectura del deformímetro 1C-8 con una carrera de 1 pulgada utilizado durante la prueba. En base a estos resultados se determinó el esfuerzo unitario (δ).

Utilizando los datos de esfuerzo unitario y deformación unitaria, se obtuvo el módulo de elasticidad.

Figura 4.12. Prueba de compresión paralela a la fibra en Pucte. (Falla de Corte)



(Bonilla, 2007)

2. Compresión perpendicular a la fibra. Para esta prueba se utilizaron seis probetas por especie de dimensiones de 2"x 2"x 6" a las cuales se les aplicó una carga en la cara radial hasta alcanzar el momento de la falla, momento en el cual al igual que en la compresión paralela se anotó la carga emitida por la compresora, únicamente que en este caso se trataba de una compresora hidráulica monofásica, marca Forney, modelo FT-40-DR, con capacidad de 250,000 lbs. Con éste resultado, se obtuvo la deformación unitaria.

Figura 4.13. Ensayo de compresión perpendicular a la fibra en Jobillo.



(Bonilla, 2007)

3. Prueba de dureza. Para esta prueba, se utilizaron seis probetas por especie de dimensiones de 2"x2"x2" las cuales fueron sometidas a la carga necesaria por medio de una compresora manual, marca Solitest, modelo CN-472y, Serie(192) con un deformímetro incorporado, para que una bala de acero de 0.44" penetre dentro de la muestra hasta la mitad de su diámetro. Al llegar a dicha profundidad, se toma la lectura de deformación del anillo por medio del deformímetro Soiltets LC-2. La lectura del deformímetro se utiliza para determinar la carga mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Carga (lb.)} = \frac{1000 (\text{No. De vueltas})}{1.3333}$$

Figura 4.14. Ensayo de dureza en una pieza de Lloro-sangre.



(Bonilla, 2007)

4. Flexión estática. Para esta prueba, se utilizaron seis probetas por especie de dimensiones 2"x2"x30" a las cuales se les aplicó una carga en la cara tangencial tal y como se aprecia en la figura 4.15. Para aplicar dicha carga se utilizó la compresora hidráulica Versa Tester Soiltest, Serie (153). Para poder realizar la prueba debido a la limitante de altura del brazo de soporte de la compresora, se agregaron unos discos de acero bajo la plancha de soporte de la probeta, como se puede observar en la figura 4.15. Con los datos obtenidos durante esta prueba fue posible calcular el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura.

$$\text{MOE} = \frac{Pa}{24\Delta I} (3L^2 - 4a^2)$$

Donde MOE = módulo de elasticidad

$$I = b (\text{base}) * h (\text{altura})^3 / 12 = \text{constante (in}^4) = 1.33 \text{ in}^4$$

P = carga aplicada (lb) (lectura en la máquina universal)

a = distancia entre los apoyos, en nuestro caso sería L/3 (in)

L = largo total de la viga

Δ = deformación (in) (lectura del deformímetro)

Suponiendo unas medidas iguales para todas las probetas, es posible sustituir en la fórmula el momento de inercia, la distancia entre los apoyos y el largo total de la viga, dando como resultado una fórmula en función de la carga aplicada y la deformación:

$$\text{MOE} = \frac{P}{\Delta} (718.75)$$

Para calcular el módulo de ruptura, se utilizó la última carga registrada hasta la falla, aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{MOR} = My / I$$

Donde MOR = módulo de ruptura

$$I = bh^3 / 12$$

$$M = Pa$$

$$y = h / 2$$

Figura 4.15. Ensayo de flexión para el Tempisque.



(Bonilla, 2007)

5. Prueba de corte. La medida de probetas a utilizar será de 2 x 2 x 2", para esta prueba se utilizó un dispositivo diseñado especialmente para inducir el corte. Las piezas de cada especie son colocadas dentro de un molde como el que se puede observar en la Figura 4.16., el cual fue previamente medido para que las piezas cupieran, de lo contrario las piezas podrían quedar sueltas dentro del molde o no podrían ingresarse al molde en el caso de que sean muy grandes. Al realizar la prueba se obtiene la carga a la cual la grada de la pieza colapsa.

Figura 4.16. Ensayo de corte sobre una probeta de Jobillo.



(Bonilla, 2007).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Jobillo, (*Astronium graveolens*)

1. Descripción botánica del Jobillo. Árbol de 10 a 30 m de altura y de 20 a 80 cm. de diámetro. Tronco con raíces tablares de mediano tamaño en la base. Corteza exterior gris o negra y exfoliante en pequeñas placas circulares. Hojas imparipinnadas y alternas, con 9 a 15 folíolos opuestos en el extremo apical del raquis y subopuestos hacia la base. Folíolos de 5 a 9 cm. de largo y de 2 a 3 cm. de ancho, oblongo lanceolados, con ápice acuminado, bordes dentados y base redondeada o desigual. Los folíolos jóvenes presentan un agradable olor a resina al estrujarlos. Pecíolos de 3 a 7 cm. de largo y pulvinados en la base. La especie es dioica. Flores verdes o amarillentas. Frutos de 1 a 1.5 cm. de largo y con cinco alas formadas por los sépalos persistentes del cáliz, verdes, tornándose negros al madurar.

Figura 5.17. A, Rama con hojas; B, flor masculina; C, flores femeninas; D, infrutescencia.



(Pennington & Sarukhan 1998).

2. Propiedades físicas de la madera del Jobillo.

Cuadro 5.6. Características organolépticas del Jobillo.

Característica	Descripción
Olor	No distintivo
Color	Desde HUE 5 YR 6/6 hasta 5YR 2.5/2
Sabor	Ausente
Grano	Recto
Textura	Gruesa, homogénea uniforme

En base al cuadro 5.6 antes presentado de propiedades organolépticas, se puede notar que la madera de Jobillo no cuenta con ningún olor o sabor característico, a diferencia de las otras especies evaluadas, excepto el Siricote. Dicho análisis, se evaluó en las diferentes caras externas de la pieza previo a las pruebas mecánicas, y en las caras internas en el momento de colapso de la pieza, para lograr un análisis más preciso.

Cuadro 5.7. Contenido de humedad y pesos del Jobillo.

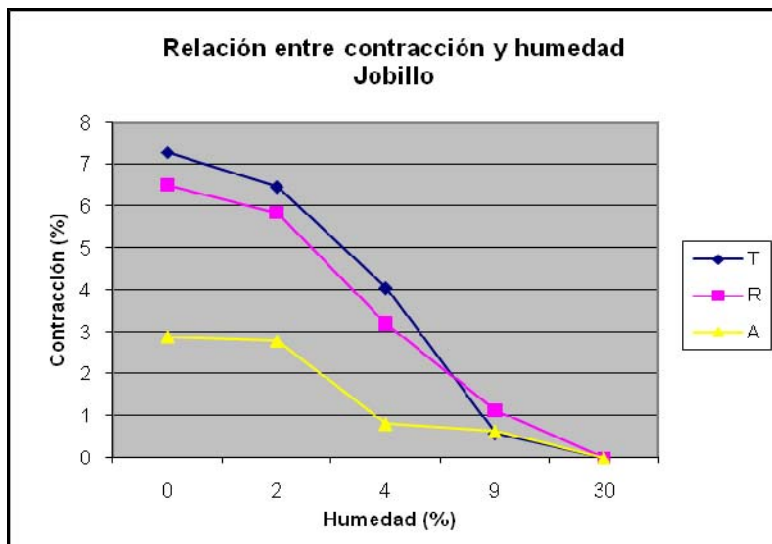
Propiedad	Kg/m ³	SG
Densidad aparente	1,108.29	1.11
Densidad anhidra	1,221.36	1.22
Densidad al 12%,	1,011.75	1.01
Densidad al 8%,	1,136.56	1.14
Humedad	3.30%	---

Con base a la densidad específica al 12% que se muestra en el cuadro 5.7., la madera del Jobillo se clasifica como una madera “extremadamente pesada”, datos que son confirmados por Kukachka (1968), quien define, a esta especie como madera de alta densidad con valores de densidad específica que varían desde 0.81 hasta 0.99 g/cm³. La madera del Jobillo, debido a su gran densidad, y características de fibra variable es moderadamente difícil de secar sin degradarla. A pesar de que la madera del Jobillo se encuentra en la clase de densidad alta, no es difícil de trabajar con herramientas y maquinaria. El duramen es muy resistente a la absorción de humedad, y debido a su alta densidad, puede presentar algunas dificultades para pegarla. La madera del Jobillo debido a su gran resistencia la hacen una madera adecuada para construcción pesada y durable. Esta madera es utilizada en la elaboración de pisos y muebles, y en la fabricación de artículos especiales tales como arcos de caza, tacos de billar, mangos para cepillos y mangos para cuchillos.

Cuadro 5.8. Valores de contracción del Jobillo.

Contracción	Valor medio
Tangencial	7.27
Radial	6.50
Axial	2.88
Volumétrica	16.65
CT/CR	1.12

Como se puede observar en el cuadro 5.8., los valores de contracción tangencial y radial obtenidos fueron muy similares, por lo que la relación (CT/CR) fue bastante cercano a uno, por lo cual se considera una madera estable (Vignote & Jiménez, 1996). En el caso del eje axial, el dato obtenido fue bastante alto (Ver cuadro). Según Simpson & TenWolde (1999), la madera generalmente se contrae en el plano axial en un rango de 0.1 a 0.2%, sin embargo se pueden obtener datos mayores causados por la presencia de madera de reacción, lo cual en el caso del Jobillo por ser una especie latifoliada, se trata de madera de tensión. En el caso de las contracciones tangenciales y radiales, la contracción tangencial es “alta” y las contracciones radiales son “muy altas” (Benítez, 1988)

Figura 5.18. Relación entre la contracción y humedad del Jobillo.

Como se mencionó anteriormente, la relación CT/CR del Jobillo fue de 1.12, por lo cual se considera una madera bastante estable, la cual indica que se producen pocas deformaciones y grietas, reduciendo la dificultad en su secado.

3. Propiedades mecánicas de la madera del Jobillo.

Cuadro 5.9. Esfuerzos últimos y básicos del Jobillo.

	Psi (lb/in²)	Kg/cm²	Esf. Básicos (Kg/cm²)	Coef. de var. (%)
Corte radial	4,154.58	288.37	96.53	6.87
Compresión paralela a la fibra	10,166.67	716.29	239.31	26.70
Compresión perpendicular a la fibra	4,257	300	100.28	18.32
Dureza	2,309.58 lbs.	1,049.81 Kg.	----	7.59

Los datos obtenidos de compresión paralela para el Jobillo (Ver cuadro 5.9.), fueron muy cercanos a los obtenidos por Simpson & TenWolde (1999), los cuales mostraron datos de compresión paralela a la fibra de 10,320 Psi. y en el caso de la prueba de dureza, soportó una carga de 2,160 lbs. Como criterio de comparación, el pino se encuentra entre un rango de 2,500 Psi a 5,000 Psi, lo cual al compararse con los esfuerzos últimos del cuadro 5.9, muestra la alta compresión paralela a la fibra de esta especie, y su aptitud para ser utilizada en construcciones pesadas. La dureza del Jobillo puede ser considerada por arriba del promedio.

Cuadro 5.10. Medidas de flexión estática en el Jobillo.

	Psi (lb/in²)	Kg/cm²	Esf. Básicos (Kg/cm²)	Desv. Estándar	Coef. de var. (%)
MOE	5,099,200.34	269,446.92	89,671.42	177,103.14	65.73
MOR	23,558.90	1,659.83	555.01	308.27	18.57

Como es de esperarse, basado en la alta densidad específica, la madera de Jobillo promedia altos valores de compresión paralela y perpendicular a la fibra. Basado en su módulo de elasticidad (Ver cuadro 5.10.), el Jobillo puede ser considerado como una madera excepcionalmente elástica, especialmente en comparación con otras especies comerciales de Guatemala, tal como el pino, que cuenta con un módulo de elasticidad de 123,000 Kg/cm².

B. Tempisque, (*Mastichodendron capiri* var. *Tempisque*)

1. **Descripción botánica del Tempisque.** Árboles o arbustos, espinosos o inermes, a veces trepadores; estípulas ausentes, hojas arregladas en espiral, rara vez opuestas, en ocasiones fasciculadas sobre tallos laterales cortos; inflorescencias axilares, a veces en axilas de hojas 13 caídas; flores solitarias o fasciculadas, sésiles o raras veces pedunculadas, generalmente bisexuales, rara vez unisexuales; cáliz de un solo verticilo de sépalos libres, quincunciales; corola ciatiforme, generalmente glabra, tubo casi siempre más corto que los lóbulos, rara vez tan largo o excediéndolos en tamaño, lóbulos, imbricados o quincunciales, extendidos, enteros o divididos en tres segmentos; estambres, fijos al final del tubo de la corola, exsertos, filamentos bien desarrollados, anteras extrorsas, generalmente glabras, estaminodios, por lo general bien desarrollados, alternando con los estambres, normalmente lanceolados, erosos, doblados e incurvados contra el estilo, por lo regular glabros, raramente pilosos; ovario -locular, piloso o glabro, placentación basi-ventral o basal, estilo exserto o incluso, simple o capitado.

Figura 5.19. A, rama con inflorescencias; B, infrutescencia del Tempisque.



(Pennington & Sarukhan 1998)

Fruto de 1(2) semillas, carnosos, generalmente glabros; semilla globosa, ovoide, oblonga o elipsoide, no comprimida lateralmente, testa lisa, brillante, sin unirse al pericarpo, con

frecuencia gruesa y leñosa, con varias placas prominentes y engrosadas sobre la superficie dorsal, cicatriz casi siempre basal o basiventral, pequeña, circular, lanceolada o elíptica, raramente ventral y entonces amplia, embrión vertical, oblicuo u horizontal, cotiledones delgados y foliáceos, endospermo abundante, o bien, cotiledones planoconvexos y entonces el endospermo delgado, o a veces ausente, radícula exserta. (Pennington & Sarukhan 1998)

2. Propiedades físicas de la madera del Tempisque.

Cuadro 5.11. Características organolépticas del Tempisque.

Característica	Descripción
Olor	Aromático/ Dulce/ Olor a higo
Color	HUE 10 YR 7/6 Amarillo
Sabor	Amargo
Grano	Recto
Textura	Mediana, Homogénea uniforme

Como se describe en el cuadro 5.11, se puede observar que el Tempisque cuenta con un olor aromático, el cual se asemeja bastante al olor del higo. El olor es agradable, a diferencia de su sabor que es bastante amargo. Al igual que en el caso del Jobillo, se analizó las diferentes superficies de la pieza, y luego se hizo un segundo análisis al llegar a la falla de la probeta.

Cuadro 5.12. Contenido de humedad y pesos del Tempisque.

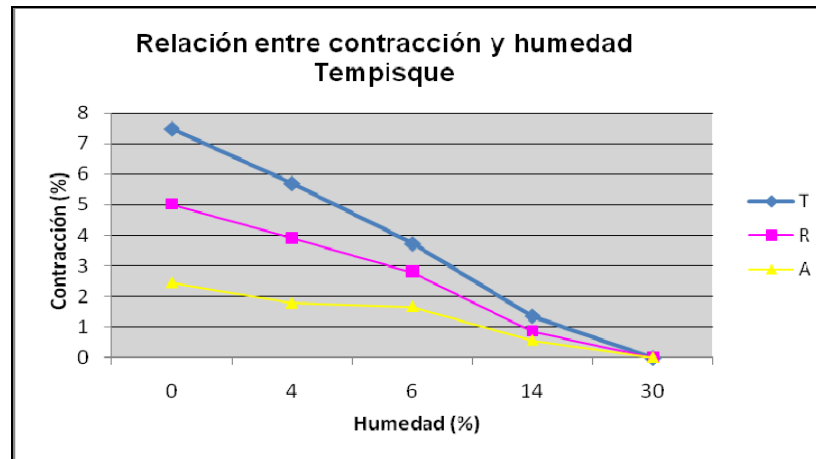
Propiedad	Kg/m ³	SG
Desidad aparente	1,514.27	1.51
Densidad anhidra	1,582.92	1.58
Densidad al 12%,	1,321.10	1.32
Densidad al 8%,	1,499.64	1.50
Humedad	6%	----

Como se puede observar en el cuadro 5.12, la densidad específica obtenida al 12%, también convierte la madera del Tempisque en “extremadamente pesada”. A pesar de eso el Tempisque es una madera que luego de ser extraída del bosque, cuenta con un número determinado de días, durante los cuales puede pasar en el patio de acopio, ya que es fuertemente dañada por un barrenador que deteriora la madera, impidiendo su comercialización, motivo por el cual los aserraderos del norte han dejado de aprovechar esta especie.

Cuadro 5.13. Valores de contracción del Tempisque.

Contracción	Valor medio
Tangencial	7.49
Radial	5.01
Axial	2.45
Volumétrica	14.95
CT/CR	1.51

Como se puede notar en el cuadro 5.13, la contracción tangencial del Tempisque sobrepasa la contracción radial por 2.48%, obteniendo de esta manera una relación CT/CR que indica que la madera es estable. No obstante, este dato también indica que la madera cuenta con algunas grietas, por lo que requiere una leve atención durante el secado. En la figura 5.20, se puede observar el comportamiento de las curvas de los diferentes ejes del Tempisque, en los cuales se ve claramente que el eje axial, semejante al Jobillo, obtuvo un valor alto, por lo que el Tempisque también contaba con madera de reacción, específicamente, madera de tensión. De acuerdo a Benítez (1988), las contracciones tangenciales y radiales obtenidas son “altas”.

Figura 5.20. Relación entre la contracción y humedad del Tempisque.

3. Propiedades mecánicas de la madera del Tempisque.

Cuadro 5.14. Esfuerzos últimos y básicos del Tempisque.

	Psi (lb/cm²)	Kg/cm²	Esf. Básicos (Kg/cm²)	Coef. De var. (%)
Corte radial	3,302.81	229.39	76.74	12.41
Compresión paralela a la fibra	5,833.33	410.99	137.58	7.00
Compresión perpendicular a la fibra	2,799	197	65.98	10.50
Dureza	1,371.25 lbs.	623.29 Kg.	----	27.27

Al analizar los datos de esfuerzos últimos y básicos del Tempisque (Ver cuadro 5.14), se puede notar que ha pesar de ser una madera que cuenta con algunas grietas al ser aserrada, tiene una alta compresión paralela y perpendicular a la fibra. Como criterio de comparación, la caoba cuenta con una compresión paralela de 299 Kg/cm², una compresión perpendicular de 85 Kg/cm², y una dureza de 316 Kg (Simpson & TenWolde 1999). Es evidente que el Tempisque supera las propiedades de la caoba antes mencionadas, por lo que se posiciona por arriba del promedio al igual que el Jobillo.

Cuadro 5.15. Medidas de flexión estática en el Tempisque.

	Psi (lb/cm²)	Kg/cm²	Esf. Básicos (Kg/cm²)	Desv. Estándar	Coef. De var. (%)
MOE	3,752,594.97	225,831.33	75,174.06	143,115.13	63.37
MOR	27,318.30	1,924.70	643.87	269.41	14.00

Tanto el módulo de ruptura como el de elasticidad del Tempisque (Ver cuadro 5.15), al establecer una comparación con otras especies comerciales como la caoba, la cual cuenta con un MOE de 89,600 Kg/cm² y un MOR de 615.74 Kg. demuestran su superioridad de resistencia de cargas mayores, emitiendo datos experimentales de esfuerzos últimos de MOE y MOR, de 225,831.33 Kg/cm² y de 1,924 Kg/cm² respectivamente.

C. Lloro-sangre, (*Swartzia cubensis*)

1. **Descripción botánica del Lloro-sangre.** *Swartzia cubensis*. Es común encontrar esta especie en cerros de piedra caliza, a 300 metros o menos. Es un árbol de 12 metros de altura o más, y un fuste de 45 cm. De diámetro, las ramillas jóvenes son de color café – tomentuloso, el raquis de las hojas es puberulento, y muy alado cerca del ápice del nudo. Cuenta con 11 a 13 hojillas u hojuelas, cortas – paniculadas, oblongas o estrechas lancetadas-oblongas, de 3-8 cm. De largo, un poco estrechas hacia lo obtuso o el ápice redondo, son redondas y bastante obtusas en la base, glabrosa en la parte superior, bastante densa y minuciosamente seríceo por debajo, la venación es estrechamente reticulada, racimos solitarios o geminados, usualmente levantada desde los nudos defoliados, suelta y de pocas flores, mucho más pequeño que las hojas, el raquis es puberulento, los pedicelos son cortos, la flor cuenta con una forma elipsoide, 6mm de largo, no cuenta con pétalos. La legumbre usualmente cuenta con una semilla, oblicua-elipsoide, 2-4.5 cm. De largo, glabrosa, 2 cm., y gruesa.

Figura 5.21. A, inflorescencias; B, infrutescencias; C, rama con hojas del Lloro-sangre.



(Pennington & Sarukhan 1998)

2. Propiedades físicas de la madera del Lloro-sangre.

Cuadro 5.16. Características organolépticas del Lloro-sangre.

Característica	Descripción
Olor	Desagradable
Color	HUE 7.5 YR 7/6 Amarillo rojizo
Sabor	Ausente
Grano	Recto
Textura	Fina, Homogénea uniforme

Al analizar las propiedades organolépticas del Lloro-sangre cuadro 5.16, podemos concluir luego del análisis antes mencionado, que contaba con un olor desagradable, el cual se asemejaba al olor de una fruta en descomposición, el olor se tornó más fuerte al momento de colapso de la pieza.

Cuadro 5.17. Contenido de humedad y pesos del Lloro-sangre.

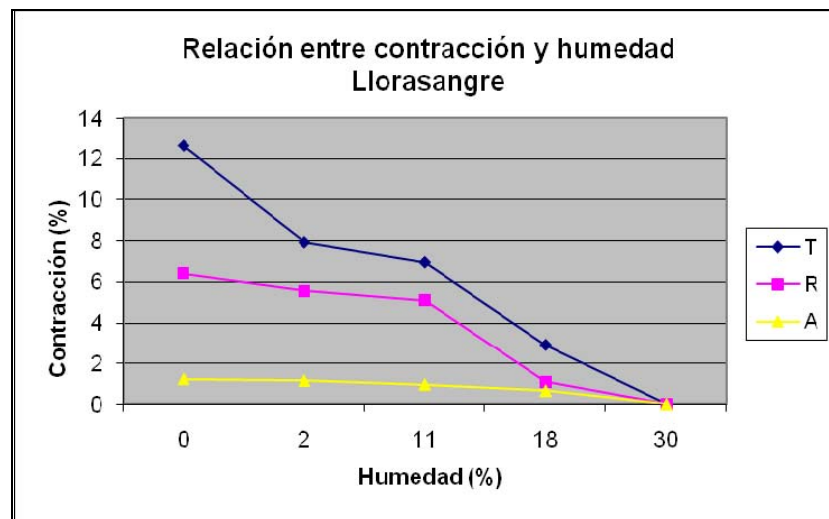
Propiedad	Kg/m ³	SG
Densidad aparente	999.89	1.00
Densidad anhidra	868.40	0.87
Densidad al 12%,	716.86	0.72
Densidad al 8%,	842.44	0.84
Humedad	19.50%	----

En el caso del Lloro-sangre, al igual que las otras especies evaluadas, obtuvo una densidad específica al 12% cuadro 5.17 de 716.86 Kg/m³, que la posiciona dentro de las maderas “Muy pesadas”. La madera del Lloro-sangre se seca rápidamente y puede trabajarse bien con máquinas. La madera es dura, pesada y densa, y esta clasificada como una de las maderas más pesadas de Guatemala, es adecuada para construcción de tipo pesado si se trata la amplia zona de la albura (Kukachka, 1968).

Cuadro 5.18. Valores de contracción del Lloro-sangre.

Contracción	Valor medio
Tangencial	12.62
Radial	6.38
Axial	1.22
Volumétrica	20.22
CT/CR	1.98

A diferencia de las especies antes analizadas, el Lloro-sangre obtuvo una contracción axial más baja cuadro 5.18. No obstante rebasa el rango normal que va de 0.1 a 0.2 %, por lo que también contaba con madera de reacción, lo cual implica, madera de tensión. Por otra parte, la relación CT/CR, indica que la madera es estable y necesita solamente una leve atención en el secado. Con base a las contracciones tangenciales y radiales obtenidas, y según Benítez (1988), ambas contracciones son muy “altas”.

Figura 5.21. Relación entre la contracción y humedad del Lloro-sangre.

En la figura 5.21. se puede observar claramente como el eje longitudinal muestra valores bastante altos a los sugeridos por Benítez (1988). Como parámetro de comparación se escogió el Jaboncillo, el cual cuenta con un valor medio de contracción axial de 0.83 (Lima 2004), quedando muy por debajo del Tempisque.

3. Propiedades mecánicas de la madera del Lloro-sangre.

Cuadro 5.19. Esfuerzos últimos y básicos del Lloro-sangre.

	Psi (lb/cm²)	Kg/cm²	Esf. Básicos (Kg/cm²)	Coef. de var. (%)
Corte radial	1,478.33	102.24	34.16	25.38
Compresión paralela a la fibra	5,750.00	405.11	135.61	7.28
Compresión perpendicular a la fibra	1,385	98	32.63	13.18
Dureza	585 lbs.	265.90 Kg.	----	9.59

El Lloro-sangre mostró altos valores de compresión paralela y perpendicular a la fibra, cuadro 5.19. Como parámetro de comparación, se utilizó el pino ocote, debido a su similitud en compresión paralela a la fibra, basándose en los esfuerzos últimos, el cual cuenta con una compresión paralela de 530 Kg/cm² y una dureza de 265 Kg. Por medio de esta comparación, se puede observar que el Lloro-sangre podría ocupar ciertos nichos del mercado que el pino abastece. El Lloro-sangre, durante las pruebas de compresión paralela a la fibra, produjo fallas de aplastamiento (plano de ruptura aproximadamente horizontal), y falla de grieta cuneiforme.

Cuadro 5.20. Medidas de flexión estática en el Lloro-sangre.

	Psi (lb/cm²)	Kg/cm²	Esf. Básicos (Kg/cm²)	Desv. Estándar	Coef. de var. (%)
MOE	3,066,958.42	216,081.59	72,217.50	50,695.19	23.46
MOR	20,112.78	1,417.03	474.40	91.36	6.45

El módulo de elasticidad y de ruptura del Lloro-sangre cuadro 5.20 superan de igual manera que las especies previamente analizadas a las especies comerciales antes mencionadas.

D. Pucte, (*Bucida buceras*)

1. Descripción botánica del Pucte. Especie que se encuentra en el bosque húmedo a 1,000 msnm o usualmente menos. Es un árbol, usualmente de 9-15 metros de altura, con un fuste a menudo de 30 cm. o más de diámetro, en algunos casos hasta 1 m. La corteza es gris y escamosa, las ramillas jóvenes son seríceas, y luego glabras, las ramas a menudo se encuentran armadas con espinas robustas, de 2-3 cm. de largo; las hojas se encuentran en racimos al final de las ramillas, atestada, de pecíolos delgados, de obovado a ovalado, 3-9 cm. de largo, muy obtuso a redondo, estrecho en la base, glabro con el tiempo, cuando son muy jóvenes son algo seríceas, flores blanquecinas, espigas pedunculadas, delgadas, seríceas, 3-10 cm. de largo, usualmente interrumpido, lóbulos del cáliz triangulares, aguda, fruto ovoide, 8 mm. De largo, seríceo.

Figura 5.22. A, rama de la parte inferior del árbol con hojas y espinas; B, inflorescencia; C, flor; D, fruto del Pucte.



(Pennington & Sarukhan 1998)

2. Propiedades físicas de la madera del Pucte.

Cuadro 5.21. Características organolépticas del Pucte.

Característica	Descripción
Olor	Aromático/ Olor similar al pepino
Color	HUE 2.5Y 5/3 Café Oliva Claro
Sabor	Ausente
Grano	Recto
Textura	Fina heterogénea

En base al cuadro 5.21., se puede observar que el Pucte contaba con un olor muy similar al del pepino, se puede describir como un olor agradable no penetrante. Y al realizar el análisis en toda la pieza, no fue posible registrar un sabor, se encontraba totalmente ausente.

Cuadro 5.22. Contenido de humedad y pesos del Pucte.

Propiedad	Kg/m ³	SG
Densidad aparente	1,311.30	1.31
Densidad anhidra	1,478.24	1.48
Densidad al 12%,	1,156.75	1.16
Densidad al 8%,	1,321.06	1.32
Humedad	5%	---

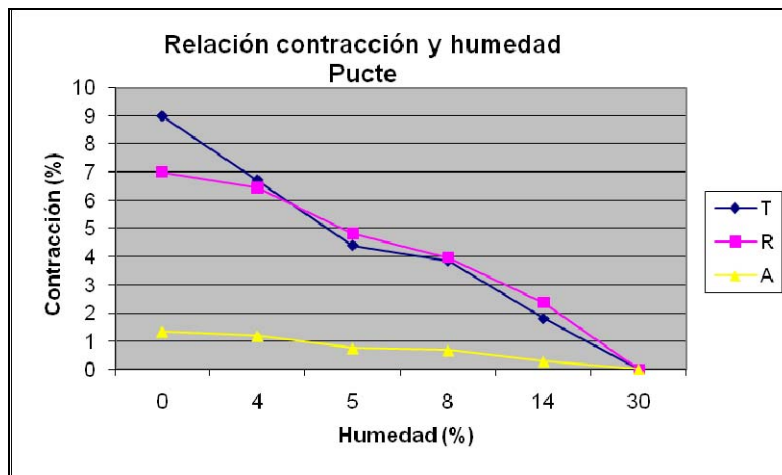
Al analizar la densidad al 12% cuadro 5.22-, se puede concluir que la madera del Pucte es “muy pesada”. La madera es muy dura y pesada, y difícil de trabajar, tanto con maquinaria como con herramientas de mano. Su gran resistencia y durabilidad la hacen particularmente adecuada para usos de trabajo pesado bajo condiciones exteriores (Kukachka, 1968).

Cuadro 5.23. Valores de contracción del Pucte.

Contracción	Valor medio
Tangencial	8.97
Radial	6.99
Axial	1.33
Volumétrica	17.29
CT/CR	1.28

Se puede observar que la contracción tangencial y radial Cuadro 5.23., del Pucte es “Muy Alta” (Benítez, 1988). La relación CT/CR, emitió un dato que posiciona al Pucte como una madera estable que no se agrieta, por lo que no necesita mayor control durante el secado. Nuevamente la contracción axial fue bastante alta por lo que Pucte también contaba con madera de reacción.

Figura 5.23. Relación entre la concentración y humedad del Pucte.



3. Propiedades mecánicas de la madera del Pucte.

Cuadro 5.24. Esfuerzos últimos y básicos del Pucte.

	Psi (lb/cm ²)	Kg/cm ²	Esf. Básicos (Kg/cm ²)	Coef. de var. (%)
Corte radial	4,134.59	286.75	96.01	4.75
Compresión paralela a la fibra	9,333.33	657.58	220.16	5.53
Compresión perpendicular a la fibra	4,507	318	106.13	22.77
Dureza	3,160.41 lbs.	1,436.55 Kg.	----	8.11

El Pucte cuenta con altas compresiones paralelas y perpendiculares cuadro 5.24, lo cual posiciona a esta especie por arriba del promedio. Supera las compresiones de la caoba y el pino ocote. El Pucte generó fallas de aplastamiento (plano de ruptura aproximadamente horizontal), y fallas de corte (plano de ruptura de ángulo agudo con la horizontal).

Cuadro 5.25. Medidas de flexión estática en el Pucte.

	Psi (lb/cm²)	Kg/cm²	Esf. Básicos (Kg/cm²)	Desv. Estándar	Coef. de var. (%)
MOE	3,997,433.49	242,521.54	80,826.40	124,870.76	51.49
MOR	21,052.63	1,483.26	495.79	326.55	22.02

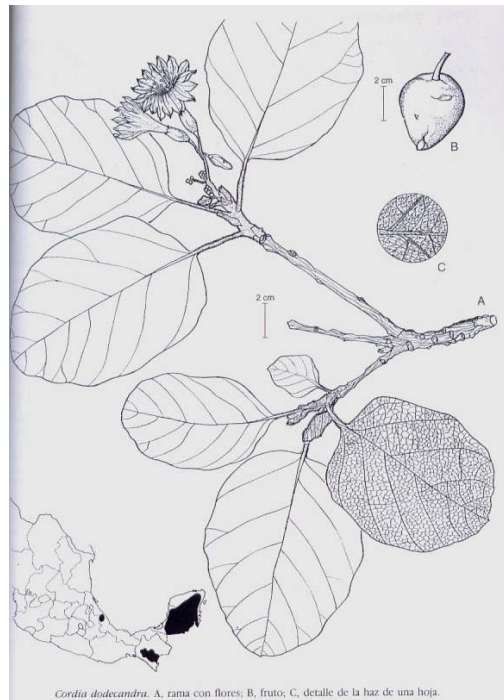
Figura 5.24. Prueba de flexión estática del Pucte.

(Bonilla, 2007)

E. Siricote, (*Cordia dodencandra*)

1. Descripción botánica del Siricote. Especie que se encuentra desde el nivel del mar hasta los 900 msnm. Árboles de 8-10 metros de altura, usualmente con una copa ancha y un fuste corto, las ramas jóvenes son robustas, hispidulosas y café-tomentosa, hojas sobre pecíolos cortos o elongados, el tallo es oblongo, 6-15 cm. de largo, 4-8 cm. de ancho, redondo u obtuso en el ápice y en la base, completamente o algo sinuado, muy escabroso de ambos lados, hispiduloso en la parte inferior, inflorescencia cimosa – paniculada, pocos cimos con flores, panículas terminales y bastante compactas, cáliz de 1-1.3 cm. de largo, tubular-campanulado, truncado en el ápice, glabroso o algo tomentuloso, con algunos pelos esparcidos, rectos, ferruginoso-tomentuloso cerca del ápice y sobre los lóbulos, corola en forma de embudo, anaranjado brillante, 3-5 cm. de largo, estriado con tomento pesado a lo largo de las líneas y los márgenes de los lóbulos, tanto en el interior como en el exterior. Los estambres son tantos como los lóbulos de la corola, ovario ovoide, posicionado sobre un disco grande, estilo alargado, frutos maduros de color amarillo verdoso, ovoide-oblongo, agudo en el ápice, 2 cm. de largo, la drupa se encuentra encajonada en un cáliz carnososo con forma de urna.

Figura 5.25. A, rama con flores; B, fruto; C, detalle de la haz de una hoja del Siricote.



(Pennington & Sarukhan 1998)

2. Propiedades físicas de la madera del Siricote.

Cuadro 5.26. Características organolépticas del Siricote.

Característica	Descripción
Olor	No distintivo
Color	HUE 7.5 YR 5/4 Café → Duramen HUE 10 YR 6/6 Café amarillento → Albura
Sabor	Ausente
Grano	Recto
Textura	Mediana homogénea uniforme

Como se puede observar en el cuadro 5.26., el Siricote no presenta un olor distintivo ni un sabor que lo caracterice. El corazón del Siricote cuenta con un color café intenso, el cual en Guatemala es utilizado por los artesanos del área del Remate, en el departamento del Petén, para la fabricación de máscaras y figuras de animales, los cuales son vendidos a los turistas que visitan el parque nacional Tikal.

Cuadro 5.27. Contenido de humedad y pesos del Siricote.

Propiedad	Kg/m ³	SG
Desidad aparente	1,367.23	1.37
Densidad anhidra	1,435.39	1.44
Densidad al 12%,	1,192.62	1.19
Densidad al 8%,	1,362.82	1.36
Humedad	8.70%	----

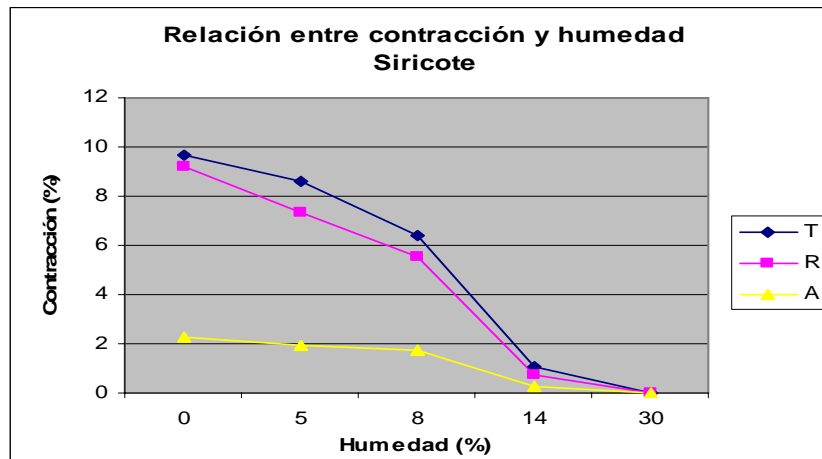
Al analizar la densidad al 12% obtenida para el Siricote cuadro 5.27., se puede observar que esta es una madera “extremadamente pesada”. La madera es muy fácil de trabajar, puede tener un acabado muy liso, pega muy bien y mantiene bien su forma. Debido a su facilidad para trabajarla, su durabilidad y buena estabilidad, puede servir muy bien como un alternativo del cedro y la caoba cuando el color no sea un factor principal.

(Kukachka, 1968).

Cuadro 5.28. Valores de contracción del Siricote.

Contracción	Valor medio
Tangencial	9.64
Radial	9.23
Axial	2.27
Volumétrica	21.14
CT/CR	1.04

Según Benítez (1988), las contracciones tangenciales y radiales obtenidas cuadro 5.28 son “muy altas”. Similar a las especies anteriormente analizadas, el Siricote cuenta con una contracción axial muy alta, por lo que las piezas analizadas contaban con madera de reacción.

Figura 5.26. Relación entre la concentración y humedad del Siricote.

3. Propiedades mecánicas de la madera del Siricote.

Cuadro 5.29. Esfuerzos últimos y básicos del Siricote.

	Psi (lb/cm ²)	Kg/cm ²	Esf. Básicos (Kg/cm ²)	Coef. de var. (%)
Corte radial	2,733.23	190.05	63.51	23.38
Compresión paralela a la fibra	6,833.33	481.44	161.10	11.02
Compresión perpendicular a la fibra	3,285	231	77.44	10.66
Dureza	1,976.66 lbs.	898.48 Kg.	----	31.21%

El Siricote cuenta con compresiones paralelas y perpendiculares cuadro 5.29., mayores que la caoba, incluyendo la dureza que es de 316 Kg. El Siricote presento fallas de corte (plano de ruptura de ángulo agudo con la horizontal).

Cuadro 5.29. Medidas de flexión estática en el Siricote.

	Psi (lb/cm²)	Kg/cm²	Esf. Básicos (Kg/cm²)	Desv. Estándar	Coef. de var. (%)
MOE	3,590,129.52	252,941.44	84,533.76	60,185.09	23.79
MOR	29,448.62	2,074.79	694.22	249.40	12.02

El Siricote presento módulos de elasticidad y ruptura mayores a los de la caoba, al igual que las especies antes mencionadas.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. A través de la determinación de la densidad específica de cada especie, se pudo observar que todas las especies están catalogadas como extremadamente pesadas.
2. Al obtener la relación contracción tangencial / contracción radial (CT/CR), se pudo determinar que las cinco especies en general son maderas estables.
3. El Tempisque fue la madera más pesada dentro de las cinco especies analizadas, estando así catalogada como extremadamente pesada. Por medio de la relación (CT/CR), se determinó que la madera a pesar de contar con algunas grietas es una madera bastante estable. Sus contracciones se describen como altas, teniendo una contracción axial por arriba del 2%, por lo que la madera que se utilizó contaba con madera de reacción. Esta madera es la más susceptible al permanecer mucho tiempo en el patio de acopio. Los resultados de la pruebas mecánicas mostraron que el Tempisque esta por arriba del promedio.
4. El Lloro-sangre es la especie menos pesada de las cinco especies analizadas, y aún así demostró cualidades superiores similares a las especies más fuertes como lo son el Pucte y el Jobillo, también se encuentra dentro del grupo de las maderas extremadamente pesada. La madera de esta especie es una madera estable, que demostró contracciones altas, y al igual que el tempisque contaba con madera de reacción. El Lloro-sangre al igual que las otras especies demostró excelentes cualidades al ser sometida a las pruebas mecánicas, soportando cargas altas. La madera del Lloro-sangre emitió un olor desagradable cuando la pieza colapso durante las pruebas mecánicas, mas no contaba con un sabor específico. El Lloro-sangre podría ser utilizado para construcciones pesadas, siempre y cuando se utilice la albura. El Lloro-sangre presentó fallas de aplastamiento y de grieta cuneiforme.
5. El Pucte tiene un olor a pepino, y no tiene un sabor característico. El Pucte es una de las maderas más resistentes junto con el Jobillo. La madera del Pucte también se encuentra dentro de las maderas extremadamente pesadas, y es una madera estable. Debido a que es una madera muy dura y pesada, es un poco difícil, de trabajar. Por su gran resistencia y durabilidad, es una especie que se puede utilizar para trabajos pesados a la intemperie. Sus resultados mecánicos, demostraron que es una madera muy resistente con capacidad de soportar grandes cargas.

El Pucte presentó fallas de aplastamiento y de corte.

6. El Siricote fue la segunda madera más pesada, y no cuenta con un olor ni un sabor específico. Está catalogada dentro del rango de las especies anteriores, como una madera extremadamente pesada. La albura es muy susceptible a hongos mas no el duramen. Es una madera estable, que mostró contracciones “Muy Altas”. Cuenta con una madera muy fácil de trabajar, y en algunos casos se ha sugerido como una posible alternativa, para elaborar productos que normalmente se fabrican con cedro y caoba, cuando el color no es relevante para el cliente. Durante las pruebas mecánicas, se pudo observar su superioridad ante una especie como la caoba. Durante las pruebas de compresión, esta especie presento fallas de corte (plano de ruptura de ángulo agudo con la horizontal).

7. El Jobillo no presentó un olor ni un sabor en particular, y se posicionó como la cuarta especie más pesada dentro de las cinco evaluadas. Su madera está clasificada dentro del grupo de las “extremadamente pesadas”, y al mismo como una madera estable. No es difícil trabajarla a pesar de su alta densidad, tanto con herramientas como maquinaria. Por otro lado su alta densidad genera problemas en el momento de pegar un pieza con otra. Es una madera adecuada para construcción pesada, para muebles, pisos, elaboración de arcos de caza, tacos de billar, mangos para cepillos y mangos para cuchillos. Las contracciones del Jobillo fueron muy altas, lo que indica presencia de madera de reacción, específicamente para las latifoliadas, madera de tensión. Esta especie demostró durante las pruebas mecánicas, su gran capacidad para soportar grandes cargas.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- ASTM (American Society for Testing Materials)*, ASTM- D 143 (Sociedad Americana de ensayos de materiales)
- Benítez, RF. y J. Montesinos. 1988. *Catálogo de 100 especies forestales de Honduras: distribución, propiedades y usos*. Siguatepeque, Honduras. Escuela Nacional de Ciencias Forestales –ESNACIFOR. 216 p.
- Bodig, J.& B.A. Jayne. 1982. *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold Company Inc. New York. 712pp.
- Casasola, CR. 1988. *Anatomía y propiedades físicas de las maderas Calophyllum brasiliense, Vochysia hondurensis y Symphonia globulifera*. Tesis Licenciatura en Agronomía. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. 112 p.
- Chudnoff, M. 1984. *Tropical Timbers of the World*. Agricultura handbook number 607. Department of Agricultura, Forest Service. Washington. 466pp.
- Craig, R. *Mecánica de Materiales*. 2002. Primera Edición. Compañía Editorial Continental. México. 752 pp.
- CTEF (Centro Técnico de Evaluación Forestal). 1972. *Estudio de las Propiedades Físico Mecánicas y Estructura Anatómica de 7 especies de Pino de Guatemala*. Guatemala. 114p.
- Davis, H., G. Troxell y C. Wiskocil. 1982. *Ensayo e inspección de los materiales en ingeniería*. 9ª. Impresión. México D.F. Editorial Continental S.A. de C.V. 576p.
- Globe. 2003. *Soil Investigation and Caracterización*. [En línea]. UCAR / CSU whit support from NASA, NSF and the US Department of State. Consultado 25 ene. 2004. Disponible en <http://www.globe.gov/hq/trr/spanish/1>.
- Gurfinkel, G. 1981. *Word Engineering*. 2º. Edition. Kendall/Publishing Company. Iowa. 552 pp.

- Herrera, E. 1991. *Propiedades Físico-Mecánicas y Estructura de tres especies de maderas de Petén: plumajillo, danto y lagarto*. Tesis Ingeniería Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 101 pp.
- Lima, L. 2003. *Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas de 5 especies de árboles tropicales*. Tesis. Ing. Forestal. UVG. 74 pp.
- Martínez, H. 1989. *El componente forestal en los sistemas de finca de pequeños agricultores*. CATIE. Turrialba, C.R. 79 pp.
- Pennington, T. Sarukhán. 1998. *Árboles Tropicales de México*. Fondo de Cultura Económica. México. 521 pp.
- Samayoa, M. 1972. *Estudio preliminar de las propiedades físico-mecánicas de 7 especies de pino de Guatemala*. Tesis Ingeniería Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 156 pp.
- Seely, F. B. 1954. *Resistencia de Materiales*. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana. México. 591pp.
- Universidad Católica del Norte de Chile. 2005. *Laboratorio de Materiales* [En línea]. Consultado 10 de septiembre 2005. Disponible en <http://www.ucn.cl/Facultades/Institutos/laboratorio/materiales3.htm>
- UVG (Universidad del Valle de Guatemala). 2003. *Guía de Laboratorio de Resistencia de Materiales*. Guatemala. 2p.
- Valdes, H.C. 1988. *Anatomía y propiedades físicas de la madera Lonchocarpus latifolius (Wild) HBK, Terminalia amazonia (J.F. Gmel) y Pouteria gallifruca Cronquist*. Tesis Licenciatura en Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 49 pp.
- Vignote, S. y J. Jiménez. 1996. *Tecnología de la Madera*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 602 pp.

APÉNDICES

- A. Fotografías de las especies estudiadas
- B. Calibración de la compresora manual

C. APÉNDICE A

Fotografías de las especies estudiadas

FAMILIA: Boraginaceae
NOMBRE CIENTÍFICO: *Cordia dodecandra*
NOMBRE COMÚN: Siricote



(Bonilla, 2007)

FAMILIA: Combretaceae
NOMBRE CIENTÍFICO: *Bucida buceras*
NOMBRE COMÚN: Pucté



(Bonilla, 2007)

FAMILIA: Fabaceae
NOMBRE CIENTÍFICO: *Swartzia cubensis*
NOMBRE COMÚN: Lloro – sangre



(Bonilla, 2007)

FAMILIA: Sapotaceae
NOMBRE CIENTÍFICO: *Mastichodendron capiri* var. *Tempisque*
NOMBRE COMÚN: Tempisque



(Bonilla, 2007)

FAMILIA: Anacardiaceae
NOMBRE CIENTÍFICO: *Astronium graveolens*
NOMBRE COMÚN: Jovillo



(Bonilla, 2007)

APÉNDICE B (Calibración compresora manual)

