

CONTRACCIONES Y PROPIEDADES FÍSICAS DE *Acacia mangium* Willd., *Tectona grandis* L. f. y *Terminalia amazonia* A. Chev, MADERAS DE PLANTACIÓN EN COSTA RICA

SKRINKAGES AND PHYSICAL PROPERTIES OF *Acacia mangium* Willd, *Tectona grandis* L. f. and *Terminalia amazonia* A. Chev, PLANTATION WOOD FROM COSTA RICA

Freddy Muñoz-Acosta¹; Pablo A. Moreno-Perez²

¹Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Centro de Investigación en Integración Bosque-Industria. 800 m Sur de la Basílica de los Ángeles. Cartago, Costa Rica. Apartado postal 159-7050. Correo-e: fmunoz@tec.ac.cr

²Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Vía principal Chorros de Milla, Mérida, Venezuela. Apartado postal 5101. Correo-e: pmoreno@ula.ve (Autor para correspondencia).

RESUMEN

De acuerdo con las normas ASTM D 2395-02 y D 143-94, se determinó la contracción total y normal en dirección radial (CR), tangencial (CT) y volumétrica (CV) y el coeficiente CT/CR total y normal de *Acacia mangium* Willd., *Tectona grandis* L. f. y *Terminalia amazonia* A. Chev, maderas provenientes de plantación. También se determinaron algunas propiedades físicas como peso específico básico (PEB), $PE_{12\%}$ y $PE_{anhidro}$, densidad verde (DV) y normal (DN), punto de saturación de la fibra (PSF) y contenido de humedad (CH). Algunos criterios de clasificación, propuestos por otros investigadores, se aplicaron para categorizar la estabilidad dimensional y propiedades físicas de estas especies. Se encontró que la CR, CT, CV totales y CT_{total}/CR_{total} tienen diferencias significativas entre especies, al igual que las propiedades físicas PEB y PSF. El índice CT_{total}/CR_{total} indicó que *T. grandis* tiene mejor estabilidad dimensional. La relación lineal ($R^2=0.7769$) indicó que el PSF es un buen indicador de la magnitud de la CV_{total} . Las especies de plantación de este estudio comparadas con las del bosque natural tienen estabilidad dimensional similar pero menor PEB.

PALABRAS CLAVE: Peso específico básico, densidad, punto de saturación de la fibra, contenido de humedad, estabilidad dimensional.

ABSTRACT

Based on ASTM standards D 2395-02 and D 143-94, total and normal shrinkage in radial (RS), tangential (TS) and volumetric (VS) directions and the total and normal TS/RS ratio were determined in the plantation woods *Acacia mangium* Willd., *Tectona grandis* L.f. and *Terminalia amazonia* A. Chev. Also, physical properties such as basic specific gravity (BSG), $SG_{12\%}$ and $SG_{ovendry}$, green density (GD) and normal density (ND), fiber saturation point (FSP) and moisture content (MC) were determined. Some classification criteria, proposed by other researchers, were used to categorize the dimensional stability and physical properties of these species. Significant differences were found among the species for total RS, TS, VS and TS_{total}/RS_{total} , as well as for the physical properties BSG and FSP. The TS_{total}/RS_{total} ratio indicated that *T. grandis* has better dimensional stability. The linear regression ($R^2=0.7769$) indicated that FSP is a good indicator of VS_{total} magnitude. The plantation species of this study compared with those of the natural forest have similar dimensional stability but lower BSG.

KEYWORDS: Basic specific gravity, density, fiber saturation point, moisture content, dimensional stability.



Recibido: 14 de junio de 2012
 Aceptado: 05 de junio de 2013
 doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.06.040
<http://www.chapingo.mx/revistas>

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el mercado de la industria maderera costarricense se abastece con madera proveniente de plantaciones, mientras que el abastecimiento con madera procedente del bosque natural es cada vez menor. Según estadísticas forestales de la Oficina Nacional Forestal (ONF, 2011), el consumo de madera de plantación en troza es de $800,000 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$, y $37,000 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ de madera procedente de bosque natural. Las especies *Acacia mangium* Willd., *Tectona grandis* L.f. y *Terminalia amazonia* A. Chev. provenientes de plantación son de interés comercial en la industria maderera costarricense (Moya et al., 2010), por lo que, se hace necesaria la caracterización de las mismas, siendo importante conocer su comportamiento en cuanto a la estabilidad dimensional (contracciones) y propiedades físicas tales como densidad, peso específico básico, punto de saturación de la fibra, y contenido de humedad. Estas propiedades serán de utilidad a los industriales, para que puedan adecuar los procesos productivos y obtengan productos de madera con mayor valor agregado.

La madera es un material poroso, higroscópico y heterogéneo en su estructura, presenta un comportamiento anisotrópico (propiedades que varían en su magnitud en dirección radial, tangencial y axial), por lo que sus propiedades físicas son también variables. El contenido de humedad es una de las propiedades físicas de la madera que influye sobre los cambios dimensionales (contracciones e hinchamientos) y el peso específico. El conocimiento de las propiedades físicas básicas tales como contenido de humedad, densidad, peso específico y cambios dimensionales, facilita el procesamiento, utilización óptima, comparación y selección entre diferentes maderas para un producto final específico.

Cuando la madera pierde humedad, manifiesta una reducción de peso si sólo pierde agua libre, que es la que se encuentra en el lumen de las células. Sin embargo, cuando se inicia la pérdida de humedad en las paredes celulares (agua higroscópica), se iniciará también la contracción celular y, por tanto, la contracción de la madera en su conjunto de manera más significativa. Este punto de inflexión en el contenido de humedad representa el inicio de las contracciones (en un proceso de secado) o el hinchamiento (en un proceso de adsorción), con los consecuentes cambios dimensionales en la madera (Kollmann & Côté, 1968). Si la madera ha perdido teóricamente toda su agua libre manteniendo sus paredes celulares saturadas de humedad (agua higroscópica), la madera se encontrará a un contenido de humedad que se conoce técnicamente como punto de saturación de la fibra (Fuentes-Salinas, 2000). De acuerdo con Kollmann y Côté (1968), el punto de saturación de la fibra es un valor límite del contenido de humedad que se relaciona con los cambios dimensionales, el calor de humectación de la pared celular, la conductividad eléctrica, la rigidez y la resistencia mecánica de la madera, y la adsorción-compresión del agua en la madera.

INTRODUCTION

Currently, the Costa Rican timber industry market is supplied with wood from plantations, while the wood supply from natural forests is declining. According to forestry statistics from the National Forestry Office (ONF, 2011), the consumption of plantation wood in log form is $800,000 \text{ m}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$, compared to $37,000 \text{ m}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$ for natural forest wood. The plantation species *Acacia mangium* Willd., *Tectona grandis* L.f. and *Terminalia amazonia* A. Chev. are of commercial interest in the Costa Rican timber industry (Moya et al., 2010); therefore, it is necessary to characterize them, as it is important to know their behavior in terms of dimensional stability (shrinkage) and physical properties such as density, basic specific gravity, fiber saturation point and moisture content. Knowledge of these properties will be useful to manufacturers, as they can then adjust their production processes and obtain higher value-added wood products.

Wood is a porous, hygroscopic and heterogeneous material in its structure, with anisotropic behavior (properties that vary in magnitude in radial, tangential and axial directions), so their physical properties are also variable. Moisture content is one of the physical properties of wood that influences dimensional changes (shrinkage and swelling), along with specific gravity. Knowledge of basic physical properties such as moisture content, density, specific gravity and dimensional changes facilitates processing, optimal use, comparison and selection between different woods for a specific end product.

When wood loses moisture, it shows a weight reduction only if it loses free water, which is located in the lumen of the cells. However, when moisture loss begins in the cell walls (hygroscopic water), cell contraction will also start and, therefore, the shrinkage of the wood as a whole in a more significant way. This inflection point in the moisture content represents the start of shrinkage (in a drying process) or swelling (in an adsorption process), with consequent dimensional changes in the wood (Kollmann & Côté, 1968). If the wood has theoretically lost all its free water while its cell walls remain saturated with moisture (hygroscopic water), the wood will be at a moisture content level that is technically known as fiber saturation point (Fuentes-Salinas, 2000). According to Kollmann and Côté (1968), the fiber saturation point is a limit value of moisture content that is related to dimensional changes, the heat of wetting of the cell wall, electrical conductivity, the rigidity and mechanical strength of the wood, and the adsorption-compression of the water in the wood.

On the other hand, specific gravity is considered one of the best indicators of mechanical wood strength (Da Silva, Ribeiro, Gasson, & Cutler, 2009). Specific gravity refers to the portion of cell wall, in the wood fiber, that is void space with regard to the cell lumen (Wiendehoeft, 2010). The concept of specific gravity may also be defined as the relationship between the density of the wood to a particular moisture content level and the density of the water (Simpson & Tenwolde, 1999).

Por otra parte, el peso específico es considerado como uno de los mejores indicadores de la resistencia mecánica de la madera (Da Silva, Ribeiro, Gasson, & Cutler, 2009). El peso específico se refiere a la proporción de pared celular, en la fibra de madera, que es espacio vacío respecto del lumen celular (Wiendenhoeft, 2010). El concepto de peso específico también puede ser definido como la relación que existe entre la densidad de la madera a un contenido de humedad determinado y la densidad del agua (Simpson & TenWolde, 1999).

Las tres especies de este estudio pertenecen a un grupo de aproximadamente 10 especies maderables que han destacado por su alto volumen de producción y su grado de aceptación en el mercado maderero nacional (Moya et al., 2010). El aprovechamiento de una especie maderera como materia prima en cualquier proceso industrial, depende entre otros factores, de sus propiedades físicas como densidad, peso específico, contenido de humedad y contracciones. El presente estudio aportará conocimiento tecnológico a los productores, industriales y otros usuarios sobre las propiedades físicas y comportamiento dimensional de las especies, hacia la consecución de procesos de transformación adecuados y productos de madera con mayor valor agregado.

Por tanto, el objetivo de este trabajo fue determinar algunas propiedades de las especies *A. mangium*, *T. grandis* y *T. amazonia*, provenientes de la plantación, y de interés comercial en la industria maderera costarricense. Las propiedades evaluadas fueron la contracción en dirección radial (CR), tangencial (CT) y volumétrica (CV); el coeficiente diferencial CT/CR o índice de distorsiones y alabeos y su relación con las propiedades físicas como peso específico básico (PEB), punto de saturación de la fibra (PSF), densidad normal (DN) y contenido de humedad (CH).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de muestreo y preparación de probetas

Las especies seleccionadas para este estudio provienen de tres regiones geográficas de Costa Rica. La especie *T. grandis* procede de la Región Atlántica, *T. amazonia* del Pacífico Sur y *A. mangium* del Pacífico Central. El Cuadro 1 muestra algunas características dendroepidométricas de las plantaciones muestreadas y las condiciones climatológicas medias anuales de cada región. Tres árboles de cada especie con fuste recto, sin bifurcaciones y daños visibles se seleccionaron al azar. El volteo de los árboles se hizo aplicando el método tradicional de corta con dirección abierta.

No se consideraron otras variables dendroepidométricas como, por ejemplo, incremento medio anual (IMA), índice de crecimiento anual (ICA), índice de sitio (IS) y procedencia del material genético, dado que la gerencia administrativa de las plantaciones muestreadas no suministró la información. Otras variables como tiempo de paso, competencia entre copas y clase de copa de los árboles no fue diagnosticado en terreno ni en los procesos de corta y volteo de los

The three species of this study belong to a group of about 10 timber species noteworthy for their high production volume and degree of acceptance in the domestic timber market (Moya et al., 2010). The use of a wood species as raw material in any industrial process depends on, among other things, its physical properties such as density, specific gravity, moisture content and shrinkage. This study will provide technological knowledge to producers, manufacturers and other users on the physical properties and dimensional behavior of the species, enabling them to establish appropriate transformation processes and create higher value-added wood products.

Therefore, the aim of this study was to determine several properties of the plantation species *A. mangium*, *T. grandis* and *T. amazonia*, which are of commercial interest in the Costa Rican timber industry. The properties evaluated were: radial, tangential and volumetric shrinkage (RS, TS, and VS, respectively); the TS/RS differential coefficient or distortion and warping ratio and its relationship to physical properties such as basic specific gravity (BSG), fiber saturation point (FSP), normal density (ND) and moisture content (MC).

MATERIALS AND METHODS

Sampling sites and specimen preparation

The species selected for this study come from three geographic regions of Costa Rica. The species *T. grandis* comes from the Atlantic Region, *T. amazonia* the South Pacific and *A. mangium* the Central Pacific. Table 1 shows some forest measurement characteristics of the plantations sampled and the mean annual climatic conditions of each region. Three trees of each species with a straight trunk, without bifurcations and no visible damage were randomly selected. The trees were felled using the traditional open-face cutting method.

No other forest measurement variables such as mean annual increment (MAI), annual growth rate (AGR), site index (SI) and origin of the genetic material were considered, since the management staff of the plantations sampled did not supply the information. Other variables such as time-step, crown competition and tree crown class were not diagnosed in the field or in the cutting and felling processes of the trees sampled. In this regard, and considering forest measurement variables, Álvarez, Barrio, Gorgoso, and Álvarez (2003) propose a methodology which includes 14 indices for the selection of competing trees. Although the factors that regulate tree growth are complex and little known, it is universally accepted that spatial interaction with other nearby trees is one of the factors that influences growth.

Immediately after the felling operation of each tree, a 4-cm-thick disc was obtained from the cross-section of the shaft, at 1.30 m above the base of the tree. The disc was encoded only by species and packaged in plastic to prevent moisture loss. From each disk a 3-cm-wide central slat without pith was obtained, providing the specimens to determine BSG, 12 %

CUADRO 1. Características dendroepidométricas de las plantaciones y condiciones climatológicas de las regiones geográficas muestreadas.

Características y ubicación geográfica de la plantación	Especie		
	<i>Acacia mangium</i>	<i>Tectona grandis</i>	<i>Terminalia amazonia</i>
Edad (años)	9	9	14
Dp (árboles·ha ⁻¹)	556	338	452
Ht (m)	17.1	19	21.4
DAP (cm)	20.5	26.7	22.6
Manejo silvícola	Raleo de 50 % a los 4 años	Limpieza de malezas y raleo a los 3 y 6 años	Raleo sanitario, raleo de 50 % a los 5 y 9 años
Región geográfica	PC	RA	PS
Condiciones climatológicas (Solano & Villalobos, 2012)			
Tipo de clima	Tropical seco, periodo seco 2-3 meses	Tropical húmedo a muy húmedo sin periodo seco	Tropical seco, periodo seco 2-3 meses
Temperatura media anual (°C)	25.3	23.0	26.0
Lluvia media anual (mm)	3,578	≥ 4,000	3,524
Lluvia media anual (días)	150	206	194
Humedad relativa anual (%)	77.5	88.5	77.5

D_p: Densidad de plantación, H_t: Altura total del árbol, DAP: Diámetro a la altura de pecho (1.3 m sobre el nivel de suelo), PC: Pacífico Central, RA: Región Atlántica, PS: Pacífico Sur.

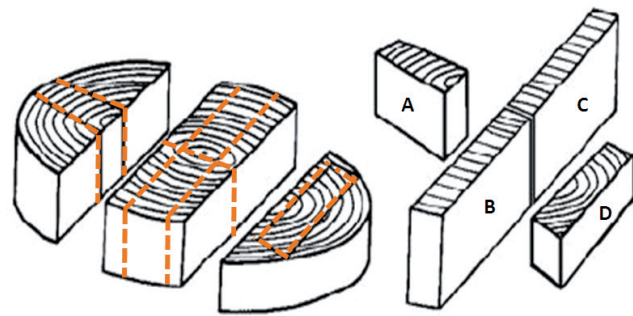
TABLE 1. Forest measurement characteristics of the plantations and climatological conditions of the geographical regions sampled.

Plantation characteristics and geographical location	Species		
	<i>Acacia mangium</i>	<i>Tectona grandis</i>	<i>Terminalia amazonia</i>
Age (years)	9	9	14
PD (trees·ha ⁻¹)	556	338	452
Ht (m)	17.1	19	21.4
DBH (cm)	20.5	26.7	22.6
Forest management	50 % thinning at 4 years	Weeding and thinning at 3 and 6 years	Sanitation thinning, 50 % thinning at 5 and 9 years
Geographical region	CP	AR	SP
Climatological conditions (Solano & Villalobos, 2012)			
Climate type	Tropical dry, dry season 2-3 months	Tropical wet to very wet, without dry season	Tropical dry, dry season 2-3 months
Mean annual temperature (°C)	25.3	23.0	26.0
Mean annual rainfall (mm)	3,578	≥ 4,000	3,524
Mean annual rainfall (days)	150	206	194
Annual relative humidity (%)	77.5	88.5	77.5

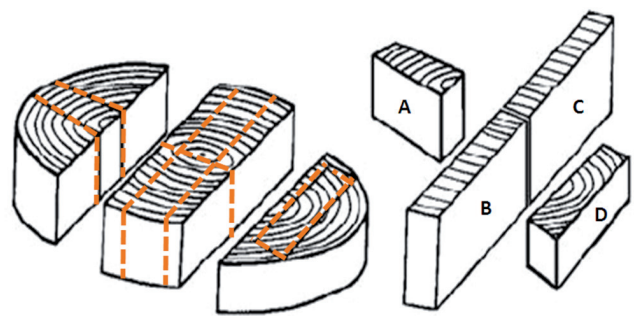
PD: Planting density, H_t: Total tree height, DBH: Diameter at breast height (1.3 m above ground level), CP: Central Pacific, AR: Atlantic Region, SP: South Pacific.

árboles muestreados. Al respecto, y considerando variables dendroepidométricas, Álvarez, Barrio, Gorgoso, y Álvarez (2003) proponen una metodología donde se incluyen 14 índices para la selección de árboles competidores. Aunque los factores que regulan el crecimiento del árbol son complejos

specific gravity (SG₁₂), oven-dry specific gravity (SG₀), initial moisture content (MC_i), BD, normal density (ND) and VS. The specimens were taken from the semicircular sections to determine tangential and radial shrinkage, as shown in Figure 1. The wood processing, specimen preparation and



Probeta A	Probetas B y C	Probeta D
CR (normal y total)	<ul style="list-style-type: none"> • % CH_i • PEB, PE₁₂, PE₀ • DB y DN • CV (normal y total) 	CT (normal y total)



Spesimen A	Spesimen 3 and C	Spesimen D
RS Normal and total	<ul style="list-style-type: none"> • % MG • BSG, SG₁₂, SG₀ • BD and ND • VS (normal and total) 	TS (normal and total)

FIGURA 1. Muestreo a partir de un disco con diámetro a la altura del pecho (DAP: 1.3 m nivel del suelo), para determinar las propiedades físicas y contracciones de las especies de plantación *Acacia mangium*, *Tectona grandis* y *Terminalia amazonia*. CR: Contracción radial, CV: Contracción volumétrica, CT: Contracción tangencial, CH: Contenido de humedad, PEB: Peso específico básico, PE₁₂: Peso específico al 12 %, PE₀: Peso seco, DB: Densidad básica, DN: Densidad normal.

FIGURE 1. Sampling from a disc with diameter at breast height (DBH: 1.3 m above ground level) to determine the physical properties and shrinkage of plantation species *Acacia mangium*, *Tectona grandis* and *Terminalia amazonia*. RS: Radial shrinkage, VS: Volumetric shrinkage, TS: Tangential shrinkage, MC: Moisture content, BSG: Basic specific gravity, SG₁₂: 12 % specific gravity, SG₀: Ovendry specific gravity, BD: Basic density, ND: Normal density.

y poco conocidos, es aceptado universalmente que la interacción espacial es uno de los factores que influye sobre el crecimiento con otros árboles cercanos.

Inmediatamente después de la operación de volteo de cada árbol se obtuvo un disco de 4 cm de espesor de la sección transversal del fuste, a 1.30 m de altura a partir de la base del árbol. El disco fue codificado sólo por especie y empaclado en plástico para impedir la pérdida de humedad. De cada disco se obtuvo un listón central sin médula de 3 cm de ancho, obteniendo las probetas para determinar PEB, peso específico al 12 % (PE₁₂), peso seco (PE₀), contenido de humedad inicial (CH_i), DB, densidad normal (DN) y CV. Las probetas se obtuvieron de las secciones semicirculares para determinar las contracciones en dirección tangencial y radial, como se muestra en la Figura 1. El procesamiento de la madera, preparación de probetas y ensayos se ejecutaron en las instalaciones del Centro de Investigación en Integración Bosque Industria (CIIBI) de la Escuela de Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica (TEC), Cartago-CR.

Propiedades físicas

Se prepararon, acondicionaron y ensayaron 15 probetas para cada especie, bajo la norma D 2395 “Método de prueba para determinar la densidad básica de la madera y materiales a base de madera, método B” (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2002). La clasificación del PEB de la madera se realizó de acuerdo con Bárcenas (1985) y la clasificación de la densidad normal (12 % CH) de acuerdo con el método Sallenave (Pérez, 1983). El porcentaje de CH, contenido de humedad máximo (CH_{máx}), PEB, DB y densi-

tests were carried out at the facilities of the Costa Rica Institute of Technology’s School of Forest Engineering’s Research Center on Forest-Industry Integration (CIIBI), Cartago-CR.

Physical properties

Fifteen specimens per species were prepared, conditioned and tested under Standard D 2395 “Test Methods for determining specific gravity of wood and wood-based materials, method B” (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2002). The BSG classification of the wood was carried out according to Bárcenas (1985) and the normal density (12% MC) classification according to the Sallenave method (Pérez, 1983). The MC percentage, maximum moisture content (MC_{max}), BSG, BD and green density (GD) of the wood were calculated using the following equations according to Glass and Zelinka (2010):

Where:

$$MC = \left[\frac{m_v - m_0}{m_0} \right] * 100$$

$$MC_{max} = \left[\frac{(1.54 - BSG) * 100}{(BSG * 1.54)} \right]$$

$$BD = \left[\frac{m_0}{v_v} \right] = BSG = \frac{m_0}{v_v} / \rho_a$$

dad verde (DV) de la madera se calcularon con las siguientes ecuaciones de acuerdo con Glass y Zelinka (2010):

Donde:

$$CH = \left[\frac{m_v - m_0}{m_0} \right] * 100$$

$$CH_{m\acute{a}x} = \left[\frac{(1.54 - PEB) * 100}{(PEB * 1.54)} \right]$$

$$DB = \left[\frac{m_0}{v_v} \right] = PEB = \frac{m_0}{v_v} / \rho_a$$

$$DV = \frac{m_v}{v_v}$$

CH: Contenido de humedad de la madera en base seca (%)

CH_{máx}: Contenido de humedad máximo de la madera (%)

DB = PEB: Densidad básica (g·cm⁻³) o peso específico básico (adimensional)

DV: Densidad en verde (g·cm⁻³)

ρ_a: Densidad del agua a 25 °C (~ 1 g·cm⁻³)

m_v m_o: Masa verde y masa seca (g) a estufa (103 °C por 24 h)

V_v: Volumen verde (cm³) determinado con el método por desplazamiento de agua a temperatura ambiente (~ 24 °C)

El valor del PSF se determinó con la siguiente ecuación, siendo uno de los dos métodos propuestos por Fuentes-Salinas (2000) y que derivan del trabajo de Skaar (1972):

Donde:

$$PSF = \frac{CV_{total}}{0.9 * PEB}$$

PSF: Punto de saturación de la fibra (%CH).

CV_{total}: Coeficiente de contracción volumétrica total (de verde a anhidro)

PEB: Peso específico básico

Valor 0.9: Considera la densidad del agua en la pared celular.

El agua es sometida a elevadas fuerzas de compresión cuando se encuentra en el interior de la pared provocando que la densidad sea mayor (1.113 g·cm⁻³) a la que tendría en condiciones normales (Fuentes-Salinas, 2000).

$$GD = \frac{m_v}{v_v}$$

MC: Dry-basis moisture content of the wood (%)

MC_{máx}: Maximum moisture content of the wood (%)

BD = BSG: Basic density (g·cm⁻³) or basic specific gravity (adimensional)

GD: Green density (g·cm⁻³)

ρ_a: Water density at 25 °C (~ 1 g·cm⁻³)

m_v m_o: Green mass and oven-dry mass (g; 103 °C for 24 h)

G_v: Green volume (cm³) determined by the water displacement method at ambient temperature (~ 24 °C)

The FSP value was determined using the following equation, one of two methods proposed by Fuentes-Salinas (2000) and derived from the work of Skaar (1972):

Where:

$$FSP = \frac{VS_{total}}{0.9 * BSG}$$

FSP: Fiber saturation point (%MC).

VS_{total}: Coefficient of total volumetric shrinkage (from green to oven-dry)

BSG: Basic specific gravity

Value 0.9: Considers the density of the water in the cell wall.

The water is subjected to high compression forces when inside the wall, causing the density to be greater (1.113 g·cm⁻³) than it would be in normal conditions (Fuentes-Salinas, 2000).

Radial, tangential, and volumetric shrinkage, and differential coefficient (TS/RS)

Shrinkage was measured using the standard D 143-94 method, "Standard test methods for small clear specimens of timber" (ASTM, 2000). Volumetric shrinkage was considered in two moisture conditions: normal, from green condition to 12 %, and total, from green to oven-dry condition (oven for 24 h at 103 °C). Quantifying normal and total shrinkage in the radial, tangential and volumetric directions was done using the following equation, according to Igartúa, Monteoliva, & Piter (2009).

Where:

$$\%C = \frac{D_{MC} - D_0}{D_0} * 100$$

Contracción radial, tangencial, volumétrica y coeficiente diferencial (CT/CR)

Las contracciones se determinaron con el método de la norma D 143-94 “Método de prueba para probetas de madera libre de defectos” (ASTM, 2000). La contracción volumétrica se consideró en dos condiciones de humedad: normal, desde condición verde al 12 %, y total, desde condición verde a condición anhidra (estufa por 24 h a 103 °C). La cuantificación de la contracción normal y total en la dirección radial, tangencial y volumétrica se hizo con la siguiente ecuación, de acuerdo con Igartúa, Monteoliva, & Piter (2009).

Donde:

$$\%C = \frac{D_{CH} - D_0}{D_0} * 100$$

%C: Coeficiente de contracción radial, tangencial y volumétrica, según sea el caso.

D_{CH} : Dimensión considerada a un % CH específico (para el caso de contracciones normales de condición verde a 12 % y para contracciones totales de verde a condición anhidra).

D_0 : Dimensión considerada en estado anhidro (estufa a 103 °C por 24 h).

El índice diferencial de contracción total entre la contracción tangencial (CT) y radial (CR), se determinó con la siguiente ecuación (Igartúa et al., 2009).

$$\frac{CT_{total}}{CR_{total}}$$

La estabilidad dimensional de cada especie se clasificó con base en el coeficiente diferencial o índice de alabeos y distorsiones, utilizando el criterio de clasificación propuesto por Ordóñez, Bárcenas y Quiróz (1989).

Diseño experimental

Los datos se analizaron con un diseño factorial general con un sólo factor (especie) y tres niveles categóricos: *A. mangium*, *T. grandis*, *T. amazonia* y 16 variables respuesta: CT normal y total, CR normal y total, CV normal y total, CT/CR normal y total, PSF, PEB, PE_{12} , PE_0 , DV, DN, $CH_{inicial}$ y CH_{max} . El análisis de varianza (ANDEVA) y la prueba DMS (diferencia mínima significativa) se realizaron con una confiabilidad del 95 %, utilizando el software estadístico Design Expert® v.7.0.2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos bajo las normas ASTM (2000, 2002) y las metodologías de clasificación para las contracciones y propiedades físicas (Bárcenas, 1985; Fuentes, Silva, Lomelí, Richter, & Sanjuán,

%C: Coefficient of radial, tangential y volumetric shrinkage, as the case may be.

D_{MC} : Dimension considered to a specific MC % (in the case of normal shrinkage from green condition to 12 % and for total shrinkage from green to oven-dry condition).

D_0 : Dimension considered in oven-dry hydrous state (oven at 103 °C for 24 h).

The total shrinkage differential ratio between tangential shrinkage (TS) and radial shrinkage (RS) was determined using the following equation (Igartúa et al., 2009).

$$\frac{TS_{total}}{RS_{total}}$$

The dimensional stability of each species was classified based on the differential coefficient or distortion and warping ratio, using the classification criteria proposed by Ordóñez, Bárcenas and Quiróz (1989).

Experimental design

Data were analyzed with a general factorial design with a single factor (species) and three categorical levels: *A. mangium*, *T. grandis*, *T. amazonia* and 16 response variables: normal and total TS, normal and total RS, normal and total TS/RS, FSP, BSG, SG_{12} , SG_0 , GD, ND, $MC_{initial}$ and MC_{max} . Analysis of variance (ANOVA) and the LSD (least significant difference) test were performed with a reliability of 95 %, using Design Expert® v.7.0.2 statistical software.

RESULTS AND DISCUSSION

The following results were obtained from testing under ASTM standards (2000, 2002) and classification methodologies for shrinkage and physical properties (Bárcenas, 1985; Fuentes, Silva, Lomelí, Richter, & Sanjuán, 2002; Ordóñez et al., 1989; Pérez, 1983) of the natural forest species *A. mangium*, *T. grandis* and *T. amazonia* (Chowdhury, Shams, & Alam, 2005; Escobar, 1994; Hamami, Ashaari, 1998; Keenan & Tejada, 1987; Miranda, Sousa, & Pereira, 2010; Shavanas & Kumar, 2006):

Shrinkage and physical properties

Table 2 shows the shrinkage and average physical properties of each of the species. The results are comparable with those obtained by Moya and Muñoz (2010) and Moya et al. (2010) in plantation timber. Table 3 presents the shrinkage and dimensional stability classification of each species.

The TS_{total}/RS_{total} ratio is an index for distortion and warping; the higher it is, the greater the likelihood of a distortion or deformation in the piece of wood due to the moisture changes that occur in a drying process or when the wood is in service. The TS_{total}/RS_{total} differential coefficient indicated

CUADRO 2. Diferencias mínimas significativas (DMS) entre las contracciones normales y totales, coeficiente diferencial C_T/C_R normal y total y propiedades físicas promedio de las especies de plantación.

Propiedad física	Especie								
	<i>Acacia mangium</i>			<i>Tectona grandis</i>			<i>Terminalia amazonia</i>		
	Promedio	D. E.	C. V. (%)	Promedio	D. E.	C. V. (%)	Promedio	D. E.	C. V. (%)
CR _{normal} (%)	0.83 ^A	0.16	19.68	2.72 ^B	0.20	7.50	1.87 ^C	0.32	17.27
CR _{total} (%)	2.72 ^A	0.39	14.24	4.34 ^B	0.64	14.72	2.75 ^A	0.51	18.62
CT _{normal} (%)	2.23 ^A	0.34	15.17	4.24 ^B	0.62	14.52	2.49 ^A	0.39	15.85
CT _{total} (%)	5.32 ^A	0.85	16.06	5.34 ^A	0.82	15.3	6.03 ^B	0.79	13.17
CV _{normal} (%)	10.60 ^A	1.92	18.07	6.56 ^B	1.04	15.88	4.82 ^C	0.89	18.49
CV _{total} (%)	12.64 ^A	1.74	13.78	7.40 ^B	0.88	11.89	6.36 ^C	1.12	17.65
CT/CR normal	2.82 ^A	0.78	27.82	1.57 ^B	0.24	15.25	1.41 ^B	0.49	34.77
CT/CR total	2.00 ^A	0.46	23.15	1.27 ^B	0.31	24.63	2.26 ^A	0.50	22.08
PSF (%)	31.45 ^A	4.48	14.26	28.19 ^B	1.80	6.40	23.38 ^C	2.04	8.71
PEB	0.45 ^A	0.03	7.09	0.45 ^A	0.02	4.15	0.53 ^B	0.05	9.90
PE ₁₂	0.50 ^A	0.04	7.33	0.48 ^A	0.02	4.38	0.55 ^B	0.05	9.91
PE ₀	0.50 ^A	0.04	7.60	0.48 ^A	0.02	4.66	0.56 ^B	0.06	10.48
DV (g·cm ⁻³)	0.87 ^A	0.08	9.30	0.63 ^B	0.03	5.46	0.69 ^C	0.07	10.25
DN (g·cm ⁻³)	0.62 ^A	0.06	10.10	0.55 ^B	0.02	4.52	0.63 ^A	0.06	9.93
CH _i (%)	98.11 ^A	8.41	8.58	59.65 ^B	5.35	8.96	79.25 ^C	5.81	7.33
CH _{máx} (%)	159.56 ^A	17.09	10.71	157.17 ^A	9.61	6.12	126.47 ^B	19.28	15.24

CR: Contracción radial, CT: Contracción tangencial, CV: Contracción volumétrica, PSF: Punto de saturación de la fibra, PEB: Peso específico básico, PE₁₂: Peso específico al 12 %, PE₀: Peso específico seco (estufa), DV: Densidad verde, DN: Densidad normal, CH_i: Contenido de humedad inicial, CH_{máx}: Contenido máximo de humedad calculado, D.E.: Desviación estándar, C.V.: Coeficiente de variación. Nota: Contracción normal, de verde a 12 % CH; Contracción total, de verde a condición anhidra. Letras diferentes en una misma propiedad y diferente especie indican diferencia mínima significativa entre medias de acuerdo con la prueba DMS, a una $P = 0.05$.

TABLE 2. Least significant differences (LSD) between normal and total shrinkage, normal and total T_s/R_s differential coefficient and average physical properties of plantation species.

Physical property	Species								
	<i>Acacia mangium</i>			<i>Tectona grandis</i>			<i>Terminalia amazonia</i>		
	Average	S. D.	C. V. (%)	Average	S. D.	C. V. (%)	Average	S. D.	C. V. (%)
RS _{normal} (%)	0.83 ^A	0.16	19.68	2.72 ^B	0.20	7.50	1.87 ^C	0.32	17.27
RS _{total} (%)	2.72 ^A	0.39	14.24	4.34 ^B	0.64	14.72	2.75 ^A	0.51	18.62
TS _{normal} (%)	2.23 ^A	0.34	15.17	4.24 ^B	0.62	14.52	2.49 ^A	0.39	15.85
TS _{total} (%)	5.32 ^A	0.85	16.06	5.34 ^A	0.82	15.3	6.03 ^B	0.79	13.17
VS _{normal} (%)	10.60 ^A	1.92	18.07	6.56 ^B	1.04	15.88	4.82 ^C	0.89	18.49
VS _{total} (%)	12.64 ^A	1.74	13.78	7.40 ^B	0.88	11.89	6.36 ^C	1.12	17.65
TS/RS normal	2.82 ^A	0.78	27.82	1.57 ^B	0.24	15.25	1.41 ^B	0.49	34.77
TS/RS total	2.00 ^A	0.46	23.15	1.27 ^B	0.31	24.63	2.26 ^A	0.50	22.08
FSP (%)	31.45 ^A	4.48	14.26	28.19 ^B	1.80	6.40	23.38 ^C	2.04	8.71
BSG	0.45 ^A	0.03	7.09	0.45 ^A	0.02	4.15	0.53 ^B	0.05	9.90
SG ₁₂	0.50 ^A	0.04	7.33	0.48 ^A	0.02	4.38	0.55 ^B	0.05	9.91
SG ₀	0.50 ^A	0.04	7.60	0.48 ^A	0.02	4.66	0.56 ^B	0.06	10.48
GD (g·cm ⁻³)	0.87 ^A	0.08	9.30	0.63 ^B	0.03	5.46	0.69 ^C	0.07	10.25
ND (g·cm ⁻³)	0.62 ^A	0.06	10.10	0.55 ^B	0.02	4.52	0.63 ^A	0.06	9.93
MC _i (%)	98.11 ^A	8.41	8.58	59.65 ^B	5.35	8.96	79.25 ^C	5.81	7.33
MC _{máx} (%)	159.56 ^A	17.09	10.71	157.17 ^A	9.61	6.12	126.47 ^B	19.28	15.24

RS: Radial shrinkage, TS: Tangential shrinkage, VS: Volumetric shrinkage, FSP: Fiber saturation point, BSG: Basic specific gravity, SG₁₂: 12 % specific gravity, SG₀: Owendry specific gravity, GD: Green density, ND: Normal density, MC_i: Initial moisture content, MC_{máx}: Maximum moisture content calculated, S.D.: Standard deviation, C.V.: Coefficient of variation. Note: Normal shrinkage, from green to 12 % MC; Total shrinkage, from green to owendry condition. Different letters in the same property and different species indicate minimum significant difference between means according to the LSD test, at $P = 0.05$.

CUADRO 3. Clasificación de las contracciones, coeficiente diferencial y estabilidad dimensional de las especies de plantación, de acuerdo con los criterios de clasificación de Fuentes et al. (2002)⁽¹⁾, Bárcenas (1985)⁽²⁾ y Ordóñez et al. (1989)⁽³⁾.

Especie	CR ⁽¹⁾ (%)		CT ⁽¹⁾ (%)		CV ⁽²⁾ (%)	Coef. CT/CR ⁽²⁾	Estabilidad dimensional ⁽³⁾
	Normal	Total	Normal	Total			
<i>Acacia mangium</i>	Muy pequeña	Muy pequeña	Muy pequeña	Ligeramente grande	Alta	Alta deformación	Estable
<i>Tectona grandis</i>	Moderada	Moderada	Moderada	Ligeramente grande	Media	Baja deformación	Muy estable
<i>Terminalia amazonia</i>	Muy pequeña	Muy pequeña	Muy pequeña	Grande	Baja	Alta a muy alta deformación	Moderadamente estable

CR: Contracción radial, CT: Contracción tangencial, CV: Contracción volumétrica, CT/CR: Coeficiente diferencial o índice de distorsiones y alabeos. Nota: Contracción normal, de verde a 12 % CH; y contracción total, de verde a condición anhidra.

TABLE 3. Shrinkage, differential coefficient and dimensional stability classification of the plantation species, according to the classification criteria of Fuentes et al. (2002)⁽¹⁾, Bárcenas (1985)⁽²⁾ and Ordóñez et al. (1989)⁽³⁾.

Species	RS ⁽¹⁾ (%)		TS ⁽¹⁾ (%)		VS ⁽²⁾ (%)	TS/RS Coef. ⁽²⁾	Dimensional stability ⁽³⁾
	Normal	Total	normal	Total			
<i>Acacia mangium</i>	Very small	Very small	Very small	Slightly large	High	High Deformation	Stable
<i>Tectona grandis</i>	Moderate	Moderate	Moderate	Slightly Large	Medium	Low deformation	Very stable
<i>Terminalia amazonia</i>	Very small	Very small	Very small	Large	Low	High to very high deformation	Moderately stable

RS: Radial Shrinkage, TS: Tangential shrinkage, VS: Volumetric shrinkage, TS/RS: Differential coefficient or distortion and warping ratio. Note: Normal shrinkage, from green to 12 % MC; and total shrinkage, from green to oven-dry condition.

2002; Ordóñez et al., 1989; Pérez, 1983) de las especies *A. mangium*, *T. grandis* y *T. amazonia* procedentes del bosque natural (Chowdhury, Shams, & Alam, 2005; Escobar, 1994; Hamami, Ashaari, 1998; Keenan & Tejada, 1987; Miranda, Sousa, & Pereira, 2010; Shavanas & Kumar, 2006) se tienen los siguientes resultados:

Contracciones y propiedades físicas

En el Cuadro 2 se indican las contracciones y propiedades físicas promedio de cada una de las especies. Los resultados son comparables con los obtenidos por Moya y Muñoz (2010) y Moya et al. (2010) en maderas de plantación. En el Cuadro 3 se presenta la clasificación de las contracciones y estabilidad dimensional de cada especie.

La razón CT_{total}/CR_{total} es un índice para distorsiones y alabeos, entre mayor sea, existe mayor probabilidad que ocurra una distorsión o deformación en la pieza de madera debido al cambio de humedad en un proceso de secado o cuando la madera esté en servicio. El coeficiente diferencial CT_{total}/CR_{total} indicó, para las tres especies, que la contracción tangencial es aproximadamente dos veces la contracción radial, coincidiendo con lo reportado por Simpson y TenWolde (1999). La CV_{total} de *A. mangium* superó en 54 % (promedio) a *T. grandis* y *T. amazonia*. De la comparación entre las contracciones totales de las especies procedentes de plantación y de bosque natural se obtuvo que *A. mangium* de plantación presenta contracciones totales dentro del mismo rango que

that, for the three species, tangential shrinkage is about twice radial shrinkage, coinciding with that reported by Simpson and Tenwolde (1999). The VS_{total} of *A. mangium* exceeded that of *T. grandis* and *T. amazonia* by an average of 54 %. Comparing the total shrinkage of plantation and natural forest species showed that plantation *A. mangium* presents total shrinkage within the same range as the natural forest wood. The species *T. grandis* had higher RS and lower TS/RS than the natural forest wood. In the case of *T. amazonia*, TS and VS are within the same range, but plantation *T. amazonia* had higher RS and greater TS/RS than natural forest wood (Tables 2 and 4). In general, the plantation and natural forest species of this study have similar dimensional stability.

The BSG values obtained are similar to those reported by Moya and Muñoz (2010) and Moya et al. (2010) for the same plantation species, but the BSG is lower than that reported for the same natural forest species (Tables 2 and 4). This difference can be attributed to what was indicated by Glass and Zelinka (2010) and León (2010), who state that the relationship between specific gravity and properties are influenced by the differences in specific gravity between earlywood and latewood. On these differences in specific gravity, Muñoz and Moya (2008) and Toro, Ruiz, Velásquez, and Gómez (2009) found a variation trend in BSG's radial direction in the pith-bark gradient.

Morgado et al. (2010) determined that within the same tree there is variability and correlation between the specific gravity and the assessment height, with the specific gravity

CUADRO 4. Propiedades físicas de las especies estudiadas de bosque natural

Propiedad física	Especie		
	<i>Acacia mangium</i>	<i>Tectona grandis</i>	<i>Terminalia amazonia</i>
Ubicación geográfica	India, Indonesia, Malasia, Tailandia, Bangladesh	East Timor	Bolivia, Colombia, Venezuela
Edad (años)	6 - 20	60	-
PEB	0.48 - 0.6	0.607	0.65
DV (g·cm ⁻³)	-	-	1.01 - 1.07
CR (%)	1.85 - 3.89	3.50	4.6 - 5.5
CT (%)	3.26 - 7.62	5.17	7.3 - 9.2
CV (%)	7.73	7.60	5.3 - 8.4
CT/CR	1.76 - 2.0	1.47	1.58 - 1.7
Referencias	Chowdhury et al. (2005) Hamami et al. (1998) Shavanas y Kumar (2006)	Miranda et al. (2011)	Escobar (1994) Keenan &Tejada (1987)

TABLE 4. Physical properties of the natural forest species studied

Physical property	Species		
	<i>Acacia mangium</i>	<i>Tectona grandis</i>	<i>Terminalia amazonia</i>
Geographical location	India, Indonesia, Malaysia, Thailand, Bangladesh	East Timor	Bolivia, Colombia, Venezuela
Age (years)	6 - 20	60	-
BSG	0.48 - 0.6	0.607	0.65
GD (g·cm ⁻³)	-	-	1.01 - 1.07
RS (%)	1.85 - 3.89	3.50	4.6 - 5.5
TS (%)	3.26 - 7.62	5.17	7.3 - 9.2
VS (%)	7.73	7.60	5.3 - 8.4
TS/RS	1.76 - 2.0	1.47	1.58 - 1.7
References	Chowdhury et al. (2005) Hamami et al. (1998) Shavanas & Kumar (2006)	Miranda et al. (2011)	Escobar (1994) Keenan &Tejada (1987)

la madera de bosque natural. La especie *T. grandis* presentó mayor CR y menor CT/CR que la madera procedente de bosque natural. Para el caso de *T. amazonia*, la CT y CV se encuentran dentro del mismo rango, pero la *T. amazonia* de plantación presentó mayor CR y mayor CT/CR que la madera de bosque natural (Cuadros 2 y 4). En general, las especies de plantación de este estudio y las de bosque natural tienen estabilidad dimensional similar.

Los valores de PEB obtenidos son similares a los reportados por Moya y Muñoz (2010) y Moya et al. (2010) para las mismas especies en plantación; pero el PEB es menor al reportado para las mismas especies de bosque natural (Cuadros 2 y 4). Esta diferencia puede ser atribuida a lo indicado por Glass y Zelinka (2010) y León (2010), quienes mencionan que la relación entre el peso específico y las propiedades está influenciada por las diferencias de peso específico entre la madera de leño temprano y leño tardío. Sobre estas diferencias del peso

value being higher at the base of the tree. These variations imply differences in the physical and mechanical properties within the same timber species, within the same tree and even within the same annual growth ring that is composed of both types of woods. Specific gravity is directly related to the MC percentage in the wood, which explains the differences found, as the percentage of initial MC also varies between species and trees (Simpson & TenWolde, 1999).

On the other hand, Glass and Zelinka (2010) indicate that BSG is a good parameter for determining the maximum moisture content in wood. This is shown in Figure 2, where there is a good coefficient of linear regression between SG and MC_{max} %.

When BSG increases, the volume of the lumen of the cell decreases because the specific gravity of the cell wall is constant between species. However, the maximum moisture con-

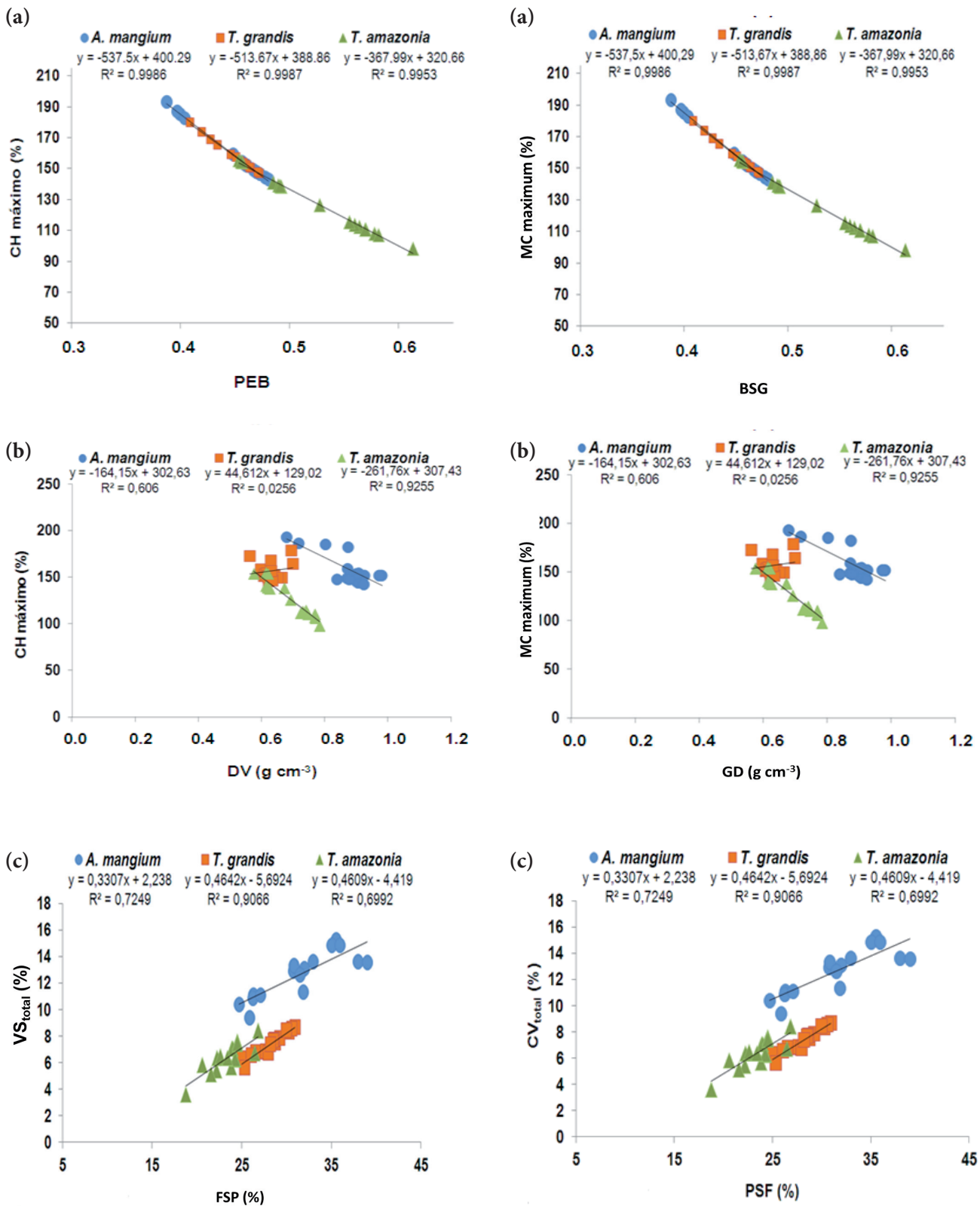


FIGURA 2. Relación lineal de a) peso específico básico (PEB) y contenido máximo de humedad ($CH_{m\acute{a}x}$) calculado, b) densidad verde (DV) y $CH_{m\acute{a}x}$, c) punto de saturación de fibra (PSF) y contracción volumétrica total (VS_{total}) de las especies de plantación *Acacia mangium*, *Tectona grandis* y *Terminalia amazonia*.

FIGURE 2. Linear regression of a) basic specific gravity (BSG) and maximum moisture content (MC_{max}) calculated, b) green density (GD) and MC_{max} , c) fiber saturation point (FSP) and total volumetric shrinkage (VS_{total}) of plantation species *Acacia mangium*, *Tectona grandis* and *Terminalia amazonia*.

específico, Muñoz y Moya (2008) y Toro, Ruiz, Velásquez, y Gómez (2009) determinaron una tendencia de variación en dirección radial del PEB en el gradiente médula-corteza.

Morgado et al. (2010) determinaron que dentro de un mismo árbol existe variabilidad y una correlación entre el peso específico y la altura de evaluación, siendo el valor del peso específico superior en la base del árbol. Estas variaciones implican diferencias en las propiedades físicas y mecánicas dentro de una misma especie maderable, dentro de un mismo árbol e incluso dentro de un mismo anillo de crecimiento anual que está compuesto por ambos tipos de leños. El peso específico está directamente relacionado con el porcentaje de CH en la madera; esto explica las diferencias encontradas, dado que el porcentaje de CH inicial también varía entre especies y entre árboles (Simpson & TenWolde, 1999).

Por otra parte, Glass y Zelinka (2010) indican que el PEB es un buen parámetro para determinar el contenido máximo de humedad en la madera. Lo anterior se demuestra en la Figura 2, en donde existe un buen coeficiente de relación lineal entre el PEB y $\% CH_{m\acute{a}x}$.

Cuando el PEB aumenta, el volumen del lumen de la célula, disminuye debido a que el peso específico de la pared celular es constante entre especies. Sin embargo, el contenido máximo de humedad disminuye dado que hay menos espacio para el agua libre en el lumen de la célula; por tanto, sólo hay mayor espacio para agua higroscópica que se concentra precisamente dentro de la pared celular (Glass & Zelinka, 2010). Lo anterior se comprueba para *A. mangium* que obtuvo el menor $CH_{m\acute{a}x}$ y mayor PEB y PSF. Cuando hay mayor humedad en la pared celular y menos agua libre (lumen) se incrementa la posibilidad de tener mayores contracciones volumétricas (CV), dado que al eliminar mayor cantidad de humedad de la pared celular, aumenta la probabilidad de que ésta sufra contracciones.

Referente a las contracciones y deformaciones en la madera, Tenorio y Moya (2011) y Tenorio, Moya, y Quesada (2012) encontraron algunos inconvenientes en la especie *A. mangium*, luego de un proceso de secado (torceduras, arqueaduras, alabeos grietas y rajaduras). Esto es atribuido a la presencia de zonas puntuales con altas concentraciones de humedad, predominantemente en la sección radial de las piezas, que produjeron alta variabilidad en el CH_{final} de la madera. Al parecer, esta concentración de humedad anormal está asociada con infecciones bacterianas (wetwood), aumentando el CH y produciendo manchas y deformaciones en la madera (Kabir, Leininger, Araman, & Winn, 2006; Moya, Muñoz, & Escalante, 2006; Moya & Muñoz, 2008; Ward & Pong, 1980).

De acuerdo con los valores obtenidos de densidad normal (Cuadro 2) y los criterios de clasificación de las especies latifoliadas (Pérez, 1983), las especies de plantación *A. mangium*, *T. grandis* y *T. amazonia* se clasifican como maderas livianas; mientras que, por los valores de PEB (Cuadro 2) y

tent decreases because there is less space for the free water in the lumen of the cell; therefore, there is more space for hygroscopic water that is concentrated within the cell wall (Glass & Zelinka, 2010). This is true for *A. mangium* which had the lowest MC_{max} and highest BSG and FSP. When there is more moisture in the cell wall and less free water (lumen), it increases the possibility of having greater volumetric shrinkage (VS), since removing more moisture from the cell wall increases its likelihood of undergoing shrinkage.

Regarding shrinkage and deformations in wood, Tenorio and Moya (2011) and Tenorio, Moya, and Quesada (2012) found some drawbacks in the species *A. mangium*, after a drying process (twist, bow, split and check). This is attributed to the presence of localized areas with high moisture concentrations, predominantly in the radial section of the pieces, which produced high variability in the MC_{final} of the lumber. Apparently, this abnormal moisture concentration is associated with bacterial infections (wetwood), increasing the MC and producing blemishes and deformations in the wood (Kabir, Leininger, Araman, & Winn, 2006; Moya, Muñoz, & Escalante, 2006; Moya & Muñoz, 2008; Ward & Pong, 1980).

According to the normal density values obtained (Table 2) and the criteria for the classification of broadleaved species (Pérez, 1983), the plantation species *A. mangium*, *T. grandis* and *T. amazonia* are classified as light woods, while based on BSG values (Table 2) and the classification criteria of Bárcenas (1985), *A. mangium* and *T. grandis* are moderately heavy woods and *T. amazonia* is classified as heavy wood.

With 95 % confidence, both the model used and the species factor are significant for all response variables. The proportion of variability of each response is explained by the statistical model using the value of R^2 . On the other hand, the adjusted R^2 value indicates that the number of factors n in the model is appropriate; therefore, it confirms the validity of ANOVA, which is summarized in Table 5. The LSD test reported statistically significant differences in the physical properties and shrinkage among the plantation species (Table 2).

Relationship between physical properties and shrinkage

A linear regression was found between GD- MC_{max} for *A. mangium* ($R^2 = 0.606$) and *T. amazonia* ($R^2 = 0.925$), but not for *T. grandis* ($R^2 = 0.025$), whereas for the BSG- MC_{max} relationship, higher linear regression coefficients were found for the three species studied (Figures 2a and b). This means that BSG is a better indicator than GD for estimating MC_{max} . Therefore, the greater BSG, the lesser the wood's ability will be to hold moisture in its cellular structure. A linear correlation was also found between BSG-VS only for *T. grandis* ($R^2 = 0.357$), while for the other two species the linear regression was $R^2 = 0.06$. On the other hand, a linear-type regression was determined between FSP and VS_{total} ; the FSP was found to be a good indicator for estimating whether a species will have lower

CUADRO 5. Análisis de varianza (ANDEVA) para las contracciones normales y totales, índice CT/CR normal y total y propiedades físicas de las especies de plantación *Acacia mangium*, *Tectona grandis* y *Terminalia amazonia*.

Variable respuesta	Valor-P* (P = 0.05) para variable respuesta			
	Factor diseño		Proporción de variabilidad	
	Modelo	Especie	R ²	R ² ajustado
CR _{normal}	< 0.0001	< 0.0001	0.9122	0.9080
CR _{total}	< 0.0001	< 0.0001	0.6761	0.6607
CT _{normal}	< 0.0001	< 0.0001	0.7859	0.7757
CT _{total}	0.0417	0.0417	0.1404	0.0994
CV _{normal}	< 0.0001	< 0.0001	0.7604	0.7490
CV _{total}	< 0.0001	< 0.0001	0.8173	0.8086
CT/CR normal	< 0.0001	< 0.0001	0.5674	0.5478
CT/CR total	< 0.0001	< 0.0001	0.5475	0.5259
PSF	< 0.0001	< 0.0001	0.5448	0.5231
PEB	< 0.0001	< 0.0001	0.4998	0.4760
PE ₁₂	< 0.0001	< 0.0001	0.3811	0.3516
PE _o	< 0.0001	< 0.0001	0.3699	0.3399
DV	< 0.0001	< 0.0001	0.7106	0.6968
DN	0.0006	0.0006	0.3003	0.2670
CH _i	< 0.0001	< 0.0001	0.9079	0.9075
CH _{máx}	< 0.0001	< 0.0001	0.4739	0.4488

*Valor P < 0.05 indica que los términos del modelo son significativos. CR: Contracción radial, CT: Contracción tangencial, CV: Contracción volumétrica, PSF: Punto de saturación de la fibra, PEB: Peso específico básico, PE₁₂: Peso específico al 12 %, PE_o: Peso específico seco (estufa), DV: Densidad verde, DN: Densidad normal, CH_i: Contenido de humedad inicial, CH_{máx}: Contenido máximo de humedad calculado.

TABLE 5. Analysis of variance (ANOVA) for normal and total shrinkage, normal and total TS/RS ratio and physical properties of plantation species *Acacia mangium*, *Tectona grandis* and *Terminalia amazonia*.

Response variable	Value-P* (P = 0.05) or response variable			
	Design factor		Proportion of variability	
	Model	Species	R ²	R ² adjusted
RS _{normal}	< 0.0001	< 0.0001	0.9122	0.9080
RS _{total}	< 0.0001	< 0.0001	0.6761	0.6607
TS _{normal}	< 0.0001	< 0.0001	0.7859	0.7757
TS _{total}	0.0417	0.0417	0.1404	0.0994
VS _{normal}	< 0.0001	< 0.0001	0.7604	0.7490
VS _{total}	< 0.0001	< 0.0001	0.8173	0.8086
TS/RS normal	< 0.0001	< 0.0001	0.5674	0.5478
TS/RS total	< 0.0001	< 0.0001	0.5475	0.5259
FSP	< 0.0001	< 0.0001	0.5448	0.5231
BSG	< 0.0001	< 0.0001	0.4998	0.4760
SG ₁₂	< 0.0001	< 0.0001	0.3811	0.3516
SG _o	< 0.0001	< 0.0001	0.3699	0.3399
GD	< 0.0001	< 0.0001	0.7106	0.6968
ND	0.0006	0.0006	0.3003	0.2670
MC _i	< 0.0001	< 0.0001	0.9079	0.9075
MC _{máx}	< 0.0001	< 0.0001	0.4739	0.4488

*Value P < 0.05 indicates that the terms of the model are significant. RS: Radial shrinkage, TS: Tangential shrinkage, VS: Volumetric shrinkage, FSP: Fiber saturation point, BSG: Basic specific gravity, SG₁₂: 12 % specific gravity, SG_o: Owendry specific gravity, GD: Green density, ND: Normal density, MC_i: Initial moisture content, MC_{máx}: Maximum moisture content calculated.

los criterios de clasificación de Bárcenas (1985), *A. mangium* y *T. grandis* son maderas moderadamente pesadas y *T. amazonia* se clasifica como madera pesada.

Con un 95 % de confiabilidad, tanto el modelo aplicado como el factor especie son significativos para todas las variables respuesta. La proporción de variabilidad de cada respuesta es explicada por el modelo estadístico mediante el valor de R^2 . Por otra parte, el valor R^2 ajustado indica que el número de factores presentes en el modelo es adecuado, por lo tanto, se confirma la validez del ANDEVA que se resume en el Cuadro 5. La prueba DMS reportó diferencias estadísticamente significativas de las propiedades físicas y contracciones entre las especies de plantación (Cuadro 2).

Relación entre las propiedades físicas y contracciones

Se encontró una relación lineal entre DV- $CH_{m\acute{a}x}$ para *A. mangium* ($R^2 = 0.606$) y *T. amazonia* ($R^2 = 0.925$), pero no para *T. grandis* ($R^2 = 0.025$), mientras que para la relación PEB- $CH_{m\acute{a}x}$ se encontraron coeficientes de relación lineal más altos para las tres especies estudiadas (Figuras 2a y b). Esto significa que el PEB es mejor indicador que la DV para estimar el $CH_{m\acute{a}x}$. Por tanto, a mayor PEB, la madera tendrá menor capacidad de contener humedad en su estructura celular. También se encontró una correlación lineal entre PEB-CV sólo para *T. grandis* ($R^2 = 0.357$), para las otras dos especies la relación lineal fue de $R^2 = 0.06$. Por otra parte, una relación de tipo lineal se determinó entre el PSF y la CV_{total} ; el PSF resultó ser un buen indicador para estimar si una especie tendrá menor o mayor CV_{total} debido al buen coeficiente de relación lineal obtenido para cada especie estudiada (Figura 2c).

Glass y Zelinka (2010) reportan que la contracción en la madera es afectada por un número variable de factores, pero en general, la CV está asociada con valores altos de densidad. Sin embargo, siendo la CV_{total} significativamente diferente entre especies (Cuadro 2), no existe para *A. mangium* una relación lineal ($R^2 = 0.0095$) entre DV- CV_{total} , a pesar de que es la especie con mayor CV_{total} y DV (Cuadro 3), de igual manera sucedió con *T. grandis* ($R^2 = 0.0806$). En el caso de *T. amazonia* se encontró una relación lineal entre DV- CV_{total} ($R^2 = 0.4463$).

Fuentes et al. (2002) reportan que no es conocida la linealidad entre CT/CR en todo el rango higroscópico de la madera, por lo que este índice está en función del rango de humedad en el cual se determine. Para el caso de las especies evaluadas, en el rango higroscópico de verde a 12 % se obtuvieron los siguientes coeficientes de regresión lineal entre CT/CR y CH: $R^2 = 0.646$ para *A. mangium*, $R^2 = 0.199$ para *T. grandis* y $R^2 = 0.98$ para *T. amazonia*. Simpson y TenWolde (1999) reportan para madera de Douglas-fir, una relación lineal de la CT y el CH, determinando que al decrecer el CH, la CT de la madera incrementa como se muestra en la Figura 3.

or higher VS_{total} due to a good coefficient of linear regression obtained for each species studied (Figure 2c).

Glass y Zelinka (2010) report that shrinkage of wood is affected by various factors, but in general VS is associated with high density values. However, the VS_{total} being significantly different between species (Table 2), for *A. mangium* a linear regression ($R^2 = 0.0095$) does not exist between GD- VS_{total} , although it is the species with the highest VS_{total} and GD (Table 3), as was the case with *T. grandis* ($R^2 = 0.0806$). In the case of *T. amazonia*, a linear regression was found between GD- VS_{total} ($R^2 = 0.4463$).

Fuentes et al. (2002) report that the linearity between TS/RS throughout the hygroscopic range of the wood is unknown, so this index is a function of the moisture range in which it is determined. In the case of the species evaluated, in the hygroscopic range from green to 12 %, the following coefficients of linear regression between TS/RS and MC were obtained: $R^2 = 0.646$ for *A. mangium*, $R^2 = 0.199$ for *T. grandis* and $R^2 = 0.98$ for *T. amazonia*. Simpson and Tenwolde (1999) reported for Douglas-fir wood a linear regression

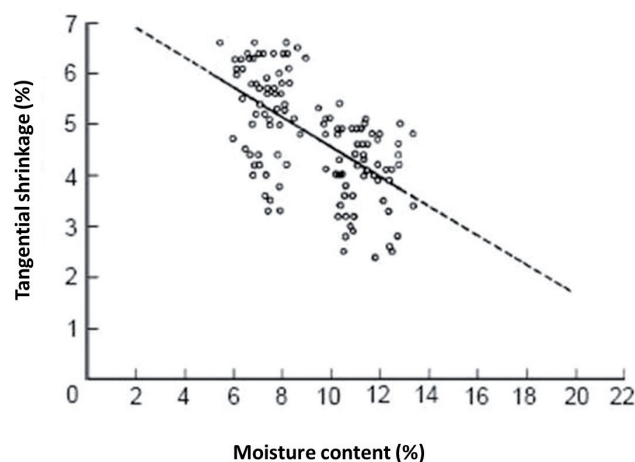


FIGURE 3. Variation in tangential shrinkage of Douglas-fir boards according to moisture content (Simpson & TenWolde, 1999).

between TS and MC, determining that with decreasing MC, the TS of the wood increases as shown in Figure 3.

CONCLUSIONS

A. mangium had the highest fiber saturation point (FSP) and the highest total volumetric shrinkage (VS_{total}). The species with the best dimensional stability (lowest distortion and warping ratio) is *T. grandis*, while *T. amazonia* had the highest distortion and warping ratio (TS/RS). The lower the value of this index, the lesser the likelihood of distortion or deformation occurring in the piece of wood due to moisture change. The FSP was found to be a good indicator of

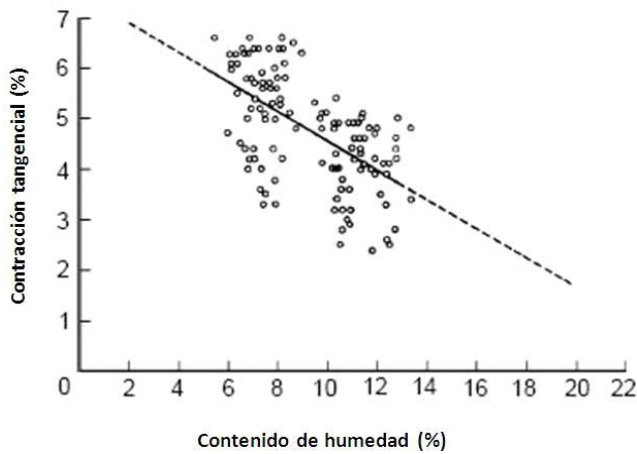


FIGURA 3. Variación de la contracción tangencial de la madera de Douglas-fir de acuerdo con el contenido de humedad (Simpson & TenWolde, 1999).

CONCLUSIONES

A. mangium presentó el mayor punto de saturación de la fibra (PSF) y la mayor contracción volumétrica total (CV_{total}). La especie con la mejor estabilidad dimensional (menor índice de alabeos y distorsiones) es *T. grandis*, mientras que *T. amazonia* presentó mayor índice de alabeo y distorsiones (CT/CR). Entre menor sea el valor de este índice, existe menor probabilidad de que ocurra una distorsión o deformación en la pieza de madera por cambio de humedad. El PSF resultó ser un buen indicador de la CV_{total} . El peso específico básico (PEB) resultó ser un buen indicador del contenido de humedad máximo, es decir, a mayor PEB, menor será el valor de humedad máxima que la madera podría contener en su estructura celular. En general, comparando las especies de plantación y las de bosque natural, los valores de contracción y estabilidad dimensional se registraron en rangos similares. Sin embargo, las especies de plantación presentaron menor PEB.

Se recomienda en futuras investigaciones con estas u otras especies maderables, la inclusión de otras variables dendroepidométricas de interés y verificar su evidencia significativa sobre los resultados de las propiedades físico-mecánicas y las contracciones de las especies en estudio.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación en Integración Bosque-Industria (CIIBI) por el apoyo de personal técnico y de equipamiento. A las empresas, Precious Woods de Centro América, Ecodirecta Group y Barca, S. A. por el suministro del material de estudio y a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Tecnológico de Costa Rica, por el apoyo financiero.

the VS_{total} . Basic specific gravity (BSG) proved to be a good indicator of maximum moisture content, i.e., the higher the BSG, the lower the amount of maximum moisture that the wood could contain in its cellular structure. In general, comparing the plantation and natural forest species, shrinkage and dimensional stability values were found in similar ranges. However, plantation species had lower BSG.

It is recommended that future research on these or other timber species include other forest measurement variables of interest in order to determine the significance of their impact on the physical-mechanical properties and shrinkage of the species studied in this work.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the Research Center on Forest-Industry Integration (CIIBI) for the support provided in terms of technical staff and equipment, the companies Precious Woods in Central America, Ecodirecta Group and Barca, Ltd., for supplying the study material and the Costa Rica Institute of Technology's Vice-chancellorship of Research and Extension for the financial support granted.

REFERENCIAS

- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2000). D143-94 Standard test methods for small clear specimens of timber. In ASTM (Ed), *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, USA: Autor.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2002). D2395-02 Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. In ASTM (Ed.), *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, USA: Autor.
- Álvarez, M., Barrio, M., Gorgoso, J., & Álvarez, J. (2003). Influencia de la competencia en el crecimiento en sección en *Pinus radiata* D. Don. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 12(2), 25–35. Obtenido de http://www.inia.es/gcontrec/pub/025-035-%28117S1%29-Influencia_1059568626234.pdf
- Bárcenas, G. (1985). Recomendaciones para el uso de 80 maderas de acuerdo con su estabilidad dimensional. Xalapa, México: Instituto de Investigaciones sobre Recursos Bióticos (INIREB), Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera (LACITEMA).
- Chowdhury, Q., Shams, I., & Alam, M. (2005). Effects of age and height variation on physical properties of mangium (*Acacia mangium* Willd.) wood. *Australian Forestry*, 68(1), 17–19. Obtenido de <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00049158.2005.10676221#preview>
- Da Silva, L., Ribeiro, F., Gasson, P., & Cutler, D. (2009). Anatomia e densidade básica da madeira de *Caesalpinia pyramidalis* Tul. (Fabaceae), espécie endêmica da caatinga do Nordeste do Brasil *Acta Botanica Brasílica*, 23, 436–445. Obtenido de <http://acta.botanica.org.br/index.php/acta/article/view/879>
- Escobar, P. (1994). *Las maderas de Colombia, Fascículo 43 Guayabo palo prieto*. Colombia: SENA Regional Antioquia Choco.
- Fuentes-Salinas, M. (2000). Estimación del punto de saturación de la fibra (PSF) de las maderas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 6(1), 79–81. Obtenido de http://portal.chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?anio=2000&vol=VI&num=1&id_rev=3
- Fuentes, F., Silva, J., Lomelí, M., Richter, H., & Sanjuán, R. (2002). Comportamiento higroscópico de la madera de *Persea americana* var. *guatemalensis* Mill (Hass). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8(1), 49–56. Obtenido de http://portal.chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?anio=2002&vol=VIII&num=1&id_rev=3
- Glass, S., & Zelinka, S. (2010). Moisture relations and physical properties of wood. In R. J. Ross (Ed.), *Wood handbook-Wood as an engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI, USA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Hamami, M., Ashaari, Z., Abdul, R., & Latif, A. (1998). Physical and mechanical properties of *Acacia mangium* and *Acacia Auriculiformis* from different provenances. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 21(2), 73–81. Obtenido de http://psasir.upm.edu.my/3681/1/Physical_And_Mechanical_Properties_of_Acacia_mangium_and_Acacia.pdf
- Igartúa, D., Monteoliva, S., & Piter, J. (2009). Estudio de algunas propiedades físicas de la madera de *Acacia melanoxylon* en Argentina. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 11(1), 3–18. Obtenido de http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-221X2009000100001&script=sci_arttext
- Kabir, M., Leininger, T. D., Araman, P., & Winn, M. F. (2006). Detection of wetwood by ultrasonics. *Forest Products Journal*, 56(3), 70–74.
- Keenan, F., & Tejada, M. (1987). *Maderas tropicales como material de construcción en los países del grupo andino de América del Sur*. Ottawa, Canadá: Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo.
- Kollmann, F., & Côté, W. (1968). *Principles of wood science and technology*. München, DE: Springer-Verlag.
- León, W. (2010). Anatomía y densidad o peso específico de la madera. *Revista Forestal Venezolana*, 54(1), 67–76. Obtenido de <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/31646/1/ensayo1.pdf>
- Miranda, I., Sousa, V., & Pereira, H. (2011). Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. *Journal of Wood Science*, 57, 171–178. doi: 10.1007/s10086-010-1164-8
- Morgado, R., Gutiérrez, L., García, P., Tairis, A., Toro, M., Gómez, L., & Velásquez, J. (2010). Variación longitudinal del peso específico en la madera de *Centrolobium paraense* Tul. (Fabaceae). *Revista Forestal Venezolana*, 54(2), 227–234. Obtenido de http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/32527/1/art9_ramonmorgado.pdf
- Moya, R., Muñoz, F., & Escalante, I. (2006). Aplicación de la tomografía axial computarizada para la detección de bolsas de humedad en madera seca de *Gmelina arborea* (Roxb.). *Ciencia y Tecnología*, 24(2), 183–196. Obtenido de <http://www.revistas.ucr.ac.cr/index.php/cienciaytecnologia/article/view/2646>
- Moya, R., & Muñoz, F. (2008). Wet pockets in kiln-dried *Gmelina arborea* lumber. *Journal of Tropical Forest Science*, 20(1), 46–58.
- Moya, R., Muñoz, F., Salas, C., Berrocal, A., Leandro, L., & Esquivel, E. (2010). Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. *Revista Forestal Mesoamericana: Kurú*, 7, 18–19. Obtenido de www.tec.ac.cr/revistaforestal
- 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
- 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(4), 318–322. doi: 10.1007/s10086-008-0954-8
- Oficina Nacional Forestal (ONF). (2011). Usos y aportes de la madera en Costa Rica. Estadísticas 2010. Obtenido de http://onfcr.org/media/uploads/cyclope_old/adjuntos/Usosyaportesdelamaderaenel2010nh57280.pdf
- Ordóñez, V., Bárcenas, G., & Quiróz, A. (1989). *Características físico-mecánicas de la madera de diez especies de San Pablo Macuiltianguis, Oax. La madera y su uso*. México: Instituto de Ecología, A.C., Universidad Autónoma Metropolitana.
- Pérez, V. (1983). *Manual de propiedades físicas y mecánicas de maderas chilenas*. Santiago, Chile: Proyecto CONAF/PNUD/FAO-CHI 76/003.
- Simpson, W., & Tenwolde, A. (1999). Physical properties and moisture relations of wood. In USDA Forest Products Staff (Ed.),

- Wood handbook-Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-113.* Madison, WI, USA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Shavanas, A., & Kumar, B. (2006). Physical and mechanical properties of three agroforestry tree species from Kerala, India. *Journal of Tropical Agriculture*, 44(1-2), 23–30. Obtenido de <http://jtropag.in/index.php/ojs/article/viewFile/164/152>
- Skaar, C. (1972). *Water in wood. Wood science series.* USA: Syracuse University Press.
- Solano, J., & Villalobos, R. (2012). Regiones y sub-regiones climáticas de Costa Rica. Instituto Meteorológico Nacional. Obtenido de http://www.imn.ac.cr/publicaciones/estudios/Reg_climaCR.pdf
- Tenorio, C., & Moya, R. (2011). Kiln drying of *Acacia mangium* Willd wood: Considerations of moisture content before and after drying and presence of wet pockets. *Drying Technology*, 29(15), 1845–1854. Obtenido de <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2011.610912#preview>
- Tenorio, C., Moya, R., & Quesada, H. (2012). Kiln drying *Acacia mangium* wood: Color, shrinkage, warp, split and check in dried lumber. *Journal of Tropical Forest Science*, 24(1), 125–139.
- Toro, M., Ruiz, J., Velásquez, J., & Gómez, L. (2009). Gradiente radial del peso específico en la madera de *Carapa guianensis* Aublet (Meliaceae). *Revista Forestal Venezolana*, 53(1), 75–81. Obtenido de http://www2.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0556-66062009000100008&lng=pt&nrm=i
- Ward, J., & Pong, W. (1980). *Wetwood in trees: A timber resource problem. General technical report PNW-112.* USA: United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experimental.
- Weindenhoeft, A. (2010). Structure and function of wood. In Robert J. Ross (Ed.), *Wood handbook-Wood as an engineering material.* General Technical Report FPL- GTR-190. Madison, WI, USA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.