

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**FACTORES DE VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD,
COLOR Y DEFECTOS EN LA MADERA DE *Acacia mangium*
(WILLD) ANTES Y DESPUÉS DEL SECADO**

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIADA EN INGENIERÍA
FORESTAL**

CAROLINA TENORIO MONGE (B.Sc.)

CARTAGO, COSTA RICA

JUNIO, 2011



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERIA FORESTAL

**FACTORES DE VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD,
COLOR Y DEFECTOS EN LA MADERA DE *Acacia mangium*
(WILLD) ANTES Y DESPUÉS DEL SECADO**

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIADA EN INGENIERIA
FORESTAL**

CAROLINA TENORIO MONGE (B.Sc.)

CARTAGO, COSTA RICA

JUNIO, 2011

Factores de variación del contenido de humedad, color y defectos en la madera de *Acacia mangium* (Willd) antes y después del secado

RESUMEN

Acacia mangium es actualmente una de las especies más utilizadas en plantaciones forestales comerciales en Costa Rica. No obstante, los usos de su madera han sido restringidos debido a que presenta algunos problemas en el proceso de secado. Se señala que la madera aserrada presenta altos contenidos de humedad inicial (CHi), una alta variabilidad del contenido de humedad final (CHf), cambios de coloración en el duramen y una alta incidencia de defectos. Se investigaron las causas de estos problemas, tomando en cuenta factores como el clima o procedencia de la madera, la altura (posición de la troza en el árbol), el patrón de corte aplicado en el aserrío, el tipo de programa de secado utilizado, la posición radial de la tabla en la troza (distancia de la médula) y la presencia de albura o duramen. Los resultados mostraron que el CHi de la madera aserrada fue en promedio de 127% y se presentó una variación de 58 a 186%. Y los parámetros que influyeron en esta variación fueron el clima, la altura del árbol y tipo de patrón de corte que se aplica en la troza. Luego del secado se presentó un CHf de 19%, con una variación de 9 a 52%. La poca uniformidad en el CHf luego del secado es influenciado por la altura, el tipo de secado y la interacción de ambos factores. Así mismo, fue encontrado que durante el secado se desarrollan bolsas de humedad y que la incidencia de éstas aumenta en la madera proveniente de árboles creciendo en climas tropicales muy húmedos, en procesos de secado de baja humedad relativa en la cámara y en maderas aserradas con patrones de corte combinados. El cambio de color de la madera durante el secado se produjo por tipo de secado aplicado en la madera y el tipo de clima donde crece el árbol. Los defectos de secado y contracciones en *A. mangium* son catalogados como nulos o leves en la mayoría de los casos, y se ven afectados por el clima, el patrón de corte, el CHi y CHf, y el tipo de secado.

Palabras claves: bolsas de humedad, contracciones, secado convencional, madera tropical, uniformidad, Costa Rica.

Sources of variation in moisture content, color and defects in *Acacia mangium* (Willd) wood before and after drying

ABSTRACT

Acacia mangium is an important specie planted in Costa Rica. However, the wood uses have been limited by drying problems such as high initial moisture content (CHi), a high variability of final moisture content (CHf), wood color variation in heartwood and a high presence of drying defects. The aim objective of this research was investigated the causes of these problems. It was considered climatic conditions where tree growth, height of the tree, grain pattern, drying schedules, distance from pith and sapwood or heartwood presence. The results showed a CHi averaged of 127% and its variation was from 58 to 186%. The variation of CHi was influenced by climatic conditions, tree height and grain pattern. The MCf averaged was 19% and varied from 9 to 52%. The lack of uniformity in the CHf after drying is influenced by tree height, drying schedule and the interaction of both factors. Also, it was found that wet pockets are development during drying. The lumber from trees growing in humid tropical climates, drying processes with low relative humidity in kiln dry and sawn timber with rift sawn or double rift sawn is likely to develop wet pocket. The wood color change during drying and its changed was affected by the drying schedule and climatic conditions. Drying defects and shrinkages are classified as nulls or likely present and they were affected by climate, grain pattern, the CHi and CHf, and drying schedule.

Keywords: wet pockets, shrinkage, kiln dry, tropical wood, moisture uniformity, Costa Rica.

Esta tesis de graduación ha sido aceptada por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura.

Factores de variación del contenido de humedad, color y defectos en la madera de *Acacia mangium* (Willd) antes y después del secado

Miembros del Tribunal Evaluador

Róger Moya Roque, Ph.D.
Director de Tesis

Diego Camacho Cornejo, MBA.
Profesor evaluador

Cynthia Salas Garita, M.Sc.
Profesor evaluador

Carolina Tenorio Monge
Estudiante

DEDICATORIA

A mis padres.

Por todo su esfuerzo,
apoyo y tolerancia.

AGRADECIMIENTOS

Al mi tutor Roger Moya Roque, por brindarme la oportunidad de trabajar con él, y por todos los conocimientos que ha inculcado en mi persona.

A Diego Camacho, Cynthia Salas, Carlos Olivares, Rodrigo Víquez y José María Jiménez, funcionarios de la Escuela de Ingeniería Forestal, por su colaboración.

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica por su ayuda financiera.

A la empresa Ganadera Basa S.A. por facilitar el material utilizado en este estudio.

INDICE GENERAL

	Pág.
<i>RESUMEN</i>	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
<i>Miembros del Tribunal Evaluador</i>	iii
<i>DEDICATORIA</i>	iv
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	v
<i>INDICE GENERAL</i>	vi
<i>INDICE DE CUADROS</i>	viii
<i>INDICE DE FIGURAS</i>	ix
1. INTRODUCCION	1
2. OBJETIVOS	4
2.1.Objetivo General.....	4
2.2.Objetivos Específicos	4
3. REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1.Generalidades de la <i>Acacia mangium</i>	5
3.2.Contenido de humedad de la madera.....	6
3.3.Secado de la madera	7
3.4.Bolsas de humedad	8
3.5.Color de la madera.....	9
3.6.Defectos en la madera.....	10
4. MATERIALES Y METODOS	11

4.1.Ubicación y características de las plantaciones forestales.....	11
4.2.Muestreo de árboles.....	11
4.3.Patrón de aserrío y muestreo en la tabla.....	12
4.4.Clasificación de tablas y determinación del porcentaje de duramen y albura.....	14
4.5.Secado de la madera.....	14
4.6.Determinación del contenido de humedad.....	15
4.7.Determinación de bolsas de humedad.....	16
4.8.Determinación de peso específico, coeficientes de difusión y contracciones.....	16
4.9.Evaluación de presencia de defectos en la madera.....	17
4.10.Medición del color.....	18
4.11.Análisis estadísticos.....	19
5. RESULTADOS Y DISCUSION.....	21
5.1.Contenido de humedad inicial (CHi).....	21
5.2.Contenido de humedad final (CHf).....	23
5.3.Bolsas de humedad.....	29
5.4.Color.....	32
5.5.Defectos de secado.....	37
5.6.Contracciones de la madera.....	42
6. CONCLUSIONES.....	44
7. RECOMENDACIONES.....	46
8. BIBLIOGRAFÍA.....	47
9. ANEXOS.....	54
9.1.Manual de secado.....	54

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características de las plantaciones de rápido crecimiento de <i>A. mangium</i> muestreadas.	12
Cuadro 2. Programas de secado utilizados en el secado convencional de la madera de <i>A. mangium</i>	15
Cuadro 3. Coeficientes de correlación y significancia de las variables continuas evaluadas en el contenido de humedad, el color y en el porcentaje de contracción en la madera de <i>A. mangium</i>	26
Cuadro 4. Valores F del análisis de covarianza para el contenido de humedad, el color y el porcentaje de contracción en la madera de <i>A. mangium</i> (N=216).	27
Cuadro 5. Regresión logística y estimadores sobre la probabilidad de la presencia de bolsas de humedad en la madera de <i>A. mangium</i>	30
Cuadro 6. Porcentaje de piezas encontradas por categoría de defectos en madera de <i>A. mangium</i> antes y después del secado.	40
Cuadro 7. Valor F del análisis de varianza para los índices de calidad en madera aserrada de <i>A. mangium</i> antes y después del secado (N=216).	41

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Patrón de aserrío utilizado en cada troza y obtención de muestras para determinación de contenido de humedad en la tabla.....	13
Figura 2. Factores que afectan el contenido de humedad inicial y final en la madera de <i>A. mangium</i>	28
Figura 3. Bolsas de humedad presentes en la madera seca de <i>A. mangium</i>	29
Figura 4. Contenido de humedad de las piezas que presentaron bolsas de humedad por clima y por la ubicación de la bolsa por tipo de corte radial y tangencial en la madera de <i>A. mangium</i>	32
Figura 5. Parámetros de color en la madera de <i>A. mangium</i> antes y después del secado (a), niveles de variación del ΔE^* (b) y comportamiento del ΔE^* por tipo de secado y clima....	36
Figura 6. Porcentaje de incidencia de los defectos antes y después del secado (a), magnitud de la incidencia de los defectos (b), contracción en ancho por procedencia (c) y contracción en espesor por tipo de secado (d), en tablas de madera de <i>A. mangium</i>	38

1. INTRODUCCION

El secado de la madera es una etapa importante en los procesos de manufactura ya que este contribuye a la estabilidad dimensional, la trabajabilidad, la compatibilidad con acabados y adhesivos, y brinda mejores propiedades térmicas, acústicas y de aislamiento eléctrico, además de incrementar las propiedades mecánicas y la resistencia a la degradación biológica (Gu *et al*, 2004). Durante el proceso de secado se debe mantener un buen control de todas las etapas que lo componen, esto con el fin de reducir la variación en el contenido de humedad final (CHf) y del color de madera y prevenir los defectos de secado en las piezas (Simpson, 1999; Gu *et al*, 2004). La falta de uniformidad en el CHf de la madera es un problema importante en los procesos de manufactura, ya que este contribuye en la calidad de los productos fabricados (Cai y Hayashi, 2007). Del mismo modo, una baja calidad de la madera luego del secado, afecta no solo su valor económico, sino que además influye en algunas de sus propiedades de trabajabilidad y uso final, aumentando los desperdicios (Gu *et al*, 2004). En tanto que el color de la madera debe mantenerse lo más uniforme posible con el fin de tener productos también de igual forma uniformes (Keey, 2005).

Se han señalado diferentes factores que pueden ser los causantes principales de la variación en el CHf, cambios en la coloración de la madera y los defectos en la madera seca, entre los que se destacan: las características propias de las especies, como su densidad y composición química (Möttönen, 2006), presencia de extractivos (Burtin *et al*, 1998; Keey, 2005), la edad del árbol (Qumruzzaman *et al*, 2004), el contenido de humedad inicial de la madera (CHi) (Moya y Muñoz, 2008; Ofori y Brentuo, 2005), el programa de secado (Simpson, 1999; Gu *et al*, 2004), posición en altura de la pieza de la madera en el árbol (Ofori y Brentuo, 2005), presencia de albura y duramen (Yamamoto *et al*, 2003) y la procedencia de la madera (Luostarinen y Möttönen, 2004; Gu *et al*, 2004), entre otras.

Por otro lado, *Acacia mangium* ha sido introducida con buena aceptación en Asia, África, Centro América, Suramérica y las islas del Caribe (Arisman *et al*, 2006). Su éxito en

plantaciones comerciales radica en su rápido crecimiento (Shah Newaz *et al*, 2005), en la calidad de su madera (Yamamoto *et al*, 2003) y su tolerancia a sitios perturbados, quemados y a suelos agrícolas abandonados (Shah Newaz *et al*, 2005). No obstante, la utilización de madera de árboles de plantaciones muestra problemas en la calidad de la madera aserrada y en algunos procesos industriales. Yamamoto *et al* (2003) estudiando el contenido de humedad en condición verde de *A. mangium*, encontraron valores extremadamente altos, de 253% en duramen y 154% en la albura, sugiriendo que este alto valor de humedad se debe a la presencia de “madera húmeda” y factores propios de la madera durante el secado (Yamamoto *et al*, 1997; Larcher, 1995).

Recientemente se han señalado problemas debido a los procesos de secado en la madera de *A. mangium* (Moya *et al*, 2011a; Barsi y Wahyudi, 2007 y 2009; Lim *et al*, 2003, Piao *et al*, 2000). Moya *et al* (2011a) mencionan que la madera de *A. mangium* presenta un mayor incremento en los defectos después de secado (grietas, acanaladuras y encorvaduras), en comparación con otras especies de plantaciones de rápido crecimiento de regiones tropicales. Así mismo dichos autores encontraron una alta variación en el CHF luego del secado. Barsi y Wahyudi (2007) estudiando también varias especies tropicales del Oeste de Papua encontraron que *A. mangium* es una madera con alta presencia de defectos, susceptible a producir grietas, torceduras y reventaduras. Lim *et al* (2003) haciendo referencia al secado de *A. mangium* menciona la existencia de problemas de secado y que para reducir los defectos es necesario realizar un presecado al aire antes de realizar el secado convencional. En tanto Piao *et al* (2000) contrario a los otros autores mencionan que la especie es de fácil secado, pero con alta incidencia a colapso y reventaduras, también sugieren que realizar un presecado antes de secar en cámara es importante y debe acompañarse por un secado lento.

Visualmente la madera de *A. mangium* ha sido catalogada por algunos investigadores como de color marrón amarillento a marrón dorado en condición verde, y marrón mate en madera seca (Sahri *et al*, 1993). Sin embargo, los posibles factores que afectan el cambio de color en la madera de la especie por efecto del secado no han sido estudiados.

Debido a la alta importancia de *A. mangium* como especie de reforestación, a los posteriores usos de su madera, a la poca información y a la incongruencia que existe en la presencia y causas de variación del CHI y CHF, la incidencia de defectos y los cambios de color por secado, es que se realizó el presente trabajo, el cuál tiene como objetivo determinar los factores de variación del CHI y CHF, del color y los defectos causados en la madera por el secado convencional. Se considera la influencia de factores tales como procedencia de la madera, tipo de secado aplicado, altura de la tabla (posición de la troza en el árbol), posición radial (distancia de la médula), patrón de corte y la presencia de albura y duramen. La información obtenida permitirá tener un conocimiento de las causas por las que se presenta la variación del contenido de humedad y la presencia de defectos luego del secado, para de esta manera tomar en consideración estos factores durante el proceso de secado y así reducir la incidencia de defectos y tener un producto final más uniforme.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Determinar la influencia que factores como procedencia de la madera, tipo de secado aplicado, altura de la tabla (posición de la troza en el árbol), posición radial (distancia de la médula), patrón de corte y presencia de albura y duramen, causan en el contenido de humedad inicial, el contenido de humedad final, el cambio de coloración y en los defectos, en la madera aserrada de *Acacia mangium*.

2.2. Objetivos Específicos

- a) Determinar qué relación presentan los factores mencionados con el contenido de humedad de la madera aserrada antes y después del secado.
- b) Identificar cuales factores influyen en el comportamiento del contenido de humedad antes y después del secado.
- c) Determinar las causas en la variación del contenido de humedad final.
- d) Determinar los factores que influyen en la presencia de bolsas de humedad en la madera seca.
- e) Determinar el color de la madera antes y después del secado.
- f) Determinar los factores que afectan el cambio en la coloración de la madera después del secado.
- g) Determinar el porcentaje de incidencia de los defectos antes y después del secado.
- h) Evaluar la magnitud de los defectos antes y después del secado.
- i) Determinar cuales son los factores que influyen en los defectos antes y después del secado.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Generalidades de la *Acacia mangium*

Conocida comunmente como “Mangium” o “Acacia”, es una especie nativa de la parte noroeste de Australia, Papúa Nueva-Guinea y del este de Indonesia, la cual ha sido introducida con buena aceptación en Asia, África, Centro América, Suramérica y las islas del Caribe (Arisman *et al*, 2006). Es un árbol que en su hábitat natural alcanza de 25 a 30 m de altura y hasta 90 cm de dap (diámetro a la altura del pecho); su fuste es recto y libre de ramas hasta las dos terceras partes de su altura total (CATIE, 1992).

Es una especie heliófita, que crece bien tanto en zonas secas como en bosques más húmedos, con precipitaciones que pueden variar de los 1000 hasta los 4500 mm/año, y con temperaturas desde los 12°C hasta los 34°C. Altitudinalmente es frecuente encontrarla desde el nivel del mar hasta los 720 msnm (CATIE, 1992). Además es característica por su excelente adaptabilidad en sitios degradados, rápido crecimiento (Shah Newaz *et al*, 2005), por la calidad de su madera (Arisman *et al*, 2006; Yamamoto *et al*, 2003) y por su tolerancia a sitios perturbados, quemados y a suelos agrícolas abandonados (Shah Newaz *et al*, 2005).

Su madera es característica por presentar poca albura, la cual es de color crema claro. El duramen es de color café claro, con bandas café oscuro (Peh *et al*, 1984). Es moderadamente pesada, con una gravedad específica de 0,50 g/cm³ (CATIE, 1992), la cual tiende a presentar problemas de secado (Moya *et al*, 2011a; Barsi y Wahyudi, 2007; Barsi y Yuniarti, 2009; Lim *et al*, 2003, Piao *et al*, 2000). Sin embargo es considerada como de una gran belleza y finos acabados. A sido utilizada principalmente para pulpa y papel (Arisman *et al*, 2006). Otros usos incluyen tableros de fibras de media densidad, mueblería, plywood, construcción en general y artesanados (Peh *et al*, 1984; CATIE, 1992; Arisman *et al*, 2006).

3.2. Contenido de humedad de la madera

Todas las partes de un árbol vivo contienen agua. El agua es fundamental en el proceso de fotosíntesis, ya que conduce a la formación de nuevas células en el árbol propiciando su crecimiento (Bousquet, 2000). En los árboles el xilema brinda soporte mecánico y proporciona la capacidad de almacenar y distribuir el agua absorbida desde la raíz al resto de follaje; este proceso se interrumpe cuando el árbol es cortado, la humedad contenida en éste se conoce como contenido de humedad inicial (CHi) (Skaar, 1972). Una vez que la madera cortada se somete a un proceso de secado, el contenido de humedad resultante, es llamado contenido de humedad final (CHf), el cual tiende a estar en función del producto final y de las condiciones climáticas del lugar donde este se vaya a utilizar.

El contenido de humedad de la madera, se presenta principalmente de dos formas, como agua libre o capilar, ubicada en las cavidades celulares (es la primera en ser removida de la madera) y como agua de constitución, adherida a las paredes celulares, la cual es de difícil extracción y su remoción comienza cuando el agua libre es eliminada y el contenido de humedad alcanza el punto de saturación de las fibras, descendiendo hasta alcanzar el contenido de humedad de equilibrio (cuando la madera no gana ni pierde humedad).

El contenido de humedad de la madera es expresado en porcentaje, como el peso del agua presente en la madera sobre el peso de la madera. Árboles recién cortados presentan un contenido de humedad en el rango de 30 a 250%, donde la albura presenta usualmente contenidos de humedad más altos que el duramen (Bousquet, 2000; FPL, 1999).

El comportamiento del contenido de humedad depende de las características propias de las especies, como su densidad, anatomía y composición química (Möttönen, 2006). En general, existen estudios de especies tropicales que muestran la variación del contenido de humedad tanto antes como después de un secado en relación a la distancia radial de la troza (Ofori y Brentuo, 2005; Möttönen, 2006), la presencia de extractivos (Burtin *et al*, 1998; Keey, 2005), el programa de secado (Simpson, 1999; Gu *et al*, 2004), posición en altura de la pieza de madera en el árbol (Ofori y Brentuo, 2005), presencia de albura y duramen

(Yamamoto *et al*, 2003) y la procedencia de la madera (Luostarinen y Möttönen, 2004; Gu *et al*, 2004), entre otras.

3.3. Secado de la madera

El secado de la madera es una etapa importante en los procesos de manufactura ya que este contribuye a la estabilidad dimensional, la trabajabilidad, la compatibilidad con acabados y adhesivos, y brinda mejores propiedades térmicas, acústicas y de aislamiento eléctrico, además de incrementar las propiedades mecánicas y la resistencia a la degradación biológica (Gu *et al*, 2004).

Consiste en remover el agua contenida en la madera. Sin embargo, a diferencia muchos otros materiales que también deben secarse, la madera se debe secar a condiciones específicas para evitar la pérdida de sus propiedades y mantener su estabilidad dimensional (Bousquet, 2000). La pérdida de agua por el proceso de secado resulta en cambios en muchas de las propiedades de la madera, además de aumentar la incidencia de defectos tales como contracciones tangenciales y radiales, torceduras y fracturas (Bousquet, 2000).

Existen varios métodos para secar madera, sin embargo, el secado en horno convencional es el más utilizado alrededor del mundo (Oltean *et al*, 2007). Este consiste en el desarrollo de programas que controlan la temperatura y la humedad relativa de acuerdo con el contenido de humedad y las tensiones dentro de la madera, para minimizar la incidencia de defectos (FPL, 1999). La selección del programa de secado a utilizar debe estar acorde con las especificaciones según la especie, pues las condiciones internas de la cámara deben favorecer el secado apropiado de la madera y garantizar además la calidad de la misma, en función del producto final deseado (FPL, 1999).

La clave de un secado exitoso se encuentra en el control del proceso de secado. El tiempo de aplicación óptimo de temperatura, humedad relativa y circulación de aire es crítico. El no controlar el secado conduce a problemas que pueden afectar negativamente la trabajabilidad del producto.

3.4. Bolsas de humedad

Las bolsas de humedad, también conocidas como “madera húmeda” o “bolsas de agua”, son comúnmente áreas localizadas en el duramen de la madera con un contenido de humedad más alto de lo normal, aproximadamente 10% o más (Watanabe *et al*, 2010; Moya y Muñoz, 2008, Simpson, 1991). Estas son áreas que se pueden observar transversalmente y en todo lo largo de la tabla y que se caracterizan por poseer un color más oscuro donde se concentra la humedad en comparación con la región de la tabla que se encuentra seca (Moya y Muñoz, 2008).

Diversos estudios señalan posibles explicaciones para la formación de bolsas de humedad en la madera seca, Ward (1984) señala que son originadas por la invasión de una bacteria anaeróbica en el duramen de árboles vivos. Además, Moya y Muñoz (2008) presentan dos posibles explicaciones: (1) al inicio del proceso de secado las punteaduras tienden a producir fuerzas capilares de alta magnitud provocando la aspiración del margo en las secciones radiales, sin permitir el flujo normal del agua, y (2) el movimiento del agua en la sección radial de las tablas se produce principalmente por las punteaduras de las fibras las cuales son escasas y diminutas, lo cual tiende a producir un ritmo de difusión más lento.

Las bolsas de humedad tienden a producir problemas en el secado de la madera, aumentando los tiempos de secado, provocando una alta variabilidad en el contenido de humedad final y desarrollando una serie de defectos como colapsos, contracciones, torceduras, grietas y rajaduras (Simpson, 1991; Ward, 1984; Watanabe *et al*, 2010). Tablas que presentan estas condiciones suelen ser rechazadas en los procesos de manufactura, debido a su pobre desempeño y baja calidad de la madera.

Especies de pinos y robles son conocidas por presentar problemas con bolsas de humedad. Además en especies utilizadas en plantaciones forestales en Costa Rica como *Vochysia guatemalensis* y *Gmelina arborea* es común encontrar, que después del secado, se presenten bolsas de humedad, en cortes generalmente radiales (Moya y Muñoz, 2008; Moya *et al*, 2011b).

3.5. Color de la madera

El color de la madera difiere ampliamente entre especies. El color es un factor de suma importancia, considerado en la evaluación de la calidad de la madera después del secado, pues éste influye considerablemente en su apariencia y en su valor comercial (Nishino *et al*, 1998; Janin *et al*, 2001).

La colorimetría es un buen método para obtener información objetiva sobre el color de la madera (Nishino *et al*, 1998). Actualmente existen diversos parámetros que miden la variación del color en las piezas de madera; como son la escala tridimensional (X, Y, Z), la cual registra la reflectancia de los tres colores primarios, el CIE polar (L^* , C^* , h^*) scale, el cual considera la luminosidad, el cromo y el matiz (Vanclay *et al*, 2008) y el sistema CIEL*a*b*, el cual expresa cada color sobre un plano cartesiano espacial, definido por tres coordenadas (Mononen *et al*, 2002), L^* , las cuales registran luminosidad del negro- blanco, con variación desde 0 = negro hasta 100 = blanco, el parámetro a^* corresponde a rojo-verde, el cual mide rojo cuando son valores positivos, gris cuando es cero y verde cuando son valores negativos y por último está el parámetro b^* ó amarillo-azul, el cual hace lectura de amarillo si el valor es positivo, gris si es cero y azul si son negativos (Vanclay *et al*, 2008). Para el análisis de los cambios de color, se tiene en cuenta que la diferencia de color más pequeña y perceptible al ojo humano es $\Delta E^* = 1,0$ a $3,0$ (Voss y Hale, 1998; Terziev y Boutelje, 1998).

Los cambios de color asociados al secado basándose en las coordenadas colorimétricas L^* , a^* y b^* , han sido estudiados detenidamente en diferentes especies, por ejemplo: Moya y Berrocal (2010), Nishino *et al* (1998), Liu *et al* (2005). Sin embargo, para comprender más a fondo los cambios de color, se estudia la presencia de extractivos (Keey, 2005), el movimiento de fenoles hacia la superficie (Kreber y Haslett, 1998) la evaporización del agua durante el secado (Keey, 2005), el movimiento del agua dentro de la madera, la temperatura, velocidad y humedad relativa dentro de la cámara de secado (Stennud, 2004; Rappold y Smith, 2004), y el tipo de secado aplicado (Sundqvist, 2002).

3.6. Defectos en la madera

Los defectos en la madera se pueden presentar antes del secado por la acción de las tensiones de crecimiento, y después del secado como consecuencia de la pérdida de agua en las fibras y cavidades de la madera (Serrano y Cassens, 2001; Simpson, 1991, FPL, 1999). La mayoría de los defectos que se desarrollan en la madera durante el secado, se pueden clasificar como: fracturas (grietas, rajaduras, reventaduras), torceduras (alabeos, encorvaduras, arqueaduras, etc) o decoloraciones (FPL, 1999).

Diversos factores han sido estudiados como responsables del desarrollo de defectos en la madera. En muchos casos la contracción de la madera, la estructura anatómica y la presencia de extractivos, contribuyen al desarrollo de defectos asociados con el contenido de humedad, colores y superficies indeseables (FPL, 1999). Sin embargo, el factor más importante, es la temperatura de secado, ya que esta puede aumentar o disminuir la incidencia de cada tipo de defecto.

Las grietas y rajaduras en la superficie de la madera ocurren en las primeras etapas del proceso de secado, cuando las tablas son sometidas a estrés suficiente como para fracturar la madera. Este tipo de fracturas se presentan principalmente en los extremos de las caras de las tablas (FPL, 1999). El colapso es una distorsión de las células de la madera, que en casos severos se muestra como surcos, estrías o grandes ondulaciones. Las torceduras son cualquier tipo de desviación en la cara o bordes de madera aserrada, o cualquier borde que no se encuentre en ángulo recto. Las torceduras pueden ser causadas de dos formas: (1) por diferencias de contracciones tangenciales, radiales o longitudinales durante el proceso de secado, o (2) por tensiones de crecimiento. La presencia de madera juvenil, grano inclinado y madera de reacción, tienden a agravar las torceduras (FPL; 1999).

4. MATERIALES Y METODOS

4.1. Ubicación y características de las plantaciones forestales

La madera utilizada en el secado fue extraída de árboles de dos plantaciones forestales de rápido crecimiento de *A. mangium* ubicadas en dos condiciones climáticas distintas en Costa Rica propiedad de la empresa Ganadera Basa S.A. Una plantación se ubica en la región norte, en el caserío La Azucena de Pocosal, San Carlos, Alajuela (10° 52' 41" y 84 ° 21' 88") y la otra en la región del Pacífico Central, en Parrita de Aguirre, Puntarenas (09° 31' 18" y 84 ° 19' 53"), consideradas zonas de vida con bosque tropical muy húmedo (zona muy húmeda) y bosque tropical húmedo (zona húmeda) respectivamente (Bolaños y Watson, 1993). La edad de ambas plantaciones fue de 9 años, con condiciones de manejo similares (podas y raleos), pero de condiciones dasométricas distintas como consecuencia de cada sitio (Cuadro 1). En cada plantación fueron establecidas al azar dos parcelas circulares de 452 m² en un área representativa de la totalidad del área plantada para determinar las condiciones dasométricas de la plantación (Cuadro 1).

4.2. Muestreo de árboles

Diez árboles próximos a las parcelas de medición fueron seleccionados con un diámetro cercano al promedio de la plantación (Cuadro 1). Dichos árboles eran de buena forma y estaban libres de daños de ataques de insectos u hongos. Antes de cortar los árboles fue marcada su posición Norte. Posteriormente, dos trozas de 2,5 metros fueron cortadas: la primera desde la base del árbol hasta los 2,5 metros (denominado como altura A) y la segunda de 2,5 a 5,0 metros de altura del árbol (denominada como altura B). Las trozas en sus extremos fueron pintadas con el fin de disminuir la pérdida de humedad por los extremos. Todas las trozas fueron transportadas hacia el patio del aserradero del Instituto Tecnológico de Costa Rica para su procesamiento.

Cuadro 1. Características de las plantaciones de rápido crecimiento de *A. mangium* muestreadas.

Características	Parámetros	Tipo de clima	
		Zona muy Húmeda	Zona Húmeda
*Condiciones ambientales	Temperatura promedio (°C)	18-24	24-30
	Precipitación promedio (mm/año)	4000-8000	2000-4000
	Temporada seca	Marzo - Abril	Enero - Abril
**Características de la plantación	Edad del árbol (años)	9	9
	Densidad de la plantación (n/ha)	265,26	287,37
	Diámetro a la altura de pecho (cm)	30,55 (4,33)	25,26 (3,19)
	Área Basal (m ² /ha)	33,77 (0,49)	23,04 (0,27)
	Altura total del árbol (m)	24,01 (0,01)	21,65 (3,09)
	Altura comercial (m)	13,25 (5,03)	14,77 (4,23)
	Volumen (m ³ /ha)	322,08 (3,87)	222,99 (1,59)

* Datos climáticos tomados del Atlas Costa Rica (2008), de la capa de zonas de vida de Holdridge.

**Las características de la plantación se obtuvieron de dos parcelas temporales establecidas en la plantación.

Nota: los números en paréntesis corresponden a la desviación estándar de los datos.

4.3. Patrón de aserrío y muestreo en la tabla

Antes de iniciar el aserrío de la troza fue medido el diámetro en dirección Norte-Sur y marcada esta dirección. Las trozas fueron aserradas en tablas de 2,5 cm de espesor y estas fueron cortadas perpendicularmente en el sentido Norte-Sur (Figura 1a). En el momento de obtener cada tabla de la troza se fue midiendo la distancia de la médula, para establecer la ubicación de la tabla en relación al radio de la troza (distancia relativa). La madera proveniente de la parte Norte de la troza fue separada de la madera de la parte Sur. Un total de 216 tablas se obtuvieron del total de las trozas. Cada tabla fue debidamente identificada y codificada en la parte inferior de la misma, según su tipo de clima (zona muy húmeda y zona húmeda), altura (A y B), la distancia de la médula, la ubicación geográfica de la tabla (Norte y Sur) y el número de árbol. Luego del proceso de aserrío cada tabla fue cortada transversalmente a 27 cm del extremo inferior del árbol, posteriormente a esa altura fueron

extraídas dos secciones transversales: una de 2,5 cm para la determinación del contenido de humedad inicial (CHi) y la otra de 3 mm de espesor (Figura 1c) para determinar el tipo de corte y la evaluación de la presencia de duramen y albura. Debido a estos cortes realizados en la tabla, la longitud para secar fue de 2,15 m. Además de la pieza de 27 cm cortada inicialmente se obtuvieron tres piezas de 2 cm x 2 cm para determinar el peso específico, los coeficientes de difusión radial (DR) y tangencial (DT) y los porcentajes de contracción radial y tangencial (Figura 1c).

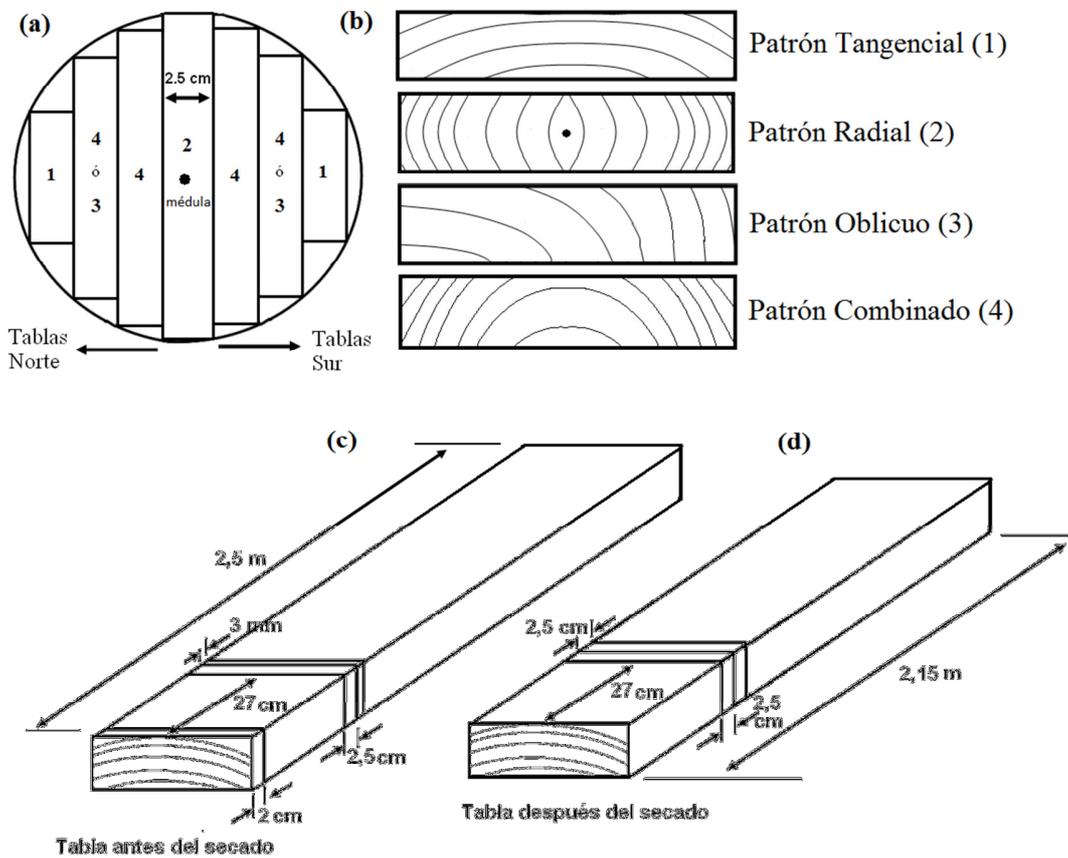


Figura 1. Patrón de aserrío utilizado en cada troza y obtención de muestras para determinación de contenido de humedad en la tabla.

4.4. Clasificación de tablas y determinación del porcentaje de duramen y albura

Todas las tablas fueron clasificadas en relación al tipo de corte presente en la sección transversal (Figura 1b) y en la muestra de 3 mm proveniente de cada una de las tablas, fue observado el patrón y clasificado en 4 tipos diferentes: patrón tangencial (1), patrón radial (2), patrón oblicuo: tangencial–radial (3) y cortes combinados: radial-tangencial-radial (4) (Figura 1b). Luego en esta misma muestra fue tomada una foto digital junto con una regla graduada a una resolución de 512 dpi. Y con la ayuda del programa Image Tool® (Health Science Center. 2006) se determinó el área total de la sección, el área de duramen y de albura, para luego calcular el porcentaje de cada uno de estos tipos de madera. Así mismo sobre esta misma foto fue calculada el área tangencial y área radial en la sección transversal de la tabla, y dichos datos fueron usados para calcular los porcentajes de estos cortes.

4.5. Secado de la madera

Dos programas de secado diferentes fueron aplicados: el primero fue aplicado a las tablas provenientes del lado Sur de la troza y cuyo origen es la combinación de los programas de secado T3-D2 y T8-D2 (Cuadro 2) propuestos por Boone *et al* (1988) que se caracterizan por usar baja temperatura y alto contenido de humedad de equilibrio (CHE) dentro de la cámara y fue denominado como Secado 1. El segundo programa aplicado a las tablas del lado Norte, se diseñó a partir de los resultados del primer programa, esto por que se presentó alta variabilidad en el CHF y una alta incidencia de bolsas de humedad; este segundo programa fue modificado con un aumento del CHE y una mayor temperatura dentro de la cámara (Cuadro 2) y se denominó Secado 2.

Cuadro 2. Programas de secado utilizados en el secado convencional de la madera de *A. mangium*.

Etapa de secado	Secado 1: contenido de humedad y temperatura baja			Secado 2: contenido de humedad y temperatura alta		
	TBS °C	CHE %	CH %	TBS °C	CHE %	CH %
	Calefacción	40		-	45	
	42	18,5	-	50	19,5	-
Secado	44	18,5	55	55	18,5	55
	44	17,6	50	55	17,6	50
	44	17,0	45	55	17,0	45
	44	16,3	40	55	16,3	40
	44	13,6	35	55	13,6	35
	44	9,9	30	55	10,1	30
	49	5,5	25	60	5,8	25
	55	4,0	20	66	4,0	20
	60	2,9	15	71	3,4	15
	71	3,5	12	82	3,5	12
Igualización	71	10	10	82	10	10
Acondicionamiento	71	13	-	82	12	-
Enfriamiento	40	-	-	40	-	-

Legenda: TBS=Temperatura de bulbo seco; CHE= Contenido de humedad de equilibrio dentro de la cámara; CH= contenido de humedad en la madera

4.6. Determinación del contenido de humedad

El contenido de humedad fue determinado en dos condiciones; antes y después del secado. Para el contenido de humedad inicial (CHi) se utilizó la muestra cortada transversalmente a 27 cm del extremo. En tanto para el contenido de humedad final (CHf), nuevamente se cortó a 27 cm del extremo superior en las tablas secas una sección transversal de 2,5 cm (Figura 1d). Dichos contenidos de humedad fueron calculados utilizando la norma D-1442-92 (ASTM, 2003).

4.7. Determinación de bolsas de humedad

Una vez terminado el proceso de secado a una longitud de 27 cm del extremo inferior, se realizó nuevamente un corte transversal de aproximadamente 2,5 cm de espesor con el fin de evaluar la presencia de bolsas de humedad (Figura 1d). La región con bolsa de humedad (BH) se evidencia transversalmente porque la región con alta humedad posee un color diferente al resto de la madera seca, que por lo general está alrededor de la bolsa de humedad. Sobre esta sección transversal fue delineado y delimitado el borde de la BH. Posteriormente fue tomada una foto digital y luego con la ayuda del programa Image Tool® (Health Science Center, 2006) fue calculado el área de la bolsa y el área total de esta sección transversal. El área de la bolsa de humedad fue expresada en relación al área total.

4.8. Determinación de peso específico, coeficientes de difusión y contracciones

Para determinar el peso específico y los coeficientes DR y DT se utilizaron las muestras de 2 cm x 2 cm. Se determinó el peso específico básico (peso seco/volumen verde), propuesto en la norma ASTM-143 (ASTM, 2003). Para el cálculo de los coeficientes de difusión se precedió a separar las muestras obtenidas de cada una de las tablas de 2 cm x 2 cm x 2 cm en tangenciales y radiales. Para la muestra tangencial, cuatro caras fueron selladas con parafina, dejando sin sellar las dos caras opuestas tangenciales. En el caso de las muestras radiales, nuevamente cuatro caras fueron selladas con parafina, pero en este caso se dejaron las dos radiales. Esta preparación de la muestra permite que el agua se difunda en la dirección tangencial o radial según lo deseado. Posteriormente las muestras fueron colocadas a 20°C y 79% EMC de 15%. Las muestras fueron pesadas al iniciar y luego en intervalos de 3 horas durante las primeras 48 horas y luego por cada 24 horas hasta completar 1026 horas, las muestras. Finalmente estas muestras se secaron a 105 °C durante 24 h para determinar su peso seco. Los coeficientes de difusión fueron calculados para cada dirección (tangencial y radial) usando la ecuación 1.

$$D = \frac{E_t^2 * \pi}{16 * t * L^2} \quad [1]$$

D se deriva de la ecuación de Stamm y Raleigh (1967) y se muestra en la ecuación 2.

$$\frac{E_t}{\sqrt{t}} = 4L \sqrt{\frac{D}{\pi}} \quad [2]$$

Donde: L es la longitud de la muestra en la dirección de transporte del agua (mm), t es el tiempo de secado (s) y Et es el cambio relativo en el contenido de humedad de la madera de verde a seco (15% CH).

Las contracciones de la madera se midieron en dos condiciones diferentes: una sobre las muestras empleadas para establecer los coeficientes de difusión radial y tangencial, y la segunda en las tablas que fueron sometidas al secado, de esta forma fueron determinadas las contracciones en espesor y ancho de las tablas. Para determinar las primeras contracciones en cada muestra fue medida su longitud antes y después de la prueba de difusión del agua. En tanto las contracciones por tabla se determinaron por el cambio dimensional que ocurrió en el ancho y en el espesor de la tabla desde la condición verde hasta el contenido de humedad final alcanzado al final del proceso de secado.

4.9. Evaluación de presencia de defectos en la madera

En cada una de las tablas obtenidas en el proceso de aserrío (216) fueron medidas las torceduras de la tabla (alabeo, encorvadura, acanaladura y arqueadura), grietas y rajaduras antes y después del secado. Métodos sugeridos de medición por Hallock y Malcolm (1972) y Milota (1996), fueron utilizados para la medición de todos estos defectos. Estos valores fueron reportados primeramente por la magnitud del defecto y luego fue cuantificada la cantidad de piezas en relación a la cantidad de piezas totales. En lo referente a la magnitud de los defectos luego del secado, se catalogaron en disminuyó, aumentó o se mantuvo en relación a los valores que presentaban las tablas antes del secado. En el grado de severidad de las torceduras (alabeo, acanalado, encorvadura y arqueadura) se siguió la norma oficial chilena, el cual determina los valores límites de calidad para las diferentes torceduras de la

madera y dichos valores están detallados en el cuadro 3 de Pérez, *et al* (2007). Una vez cuantificado las torceduras en relación a las categorías de valores, se procedió a establecer un índice de calidad para cada defecto (Ecuación 3), propuesto en la Norma Chilena Nch993EO72 (mencionado por Pérez *et al*, 2007). En el caso de la rajaduras y reventaduras se procedió a seguir la norma de clasificación Softwood Lumber Standard: Voluntary Product Standard PS 20-05 (NIST, 2005) que clasifica estos dos defectos de secado en 3 categorías de acuerdo a la longitud de estos.

$$\text{Índice de calidad} = Na * 0 + Nb * 0,5 + Nc * 2 + Nd * 2,5M. \quad [3]$$

Dónde: I=Índice de calidad, Na=número de piezas sin defectos, Nb= número de piezas con defecto leve, Nc= número de piezas con defecto moderado, Nd= número de piezas con defecto severo y M=número de piezas totales.

4.10. Medición del color

El color fue medido en cada una de las 216 tablas utilizando un espectrofotómetro marca MiniScan XE Plus de HunterLab. El mismo fue calibrado antes de cada uso. Se usó el sistema cromatológico estandarizado CIEL*a*b* para medir el espectro de reflexión. El rango de esta medida fue de 400 a 700 nm, con una apertura en el punto de medición de 11 mm. Para la observación de la reflexión fue incluido el componente especular (SCI mode), en un ángulo de 10° la cual es lo normal de la superficie del espécimen (D65/10); un campo de visión de 2° (Observador estándar, CIE 1931) y un estándar de iluminación D65 (correspondiente a luz del día en 6500 K). El color fue medido en la tabla antes y después del proceso de secado. Se garantizó que la medición fuese en el mismo punto para evitar errores de medición.

4.11. Análisis estadísticos

Primeramente se realizó un análisis descriptivo (media, desviación estándar, coeficiente de variación, valores máximos y mínimos) de todas las variables de respuesta. Así mismo se analizó que dichas variables cumplieran con las suposiciones de distribución normal, homogeneidad de la variancia y la no presencia de datos extremos. Para ello fue utilizado el procedimiento UNIVARIATE procedure del programa estadístico SAS 8.1 para Windows (SAS Institute Inc., Cary, N.C.).

Para analizar el efectos de las diferentes variables sobre el CHi, CHF y los parámetros de color fue realizado primeramente un análisis de correlación para los efectos no controlados o factores cuantitativos y en el segundo análisis fueron considerados aquellos factores no controlados (o cuantitativos) donde las variables de respuestas fueron corregidas por aquellos factores no controlados (tipo de secado, altura de la troza, patrón de corte y clima de crecimiento) que fueron estadísticamente significantes en el análisis de correlación. Para ello fue establecido un análisis de covarianza (ANCOVA). En el análisis de correlación del CHi y los parámetros de color antes del secado (variables de respuesta) fueron considerados la distancia de la médula, el porcentaje de madera de duramen, el porcentaje de madera radial y tangencial, el peso específico básico y las contracciones (variables independientes). Para la variables de respuesta luego del secado (CHF, defectos de secado y parámetros de color) nuevamente se correlacionaron con las variables de respuestas mencionadas anteriormente, solo que se agregó el CHi, el coeficiente de difusión radial y tangencial. Las diferencias estadísticas entre las medias fueron llevadas a cabo por LSMEANS de las medias ajustadas por los análisis de regresión de la parte de ANCOVA.

Para analizar los defectos de secado fue solamente considerado el índice de calidad (Ecuación 3) y fue evaluado por la influencia de altura de la troza, patrón de corte y clima donde crece el árbol en madera antes de secado, pero en el caso de madera luego del secado a estos 3 factores se agregó el tipo de secado aplicado. Dicha influencia fue evaluada por un análisis de varianza con el índice de calidad como variable independiente y los anteriores factores como variables independientes del modelo.

La evaluación de las bolsas de humedad fue analizada desde dos puntos de vista: primeramente se evaluó la presencia o no de la bolsa de humedad en la madera seca por medio de una regresión logística, esto porque la variable de respuesta es binaria, sí o no. Esta regresión fue analizada utilizando la regresión logística multinomial derivada del modelo general probabilístico. El modelo establecido es denotando en la ecuación 3:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \beta_3 * X_3 + \beta_4 * X_4 + \beta_5 * X_5 + \beta_6 * X_6 + e_{ijk} \quad [4]$$

Dónde: β_1 = efecto del clima, β_2 : efecto de la altura, β_3 : efecto del tipo de secado y β_4 : efecto del tipo de corte, todas ellas como variables categóricas y β_5 distancia de la tabla respecto a la médula y β_6 porcentaje de madera radial en la tabla., ambas como variables continuas.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. Contenido de humedad inicial (CHi)

El promedio del CHi fue de 127%, con una variación entre 58 y 186%. Esta variación es mayor que la reportada por Moya *et al* (2011a), los cuales encontraron una variación de 110 a 150% para árboles de 9 años en Costa Rica. En Malasia, Hon (1984) reporta rangos de 88 a 140% y Yamamoto *et al* (2003) reporta valores de 120 a 160%. Así mismo en otras especies cuyo peso específico es similar al de *A. mangium* (0,45), se reportan también altos CHi y alta variabilidad. Por ejemplo *Gmelina arborea* (0,40) presenta un CHi promedio de 170% con una variación de 144 a 184%, en tanto *Cupressus lusitanica* (0,49) presenta un CHi de 92% con valores que varían de 74 a 112% (Moya *et al*, 2011a).

El análisis de correlación mostró que el CHi presenta una correlación negativamente significativa con el peso específico, pero la distancia relativa de la médula, el porcentaje de duramen en la tabla y el porcentaje de madera de corte radial no afectaron estadísticamente el CHi (Cuadro 3). El peso específico, relacionado con la pared celular y la cantidad de espacios libres en la madera, determina la cantidad de agua en las cavidades de las células, de modo que un alto peso específico produce un menor almacenaje de agua en las cavidades celulares, y por ende un menor contenido de humedad (Simpson, 1999). Dicha relación, explicaría la correlación negativa entre el peso específico y el CHi en la madera de *A. mangium* (0,45).

En especies de plantaciones de los climas tropicales de América Central se ha señalado que el CHi está relacionado estadísticamente con la distancia de la médula (Muñoz y Moya, 2008; Ofori y Brentuo, 2005), no obstante en la madera de *A. mangium* no se presentó esta relación. Este comportamiento por lo general se produce cuando los elementos celulares relacionados al almacenamiento de agua, como los lúmenes de la fibra o los vasos en especies latifoliadas, presentan poca variación en la dirección médula-corteza (Moya *et al*, 2011b). Ogata *et al* (2002) menciona que *A. mangium* se caracteriza por presentar poca variación de las dimensiones de las fibras con la distancia relativa a la médula, de modo que no se presenta relación entre el CHi y la distancia relativa.

El duramen por lo general presenta un CHI mayor del que se presenta en la albura (Skkar, 1972), no obstante en el presente estudio se encontró que el porcentaje de duramen no fue significativo en la variación del CHI. Este resultado puede ser explicado por el hecho de que los árboles de *A. mangium* se caracterizan por desarrollar rápidamente y en alta proporción madera de duramen (Moya y Muñoz, 2010). En las trozas utilizadas en el presente estudio se encontró un promedio de duramen de 88%, y un espesor de albura es 2,75 cm (12% del área de la troza). A pesar de que las trozas presentaban albura, por el tipo de patrón de aserrío aplicado, del cual se obtienen tablas a lo ancho de la troza y luego se desorillan sus lados (Figura 1), la mayoría de las tablas perdieron gran parte de este tipo de madera, por lo que se obtuvieron tablas con un alto porcentaje de duramen. Este proceso de aserrío y las características propias de la especie, tienen la ventaja de que gran parte de las tablas se producen de solo duramen, por lo que se minimizan las diferencias del CHI por el porcentaje de madera de duramen o albura.

Así mismo el análisis de covarianza mostró que este CHI se vio afectado significativamente por el clima, la altura (parte del árbol donde se extrajo la tabla), la interacción entre el clima y altura, y entre el clima y el patrón de corte (Cuadro 4). Estos resultados indican que: el CHI promedio para la madera proveniente de los árboles del clima tropical muy húmedo (139%) fue mayor en comparación con la madera del clima tropical húmedo (118%).

Durante la formación de la madera, las células, son afectadas por muchos factores, tales como el sitio, las condiciones ecológicas, el manejo y la genética de la especie (Zobel y Van Buijtenen, 1989). Por lo que es de esperar que las características anatómicas relacionadas con el almacenamiento de agua se vean modificadas. Por ejemplo la madera de *Vochysia guatemalensis* también creciendo en Costa Rica (Moya *et al*, 2011b) mostró que el CHI varía según el clima donde crece el árbol, de modo que este mismo comportamiento podría explicar la variación del CHI entre climas para *A. mangium*.

Se encontró que en las tablas provenientes de la base del árbol (altura A de este estudio) el CHI (131,1%) es más alto en comparación con las tablas de la troza de 2,5 m a 5,0 m de altura, o troza B (122,2%). No obstante debido a que la interacción entre clima-altura fue estadísticamente significativa, el comportamiento del CHI en las dos altura estudiadas es

diferente en cada una de las zonas (Figura 2a). En la zona muy húmeda no existe diferencia significativa entre las dos alturas estudiadas, mientras que para la zona húmeda las tablas provenientes de la altura A o basales presentan un CHI significativamente mayor (127%) que las tablas de la zona alta o B (107%). Otro aspecto importante de destacar es que el CHI de las tablas de la altura A no presenta diferencias entre los dos tipos de clima. La madera de *A. mangium* presenta una variación del CHI con respecto a la altura, con CHI que varían de 88 a 140% en la zona basal y que luego disminuyen de 52 a 95% cerca de la primera rama (Hon, 1984; Moya y Muñoz, 2010). La variación en altura de las propiedades de los árboles es común y es producto de diferentes requerimientos de agua en los procesos fisiológicos que se producen en las diferentes alturas del tronco (Zobel y Van Buijtenen, 1989). Este comportamiento fue encontrado únicamente en las tablas de la zona húmeda. Los árboles de las dos regiones tienen condiciones de altura y diámetro muy diferentes (Cuadro 1), por lo que dichos factores u otros no considerados en este estudio pueden estar alterando el comportamiento de la madera de la zona muy húmeda.

La relación del CHI entre clima y patrón de corte es mostrada en las figuras 2c y 2d. Las tablas provenientes de los árboles de la zona muy húmeda presentan CHI mayores en comparación con los de la zona húmeda. Al analizar los diferentes patrones de corte con el tipo de clima se tiene que en la zona muy húmeda solo existieron diferencias significativas entre las tablas con corte 1 (tangencial) y corte 3 (oblicuo) (Figura 2c). Sin embargo, para la zona húmeda no existieron diferencias significativas entre los patrones de corte (Figura 2d).

5.2. Contenido de humedad final (CHf)

El programa de secado de baja humedad tuvo una duración de 330 horas, mientras que para el secado de alta humedad el tiempo de secado fue de 349 horas. En ambos programas de secado se presentó un CHf promedio de 19% con una variación de 9 a 52%, lo cual demuestra que con los programas de secado utilizados la madera de *A. mangium* produce poca uniformidad en el CHf. Altos CH luego del secado han sido señalados por Moya *et al* (2011a) para la especie, con valores de CHf promedio de 17% en madera proveniente de plantaciones de 9 años. La variación del CHf ha sido sujeto de estudio en muchas especies,

por ejemplo, para *G. arborea* fue reportada una variabilidad entre 10 y 36% (Moya y Muñoz, 2008), en tanto para *V. guatemalensis* se presentan valores entre 10 y 24% con un promedio de 12% (Moya *et al*, 2011b). En ambos casos CHF más bajos que el presentado para *A. mangium*.

La variación del CHF de la madera está presente en todo proceso de secado, no obstante esta debe ser minimizada para mejorar la estabilidad de la madera y la calidad del producto final. Esta falta de uniformidad en el CHF puede tener un impacto significativo en el procesamiento secundario de la madera y en el desempeño final del producto (Gu *et al*, 2004). Se considera un secado satisfactorio, cuando el promedio de CHF presenta una variación de $\pm 1\%$ (Simpson, 1999). De este modo se confirma que *A. mangium* es una especie con dificultades para lograr un CHF satisfactorio. Otras especies tropicales como *G. arborea*, *V. guatemalensis* y *C. odorata* concuerdan con los resultados obtenidos para *A. mangium*, donde el CHF es afectado por el CHI, el peso específico, la distancia de la médula y la presencia de cortes radiales en la tabla (Muñoz y Moya, 2008; Moya *et al*, 2011b; Ofori y Brentuo, 2005).

El análisis de correlación de los efectos aleatorios mostró que el CHF presentó una correlación positiva significativa con CHI, el porcentaje de madera radial presente en las tablas y con el porcentaje de bolsas de humedad (porcentaje de área de la bolsa de humedad), en tanto que el peso específico y la distancia relativa de la médula fueron negativamente correlacionados (Cuadro 3). Las relaciones con el primer grupo de factores tienden a producir un mayor CHF del que fue establecido en el programa de secado, mientras que en el segundo grupo ocurre el efecto contrario, tiende a obtenerse madera de menor CHF que el programado en el secado.

La madera de *A. mangium* es característica por poseer altos CHI, “madera húmeda” y de alta variación (Yamamoto *et al*, 2003). Estos aspectos provocan un proceso de secado más extenso e irregular y dan origen a CHF por encima del contenido de humedad programado, usualmente superiores al 19% (Ward, 1986). Dichos comportamientos se reflejaron en el alto valor y variabilidad del CHF en la madera seca de *A. mangium*. Así mismo, el porcentaje de madera con cortes radiales tiende a incrementar el CHF de la madera seca,

ello porque el flujo del agua a través de las fibras es mucho más lento en este corte (Sattar *et al*, 1991). El efecto en el CHF de las bolsas de humedad se detalla ampliamente en el apartado de bolsas de humedad más adelante. El incremento del peso específico disminuye el CHF. Dicho comportamiento puede ser explicado por el hecho de que un alto peso específico reduce la cantidad de espacios libres, de modo que se obtiene una menor humedad, lo que favorece el proceso de secado. La distancia relativa a la médula presenta una correlación negativa con el CHF, es decir, que las tablas cercanas a la médula presentan CHF altos en relación a las otras partes de la sección radial de la troza. En este sentido es importante hacer notar que el CHI es uniforme en sentido radial, pero al finalizar el proceso de secado se produce una variación en la velocidad de secado de cada una de las piezas en diferentes partes de la distancia de la médula, lo cual produce una variación en el CHF de la madera. Estos cambios en la velocidad de secado pueden ser debidos a una variación en la anatomía de la madera, a flujos de agua irregulares, entre otros aspectos que no fueron considerados en el presente estudio (Simpson, 1991)

El análisis de covarianza mostró que el CHF es afectado significativamente por la altura de la troza dentro del árbol, el tipo de secado y la interacción de ambas variables (Cuadro 4). El CHF fue estadísticamente más alto en las tablas sometidas al secado de baja humedad que en las tablas del secado de alta humedad (Figura 2b). Al analizar la variación en las dos alturas evaluadas, se tiene que el secado de baja humedad no presentó diferencias entre las alturas, contrario el secado de alta humedad, que sí presentó diferencias en las alturas (Figura 2b). Al igual que como sucedió con el CHI, la diferencia en este valor por la altura puede ser explicado por los diferentes procesos fisiológicos que se producen en las diferentes alturas del tronco de los árboles (Zobel y Van Buijtenen, 1989).

Cuadro 3. Coeficientes de correlación y significancia de las variables continuas evaluadas en el contenido de humedad, el color y en el porcentaje de contracción en la madera de *A. mangium*.

Factor	CHi	CHf	L* antes	a* antes	b* antes	L* después	a* después	b* después	ΔE*	% Contracción por ancho	% Contracción por espesor
CHi	NC	0,226*	-0,197	-0,419**	-0,221*	0,141	-0,392**	0,019	0,213	NC	NC
CHf	NC	NC	0,082	0,017	-0,067	0,013	-0,145	0,203	0,041	-0,270**	-0,040
% Duramen	0,05	0,203	-0,035	0,049	0,004	-0,058	-0,002	0,021	-0,004	0,060	-0,010
% Madera radial	0,019	0,423**	0,183	0,055	0,229*	0,05	-0,087	0,059	-0,145	-0,160*	0,050
Peso específico	-0,583**	-0,222*	0,062	0,106	0,104	-0,142	0,329**	-0,063	-0,192	0,100	-0,240**
Distancia relativa	-0,139	-0,274*	-0,221*	-0,068	-0,18	-0,224	0,159	0,026	0,201	0,230**	-0,160*
% de Bolsa de humedad	NC	0,427**	0,069	0,082	0,133	0,220*	0,101	0,063	-0,128	NC	NC
Coef. Difusión Radial	NC	0,255*	NC	NC	NC	0,013	-0,213	-0,06	-0,054	-0,010	0,270**
Coef. Difusión Tangencial	NC	0,187	NC	NC	NC	0,034	-0,179	-0,084	0,024	0,010	0,180*
% Contracción Tangencial	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	0,020	0,250**
% Contracción Radial	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	-0,130	-0,040

Nota: NC = no considerado en el modelo, CHi = contenido de humedad inicial, CHf = contenido de humedad final, ΔE = cambio de color, * estadísticamente significativo a $\alpha=0.05$, ** estadísticamente significativo a $\alpha=0.01$.

Cuadro 4. Valores F del análisis de covarianza para el contenido de humedad, el color y el porcentaje de contracción en la madera de *A. mangium* (N=216).

Fuente de variación	Contenido de humedad		Color antes			Color después			Cambio de color	% de Contracción	
	CHi	CHf	L*	a*	b*	L*	a*	b*		Ancho	Espesor
Clima	24,51**	2,99	0,06	6,91**	0,34	0,04	19,39**	8,26**	0,44	12,15**	0,28
Altura	14,57**	5,81*	16,88**	15,38**	4,36*	11,20**	4,74*	11,98**	3,38	4,91	0,68
Patrón de corte	0,69	1,01	2,4	0,98	0,64	2,62	1,53	0,75	2,2	0,31	1,15
Tipo de secado	NC	149,21**	NC	NC	NC	14,52**	0,02	1,33	0,01	1,09	8,32**
Clima*Altura	15,81**	0,09	0,77	0,15	0,57	0,18	1,08	0,54	0,81	3,89	0,30
Categorías Clima *Patrón de corte	2,66*	0,74	0,27	0,5	0,5	1,65	0,36	0,55	1,51	0,52	1,69
Clima *Tipo de secado	NC	0,89	NC	NC	NC	3,22	0,96	0,03	4,60*	1,32	0,80
Altura*Patrón de corte	0,83	0,51	2,67*	1,86	2,19	1,54	0,91	2,23	1,03	1,81	0,41
Altura*Tipo de secado	NC	14,08**	NC	NC	NC	3,04	1,62	0,47	0,61	0,64	0,46
Patrón de corte*	NC	1,82	NC	NC	NC	1,88	0,15	0,85	0,85	1,24	1,36
Tipo de secado	NC	1,82	NC	NC	NC	1,88	0,15	0,85	0,85	1,24	1,36
Peso específico	24,64**	0,5	NC	NC	NC	NC	0,09	NC	NC	NC	0,02
Distancia relativa	NC	2,55	0,88	NC	NC	NC	NC	NC	NC	6,51*	0,88
% Madera radial	NC	1,56	NC	NC	0,96	NC	NC	NC	NC	0,02	NC
CHi	NC	0,3	NC	0,16	NC	NC	0,04	NC	NC	NC	NC
CHf	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	3,85	NC
% de Bolsas de Humedad	NC	59,76**	NC	NC	NC	1,39	NC	NC	NC	NC	NC
% Contracción Tangencial	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
Coef. Difusión Tangencial	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	18,64**
Coef. Difusión Radial	NC	0,04	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	2,40

Nota: NC = no considerado en el modelo, CHi = contenido de humedad inicial, CHf = contenido de humedad final, ΔE = cambio de color, * estadísticamente significativo a α=0.05, ** estadísticamente significativo a α=0.01.

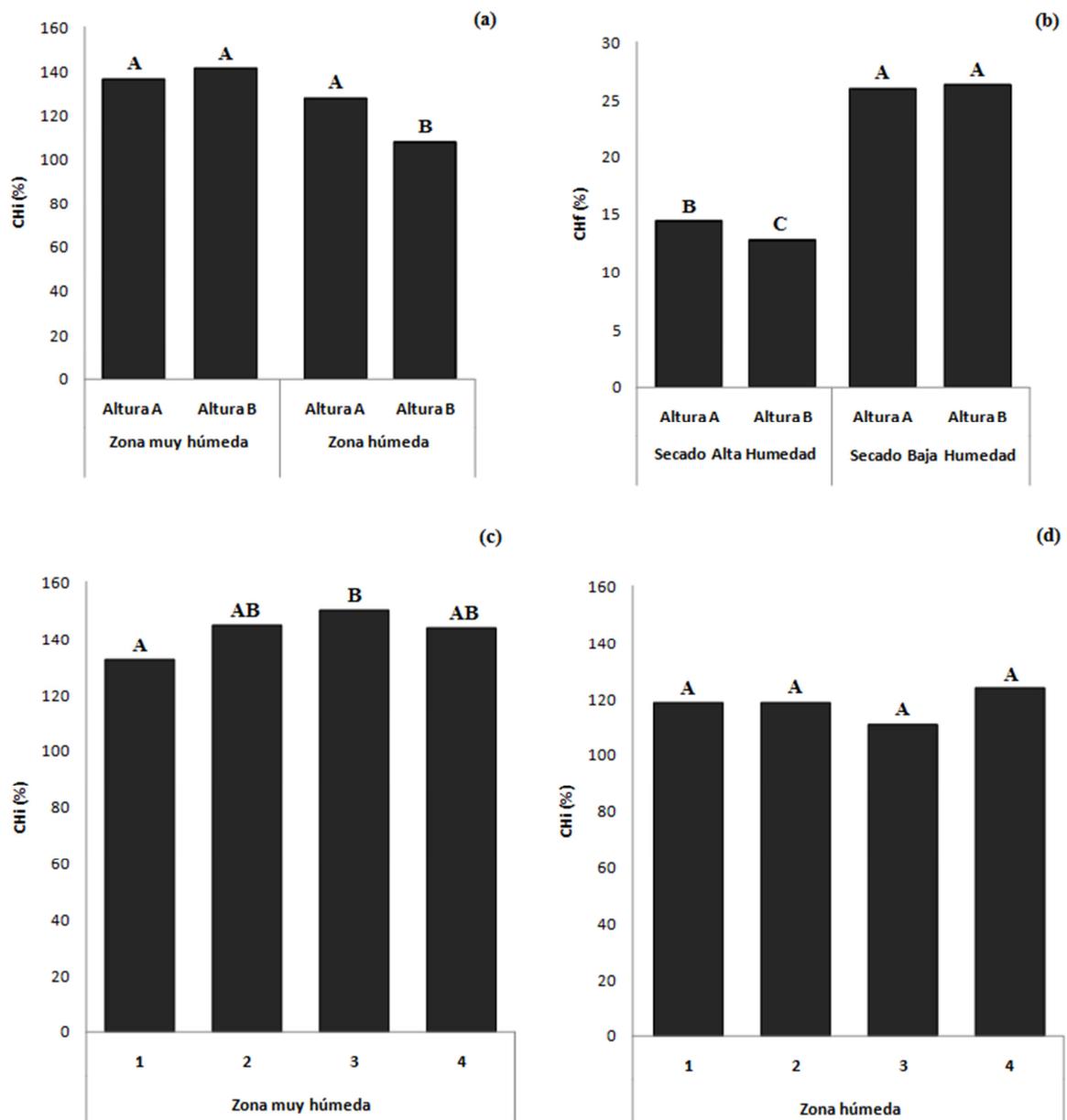


Figura 2. Factores que afectan el contenido de humedad inicial y final en la madera de *A. mangium*.

Nota: las letras encima de las barras indican que los valores son estadísticamente diferentes a un nivel de confianza de 95%. (c y d) 1 = patrón de corte tangencial, 2 = patrón de corte radial, 3 = patrón de corte oblicuo y 4 = patrón de corte combinado.

5.3. Bolsas de humedad

Unos de los factores de importante influencia en el CHF fue el desarrollo de bolsas de humedad en la madera seca, lo cual indica que la especie es propensa a la producción de éstas durante el proceso de secado. En la madera seca de *A. mangium* se encontró que un 64% del total de las tablas evaluadas en los dos programas de secado (216) presentaban bolsas de humedad.

Las bolsas de humedad son conocidas también como bolsas de agua, en donde se presentan contenidos de humedad superiores al deseado (Simpson, 1991). Las bolsas de humedad en la madera seca de *A. mangium* se pueden observar transversalmente y en todo lo largo de la tabla y se caracterizan por poseer un color más oscuro donde se concentra la humedad en comparación con la región de la tabla que se encuentra seca (Figura 3). Al evaluar el contenido de humedad en la región dentro y alrededor de la bolsa de humedad se encontró que dentro de la bolsa de humedad el CH promedio fue de 25% (12 a 76%), mientras que en la parte externa o alrededor el promedio fue de 16% (12 a 22%). Así mismo se encontró que el área promedio en la sección transversal que ocupan las bolsas de humedad fue de 23%. Las bolsas de humedad han sido reportadas en madera seca de otras especies de plantación en Costa Rica tales como *G. arborea* y *V. guatemalensis* (Moya y Muñoz, 2008; Moya *et al*, 2011b) y la variación del contenido de humedad en la bolsa también es alta, como ocurre en *A. mangium*. *G. arborea* reporta una variación de 40 a 100% (Moya y Muñoz, 2008) y *V. guatemalensis* de 15 a 35% (Moya *et al*, 2011b).



Figura 3. Bolsas de humedad presentes en la madera seca de *A. mangium*.

Al evaluar los factores que afectan el desarrollo de estas bolsas de humedad, por medio de regresión logística, se encontró que los árboles del clima 1 (zona muy húmeda), con secado de baja humedad, y en tablas con tipo de corte combinado o tipo 4 presentan altas probabilidades (Valor $P < 0,05$) de desarrollar bolsas de humedad (Cuadro 5).

Cuadro 5. Regresión logística y estimadores sobre la probabilidad de la presencia de bolsas de humedad en la madera de *A. mangium*.

Variable	Nivel de efecto	Grados de libertad	Estimado	Error estándar	Estadístico Wald	Valor p
Intercepto		1	-0,02	1,01	0,00	0,98
Clima	Zona muy húmeda	1	0,29	0,11	6,81**	0,01
Altura	A	1	-0,16	0,11	2,13	0,14
Tipo de secado	Baja humedad	1	0,34	0,11	9,26**	0,00
Tipo de corte	Tangencial	3	0,83	1,00	0,70	0,40
	Oblicuo		0,54	0,33	2,70	0,10
	Combinado		0,83	0,28	9,12**	0,00
Distancia relativa		1	-0,02	0,01	10,45**	0,00
% Madera radial		1	0,04	0,02	3,17	0,08
Escala			1,00	0,00	0,00	0,98

Nota: * estadísticamente significativo a $\alpha=0.05$, ** estadísticamente significativo a $\alpha=0.01$.

La distribución del contenido de humedad dentro o fuera de las bolsas de humedad, se muestra en la figura 4, donde se presenta el efecto del clima y tipo de corte sobre el desarrollo de bolsas de humedad. En esta figura es posible observar que: (i) las bolsas se concentraban principalmente en las tablas de corte radial (70% del total de las tablas), (ii) las tablas provenientes de las zonas muy húmedas presentaban los contenidos de humedad más altos; mientras que las tablas de las zonas húmedas, además de presentar contenidos de humedad más bajos dentro de las bolsas presentaban una mayor cantidad de tablas, 61 de 97 tablas radiales, (iii) el patrón de corte 4 (combinado) se presenta el mayor número de bolsas de humedad, (iv) de las tablas tangenciales, las tablas provenientes de la zona muy

húmeda fueron las que presentaron contenidos de humedad más altos dentro de las bolsas (24%).

Estudios realizados en *G. arborea* y *V. guatemalensis* de plantaciones de rápido crecimiento (Moya y Muñoz, 2008; Moya *et al*, 2011b), al igual que *A. mangium*, concuerdan que la madera con cortes radiales (combinados, radiales o centrales), es más propensa a desarrollar bolsas de humedad. No obstante, el desarrollo de las bolsas de humedad en madera seca es aún poco conocido. Por ejemplo, Moya y Muñoz (2008) señalan dos posibles explicaciones para la formación de bolsas de humedad en la madera seca: (1) al inicio del proceso de secado las punteaduras tienden a producir fuerzas capilares de alta magnitud provocando la aspiración del margo en las secciones radiales, sin permitir el flujo normal del agua, y (2) el movimiento del agua en la sección radial de las tablas se produce principalmente por la punteaduras de las fibras las cuales son escasas y diminutas, lo cual tiende a producir un ritmo de difusión más lento. Así mismo, otros estudios señalan que la formación de bolsas de humedad está relacionado a la “madera húmeda” (Ward, 1986; Simpson, 1991), la cual es originada por la invasión de una bacteria anaeróbica en el duramen de árboles vivos (Ward, 1984). Este tipo de madera provoca lentas velocidades de secado y baja permeabilidad producto de las aspiraciones del margo en las puntuaciones de las fibras (Ward, 1986; Jeremic *et al*, 2004). Yamamoto *et al* (1997, 2003) reportan este tipo de “madera húmeda” en el duramen de *A. mangium*. Además en otras investigaciones se ha mostrado que en esta especie se presenta un tipo de pudrición del duramen en el árbol que entre de otras cosas afecta su estructura anatómica así como otros componentes en la madera (Barry *et al*, 2004; Barry *et al*, 2006; Lee *et al*, 1997) y que junto con la presencia de madera húmeda pueden estar ayudando a la formación de bolsas de humedad.

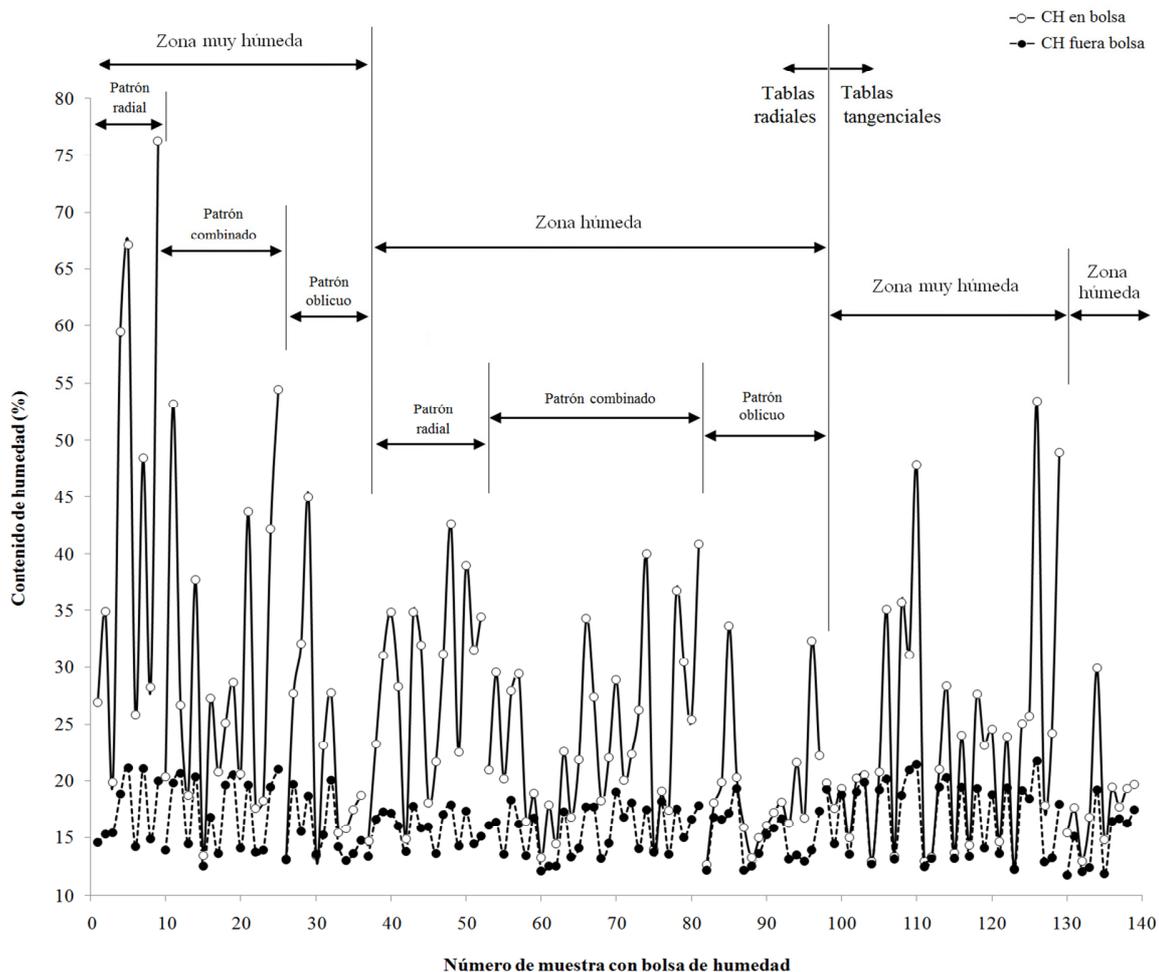


Figura 4. Contenido de humedad de las piezas que presentaron bolsas de humedad por clima y por la ubicación de la bolsa por tipo de corte radial y tangencial en la madera de *A. mangium*.

5.4. Color

Los tres parámetros de color del duramen aumentaron significativamente luego del secado en relación a los valores que presentaban antes del secado (Figura 5a). El parámetro L^* aumentó de 37,39 (21,18–61,53) a 46,10 (31,58–69,37), a^* de 6,86 (1,07–13,50) a 8,98 (4,09–15,04) y finalmente b^* de 16,21 (5,93–29,64) a 24,67 (17,36–46,17). Estos valores indican que el color del duramen de *A. mangium* es una combinación de tonos blancos, rojos y amarillos. Visualmente este tipo de madera es catalogada por algunos

investigadores como de color marrón amarillento a marrón dorado en condición verde, y marrón mate en madera seca (Sahri *et al*, 1993).

El cambio de color que sufre la madera luego del secado puede ser cuantificado, por medio del ΔE^* y acorde a sus valores puede ser catalogado en 5 diferentes niveles de percepción al ojo humano (Cui *et al*, 2004): (i) cuando ΔE^* varía de 0 a 1,5, el cambio de color no es catalogado como apreciable, (ii) cuando ΔE^* se encuentra entre 1,5 a 3,0, es apenas apreciable en la superficie, (iii) cuando el rango varía de 3,0 a 6,0, el cambio es apreciable, (iv) cuando ΔE^* varía de 6,0 a 12,0, el cambio de color es muy notable y (v) finalmente, cuando ΔE^* es superior a 12 se cataloga como un cambio de color total. Para este estudio, considerando estos niveles de cambio de color se tiene que durante el secado de la madera *A. mangium* el 1% de la totalidad de tablas secadas sufrieron un cambio de color apenas apreciable, el 9% con un cambio apreciable, el 31% con un cambio notable y finalmente el 59% el cambio de color fue completo (Figura 5b).

Keey (2005) menciona que los cambios en el color de la madera por el secado ocurren por la evaporización del agua en la superficie de la tabla, la cual contiene extractivos disueltos con azúcares de bajo peso molecular y compuestos nitrogenados como las proteínas, produciendo un cambio en la composición química de la superficie, generando melaninos, y evidenciando un color más marrón en la mayoría de los casos. Estudios realizados en otras especies han mostrado cambios en la coloración de la madera por el secado.

El análisis de correlación de las variables aleatorias mostró que antes del secado L^* tiene una correlación negativa significativa con la distancia de la médula, a^* también presentaba una correlación negativa con el CHI y el parámetro b^* negativa con el CHI y positiva con el porcentaje de madera radial en la tabla (Cuadro 3). En tanto que después del secado L^* fue afectado positivamente por el porcentaje de bolsas de humedad, a^* positivamente afectado por el peso específico básico y negativamente con el CHI (Cuadro 3) y finalmente b^* no fue afectado significativamente por ningún factor. No obstante, estos efectos aleatorios desaparecen (son estadísticamente no significantes) cuando se presentan los efectos controlados establecidos en este estudio (Cuadro 4).

El análisis de covarianza mostró que el parámetro L^* antes del secado fue afectado significativamente por la altura de donde se extrajo la troza en el árbol y por la interacción entre la altura y el patrón de corte, a^* por el clima y por la altura, y b^* por la altura. Después del secado se encontró que L^* fue afectado por la altura y el tipo de secado, a^* continuo siendo afectado por las mismas variables que lo afectaron antes del secado, y el parámetro b^* mantiene el efecto significativo de la altura junto con el clima (Cuadro 4). De los anteriores resultados se deduce que el factor que tiene más influencia los parámetros de color antes y después del secado es la altura a la que se obtienen las tablas en el árbol. El grado de cambio de color medido por ΔE^* no presentó relación estadísticamente significativa con alguna variable aleatoria (Cuadro 3) y de las variables controladas, el ANCOVA mostró que el cambio de color fue solamente afectado significativamente por la interacción entre el clima y el tipo de secado (Cuadro 4). Esta interacción da como resultado que en el secado de baja humedad el cambio de color en la madera fue de la misma magnitud en los dos tipos de clima, pero en el secado de alta humedad, la madera proveniente de la zona muy húmeda presenta una magnitud de cambio de color (ΔE^*) estadísticamente mayor que la madera de la zona húmeda (Figura 5c).

El cambio de color de la madera es influenciado por diversos factores, unos relacionados a factores propios del árbol, como al sitio de donde proviene la madera, el manejo, la genética y la edad del árbol (Phelps *et al*, 1983), y otros relacionados al proceso de secado de la madera (Mononen *et al*, 2002; Aguilar *et al*, 2009). En el primer grupo de factores el sitio es una de las principales fuentes de variación del color antes y después del secado (Gierlinger *et al*, 2004; Moya y Berrocal, 2010). Los resultados obtenidos en *A. mangium* concuerdan con este comportamiento, ya que el sitio afecto estadísticamente los parámetros de color antes y después de secado (Cuadro 4). Los parámetros de color están relacionados con la presencia de extractivos en la madera (Burtin *et al*, 1998) y específicamente encontró que L^* está relacionado con la cantidad de extractivos en la madera (Gierlinger *et al*, 2004). En *A. mangium* se ha demostrado que la cantidad de extractivos varían con la altura del árbol (Taylor *et al*, 2002), de modo que la variación de los extractivos puede estar influenciando los cambios de color en las dos alturas estudiadas. Así mismo los cambios de color debido al patrón de corte ocurren porque existen diferencias de color entre las

superficies radiales y las tangenciales, lo cual puede atribuirse como una diferencia de apariencia, producto de características anatómicas, tales como la disposición de las células, la existencia de radios anchos y los granos entrecruzados (Nishino *et al*, 1998).

Un aspecto importante de destacar de los anteriores resultados es que los factores que afectan los parámetros individuales del color no poseen influencia en el cambio de color (ΔE^*) de la madera (Cuadro 4). En este sentido se establece que el cambio de color de la superficie de la madera se debe a la eliminación del agua y al movimiento de extractivos de la parte interna a la externa o a la oxidación de estos en la superficie (Keey, 2005), por lo que la variación de los extractivos en altura y las diferentes temperaturas utilizadas en los dos secados produjeron cambios de color en diferentes magnitudes, dando como resultado la interacción entre altura y tipo de secado en ΔE^* .

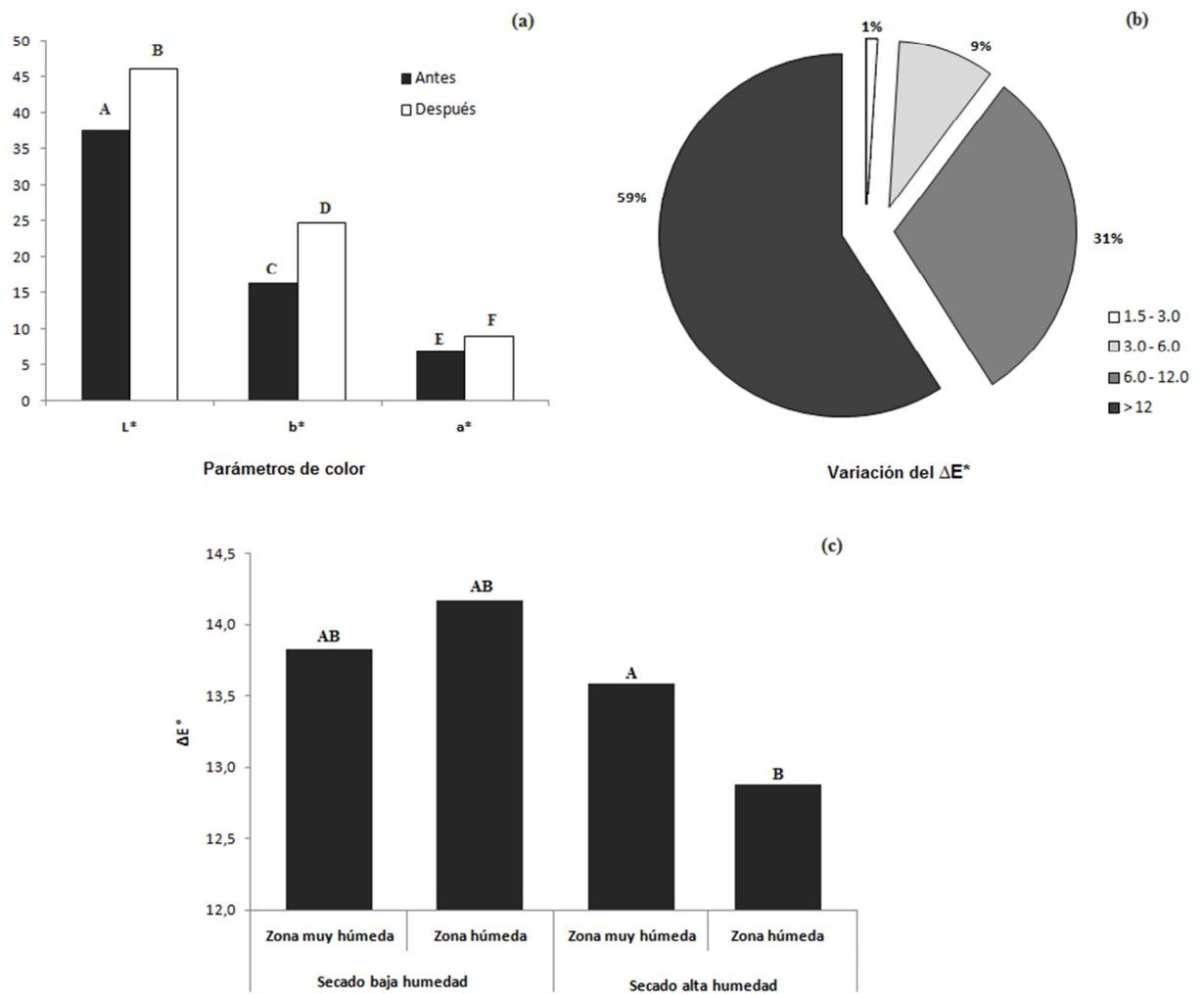


Figura 5. Parámetros de color en la madera de *A. mangium* antes y después del secado (a), niveles de variación del ΔE^* (b) y comportamiento del ΔE^* por tipo de secado y clima.

Nota: las letras encima de las barras indican que los valores son estadísticamente diferentes a un nivel de confianza de 95%.

5.5. Defectos de secado

El alabeo, encorvadura, arqueadura, grietas y rajaduras son los defectos presentes en la madera aserrada de *A. mangium* antes del secado; siendo los de más alta incidencia la encorvadura y el alabeo, con valores superiores a 65% del total de tablas (Figura 6a). La acanaladura no se presentó en las tablas antes del secado (Figura 6a). Luego del proceso de secado se aumentó la incidencia de tablas con alabeo, arqueadura, grietas y rajaduras. Sin embargo, la encorvadura disminuyó, esto posiblemente como consecuencia de que las tensiones del secado se oponen y contrarrestan las tensiones de crecimiento liberadas durante el aserrío de las trozas (Serrano y Cassens, 2001).

A pesar de que en general se observa un aumento en la cantidad de tablas con defectos luego del secado, en el momento de clasificar estos defectos se encontró 3 tipos de magnitudes: (1) aumento del defecto, (2) disminución del defecto y (3) el defecto no aumento o disminuyó en magnitud. La evaluación de las tablas en estas 3 categorías mostró que: las grietas se mantuvieron sin cambios después del secado, el alabeo, la encorvadura y la acanaladura entre el 40-50% de las tablas se mantuvieron sin cambios en los defectos (Figura 6b), sin embargo para la encorvadura y acanaladura en el otro 50% de las tablas ocurrió un aumento de los defectos (Figura 6b). En tanto que la arqueadura y rajaduras disminuyó la cantidad de tablas con este defecto luego del secado (Figura 6b).

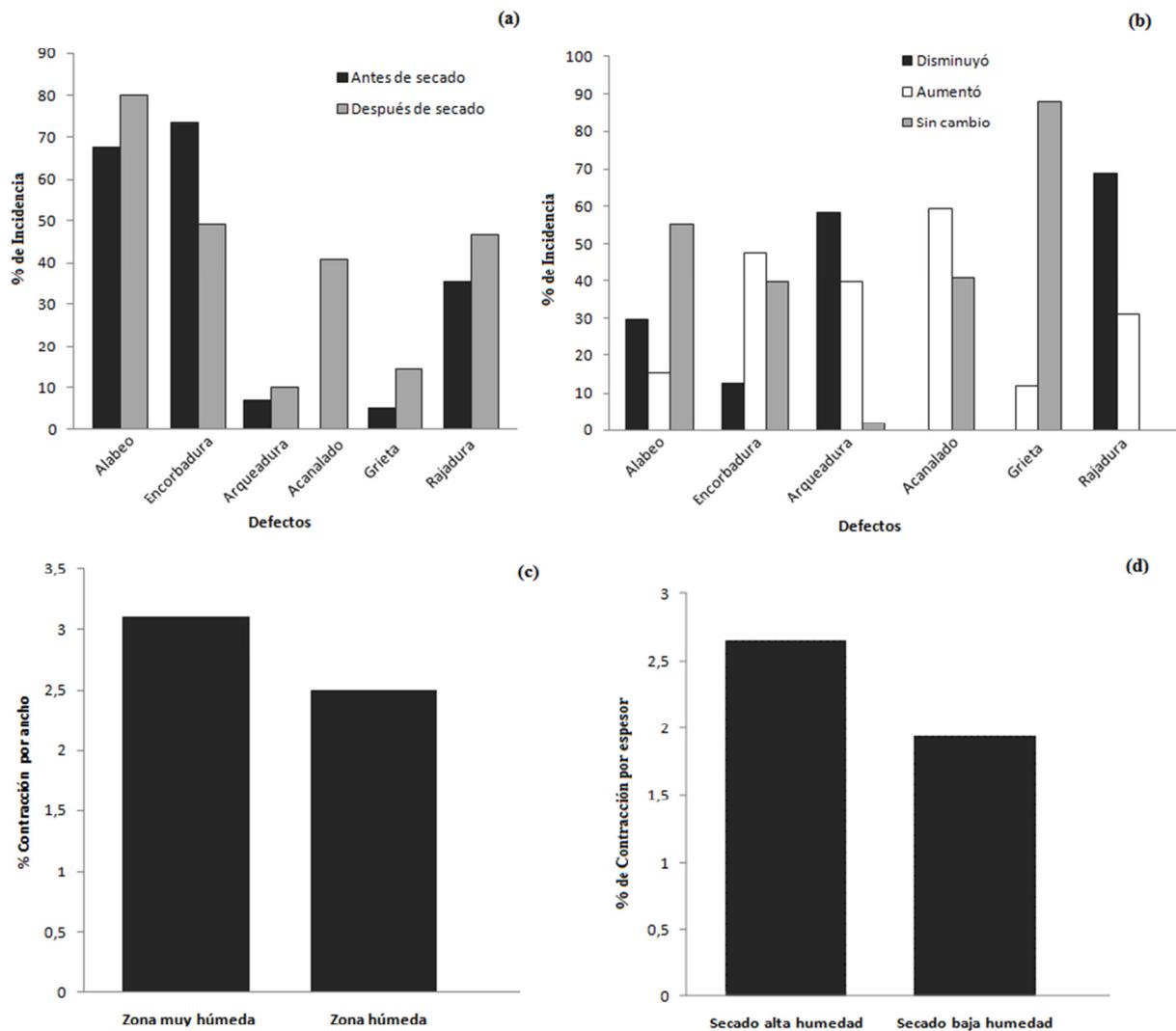


Figura 6. Porcentaje de incidencia de los defectos antes y después del secado (a), magnitud de la incidencia de los defectos (b), contracción en ancho por procedencia (c) y contracción en espesor por tipo de secado (d), en tablas de madera de *A. mangium*.

La clasificación de los defectos en 4 categorías según su magnitud (NIST, 2005) mostró que en el caso del alabeo, grietas y rajaduras antes y después del secado junto con las encorvaduras antes del secado, un alto porcentaje de las tablas se catalogaron sin defectos, y cuando el defecto estaba presente, estos se categorizan como leves, a excepción de la

encorvadura que presenta un alto porcentaje de tablas con defecto severo (Cuadro 6). Entre el 62-70% de las tablas con arqueadura antes y después del secado se clasifican como severas. El 100% de las tablas antes del secado no presentaban acanaladura, pero luego del secado sí se presentó este defecto pero catalogado como leve (Cuadro 6).

Si bien el porcentaje de incidencia de tablas con defectos aumentó después del secado, muchas de las tablas que ya presentaban algún tipo de defecto se mantuvieron sin cambios en las dimensiones de dichos defectos, y muy pocos aumentaron de magnitud. Lo anterior significa que aunque la madera aserrada de *A. mangium* durante el proceso de aserrío produce defectos como alabeo, encorvaduras y rajaduras, estas son de tipo leve o sin defectos, muchos de los cuales al secar la madera aumentan su magnitud pero siguen siendo considerados como defectos leves. Por el contrario, los defectos de encorvadura y arqueadura son de tipo severo después de secado. El acanalado en tablas anchas no se presentan antes del secado, pero al secar la madera este defecto está presente, y es catalogado como defecto leve (Cuadro 6).

Los resultados mostrados anteriormente concuerdan con los encontrados para *A. mangium* por Lim *et al* (2003) el cual señala que la madera de dicha especie posee la tendencia a presentar defectos como colapso, encorvaduras, arqueaduras, nudos y contracciones en sentido radial y tangencial. Así mismo otras especies tropicales (Moya *et al*, 2011b) se caracterizan por la presencia de defectos antes y después del secado, con magnitudes similares a las obtenidas en este estudio para *A. mangium*.

Cuadro 6. Porcentaje de piezas encontradas por categoría de defectos en madera de *A. mangium* antes y después del secado.

Tipo de defecto	Condición	Sd	L	M	S
Alabeo (mm)	Antes	67,59	0	27,31	5,09
	Después	80,09	14,35	4,63	0,93
Encorvadura (mm)	Antes	49,07	3,24	9,72	37,96
	Después	24,07	0,93	4,17	45,83
Arqueadura (mm)	Antes	6,94	4,63	18,52	69,91
	Después	10,19	5,56	22,22	62,04
Acanalado (mm)	Antes	100	0	0	0
	Después	0	92,59	34,72	5,56
Grieta (mm)	Antes	94,91	3,24	0,93	0,00
	Después	85,65	14,35	2,78	1,39
Rajadura (mm)	Antes	64,81	21,76	6,02	7,41
	Después	53,24	31,02	6,02	9,72

Rangos de alabeo: Sd=sin defecto (0 mm), Leve (1-5 mm), Moderado (5-8 mm) y Severo (sobre 8 mm)

Rangos de encorvadura: Sd=sin defecto (0 mm), Leve (1-2 mm), Moderado (2-3 mm) y Severo (sobre 3 mm)

Rangos de arqueadura: Sd=sin defecto (0 mm), Leve (1-3 mm), Moderado (3-6 mm) y Severo (sobre 6 mm)

Rangos de acanalado: Sd=sin defecto (0 mm), Leve (1-3 mm), Moderado (3-5 mm) y Severo (sobre 5 mm)

Rangos de grieta: Sd=sin defecto (0 mm), Leve (1-10 mm), Moderado (10-25 mm) y Severo (sobre 25 mm)

Rangos de rajadura: Sd=sin defecto (0 mm), Leve (1-25 mm), Moderado (25-42 mm) y Severo (sobre 42 mm)

El estudio de los factores controlados que afectan el desarrollo de defectos en las tablas mostró que en la encorvadura y las rajaduras antes y después del secado y el acanalado después del secado, son significativamente afectados por el tipo de clima de donde proviene la madera. Las arqueaduras, grietas y rajaduras después del secado son afectadas significativamente por el tipo de secado. El patrón de corte afecta igualmente al acanalado después del secado y a las rajaduras antes y después del secado (Tabla 7). En conclusión la incidencia de defectos en la madera *A. mangium* se ve afectada por el proceso de secado, el clima y el patrón de corte que presenta la madera.

La industrialización de la madera de árboles de cortas edades, como en este caso de los árboles de *A. mangium*, es propensa a producir alta incidencia de defectos de alabeo, arqueadura y encorvadura, esto debido a que se presenta una alta proporción de madera juvenil, la cual se caracteriza por la presencia de altos niveles de tensiones de crecimiento

(Zobel, 1984; Simpson, 1991; Zobel y Sprague, 1998). Por lo tanto es de esperar que la madera de *A. mangium* presente este tipo de defectos.

El secado de la madera de *A. mangium* como se explicó anteriormente, aumenta la incidencia de algunos defectos; no obstante, estos defectos, a excepción de las rajaduras y las grietas, no son afectados por los dos tipos de programas de secado utilizados. Sin embargo, este resultado debe ser tomado con cautela ya que los dos programas utilizados no poseen diferencias extremas, y el desarrollo de los defectos está muy relacionado con la velocidad de secado que se quiere aplicar a la madera (Simpson, 1991).

Cuadro 7. Valor F del análisis de varianza para los índices de calidad en madera aserrada de *A. mangium* antes y después del secado (N=216).

Fuente de variación	Condición	Tipo de secado	Clima	Altura	Patrón de corte
Alabeo (mm)	Antes	-	0,38 ^{NS}	0,00 ^{NS}	2,10 ^{NS}
	Después	3,06 ^{NS}	0,41 ^{NS}	0,00 ^{NS}	2,26 ^{NS}
Encorvadura (mm)	Antes	-	9,98 ^{**}	1,03 ^{NS}	0,92 ^{NS}
	Después	2,58 ^{NS}	10,59 ^{**}	1,09 ^{NS}	0,97 ^{NS}
Arqueadura (mm)	Antes	-	0,00 ^{NS}	0,02 ^{NS}	1,22 ^{NS}
	Después	11,88 ^{**}	0,00 ^{NS}	0,02 ^{NS}	1,73 ^{NS}
Acanalado (mm)	Antes	-	0,00 ^{NS}	0,00 ^{NS}	0,00 ^{NS}
	Después	3,82 ^{NS}	15,14 ^{**}	0,81 ^{NS}	3,25 [*]
Grietas (mm)	Antes	-	0,34 ^{NS}	0,78 ^{NS}	1,25 ^{NS}
	Después	5,05 ^{**}	0,11 ^{NS}	1,34 ^{NS}	0,88 ^{NS}
Rajaduras (mm)	Antes	-	7,91 ^{**}	0,47 ^{NS}	4,49 [*]
	Después	14,95 ^{**}	11,62 ^{**}	0,97 ^{NS}	10,60 ^{**}

Legenda: **estadísticamente significativa a $\alpha=0.01$, *estadísticamente significativa a $\alpha=0.05$ y NS=no significativa.

Nota: Las interacciones de las variables fueron eliminadas ya que en ningún caso fueron estadísticamente significantes.

5.6. Contracciones de la madera

Las contracciones de la madera fueron en promedio de 2,30% (0–9,58%) para el espesor y de 2,77% (0–21,54%) para el ancho. El análisis de correlación de las variables no controladas mostró que la contracción en ancho se encuentra relacionada negativamente con el CHF y el porcentaje de madera radial, en tanto que la distancia relativa de la médula tiene un efecto positivo en la contracción del ancho de la tabla (Cuadro 3). Al realizar el ANCOVA se mostró que la distancia relativa mantiene el mismo efecto significativo, solo que también es afectado por el clima (Cuadro 4). Las tablas provenientes de los árboles que crecen en zonas muy húmedas presentan una contracción en ancho mayor (3%) a las tablas de árboles creciendo en zonas húmedas (2,5%) (Figura 6c).

La contracción en espesor de las tablas es relacionada negativamente ($\alpha < 0,05$) con el peso específico y la distancia relativa, en tanto que coeficientes de difusión radial y tangencial del agua y el porcentaje de contracción tangencial se relacionaron positivamente ($\alpha < 0,05$) (Cuadro 3). Al considerar estos factores aleatorios y controlados en el ANCOVA se determinó que el coeficiente de difusión tangencial (variable aleatoria) junto con el tipo de secado (variable controlada) afectan significativamente la contracción en espesor (Cuadro 4). La contracción en espesor de las tablas secadas bajo el sistema de alta humedad presentan contracciones más altas (2,63%) en comparación con las tablas sometidas al secado de baja humedad (1,96%) (Figura 6d). Esta diferencia producida por los dos tipos de secado puede ser explicada por el hecho de que en el secado de alta humedad se presentó un CHF más bajo y una menor incidencia de tablas con bolsas de humedad que el secado de baja humedad, esto porque la contracción está relacionada directamente con el CH a que se seque la madera (Simpson, 1991).

Las contracciones de la madera están relacionadas con la cantidad de pared celular presente en la madera (Zobel y Van Buijtenen, 1989), y el peso específico es un parámetro indirecto para medir esta cantidad de material, que a su vez se encuentra relacionado con la distancia de la médula en el caso de *A. mangium* (Kim *et al*, 2008), por tanto es de esperar la relación entre contracciones con el peso específico y la distancia de médula (Cuadro 4).

Las contracciones de las tablas aserradas, usualmente compuestas de madera radial y tangencial, están influenciadas por las contracciones individuales de los valores de contracción en sentido radial y sentido tangencial y cada una por si sola presenta valores diferentes entre ellas. Sin embargo en el presente estudio, solamente en el espesor la contracción tangencial afectó las contracciones en la madera seca (Cuadro 4). Probablemente los efectos que están produciendo los otros factores variables y controlados influyen en la relación entre el valor de contracción de la tabla y la contracción en los diferentes planos de la madera.

6. CONCLUSIONES

Acacia mangium presenta un alto CHI y una alta variación, el cual es influenciado por el peso específico básico y al contrario de especies de rápido crecimiento, no varía en la dirección médula-corteza o por la cantidad de albura presente en la tabla. El valor del CHI de la madera aserrada es influenciado por el clima donde provienen los árboles, la posición en la altura del árbol y tipo de patrón de corte que se aplica en la troza.

La madera *A. mangium* es propensa a producir poca uniformidad en el CHF (9 a 52%) luego del secado en horno convencional y es influenciado por el CHI, el porcentaje de madera radial, el peso específico básico y la distancia relativa. No obstante, la influencia de estos factores se ve reducida durante el secado por la altura de la troza dentro del árbol, el tipo de secado y la interacción de ambas variables. Así mismo uno de los principales factores que influyen en la variabilidad del CHF es el desarrollo de bolsas de humedad durante el secado, las cuales son propensas de producirse en madera proveniente de árboles creciendo en climas tropicales muy húmedos, cuando se utilizan secados de baja humedad relativa en la cámara y en maderas aserradas con patrones de corte combinados o tipo 4.

Durante el secado de la madera de *A. mangium* el duramen cambia de color y los tres componentes del color (L^* a^* b^*) son afectados por factores como clima, altura de la troza y tipo de secado, sin embargo el cambio de color se produjo por tipo de secado aplicado en la madera y el tipo de clima donde crece el árbol.

Los defectos de secado y contracciones en *A. mangium* son catalogados como nulos o leves, con excepción de las encorvaduras y arqueaduras las cuales tienden a ser defectos severos. Defectos como alabeo, encorvadura, acanaladura y la contracción en ancho de la tabla no fueron afectados por el tipo de secado aplicado, si no que fueron afectados por otros factores como el clima donde se desarrolla el árbol, el patrón de corte y los CHI y CHF. En tanto que los defectos de arqueadura rajaduras, grietas y contracciones en espesor sí fueron afectados por el secado, no obstante el tipo de secado no ejerció influencia en el desarrollo

de estos. Así mismo las contracciones que sufre la madera aserrada durante el secado no se ven influenciadas por el tipo de secado que se le aplica a la madera.

7. RECOMENDACIONES

En la evaluación de la calidad de la madera seca, se busca un CHF y un color uniforme y además la mínima cantidad de defectos. De modo que es necesario tener en cuenta aquellas variables que inciden directamente en el comportamiento del contenido de humedad, del color y de los defectos de la madera tanto en estado verde, como en estado seco, y que pueden ser modificadas o corregidas antrópicamente, con el fin de que la calidad de la madera mejore después del proceso de secado.

Debido a esto hemos desarrollado un manual que incluye algunas consideraciones y recomendaciones para mejorar la calidad de la madera seca de *A. mangium* el cual se adjunta como anexo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, D; Moya, R; Tenorio, C. 2009. Wood color variation in undried and kiln-dried plantation-grown lumber of *Vochysia guatemalensis*. *Maderas Ciencia y Tecnología* 11(3):207-216.
- Arisman, H; Hardiyanto, EB. (2006). *Acacia mangium* – a historical perspective on its cultivation. In: Potter, K.; Rimbawanto, A. and Beadle, C. (eds), Heart rot and root rot in tropical *Acacia* plantations. Proceeding of a workshop held in Yogyakarta, Indonesia, February 7-9, 2006, pp.11-15.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 2003. D 143-92, Standard test methods for Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. West Conshohocken, PA. (Reproved 2003).
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 2003. ASTM D-4442-92, Standard test methods for direct moisture content measurements of wood and wood-Base materials (Reproved 2003).
- Barry, KM; Irianto, RSB; Santoso, E; Turjaman, M; Widyati, E; Sitepu, I; Mohammed, CL, 2004. Incidence of heartrot in harvest-age *Acacia mangium* in Indonesia, using a rapid survey method. *Forest Ecology and Management*. 190:273-280.
- Barry, KM; Irianto, RSB; Tjahjono, B; Tarigan, M; Agustini, L; Hardiyanto, EB; Mohammed, CL. 2006. Variation of heartrot, sapwood infection and polyphenol extractives with provenance of *Acacia mangium*. *Forest Pathology*. 36:183-197.
- Basri, E; Wahyudi, T. 2007. The drying properties and schedules of five wood species from West Papua. *J.Iimu & Teknologi Kayu Tropics*. 5:57-62.
- Basri, E.; Yuniarti, K. 2009. The combination of silviculture and drying techniques resulted in good quality of mangium lumbers. Abstract from XIII Mundial Congress. Buenos Aires Argentina. Available in <http://www.cfm2009.org/es/programapost/resumenes/index.asp?offset=2790> (Accesado 25 agosto del 2010).
- Bolaños, R; Watson, V. 1993. Mapa ecológico de Costa Rica. Según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L. R. Holdridge. Escala 1: 200.000. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica.
- Boone, RS; Kozlik, CJ; Bois, PJ; Wengert, EM. 1988. Dry kiln schedules for commercial woods-temperate and tropical. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-57. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 158p.

- Bousquet, D. 2000. Lumber drying: An overview of current processes. Extension Forest Resources Specialist, University of Vermont Extension and School of Natural Resources.
- Burtin, P; Jay-Allemand, C; Charpentier, J; Janin, G. 1998. Natural wood colouring process in *Juglans* sp. (*J. regia* and hybrid *J. nigra* 23 x *J. regia*) depends on native phenolic compounds accumulated in the transition zone between sapwood and heartwood. *Trees* 12:258-264.
- Cai, Y; Hayashi, K. 2007. New monitoring concept of moisture content distribution in wood during RF/vacuum drying. *Journal of Wood Science*. 53:1-4.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 1992. Mangium, *Acacia mangium* Will.: especie de árbol de uso múltiple en América Central. Programa Manejo Integrado de Recursos Naturales Renovables. Turrialba, C.R. 58p.
- Cui, W; Kamdem, P; Rypstra, T. 2004. Diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy (DRIFT) and color changes of artificial weathered wood. *Wood and Fiber Science*. 36:291-301.
- FPL (Forest Products Laboratory). 1999. Wood handbook—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, For. Prod. Lab. Madison, 450 p.
- Gierlinger, N; Jacques D; Gradner, M; Wimmer, R; Schwanninger, M; Rozenberg, P; Pâques, LE. 2004. Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. *Trees*. 18:102-108.
- Gu, H; Young, TM; Moschler, WW; Bond, BH. 2004. Potential sources of variation that influence the final moisture content of kiln-dried hardwood lumber. *Forest Products Journal*. 54(11):65-70.
- Hallock, HY; Malcolm, FB. 1972. Sawing to reduce warp in plantation red pine studs. Research paper FLP-164. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison.
- Health Science Center. 2008. Image Tools. Texas University—San Antonio. Available at: <http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/download.html>. [Cited 15 Feb 2008].
- Hon, CH. 1984. Graded sawn timber recovery study of *Acacia mangium*. *Malaysian Forester*. 47(2):116-124.
- Janin, G; Gonzalez, J; Ananias, R; Charrier, B; Fernandes, G; Dilem, A. 2001. Aesthetics appreciation of wood colour and patterns by colorimetry . Part 1. Colorimetry theory for the CIELab System. *Maderas. Ciencia y Tecnología*. 3:3-13.

- Jeremic, D; Cooper, P; Srinivasan, U. 2004. Comparative analysis of balsam fir wetwood, heartwood, and sapwood properties. *Canadian Journal of Forests Research*. 34:1241-1250.
- Keey, R. 2005. Colour development on drying. *Maderas Ciencia y Tecnología*. 7: 3-16.
- Kim, NJ; Ochiishi, M; Matsumura, J. 2008. Variation in wood properties of six natural acacia hybrid clones in northern Vietnam. *Journal of Wood Science*. 54:436-442.
- Kreber, B; Haslett, AN. 1997. A study of some factors promoting kiln brown-stain formation in radiate pine. *Holz als Rush Werk*. 55:355-362.
- Larcher, W. 1995. *Physiological Plant Ecology*. 3 rd ed. Springer, Berlin, Germany. 215-275.
- Lee, SS; Arentz, F. 1997. A possible link between rainfall and heartrot incidence in *Acacia mangium*. *Journal of Tropical Forest Science*. 9:441-448.
- Lim, SC; Gan, KS; Choo, KT. 2003. The characteristics, properties and uses of plantation timbers rubberwood and *Acacia mangium*. Timber Technology Centre. Kepong. Kuala Lumpur.
- Liu, S; Loup, C; Gril, J; Dumonceaud, O; Thibaut, A; Thibaut, B. 2005. Studies on European beech (*Fagus sylvatica* L.). Part 1: Variations of wood color parameters. *Annals Forest Science*. 62:625-632.
- Luostarinen, K; Möttönen, V. 2004. Effect of growing site, sampling date, wood location in trunk and drying method on concentration of soluble proanthocyanidins in *Betula pendula* wood with special reference to wood colour. *Scandian Journal of Forests Research*. 19:234-240.
- Milota, MR. 1996. Method of measurement of bow and crook. *Forest Products Journal*. 41(9):65-68.
- Mononen, V; Alvila, L; Pakkanen, T.T. 2002. CIEL*a*b* measurements to determine the role of felling season, log storage and kiln drying on coloration of silver birch wood. *Scandium Journal of Forest Research*. 17:179-191.
- Möttönen, V. 2006. Variation in drying behavior and final moisture content of wood during conventional low temperature drying and vacuum drying of *Betula pendula* timber. *Drying Technology* 24: 1405 – 1413.
- Moya, R; Muñoz, F. 2008. Wet pockets in kiln-dried *Gmelina arborea* lumber. *Journal of Tropical Forest Science*. 22(3):317-328.

- Moya, R; Muñoz, F. 2010. Physical and mechanical properties of eight species growing in fast growth plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science*. 22(3):317-328.
- Moya, R; Berrocal, A. 2010. Wood color variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance. *Annals Forest Science*. 67(2010)109.
- Moya, R; Ureña, E; Salas, C; Muñoz, F. 2011a. Kiln drying defects presence and grouping of wood from ten tropical species growing in fast-growth plantation. *Wood material science and engineering* (Submit).
- Moya, R; Aguilar, D; Tenorio, C; Bond, B. 2011b. Variation of moisture content in kiln dried plantation grown lumber of *Vochysia guatemalensis*. *Wood fiber and science* (Submit).
- Muñoz, F; Moya, R. 2008. Moisture content variability in kiln-dried *Gmelina arborea* wood: effect of radial position and anatomical features. *Journal of Wood Science*. 54:318-322.
- Nishino, Y; Janin, G; Chanson, B; Detienne, P; Gril, J; Thibaut, B. 1998. Colorimetry of wood specimens from French Guiana. *Journal of Wood Science*. 44:3-8.
- NIST (National Institute of Standards and Technology, US). 2005. Softwood lumber standard: Voluntary product standard PS 20-05. Washington, DC, US. Technology Administration, U.S. Department of Commerce. 38 p.
- Oltean, L; Teischinger, A; Hansmann, C. 2007. Influence of temperature on cracking and mechanical properties of wood during wood drying: A review. *Bioresources* 2:789-811.
- Ofori, J; Brentuo, B. 2005. Green moisture content, basic density, shrinkage and drying characteristics of the wood of *Cedrela odorata* grown in Ghana. *Journal Tropical of Forest Science* 17: 211–223.
- Ogata, Y; Nobuchi, T; Fujita, M. 2002. Asynchronous Wood formation on young *Acacia mangium* planted in Malaysia. *Journal of Wood Science*. 48:89-94.
- Peh, TB; Khoo, KC. 1984. Timbre properties of *Acacia mangium*, *Gmelina arborea*, *Paraserianthes falcataria* and their utilization aspects. *Malaysian Forester*. 47(4):285-302.
- Pérez, P; Ananias, RA; Hernandez, G. 2007. Estudio experimental del secado de renovales de canelo *Drimys winteri*. *Maderas Ciencia y Tecnología*. 9(1):59-70.

- Phelps, JE; McGinnes, E; Garrett, HE; Cox, GS. 1983. Growth-quality evaluation of black walnut wood. Part II—color analyses of veneer produced on different sites. *Wood and Fiber Science*. 15:177-185.
- Piao, CH; Teng-Tong, TL; Teng, T. 2000. Research on the drying of *Acacia mangium* lumber. *China Wood Industry*. 14(1):16-18.
- Qumruzzaman, C; Iftekhar S; Mahbulbul, A. 2005. Effects of age and height variation on physical properties of mangium (*Acacia mangium* Willd) wood. *Australian Forestry*. 68:17-19.
- Rappold, P; Smith, W. 2004. An investigation of the relationships between harvest season, log age, and drying schedule on the coloration of hard maple lumber. *Forest Products Journal*. 54:178-184.
- Sahri, MH; Thrahim, FH; Shukor, NA. 1993. Anatomy of *Acacia mangium* grown in Malaysia. *IAWA Journal*. 14(3):245-251.
- Sattar, A; Sarkar, S; Taukkdar, Y. 1991. Kiln drying of Gamar (*Gmelina arborea*) using varying sticker thickness and dryings schedules. *Bangladesh Journal of Forest Science*. 20:49-54.
- Stamm, AJ; Raleigh, NC. 1967. Movement of fluids in wood. II. Diffusion. *Wood Science Technology*. 1:205-230.
- Serrano, JR; Cassens, D. 2001. Reducing warp and checking in plantation grown yellow poplar 4 by 4's by reversing part positions and gluing in the green condition. *Forest Products Journal*. 51(11/12):37-40.
- Shah, N; Kamaluddin, M; Manzoor, R. 2005. Growth and yield prediction models for hybrid acacia (*A. aculiformis* & *A. mangium*) grown in the plantations of Bangladesh. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 8:1137-1141.
- Simpson, W. 1991. Properties of wood related to Drying. In: Simpson W (ed) *Dry Kiln Operator's Manual Handbook AH-188*. USDA. Forest Service. Forest Products Laboratory. WI. pp 11-150.
- Simpson, W. 1999. Drying and control of moisture content and dimensional changes. In *Wood Handbook- Wood as an Engineering Material*. Gen. Tech. Reo. FPL-GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463p.
- Skkar, C. 1972. *Water in Wood*. 1 ed. Syracuse University Press, Syracuse. 218 p.
- Stenudd, S. 2004. Color response in silver birch during kiln-drying. *Forest Products Journal*. 54(6):31-36.

- Sundqvist, B. 2002. Wood color control during kiln-drying. *Forest Products Journal*. 52(2):30-37.
- Taylor, A; Gartner, B; Morrell, J. 2002. Heartwood formation and natural durability-a review. *Wood and Fiber Science*. 34 (4):587-611.
- Terziev, N; Boutelje, J. 1998. Effect of felling time and kiln- drying on color and susceptibility of wood to mold and fungal stain during and above-ground field test. *Wood and Fiber Science*. 30:360-367.
- Torres, D; Del Valle, J. 2007. Growth and yield modelling of *Acacia mangium* in Colombia. *New Forests*. 34: 293-305.
- Vanclay, JK; Henson, M; Palmer, G. 2008. Color variation and correlations in *Eucalyptus dunnii* sawnwood. *Journal of Wood Science*. 54:431-435.
- Voss, DH; Hale, WN. 1998. A comparison of the three editions of the Royal Horticultural Society Colour Chart. *HortScience*. 33:13-17.
- Ward, JC. 1984. Influence of wetwood on pulsed-current resistances in lumber before and during kiln-drying. *Wood and Fiber Science*. 16:598-617.
- Ward, JC. 1986. The effect of wetwood on lumber drying times and rates: an exploratory evaluation with longitudinal gas permeability. *Wood and Fiber Science*. 18:288-307.
- Ward, JC; Pang, WY. 1980. Wetwood in trees: a timber resource problem. United USDA, Pacific Northwest Forest and Range Experimental, General Tech. Rep. PNW-112, U.S. Forest Service, Madison. 87 p.
- Watanabe, K; Hart, F; Mansfield, SD; Avramidis, S. 2010. Detection of wetpockets on the surface of *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg. by near infrared (NIR) spectroscopy, *Holzfoorschung*. 64:55-60.
- Yamamoto, K; Sulaiman, O; Hashim, R. 1997. Wetwood of *Acacia mangium* in Malaysia. In *JIRCAS Newls*, No. 12, ed. Kunio Tsubota, JIRCAS, Tsukuba, Japan, 5-6.
- Yamamoto, K; Sulaiman, O; Kitingan, C; Choon, L; Nhan, N. 2003. Moisture distribution in stems of *Acacia mangium*, *A. auriculiformis* and hybrid acacia trees. *Japan Agricultural Research Quarterly*. 37(3):207-212.
- Zobel, BJ. 1984. The changing quality of the world wood supply. *Wood Science Technology*. 18:1-17.
- Zobel BJ, Van Buijtenen, B. 1989. *Wood Variation: its causes and control*. Springer-Verlag, New York. 458 pp.

Zobel, BJ; Sprague, JR. 1998. Juvenile Wood in forest trees. Springer Verlag, New York, USA, 299p.

9. ANEXOS

9.1. Manual de secado

Consideraciones y recomendaciones prácticas para mejorar la calidad de la madera seca de *Acacia mangium* Willd.

Carolina Tenorio Monge¹
Roger Moya Roque²

Resumen

Acacia mangium es actualmente una de las especies más utilizadas en plantaciones comerciales en Costa Rica. Sin embargo, los usos de su madera han sido restringidos debido a que presenta algunos problemas durante el proceso de secado artificial, entre los que destaca la alta variabilidad del contenido de humedad final, la alta incidencia de defectos y la presencia de bolsas de humedad. Se han investigado las causas de esta variación y del desarrollo de estos defectos y se ha encontrado que los principales factores que influyen en estos son: alta variabilidad en el contenido de humedad inicial de la madera, la procedencia de la materia prima, la altura, la posición radial de la tabla al extraerla del árbol y el uso de programas de secado inadecuados para la especie. Así mismo se dan una serie de recomendaciones a considerar antes de iniciar el secado artificial y de esta manera lograr una mejor calidad de madera en cuanto a la variabilidad del secado y la presencia de defectos.

Palabras clave: contenido de humedad, defectos, bolsas de humedad, programas de secado.

Different aspects and recommendations to consider for quality improvement of dried lumber of *Acacia mangium* Willd.

Summary

Acacia mangium is currently is currently one of the most used species in commercial plantations in Costa Rica. However, the use of timber have been limited because it presents some problems during the kiln drying, such as high variability of final moisture content, high incidence of dry defects and development of wet pockets in dried-lumber We have

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, email: ctenorio@itcr.ac.cr

² Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, email: rmoya@itcr.ac.cr

investigated the causes of this variation and the development of these defects. It was found that mainly factors affected these problems are: high variability in initial moisture content in lumber, radial and high position where the board came from, and inadequate drying schedule. Also there are a number of recommendations to consider before starting the drying and in this way obtain a better quality of wood in relation to the variability of moisture content and the presence of dry defects.

Key words: moisture content, defects, wet pockets, drying schedules.

Introducción

Acacia mangium ha pasado de ser una especie desconocida y con usos muy limitados en Costa Rica, a ser una de las más populares especies plantadas en las regiones tropicales (Arisman *et al*, 2006), esto atribuido a su rápido crecimiento, a la calidad de su madera (Yamamoto *et al*, 2003) y a su tolerancia a sitios degradados, quemados y a suelos agrícolas abandonados (Shah Newaz *et al*, 2005). No obstante, la utilización de madera de árboles de plantaciones muestra problemas en la calidad de la madera aserrada y en algunos procesos industriales. Por ejemplo, Yamamoto *et al* (2003) estudiando el contenido de humedad en condición verde de *A. mangium*, encontraron valores extremadamente altos, de 253% en duramen y 154% en la albura y fue sugerido que este alto valor de humedad se debe a la presencia de “duramen húmedo” y a factores propios de la madera durante el proceso de secado (Yamamoto *et al*, 1997; Larcher, 1995).

Más recientemente se han señalado problemas en los procesos de secado de la madera de *A. mangium* (Moya *et al*, 2008; Barsi y Wahyudi, 2007 y 2009; Lim *et al*, 2003; Piao *et al*, 2000). Moya *et al* (2008) encontraron que la madera de *A. mangium* presenta un mayor incremento en los defectos (grietas, acanaladuras y encorvaduras) después de secado convencional, en comparación con otras especies de plantaciones de rápido crecimiento de regiones tropicales de Costa Rica. Así mismo dichos autores encontraron una alta variación en el contenido de humedad final luego del secado. Barsi y Wahyudi (2007) estudiando también varias especies tropicales del Oeste de Papua encontraron que *A. mangium* es una madera con alta presencia de defectos, susceptible a producir grietas, torceduras y reventaduras luego del secado. Lim *et al* (2003) haciendo referencia al secado convencional de *A. mangium* menciona la existencia de problemas de secado y propone que para reducir estos defectos realizar un presecado al aire de la madera antes de proceder a secar la madera al horno. En tanto Piao *et al* (2000) contrario a los otros autores mencionan que la especie es de fácil secado, pero con incidencia a colapso y reventaduras, y también sugieren que realizar un presecado al aire antes de secar el cual debe acompañarse por un secado lento.



Figura 1. Reventaduras en la madera aserrada de *A. mangium* luego del secado convencional. (Foto: Carolina Tenorio)

Debido a la alta importancia de *A. mangium* como especie de reforestación en Costa Rica y en otros países de la región tropical, a los posteriores usos de la madera, y a la poca información e incongruencia que existe en las causas de variación del contenido de humedad antes y después del secado convencional, así como a la incidencia de defectos, es que el presente trabajo tiene la finalidad de presentar algunos aspectos relevantes y recomendaciones que se deben considerar para el secado de madera de *A. mangium* proveniente de plantaciones forestales en cámaras de secado convencional. La información acá suministrada permitirá mejorar la calidad de madera seca en lo referente a contar con contenidos de humedad uniformes y madera con poca presencia de torceduras, rajaduras o grietas.

Desarrollo

La madera de *A. mangium* una vez seca presenta buenas características de resistencia mecánica y de trabajabilidad, no obstante como se ha señalado presenta problemas durante el proceso de secado. Con la finalidad de mejorar la calidad de esta madera en lo relacionado al contenido de humedad final (luego del secado) y disminuir la presencia de defectos que desecharían la madera aserrada, se enumeran a continuación aquellos factores que inciden en estos aspectos.

Estos factores fueron divididos en tres tipos de consideraciones, el primero relacionado a la madera proveniente del proceso del aserrío que comúnmente es llamada madera verde, el segundo factor que se desarrolla es el de la relación madera-proceso industrial de secado y el finalmente el tercero, el de los aspectos relevantes que determinan el contenido de humedad y la presencia de defectos de la madera aserrada después del secado.

1. Consideraciones generales de la madera aserrada de *A. mangium* antes del proceso de secado.

1.1. La madera recién cortada presenta alto contenido de humedad inicial.

La madera de *A. mangium* presenta un contenido de humedad inicial (CHi) en promedio de 126%, valor considerado como muy alto si se compara con otras maderas. Así mismo, otro inconveniente que presenta la especie es la alta variabilidad, el cual pueden variar de 110 a 150% (Cuadro 1). La procedencia o región donde crece el árbol afecta el CHi. Por ejemplo madera creciendo en la Zona Norte con clima tropical muy húmedo presenta CHi más altos que madera proveniente del Pacífico Central, la cual presenta un clima tropical húmedo. (Cuadro 1).

Cuadro 1. Contenido de humedad inicial promedio y su variación para la madera de *A. mangium* de árboles de plantaciones forestales.

Condición	Promedio de humedad inicial (%)	Variación del contenido de humedad inicial de la madera
Promedio general	126,6	58,1 a 185,9%
Procedencia San Carlos	138,9	83,6 a 178,6%
Parrita	117,9	58,1 a 185,9%

1.2. Variación del contenido de humedad inicial con la altura del árbol y en sentido médula – corteza.

La madera aserrada de *A. mangium* presenta el inconveniente de que posee una alta variación del CHi con la altura del árbol (Figura 2a). La madera proveniente de las partes altas del árbol presentan un CHi inferior al de la madera que es extraída de las partes bajas de los árboles. Esta diferencia es de aproximadamente la mitad entre la parte alta y la parte baja (Figura 2a). No obstante, se tiene la ventaja de que en los árboles de *A. mangium* el CHi es uniforme o de poca variación en sentido médula-corteza (Figura 2b), y que además en los árboles de esta especie no existe variación en el CHi por la presencia de madera de albura o duramen. Estos dos factores producen que la madera aserrada de una misma altura en el árbol no presente grandes diferencias de CHi, lo cual podría favorecer los procesos de secado si se realiza adecuadamente.

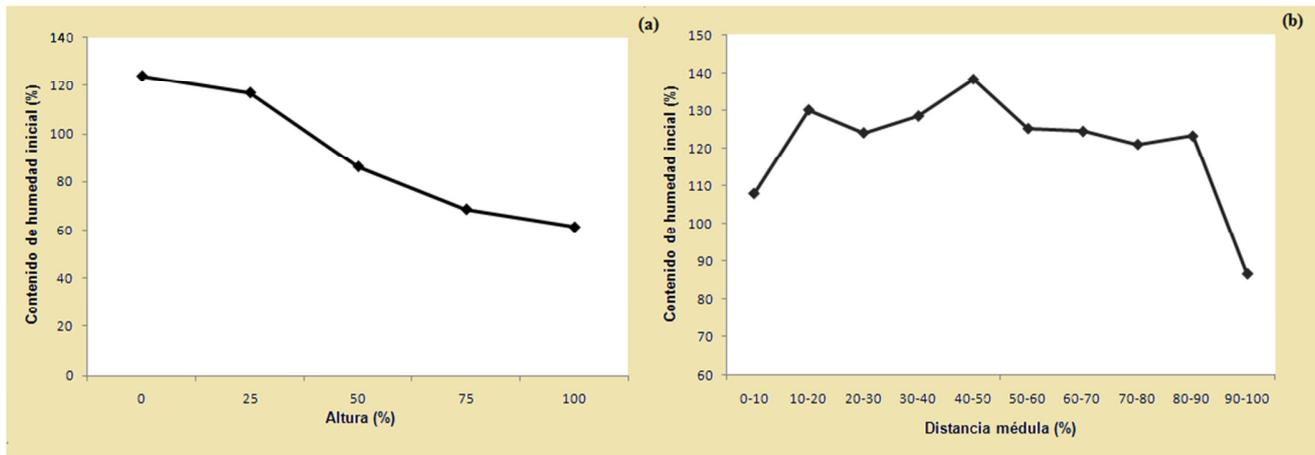


Figura 2. Variación del contenido de humedad inicial de la madera de *A. mangium* por altura comercial del árbol (a) y en médula-corteza (b), para una plantación de nueve años de edad.

1.3. El proceso de aserrío de trozas de *A. mangium* de plantaciones producen torceduras, grietas y rajaduras.

Durante el proceso de aserrío en la madera de *A. mangium* se tienden a producir una alta incidencia de defectos como lo son alabeos, arqueaduras y encorvaduras (Figura 5). En estimaciones realizadas en investigaciones se encontró que la madera al salir del proceso de aserrío tiende a presentar defectos como alabeos en el 65% de las piezas, encorvaduras en el 70% y reventaduras en el 35%. Otros tipos de defectos están presentes en la madera verde, no obstante la incidencia es baja (Figura 5). La presencia de madera juvenil es la causante de que la madera de árboles de cortas edades (inferiores a 10 años) sea propensa a presentar más defectos, esto debido a que las tensiones a las que se ven sometidos los árboles durante su crecimiento son liberadas durante el proceso de aserrío, lo que provoca una mayor presencia de defectos como los mencionados anteriormente.

2. Consideraciones durante el secado convencional de la madera aserrada de *A. mangium*.

2.1. Selección del programa de secado a utilizar

En Costa Rica, en el Instituto Tecnológico de Costa Rica se han experimentado dos programas de secado. Uno contempla la combinación de los programas de secado T3-D2 y T8-D2 (Cuadro 2) propuestos por Boone *et al* (1988), el cual se caracteriza por usar baja temperatura y bajo contenido de humedad de equilibrio (CHE) dentro de la cámara de

secado y un segundo programa que contempla un mayor contenido de humedad de equilibrio (CHE) y una mayor temperatura en relación al programa anterior. Este último programa de secado tiene la ventaja de que la cantidad de días para secar la madera es menor que la cantidad de días que se necesitan para secar la madera con el programa de baja temperatura y bajo CHE. Sin embargo, en ambos casos se tiene el inconveniente de que en la madera seca se produce una alta variación del CHf y el desarrollo de bolsas de humedad (Figura 4), pero estos disminuyen con el programa de alta temperatura y humedad relativa.

Cuadro 2. Programas de secado utilizados en el secado convencional de la madera de *A. mangium*

Etapa de secado	Secado de contenido de humedad y temperatura baja			Secado de contenido de humedad y temperatura alta		
	TBS °C	CHE %	CH %	TBS °C	CHE %	CH %
Calefacción	40		-	45		-
	42	18,5	-	50	19,5	-
Secado	44	18,5	55	55	18,5	55
	44	17,6	50	55	17,6	50
	44	17,0	45	55	17,0	45
	44	16,3	40	55	16,3	40
	44	13,6	35	55	13,6	35
	44	9,9	30	55	10,1	30
	49	5,5	25	60	5,8	25
	55	4,0	20	66	4,0	20
	60	2,9	15	71	3,4	15
	71	3,5	12	82	3,5	12
Igualización	71	10	10	82	10	10
Acondicionamiento	71	13	-	82	12	-
Enfriamiento	40	-	-	40	-	-

Legenda: TBS=Temperatura de bulbo seco; CHE= Contenido de humedad de equilibrio dentro de la cámara; CH= contenido de humedad en la madera

2.2. Variación de velocidad de secado entre madera con corte radial y madera con corte tangencial

En el aserrío de trozas de plantación, por tratarse de trozas de diámetro pequeño, se producen 4 tipos de tablas que combinan o no la madera de corte radial con la de corte tangencial y estos tipos son: tablas con corte exclusivamente tangencial (Figura 3a), tablas con corte exclusivamente radial (Figura 3b), tablas oblicuas tangencial-radial (Figura 3c) y tablas combinadas radial-tangencial-radial (Figura 3d). En las tablas que combinan la sección radial y la tangencial, se tiene el inconveniente de que cada una de ellas poseen diferentes velocidades de secado, siendo la madera de corte tangencial de más rápido secado que la madera de corte radial, por tanto este es un factor que influye en el secado. Es de esperar que las tablas de corte tangencial (Figura 3a) sequen más rápido que la tabla de corte radial (Figura 3b) cuando estos dos tipos de tablas son secadas en un horno convencional en un mismo lote de madera. Así mismo, este factor tiene el inconveniente que en las tablas compuestas de dos o más cortes como las tablas oblicuas (Figura 3c) y combinadas (Figura 3d), la parte de la tabla con corte tangencial secará más rápido que la parte de la tabla con corte radial, provocando nuevamente una diferencia en el CHF en una misma tabla al final del proceso de secado.

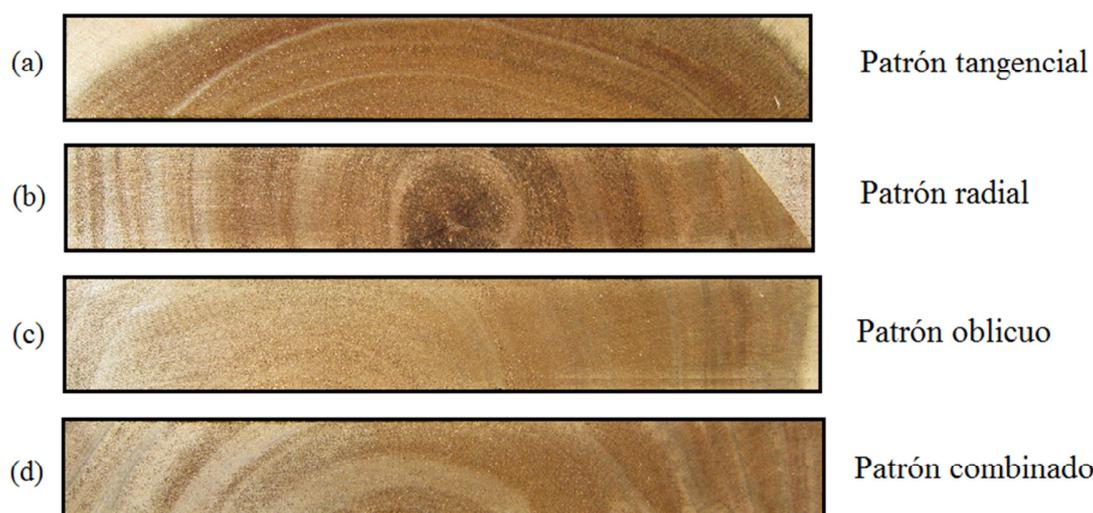


Figura 3. Diferentes patrones de corte presentes en las tablas de *A. mangium* de árboles de plantación. (a) tablas con corte exclusivamente tangencial, (b) tablas con corte exclusivamente radial, (c) tablas con corte oblicuo: tangencial-radial y (d) tablas con corte combinado: radial-tangencial-radial. (Foto: Carolina Tenorio)

3. Consideraciones de la madera de *A. mangium* luego del proceso de secado.

3.1. Alta variación del contenido de humedad final de la madera luego del secado y presencia de defectos de secado.

La madera de *A. mangium* es propensa a la presentar una alta variación del contenido de humedad final (CHf) luego del proceso de secado, los cuales pueden variar desde 9 a 52%. Aunque esta variación del CHf esté presente en todo proceso de secado, debe ser minimizada para mejorar la estabilidad de la madera y la calidad del producto final. Esta falta uniformidad en el CHf puede tener un impacto significativo en el procesamiento secundario de la madera y en el desempeño final del producto.

Las principales causas de esta variación se deben a diversos factores como: (i) CHI muy altos los cuales provocan un proceso de secado más extenso e irregular y dan origen a CHf por encima del contenido de humedad programado, (ii) aunque se presente un CHI uniforme en sentido médula-corteza, la velocidad de secado es diferente en este sentido, lo que provoca que las tablas que se obtienen cerca de la corteza resulten con un menor CHf después del secado que las cercanas a la médula y (iii) las tablas que contienen madera con corte radial (Figura 3b) son de más lento secado que las tablas con corte tangencial (Figura 3a), de modo que aquellas tablas con alguna sección con corte radial son propensas a terminar con CHf mayores que la sección tangencial en un mismo lote de secado.

3.2. La madera de *A. mangium* es propensa a producir bolsas de humedad en la madera seca.

Las bolsas de humedad son conocidas también como bolsas de agua, en donde se presentan contenidos de humedad superiores al deseado. Las bolsas de humedad en la madera seca de *A. mangium* se pueden observar transversalmente y en todo lo largo de la tabla y se caracterizan por poseer un color más oscuro donde se concentra la humedad en comparación con la región de la tabla que se encuentra seca. Las tablas que poseen este problema pueden presentar un contenido de humedad que puede variar entre 9 y 52%.

Entre los factores que propician el desarrollo de estas bolsas de humedad se encuentran el clima o procedencia de la madera, el tipo de secado y el patrón de corte. Las bolsas se concentran principalmente en las tablas con corte radial, específicamente en tablas con cortes combinados (Figura 3d), en tablas provenientes de zonas muy húmedas y obtenidas de programas de secado de baja humedad y temperatura dentro de la cámara.



Figura 4. Bolsa de humedad presente en madera seca de *A. mangium*, principalmente en la región con corte radial. (Foto: Carolina Tenorio)

3.3. Presencia de defectos en la madera de *A. mangium* después del secado.

Luego del proceso de secado, los defectos de alabeo y arqueadura se ven acentuado más de lo que se presentaban en la madera verde, pero la encorvadura, defecto de alta incidencia antes del secado, se disminuye en la madera seca, esto posiblemente como consecuencia de que las tensiones del secado se oponen y contrarrestan las tensiones de crecimiento liberadas durante el aserrío de las trozas (Serrano y Cassens, 2001). Otros defectos de secado, como arqueadura, grietas y acanaladura se presentan en la madera seca pero su incidencia es baja, a excepción del acanalado que llega alcanzar cerca del 45% (Figura 5).

Aunque la madera aserrada de *A. mangium* presenta una alta incidencia de defectos como alabeos, grietas, acanaladuras y rajaduras, estos se clasifican como leves y moderados, tanto en la madera antes como después del secado. En tanto que defectos como encorvaduras y arqueaduras son catalogados como severos después del secado.

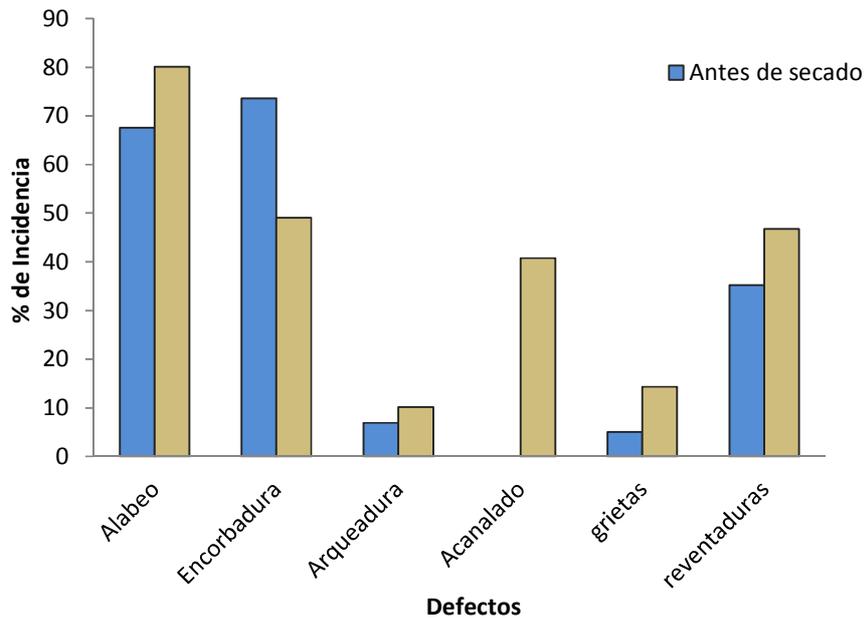


Figura 5. Porcentaje de incidencia de los defectos presentes en la madera seca de *A. mangium*

Recomendaciones en el momento de secado de la madera de *A. mangium*.

Con el fin de mejorar o disminuir la variabilidad del CHF y los defectos de secado mencionados anteriormente, se dan las siguientes recomendaciones para el secado de la madera en horno convencional:

1. Durante el aprovechamiento de los árboles de plantaciones separar las trozas de las partes altas de las partes bajas, con la finalidad de que en el aserrío se separe la madera aserrada en dos lotes de secado: un lote de la madera proveniente de la parte inferior del árbol y otro proveniente de la madera de la parte superior del árbol y de esta manera secar dichos lotes procesos de secado diferentes.
2. Separar las tablas con corte tangencial de las tablas de corte radial (Figura 6) y de ser posible secar estas en lotes de secado diferentes. En el caso de secar estos dos tipos de tablas en un mismo lote se deben colocar las sondas de control de secado en una tabla con corte radial, o bien en la parte radial si la tabla es de corte combinado (Figura 7).

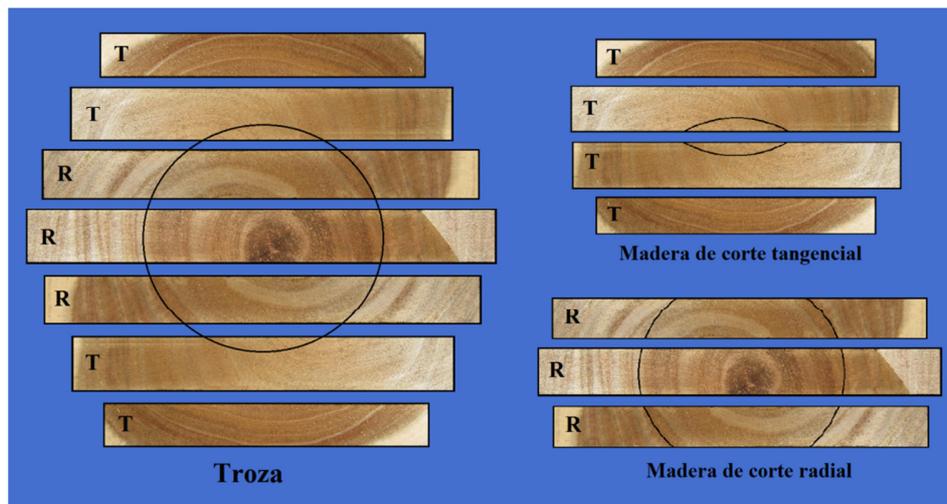


Figura 6. Recomendación para la separación de las tablas por tipo de corte (tangencial o radial). (Foto: Carolina Tenorio)

3. Colocar los pines de captura de la humedad de la madera en la región de corte radial de una tabla (Figura 7), esto debido a que este tipo de madera es de más lento secado que la madera con corte tangencial.
4. Utilizar programas de secado en donde se utilicen altas humedades relativas y altas temperaturas al inicio del secado dentro de la cámara. Un ejemplo de programa de secado puede ser similar al presentado en la tabla 2.



Figura 7. Colocación de la sondas de control de contenido de humedad. Observe que la tabla presenta corte radial y tangencial, la sonda fue colocada en la parte de madera radial. (Foto: Carolina Tenorio)

Bibliografia

- Arisman, H; Hardiyanto, EB. 2006. *Acacia mangium* – a historical perspective on its cultivation. In: Potter, K; Rimbawanto, A; Beadle, C. (eds), Heart rot and root rot in tropical *Acacia* plantations. Proceeding of a workshop held in Yogyakarta, Indonesia, February 7-9, 2006, pp.11-15.
- Basri, E; Wahyudi, T. 2007. The drying properties and schedules of five wood species from West Papua. *J.Iimu & Teknologi Kayu Tropics*. 5:57-62.
- Boone, RS; Kozlik, CJ; Bois, PJ; Wengert, EM. 1988. Dry kiln schedules for commercial woods-temperate and tropical. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-57. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 158p.
- Larcher, W. 1995. *Physiological Plant Ecology*. 3 rd ed. Springer, Berlin, Germany. 215-275.
- Lim, SC; Gan, KS; Choo, KT. 2003. The characteristics, properties and uses of plantation timbers rubberwood and *Acacia mangium*. Timber Technology Centre. Kepong. Kuala Lumpur.
- Moya, R; Muñoz, F. 2008. Wet pockets in kiln-dried *Gmelina arborea* lumber. *Journal of Tropical Forest Science*. 22 (3): 317-328.
- Moya, R; Muñoz, F. 2010. Physical and mechanical properties of eight fast growing plantation species in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science* 22 (3): 317-328.
- Piao, CH; Teng-Tong, TL; Teng, T. 2000. Research on the drying of *Acacia mangium* lumber. *China Wood Industry* 14(1):16-18.
- Serrano, JR; Cassens, D. 2001. Reducing warp and checking in plantation grown yellow poplar 4 by 4's by reversing part positions and gluing in the green condition. *Forest Products Journal* 51(11/12):37-40.
- Shah, N; Kamaluddin, M; Manzoor, R. 2005. Growth and yield prediction models for hybrid acacia (*A. aculiformis* & *A. mangium*) grown in the plantations of Bangladesh. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 8: 1137-1141.
- Yamamoto, K; Sulaiman, O; Hashim, R. 1997. Wetwood of *Acacia mangium* in Malaysia. In *JIRCAS Newls*, No. 12, ed. Kunio Tsubota, JIRCAS, Tsukuba, Japan, 5-6.
- Yamamoto, K; Sulaiman, O; Kitingan, C; Choon, L; Nhan, N. 2003. Moisture distribution in stems of *Acacia mangium*, *A. auriculiformis* and hybrid acacia trees. *Japan Agricultural Research Quarterly* 37 (3): 207-212.