

Propiedades físico-mecánicas de madera contralaminada CLT fabricados con *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*, procedente de plantaciones forestales en Costa Rica

Physical-mechanical properties of CLT Cross Laminated Timber manufactured with *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* from Costa Rican forest plantations

José David Sánchez-Machado¹ • Freddy Muñoz²  • Roger Moya²  • Carolina Tenorio² 

Recibido: 18/2/2021

Aceptado: 9/11/2021

Abstract

Physical-mechanical properties of three-layer counter-laminated boards (CLT) were determined, made with *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* wood, from forest plantations. Two types of adhesive were used, isocyanate polymer emulsion (EPI) and pre-catalyzed vinyl acetate modified with 3 % nanoclay (PVA-na). They applied two treatments to activate the adhesion surface: sanding and impregnation with acetone. The results showed that, by applying both adhesives (EPI and PVA-na) and both surface activation treatments (sanding and acetone), the CLT board with *T. grandis* obtained better mechanical performance (dynamic elastic modulus, shear stress, and parallel compression) and density than the CLT board with *G. arborea* wood. Regarding moisture absorption and moisture content between the CLT boards, no statistically significant difference was obtained. CLT boards built with both species comply with the mechanical properties (shear stress and parallel compression) and density established by the international standard ANSI / APA PRG 320 CLT.

Key words: CLT, EPI, *Gmelina arborea*, PVA, *Tectona grandis*.

1. Programa Maestría en Ciencias Forestales, Escuela Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago-Costa Rica, d.sanchez0914@gmail.com

2. Escuela Ingeniería Forestal, Centro de Investigación en Innovación Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago-Costa Rica, fmunoz@tec.ac.cr, rmoya@tec.ac.cr, ctenorio@tec.ac.cr

Resumen

Se determinaron propiedades físico-mecánicas de tableros contralaminados (CLT) de tres capas, elaborados con madera de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*, procedente de plantación forestal. Se usaron dos tipos de adhesivo, emulsión de polímero de isocianato (EPI) y acetato vinílico pre-catalizado modificado con 3 % de nanoarcilla (PVA-na). Se aplicaron dos tratamientos para activar la superficie de adhesión: lijado e impregnación con acetona. Los resultados mostraron que, aplicando ambos adhesivos (EPI y PVA-na) y ambos tratamientos de activación superficial (lijado y acetona) el tablero CLT con *T. grandis* obtuvo mejor comportamiento mecánico (módulo elástico dinámico, esfuerzo cortante y compresión paralela) y de densidad que el tablero CLT con madera de *G. arborea*. En cuanto a la absorción de humedad y el contenido de humedad entre los tableros CLT no se obtuvo diferencia estadística significativa. Los tableros CLT contruidos con ambas especies, cumplen con las propiedades mecánicas (esfuerzo cortante y compresión paralela) y de densidad que establece la norma internacional ANSI/APA PRG 320 CLT.

Palabras clave: CLT, EPI, *Gmelina arborea*, PVA, *Tectona grandis*.

Introducción

Dos de las especies maderables más reforestadas en Costa Rica son *Tectona grandis* L.f. (*T. grandis*) y *Gmelina arborea* Roxb. Ex. Sm (*G. arborea*), las que se introdujeron con fines de producción de astillas para pulpa de celulosa y no para la obtención de madera aserrada [1], [2], [3]. Sin embargo, debido a opciones en el mercado internacional y políticas públicas, se fueron posicionando como materia prima para diferentes productos o usos [1], [4]. La madera de estas especies es apta para el cepillado y lijado [5,6] y además por sus propiedades mecánicas, son aptas para ser empleadas en elementos estructurales [1], [7].

La madera contralaminada (CLT por sus siglas en inglés) es un producto de ingeniería y tecnología de la madera, patentado a mediados de la década de los 90's en Europa [8]. Consiste en un panel rígido en forma de placa compuesto de un número de capas impares de 3 o más capas, en donde cada capa está hecha de tablas colocadas de forma paralela a la fibra y adyacentes entre sí y dispuestas entre capas de forma ortogonal o en ángulo de 90° con respecto a la dirección de la fibra, es un producto prefabricado y con altas

prestaciones mecánicas [8-9]. Además, es un material con bajo consumo energético para su construcción, tiene propiedades de aislamiento térmico, belleza arquitectónica, por lo que la madera contralaminada CLT es muy utilizada en construcciones de alta demanda estructural y edificaciones de varios niveles en Europa, Canadá y Estados Unidos [8], [10]. Jele et al. [8] indica que el panel CLT es competitivo y atractivo por ser una estructura laminada más liviana que una estructura de acero o concreto, permite construir elementos de hasta 40 m de longitud, alta resistencia química ante ambientes ácidos o alcalinos, cierta tolerancia de exposición al fuego, mayor estabilidad dimensional respecto a la madera maciza, y se optimiza el recurso disponible, entre otras ventajas. Por otra parte, Borgström y Fröbel [11], reportan que la resistencia, la rigidez y la gran capacidad de carga que tiene el CLT hace posible su aplicación como material estructural en construcciones de varios niveles.

La elaboración del CLT es un proceso tecnificado, motivo por el cual se deben cumplir un mínimo de requerimientos, los productores de estos tableros de la unión europea se acogen a la norma EN 16351 que desde el 2016 entro a regir para los requisitos de fabricación y control de la calidad [12], mientras que en Canadá y Estados Unidos la norma de validación de uso no obligatorio es la ANSI/APA PRG 320 [13].

En Costa Rica existe referencia de estudios con *G. arborea* y *T. grandis* en aplicaciones de madera estructural provenientes de plantaciones forestales [14], [15], [16], [17], [18], [19]. La *T. grandis* es la de mayor reforestación comercial en la zona tropical de América Latina [20] mientras que la *G. arborea* constituye un 44 % del consumo de madera transformada en tarimas, siendo ambas especies importantes en el consumo de madera de Costa Rica, pero muy limitado en usos estructurales [21]. Actualmente, en Costa Rica existen industrias con condiciones y capacidad para el desarrollo de nuevos productos y procesos con alta innovación e ingeniería usando madera procedente de plantación, los cuales pueden ser implementados en el sector construcción, específicamente en el desarrollo de elementos estructurales [22]. Por lo que estas industrias tienen la posibilidad de promover productos derivados de madera, fabricados con especies de plantación y así no limitar su aplicación en estructuras para la construcción [23].

Sin embargo, a pesar de este importante desarrollo, no hay referencias sobre la producción de tableros tipo CLT, ni edificaciones construidas con este elemento, en Costa Rica; razón que motiva a iniciar investigación de sus propiedades físico-mecánicas para caracterizar el comportamiento de estas dos especies aplicadas a la manufactura de un producto estructural y promover el

Cuadro 1. Características físicas y químicas de los adhesivos y nanoarcilla usados.**Table 1.** Physical and chemical characteristics of used adhesives and nanoclay.

Característica	Advantage EP-950A	Grip bond 3 WA-505	nanoarcilla Dellite 43B®-DMBHT
Composición química	emulsión de polímero de isocianato (EPI) con base acrílico de dos partes	acetato polivinílico modificado con resinas alifáticas	modificación orgánica con amonio hidrogenado-dimetil-bencilo.
Color	blanco	amarillo	amarillo claro
Sólidos (%)	46,0 – 57,8	48±2 (p/p) 46±2 (p/v)	(-)
Densidad (g·cm ⁻³)	1,28	(-)	1,6
Viscosidad (cPs)	2 900 – 5 600	4 000-5 000	(-)
pH	6,5 – 8,2	(-)	(-)
Tiempo de curado (min)	(-)	30	(-)
Humedad (%)	(-)	(-)	3
Impurezas (%)	(-)	(-)	< 1
Tamaño partículas (µm)	(-)	(-)	7-9

uso de la madera procedente de plantaciones forestales como materia prima para nuevos productos no tradicionales, que al menos en la realidad del desarrollo forestal costarricense es innovador.

Por tal motivo, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento físico (densidad, contenido de humedad y absorción de agua) y mecánico (módulo de elasticidad dinámico, resistencia a la compresión y resistencia de la línea de cola) en tableros de madera contralaminada tipo CLT en 3 capas, elaborados con dos tipos de adhesivo y dos tratamientos de la superficie a encolar (limpiado con acetona y lijado) fabricado con madera de *T. grandis* y *G. arborea*, procedente de plantaciones forestales.

Material e métodos

Madera utilizada

Se utilizó madera de 22 x 100 x 1200 mm (espesor x ancho x longitud) sin cepillar de *T. grandis* y *G. arborea* procedente de plantaciones entre 10-20 años. La madera de *T. grandis* fue proveída por la empresa NovelTeak S.A., ubicada en el cantón de La Cruz, Guanacaste-Costa Rica, y la madera de *G. arborea* fue proveída por la empresa Maderas S&Q 2005 S.A., ubicada en el cantón de Pérez Zeledón, San José-Costa Rica. Ambos lotes de madera fueron secados al horno a un contenido de humedad final de 15 %. Luego la madera fue acondicionada en una cámara de control ambiental

a 75 % de humedad relativa y una temperatura de 22 °C por un periodo de 5-6 semanas, para alcanzar un contenido de humedad de equilibrio de 14,6 %. Luego, toda la madera fue dimensionada a 17 x 70 x 470 mm (espesor x ancho x longitud, respectivamente).

Adhesivos y tratamientos de activación superficial

Se emplearon dos adhesivos: Advantage EP-950A Franklin® + catalizador 200 Franklin® que es un sistema de emulsión polimérica de isocianato (EPI), fabricado por Franklin Adhesives and Polymers (OHIO, USA) proveído por la empresa NovelTeak S.A. y acetato vinílico pre-catalizado Grip Bond 3 WA-505 fabricado por LANCO® (El Coyal Alajuela, Costa Rica) adquirido en el mercado nacional y modificado con 3 % de nanoarcilla Dellite 43B®-DMBHT, fabricada por Laviosa-Chimica Mineraria, SpA (Livorno, Italia), que ha mostrado una mejoría en las propiedades de adhesión en las maderas tropicales [24], [25]. Las características de los adhesivos y nanoarcilla se presentan en el cuadro 1.

A la madera aserrada y seca se le aplicaron dos tratamientos superficiales diferentes a la cara a encolar para activar la superficie como se indica en el cuadro 2. La impregnación con acetona al 99,8 % de concentración, fue aplicada mediante brocha y el lijado de la superficie de la madera con lija de grano # 80.

Elaboración de tableros

Luego de aplicar cada tratamiento superficial, se usó un gramaje de adhesivo equivalente a 200 g·m⁻² una cara de la pieza de madera. La aplicación de ambos adhesivos

Cuadro 2. Adhesivos y tratamiento de la superficie usados para la fabricación de tableros contralaminados en madera *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*.

Table 2. Adhesives and surface treatment used for the manufacture of laminated boards in wood *Tectona grandis* and *Gmelina arborea*.

Tratamiento	Tipo de adhesivo	Tratamiento superficial	Nomenclatura
1	Advantage EP-950A	Impregnación con acetona	EPI-acetona
2	Advantage EP-950A	Lijado con lija # 80	EPI-lijado
3	Grip Bond 3 WA-505	Impregnación con acetona	PVA-na-acetona
4	Grip Bond 3 WA-505	Lijado con lija # 80	PVA-na-lijado

se realizó con una encoladora de rodillos Burkle modelo D-72250 (Robert Buerkle GmbH Co., Stuttgarter Strasse 123, Germany) previamente graduada al gramaje establecido. El prensado se realizó con una prensa hidráulica ITALPRESSE PL/9/SCF/8 (Italpresse S.A., Bergamo, Italy), a una presión de 8,0 MPa por un tiempo de 3600 s. En total fueron construidos 16 tableros CLT en 3 capas, 2 paneles por cada tratamiento (2 especies x 2 tipo de adhesivo x 2 tratamientos de la superficie x 2 muestras). Las dimensiones de cada tablero fue de 450 mm ancho x 470 mm de largo y un espesor final de 51 mm. Luego los tableros fueron dimensionados a 430 x 430 mm por el espesor respectivo de cada panel.

Propiedades evaluadas

Las propiedades evaluadas en cada uno de los paneles fueron la densidad, el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) fueron determinados en el panel completo de 430 mm x 430 mm. El porcentaje de contenido de humedad (%CH), porcentaje de absorción de humedad (%AH), resistencia máxima al esfuerzo cortante y resistencia máxima al esfuerzo en compresión paralela, se realizó con un muestreo posicional al azar en cada panel de CLT.

Densidad

A cada panel dimensionado se le midió el espesor, ancho y largo con un calibrador con una precisión de +0,01 mm para calcular el volumen y se determinó la masa en una balanza con una precisión de +0,05 g. Luego se calculó la densidad por medio de la relación masa/volumen.

Módulo de elasticidad dinámico (MOEd)

Se determinó por la técnica no destructiva por ultrasonido, usando equipo electrónico SylvaTest DUO. Se midió el tiempo que tarda la onda ultrasónica para atravesar el espesor de cada CLT, de forma perpendicular a la capa externa en 10 puntos diferentes, para un total de 160 mediciones, es decir, 2 adhesivos x 2 tratamientos x 2 especies x 2 muestras x 10 mediciones (Fig. 1.A). Determinando el valor de tiempo y el espesor del tablero CLT se determina la velocidad del ultrasonido (Ecuación

1). Luego con la ecuación (2) se calcula el módulo de elasticidad dinámico (MOEd).

$$v = \frac{d}{t} \quad (1)$$

$$MOE_d = \frac{v^2 \rho}{1\,000\,000} \quad (2)$$

Donde: v= velocidad de la señal de ultrasonido (m/s), d= espesor del tablero CLT (m), t= tiempo que tarda la onda en atravesar el espesor del tablero CLT (s), MOEd: módulo de elasticidad dinámico (MPa), ρ : densidad del material ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) y v: velocidad de la señal de ultrasonido (m/s).

Contenido de humedad (%CH)

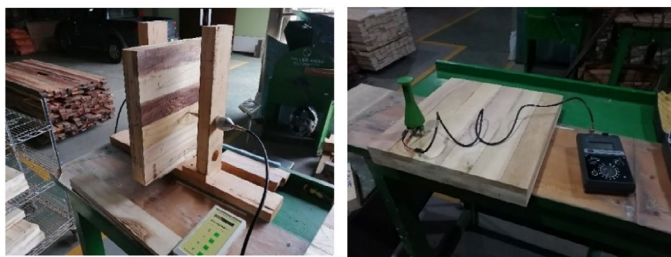
Este parámetro se determinó con un higrómetro Gann Hydromette HTR 300 (Fig. 1.B). Se midieron 6 puntos en total (3 puntos por cada cara principal del CLT). Luego se obtuvo un promedio para cada CLT por tratamiento.

Porcentaje de absorción de humedad (%AH)

Este parámetro se determinó mediante el estándar ASTM D1037-12 [26], siendo adaptada para probetas de tableros CLT, la cual consistió en cuantificar la cantidad de humedad absorbida por diferencia de peso de las probetas durante 96 horas continuas de inmersión en agua a temperatura ambiente. Antes de iniciar y al finalizar la inmersión, se tomó el peso de cada probeta en una balanza con una precisión de + 0,05 g. El ensayo de %AH se aplicó a 20 probetas en total (1 especie x 2 adhesivos x 2 tratamientos x 5 probetas).

Resistencia máxima a esfuerzo cortante

Se realizó de acuerdo con la norma ASTM 905-08 [27], la velocidad de corte fue de 5 mm/min. El ensayo de cortante en la línea de cola se realizó para 40 probetas en total (1 especie x 2 adhesivos x 2 tratamientos x 10 probetas). El muestreo de las probetas para este ensayo se realizó al azar en cada tablero CLT.



a
Figura 1. A. Procedimiento para medir la velocidad de onda ultrasónica con el equipo SILVATEST DUO en CLT/*T. grandis* perpendicular a la cara principal. B. Estimación del contenido de humedad con higrómetro en CLT/*G. arborea*.

Figure 1. A. Procedure to measure the speed of the ultrasonic wave with the SILVATEST DUO equipment in CLT / *T. grandis* perpendicular to the main face. B. Estimation of moisture content with a hygrometer in CLT / *G. arborea*.

Resistencia máxima a esfuerzo en compresión paralela

Se realizó de acuerdo con la norma UNE-EN 408 [28]. La carga se aplicó a una velocidad constante con cabezal de carga móvil con sistema de bloqueo para evitar desplazamientos angulares. La prueba de compresión se realizó para 24 probetas en total (1 especie x 2 adhesivos x 2 tratamientos x 6 probetas). El muestreo de las probetas para este ensayo se realizó al azar en cada tablero CLT.

Análisis de datos

Los datos fueron recolectados y organizados con programa Microsoft Excel®. Luego, una comparación de medias con la prueba t de Student de dos muestras con un $\alpha = 0,05$, las comparaciones se realizaron entre los tratamientos superficiales para un mismo adhesivo y especie y entre adhesivos para un mismo tratamiento superficial y especie. Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor para comparar los valores de esfuerzos del MOEd, en cortante y compresión paralela. Se aplicó la prueba Tukey para mostrar las diferencias entre las medias cuando el valor de la prueba F fue significativo ($\alpha = 0,05$). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa estadístico Minitab, Inc. versión 18.1.

Resultados

La mayor densidad se presentó en los tableros CLT contruidos con madera de *T. grandis* tanto para ambos tratamientos de superficie y adhesivos usados. La variación promedio de la densidad de los tableros CLT

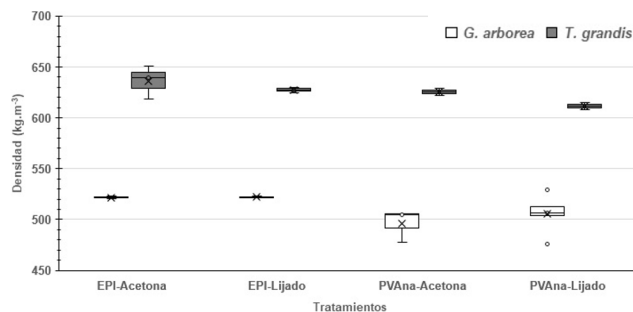


Figura 2. Valor promedio y variación de la densidad en tableros CLT de *T. grandis* y de *G. arborea* por tratamiento.

Figure 2. Average value and variation of the density in CLT boards of *T. grandis* and *G. arborea* by treatment.

con madera de *T. grandis* varía entre 611~636 kg·m⁻³ y para los tableros CLT con madera de *G. arborea* la variación fue de 496~521 kg·m⁻³ (Figura 2). La densidad del tablero CLT está más influenciada por la densidad propia de la especie que por el efecto del adhesivo o tratamiento superficial aplicado, no hay diferencia estadística entre una misma especie.

En relación con el valor promedio del %CH se encontró que este parámetro en CLT de *G. arborea* varió entre 17~18 % y para los CLT con madera de *T. grandis* el %CH varió entre 11,6~12 % (Figura 3), a pesar de que todos los tableros CLT se acondicionaron bajo las mismas condiciones de temperatura y humedad relativa. El valor de contenido de humedad fue estadísticamente diferente entre especies. No se encontró para el % CH del CLT entre una misma especie una diferencia estadística asociada al efecto del adhesivo o tratamiento superficial aplicado.

En la figura 4 se muestran los valores promedio y variabilidad del %AH para 96 h de inmersión continua en agua. Para los tableros CLT elaborados con madera de *T. grandis* el %AH varió entre 17~19% y los tableros CLT en *G. arborea* entre 15~19%, determinándose que no existe diferencia estadística en los valores de %AH para el CLT con ambas especies. Además, no fue encontrada una diferencia estadística entre un CLT de la misma especie.

Los valores promedio y parámetros estadísticos para módulo de elasticidad dinámico (MOEd), resistencia máxima en cortante y resistencia máxima en compresión paralela a la cara para tableros CLT en *T. grandis* y *G. arborea*, se muestran en el cuadro 3. En general, el CLT con *T. grandis* obtuvo el mejor desempeño mecánico.

Para el caso del CLT con *G. arborea*, se obtuvo diferencia estadística significativa debido a tratamiento superficial y adhesivo (cuadro 2) para:

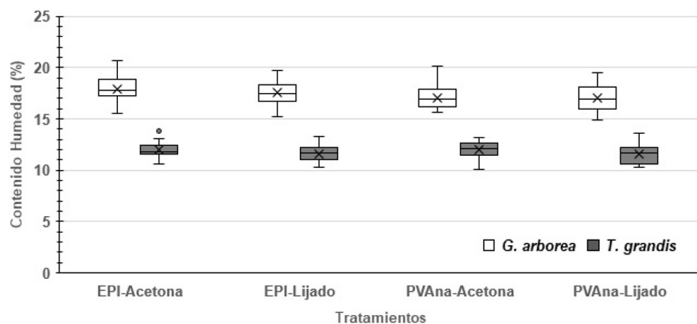


Figura 3. Valor promedio y variación del contenido de humedad (%CH) en tableros CLT *T. grandis* y *G. arborea* por tratamiento.

Figure 3. Average value and variation of moisture content (% CH) in CLT boards *T. grandis* and *G. arborea* by treatment.

- MOEd con todos los tratamientos.
- Esfuerzo cortante solo con los tratamientos 1 y 2.
- Esfuerzo en compresión paralela solo con los tratamientos 3 y 4.

Para el caso del CLT con *T. grandis*, se obtuvo diferencia estadística significativa debido a tratamiento superficial y adhesivo (cuadro 2) para:

- MOEd solo con tratamientos 1 y 2.
- Esfuerzo cortante todos los tratamientos.
- Esfuerzo en compresión paralela solo tratamientos 3 y 4.

El mayor valor de MOEd se obtuvo con el CLT con *T. grandis* y tratamiento 2, el menor valor de MOEd se obtuvo con el CLT con *G. arborea* y tratamiento 4. El mayor valor para esfuerzo de cortante se obtuvo con el CLT de *T. grandis* y tratamiento 1, mientras que el menor esfuerzo en cortante con el CLT de *G. arborea* con tratamiento 1. El esfuerzo en compresión paralela fue mayor para CLT con *T. grandis* y tratamiento 1 y el menor para el CLT con *G. arborea* y tratamiento 3. En general, existe una tendencia que las propiedades incrementan su resistencia mecánica cuando se aplicó el adhesivo tipo EPI y el tratamiento superficial de lijado (cuadro 1 y 2) para los tableros CLT tanto en madera de *T. grandis* y *G. arborea*.

Discusión

La densidad de la madera de *G. arborea* varía en el rango 480-560 kg·m⁻³ [5], [29] y la densidad de la madera de *T. grandis*, de acuerdo con Moya Roque et al. [30], Rivero y Moya [31], varía en el rango 580-830 kg·m⁻³, mostrando así que la madera de *T. grandis* presenta mayor densidad

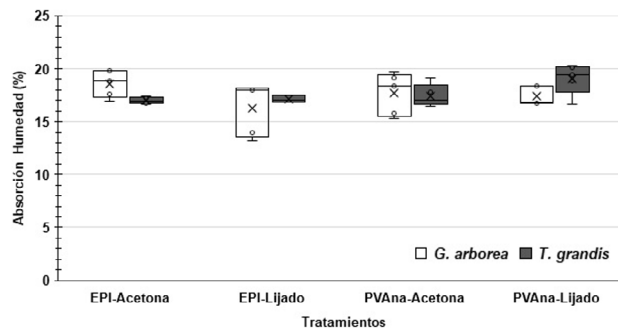


Figura 4. Valor promedio y variación de la absorción de humedad (%AH) a 96 h de inmersión continua en CLT en *T. grandis* y *G. arborea* por tratamiento.

Figure 4. Average value and variation of moisture absorption (% AH) at 96 h of continuous immersion in CLT in *T. grandis* and *G. arborea* by treatment.

y por lo tanto los materiales compuestos como el CLT obtendrán una mayor densidad como se reporta en la figura 2. La densidad de los tableros CLT de *T. grandis* es mayor que los de *G. arborea* por lo que es de esperar que el MOEd, los esfuerzos de cortante y compresión de los tableros CLT de *T. grandis* sean superiores, a los obtenidos con *G. arborea* (Cuadro 3), producto de la mayor densidad de la madera.

No obstante, en algunos productos o materiales compuestos este comportamiento no sigue esta tendencia. La densidad de productos laminados encolados con estas especies es variable, Tenorio et al. [32] encontraron que tableros contrachapados y LVL (tableros laminados de chapa) a base de madera de *G. arborea* presentan una densidad entre 516-523 kg·m⁻³, rango de densidad similar al obtenido con el CLT con madera de *G. arborea* 476-529 kg·m⁻³ (figura 2). En madera laminada encolada de *T. grandis* Aicher et al. [33] obtienen 587 kg·m⁻³ densidad menor a la obtenida con el tablero CLT/*T. grandis* 607-650 kg·m⁻³ (figura 2). En vigas laminadas encoladas, Chiniforush et al. [34] hallan que la densidad fue 779 kg·m⁻³ densidad mayor a la obtenida con el tablero CLT/*T. grandis* de este estudio. En productos laminados de madera, las propiedades mecánicas generalmente se incrementan a mayor densidad [35].

Tenorio et al. [32] encuentran para tableros contrachapados y LVL elaborados con madera de *G. arborea* tienen un %AH a 24 h continuas de inmersión de 17,8 y 15,2 %, respectivamente. En este estudio el %AH a 96 h continuas de inmersión el CLT/ *G. arborea* obtiene un rango de entre 15,6 y 19,1 %. Mientras que para el CLT/*T. grandis* el %AH varía entre 17,2 % y 19,7 % (figura 4), siendo estos valores ligeramente similares entre ellos. Aunque el CLT es un producto contralaminado sigue conservando la cualidad higroscópica de la

Cuadro 3. Valor promedio y parámetros estadísticos comparativos de las propiedades mecánicas para tableros CLT con madera de *T. grandis* y *G. arborea*.

Table 3. Average value and comparative statistical parameters of the mechanical properties for CLT boards with wood from *T. grandis* and *G. arborea*.

Adhesivo	Tratamiento superficial	<i>G. arborea</i>			<i>T. grandis</i>		
		Promedio	DE	%CV	Promedio	DE	%CV
MOEd (MPa)							
EPI	Acetona	351,05 ^{C,1,a}	38,15	10,87	427,58 ^{C,1,a}	228,55	53,45
	Lijado	589,68 ^{B,2,a}	73,90	12,53	1361,70 ^{A,2,a}	137,85	10,12
PVA-na	Acetona	392,11 ^{C,1,a}	146,44	37,35	763,23 ^{B,1,b}	138,46	18,14
	Lijado	170,58 ^{D,2,b}	112,13	65,74	805,93 ^{B,1,b}	124,05	15,39
Esfuerzo en cortante (MPa)							
EPI	Acetona	2,24 ^{C,1,a}	0,59	26,45	4,32 ^{A,1,a}	0,38	8,89
	Lijado	3,75 ^{B,2,a}	0,14	3,80	3,96 ^{B,1,a}	0,49	12,30
PVA-na	Acetona	2,39 ^{C,1,a}	0,24	10,23	4,30 ^{A,1,a}	0,43	9,98
	Lijado	2,67 ^{C,2,b}	0,22	8,37	3,62 ^{B,2,a}	0,53	14,68
Esfuerzo en compresión paralela (MPa)							
EPI	Acetona	24,05 ^{C,1,a}	1,62	6,74	40,82 ^{A,1,a}	1,50	3,67
	Lijado	25,44 ^{C,1,a}	0,98	3,84	40,10 ^{A,1,a}	1,14	2,83
PVA-na	Acetona	20,24 ^{E,1,b}	0,55	2,72	40,72 ^{A,1,a}	1,74	4,28
	Lijado	22,09 ^{D,2,b}	0,32	1,45	37,08 ^{B,2,b}	0,99	2,45

DE= desviación estándar, CV= coeficiente de variación

Letras diferentes entre los tratamientos en cada prueba mecánica indica diferencia estadística significativa a 95% de confianza. Diferentes números entre tratamientos superficiales para un mismo adhesivo, significa medias estadísticamente diferentes (t-Student) a 95% de confianza. Diferentes letras griegas entre adhesivos para un mismo tratamiento superficial significan medias diferentes (t-Student) a 95% de confianza.

madera maciza [36], y el ambiente que le rodea influye en el intercambio del %CH del material, factor que debe preverse antes y durante la obra constructiva. EL CLT/*G. arborea*, presentó un rango mayor de variación de absorción de humedad, lo que indica que potencialmente sufrirá mayores cambios dimensionales que CLT/*T. grandis*. Acorde con lo mencionado por Han et al. [37] las variaciones de humedad en la madera provocan deformaciones y defectos en los paneles de CLT, en específico, contracciones en ancho y espesor, llegando a producir separación de láminas, por lo que existe la probabilidad de tener este tipo de problemas con los CLT/*G. arborea*.

Karlinasari et al. [29], Chauhan y Sethy [38] determinaron el MOEd mediante ultrasonido para madera maciza de *G. arborea* y *T. grandis*, respectivamente y concluyeron para ambas especies que el factor dominante que influyó en el MOEd fue la densidad de la especie. Resultado similar se obtuvo en este estudio con la caracterización de las propiedades mecánicas del tablero CLT, en donde el CLT construido con madera de *T. grandis* presentó mejor comportamiento mecánico que el CLT con madera *G. arborea* (cuadro 3), dado que la densidad

determinada para el tablero CLT de *T. grandis* fue mayor a la del tablero CLT de *G. arborea* (figura 2). De acuerdo con Beall [39], es posible hacer comparaciones con productos compuestos de estas especies, ya que la propagación de la onda ultrasónica en productos compuestos es similar a madera maciza. Sin embargo, debe considerarse que la onda ultrasónica medida en sentido longitudinal es mayor que la determinada en sentido transversal (tangencial o radial), esto porque la atenuación de la onda es mayor en sentido transversal que longitudinal debido a mayores espacios vacíos (lúmenes de la células o vasos), los cuales no se presenta con la misma frecuencia en sentido longitudinal [39]. Otra posible fuente de variación que influye en los valores del MOEd es el tipo de técnica utilizada para medir esta onda o bien la densidad de la madera [40], [41], [42].

El esfuerzo en cortante en productos de madera encolados está asociado a la resistencia de la línea de cola, para el caso de tableros CLT con *T. grandis* se obtuvo la mayor resistencia en cortante con un valor de 40,82 MPa con adhesivo tipo EPI y tratamiento con acetona (cuadro 3), al respecto, Moya [43] encontró que la resistencia de la línea de cola se ve positivamente afectada cuando se

Cuadro 4. Valores de propiedades mecánicas de los tableros CLT en madera de *T. grandis* y *G. arborea*, comparado con los de referencia según PRG 320 CLT.

Cuadro 4. Values of mechanical properties of CLT boards in wood from *T. grandis* and *G. arborea*, compared with those of reference according to PRG 320 CLT.

Propiedad mecánica	CLT/ <i>G. arborea</i>	CLT/ <i>T. grandis</i>	PRG 320 CLT
Módulo de elasticidad (MPa)	170~590	428~1 362	6 205 ~11 720
Esfuerzo cortante (MPa)	2,2~3,8	3,6~4,3	2,4~3,9
Esfuerzo en compresión paralela (MPa)	20,2~25,4	37,1~40,8	6,2~23,5
Densidad (kg m ⁻³)	496~521	611~636	400-600

mejora la humectabilidad de la superficie de *T. grandis* con solventes polares como acetona, Sin embargo, Garro [44] identificó que hay diferencias significativas en la humectabilidad de la madera de *T. grandis* dependiendo de la orientación del corte, madera de corte radial posee mejor humectabilidad que madera de corte tangencial cuando se emplean solventes de origen alcohólico para activar la superficie a encolar. Por otra, parte, Lopes et al. [45] reportaron que el duramen de *T. grandis* presenta menor propiedad de humectabilidad que la albura, este se puede tener en cuenta dado que cada pieza de madera aserrada con la que se construyó cada capa del CLT presentó combinación de albura y duramen.

Comparando el comportamiento del CLT/*G. arborea* en la resistencia a cortante (3,75 MPa con tratamiento EPI-lijado, cuadro 1) con otros materiales contralaminados, Kramer et al. [46] obtuvieron con CLT/Hybrid poplar un esfuerzo en cortante de 3,1 MPa. Por otra parte, Tenorio et al. [32] encontraron que el esfuerzo en cortante para tableros contrachapados de *G. arborea* fue de 3,6 MPa, valores de esfuerzo en cortante muy similares al obtenido en el presente estudio con el CLT/*G. arborea* (Cuadro 3).

Existen diferencias estadísticas significativas en el comportamiento mecánico al esfuerzo en cortante entre CLT/*T. grandis* y CLT/*G. arborea*, por influencia de la especie, adhesivo y tratamiento aplicado. Erniwati et al. [47] menciona que factores como la alta densidad y la cantidad de extractivos en la madera afectan negativamente la humectabilidad de la madera. Sin embargo, la figura 3 muestra que la densidad promedio del CLT de *T. grandis* es superior a la del CLT de *G. arborea* y el valor promedio para esfuerzo de cortante para CLT/*G. arborea* es inferior a CLT/*T. grandis*. De acuerdo con Yusoh et al [48], la resistencia en el esfuerzo cortante en la línea de cola es mayor con el incremento de la densidad de la madera, En este caso la madera de *T. grandis* tiene mayor densidad que la *G. arborea*, por lo que se tiene mayor resistencia en la línea de cola (cuadro 3).

El tratamiento con acetona mejora la humectabilidad de la madera de *T. grandis*, mientras que no fue tan efectivo para la madera de *G. arborea*, esto se puede asociar a la estructura química de los extractivos de cada especie y su afinidad química con la acetona. Razón por la cual, la acetona solo mejoró la adhesión en el CLT de *T. grandis* obteniendo mayor resistencia mecánica en la línea de cola comparada con el CLT con madera de *G. arborea* (Cuadro 1), esto concuerda con lo expuesto por Erniwati et al. [47]. Otros tratamientos como radiación con plasma [49] y ultravioleta [50] mejoran la humectabilidad de la madera, pero que su aplicación ha sido poco estudiada en maderas de plantación de zonas tropicales.

El esfuerzo máximo en compresión paralela para CLT/*T. grandis* fue de 40,8 MPa y por su parte para CLT/*G. arborea* fue de 25,4 MPa (cuadro 3). Mohd Yusof et al. [51] encontraron para CLT/*Acacia mangium* un esfuerzo máximo en compresión paralela de 28,9 MPa. Por otra parte, Oh et al. [52] obtuvieron 38,7 MPa en compresión paralela para CLT/*Larix kaempferi*. Comparando el comportamiento en compresión paralela del CLT/*G. arborea* y CLT/*T. grandis* de este estudio, son comparables con otros resultados reportados en literatura, e indican que están dentro de los resultados típicos para este tipo de material, a pesar de ser comparados con CLT y otros productos manufacturados con otras especies y adhesivos diferentes.

Algunas normas europeas [12], [53] establecen requisitos, procedimientos para pruebas mecánicas, y valores de referencia para productos de madera encolada como el Glulam. Sin embargo, al estándar ANSI/APA PRG 320 CLT [13] y CLT Handbook [54] establecen algunos rangos para valores de resistencia en propiedades mecánicas para madera contralaminada CLT (cuadro 4).

De conformidad con la comparación mostrada en el cuadro 3 se puede indicar que los CLT/*T. grandis* y *G. arborea* de este estudio cumplen los requerimientos y características de resistencia para los esfuerzos de compresión y cortante, así como también la densidad

(figura 2). Lo cual indica que las especies de plantación utilizadas en este estudio pueden posicionarse como materia prima con altas prestaciones para paneles comerciales tipo CLT.

Hay una tendencia general que a mayor espesor del CLT aumenta su rigidez mecánica aumentando su valor de MOE, Sikora et al. [55], indican que existe una buena correlación entre el espesor del CLT y las propiedades de resistencia y rigidez del panel. Considerando que el estándar ANSI/APA GPR 320 CLT clasifica por grados de acuerdo con un rango de espesor del CLT que varía entre 105~232 mm, mientras que el CLT construido en este estudio tuvo un espesor de 51 mm. Por lo que los resultados obtenidos para el MOE de este estudio no alcanzaron los requerimientos solicitados por el estándar ANSI/APA GPR 320 CLT.

Conclusión

La manufactura de tableros CLT en configuración de tres capas fue posible usando las especies de plantación, *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*. Lo que permitió caracterizar propiedades físico-mecánicas del material con diferentes tratamientos y adhesivos. Se ha discutido que la densidad influye en las propiedades mecánicas de un material, siendo la madera de *Tectona grandis* más densa que la madera de *Gmelina arborea*, los resultados de propiedades mecánicas para los CLT de este estudio confirman esa relación. Por lo tanto, aplicando ambos adhesivos (EPI y PVA-na) y ambos tratamientos de activación superficial (lijado y acetona) el tablero CLT con *T. grandis* obtuvo el mejor comportamiento mecánico comparado con el tablero CLT con madera de *G. arborea*. En particular el mayor valor de MOE obtenido para CLT/*T. grandis*, se alcanzó con el adhesivo EPI y tratamiento de lijado, mientras que para los esfuerzos de cortante y compresión se obtuvo con el adhesivo EPI y tratamiento con acetona. Para el CLT con *G. arborea* el valor mayor de resistencia en MOE, cortante y compresión se alcanzó con el adhesivo EPI y tratamiento de lijado en todos los casos. A pesar de que el tablero CLT con *T. grandis* supera en propiedades mecánicas al tablero CLT con *G. arborea*, es importante indicar que el tablero CLT con madera de *G. arborea* de este estudio cumple con los rangos de propiedades mecánicas (esfuerzo en cortante, compresión paralela y densidad) establecidos por el estándar internacional ANSI/APA PRG 320 CLT.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica

por el apoyo financiero al proyecto VIE-1401-085, a la Dirección de Posgrado y Programa de Maestría en Ciencias Forestales por el financiamiento de beca y a las empresas NovelTeak Costa Rica S.A., Maderas S&Q 2005 S.A. y WASA por proveer las materias primas de este estudio.

Referencias

- [1] Camino R, JP Morales La teca en América Latina, en Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades, R Camino, JP Morales, Eds. Turrialba, CATIE, 2013, pp30-42
- [2] R. Moya, “*Gmelina arborea* en Costa Rica”, Bois et forêts des tropiques, vol. 279, no. 1, pp. 47-57, 2004.
- [3] F. Rojas, “Principales especies forestales en Costa Rica” (Nota técnica), Revista Forestal Mesoamericana Kurú, vol. 2, no. 4, pp. 5-4, 2005
- [4] F. Rojas-Rodríguez, D. Arias-Aguilar, R. Moya-Roque, A. Meza-Montoya, O. Murillo-Gamboa y M. Arguedas, Manual para productores de melina *Gmelina arborea* en Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2004.
- [5] R. Moya-Roque y L. Leandro-Zúñiga, “Melina: *Gmelina arborea* Kunth. Verbenaceae. Ficha técnica 5”, en Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. R. Moya, [et al]. (en línea), Revista Forestal Mesoamericana Kurú, vol. 7, n° 18-19, pp. 87-101, 2010.
- [6] R. Moya-Roque, F. Muñoz-Acosta y A. Berrocal-Jiménez, “Teca: *Tectona grandis* L.f. Verbenaceae. Ficha técnica 7, en Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. R. Moya R., [et al]. (en línea), Revista Forestal Mesoamericana Kurú, vol. 7, n° 18-19, pp. 117-131, 2010
- [7] G. González-Trejos y R. Serrano-Montero, “Propiedades y utilización de la madera de melina (*Gmelina arborea* Roxb) procedente de árboles plantados en Costa Rica”, Revista Forestal Mesoamericana Kurú, vol. 1, n° 1, pp. 77-86, 2012.
- [8] M. Jele, D. Varevac y V. Raj, “Cross-laminated timber (CLT) – a state of the art report”, GRAĐEVINAR, vol. 70, pp. 75-95, 2018.
- [9] E. Karacabeyli y B. Douglas, CLT handbook: Cross-Laminated Timber. US Edition, FPIInnovations, 2012.
- [10] O. Horx-Strathern, C. Varga y G. Guntchnig, The future of Timber Construction: CLT-Cross Laminated Timber. A study about changes, trends, and technologies of tomorrow, Zukunftsinstitut GmbH, Vienna, 2017.
- [11] E. Borgström y J. Fröbel, The CLT Handbook. CLT structures-Facts and planning, Swedish Wood, Estocolmo, Suecia, 2019.
- [12] Asociación Española de Normalización (UNE), UNE-EN 16351:2016. Estructuras de madera. Madera contralaminada. Requisitos, Asociación Española de Normalización (UNE), Madrid, 2016.

- [13] The Engineered Wood Association (APA)-American National Standards Institute (ANSI), ANSI/APA PRG 320-2019: Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber, The Engineered Wood Association (APA)-American National Standards Institute (ANSI), Georgia, 2019.
- [14] C. Tenorio-Monge, R. Moya-Roque y M. Carranza, "Vigas tipo I para la construcción civil fabricadas con madera de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica", *Revista Tecnología en Marcha*, no. especial: Día internacional de la mujer, pp. 50-59, 2014.
- [15] R. Moya-Roque y G. Gonzáles-Beltrán, "Esfuerzos admisibles de diseño por grado estructural para nueve maderas de plantación de Costa Rica", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 11, n° 26, pp. 1-11, 2013.
- [16] G. Gonzáles, R. Moya, F. Monge, R. Córdoba y J. Coto, "Evaluating the strength of finger-jointed lumber of *Gmelina arborea* in Costa Rica", *New Forests*, vol. 28, pp. 319-323, 2004.
- [17] R. Moya-Roque, C. Tenorio-Monge, M. Carranza-Solano, M. Saenz-Muñoz, Á. Navarro-Mora y V. Paniagua, "Diseño, resistencia y valores estructurales de cerchas prefabricadas con madera de plantación", Proyecto de Investigación (VIE-1401055). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2016.
- [18] R. Moya-Roque, C. Tenorio-M, D. Camacho-C, M. Carranza y F. Muñoz-A, "Determinación de los valores de esfuerzos estructurales para vigas de madera perfil Tipo I (Documento II)", Informe final de proyecto de investigación. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2011.
- [19] R. Moya-Roque, y G. Gonzáles-Trejos, "Las vigas laminadas estructurales: aspectos a considerar para su fabricación en Costa Rica", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 3, n° 8, pp. 70-76, 2006.
- [20] A. Berrocal, R. Moya, M. Rodríguez-Solis, F. Muñoz, "Drying of plantation-grown *Tectona grandis* wood with daily-controlled drying rate schedules", *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 29, no. 1, pp. 69-79, 2017. <http://www.jstor.org/stable/44028276>
- [21] A. Barrantes, S. Ugalde, "Usos y aportes de la madera en Costa Rica: Estadísticas 2018 & precios 2019", Oficina Nacional Forestal, agosto, p. 44, 2018.
- [22] T. Leiva-Leiva, R. Moya, A. Navarro-Mora, "Model calibration of prefabricated timber wall frames made of *Hieronyma alchorneoides* and *Gmelina arborea* timber using nail and screw fasteners", *Drvna Industrija*, vol. 69, no. 1, pp. 3-12, 2018. doi: 10.5552/drind.2018.1722
- [23] Y. Gong, F. Liu, Z. Tian, G. Wu, H. Ren, C. Guan, "Evaluation of mechanical properties of Cross-Laminated Timber with different Lay-ups using Japanese Larch", *Journal of Renewable Materials*, vol. 7, no. 10, pp. 941-956, 2019. doi: 10.32604/jrm.2019.07354
- [24] F. Muñoz, R. Moya, "Effect of urea formaldehyde resin modified with nano-clay on physical and mechanical properties of particleboards manufactured with wood from plantation species", *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, vol. 12, no. 5, pp. 1-11, 2018. <https://doi.org/10.1166/jbmb.2018.1796>
- [25] F. Muñoz, R. Moya, "Effect of nanoclay-treated UF resin on the physical and mechanical properties of tablero contrachapado manufactured with wood from tropical fast growth plantations", *Maderas Ciencia & Tecnología*, vol. 20, no. 1, pp. 11-24, 2018. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005001202>
- [26] ASTM International, D1037-12, "Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [27] ASTM International, ASTM D905-08, "Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [28] Asociación Española de Normalización (UNE), UNE-EN 408, "Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas", Asociación Española de Normalización (UNE), Madrid, 2011.
- [29] L. Karlinasari, M. E. Wahyuna, N. Nugroho, "Non-destructive ultrasonic testing method for determining bending strength properties of *Gmelina* wood (*Gmelina arborea*)", *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 20, n° 2, pp. 99-104, 2008.
- [30] R. Moya Roque, F. Muñoz Acosta y A. Berrocal Jiménez, "Teca: *Tectona grandis* L.f. Verbenaceae. Ficha técnica 5. In Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. R. Moya., [et al]. (en línea)", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 7, n° 18-19, pp. 117-131, 2010.
- [31] J. Rivero Moreno y R. Moya Roque, "Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Tectona grandis* Linn. F. (teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 3, n° 9, pp. 50-63, 2006.
- [32] C. Tenorio, R. Moya y F. Muñoz, "Comparative study on physical and mechanical properties of laminated veneer lumber and plywood panels made of wood from fast-growing *Gmelina arborea* trees", *Journal of Wood Science*, vol. 57, pp. 134-139, 2011.
- [33] S. Aicher, Z. Ahmad y M. Hirsch, "Bond line shear strength and wood failure of European and tropical hardwood glulam", *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 76, pp. 1205-1222, 2018.
- [34] A. Chiniforush, A. Akbarnezhad, H. Valipour y S. Malekmohammadi, "Moisture and temperature induced swelling/shrinkage of softwood and hardwood glulam and LVL: An experimental study", *Construction and Building Materials*, vol. 207, pp. 70-83, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.114
- [35] W. B. P. I. (WBPI), Density Wood Based Panels International (WBPI), 26 October 2016. [En línea]. Available: <http://www.wbpionline.com/features/density-5649027/>. [Último acceso: 2019 diciembre 01].
- [36] S. Chauhan y P. Aggarwal, "Effect of moisture sorption state on transverse dimensional changes in wood", *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 62,

- pp. 50-55, 2004.
- [37] Y. Han, S.-Y. Park, H. Chung, Y.-S. Chang y H. Yeo, "Dimensional changes of cross-laminated specimens produced under different conditions due to humidity variation", *BioResources*, vol. 14, n° 2, pp. 4035-4046, 2019.
- [38] S. Chauhan y A. Sethy, "Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity", *Maderas, Ciencia y tecnología*, vol. 18, n° 2, pp. 373-382, 2016.
- [39] FC. Beall, "Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties", *Wood Science and Technology* 36:197-212, 2002. doi: 10.1007/s00226-002-0138-4
- [40] KO. Olaoye, AO. Oluwadare, EA. Adelusi; JK. Abiola, "View of Acoustic Properties of *Gmelina arborea* (Roxb.) Wood", *Journal of Materials Science Research and Reviews*, vol. 4, no. 1, pp.1-9, 2019.
- [41] KO. Olaoye, AO. Oluwadare, "Comparative assessment of acoustic properties of talking drums made from hourglass shell from different geometric shapes of *Gmelina arborea* (Roxb.) wood", *International Wood Products Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 20-26, 2020. <https://doi.org/10.1080/20426445.2019.1706881>
- [42] T. Shaji, S. Somayaji, MS. Mathews, "Ultrasonic pulse velocity technique for inspection and evaluation of timber", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 12, no. 2, pp.180-185, 2000. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:2(180)
- [43] R. Moya-Roque, "Rendimiento y evaluación de adherencia en madera de Teca (*Tectona grandis*) para la fabricación de veleros". Informe de Práctica de Especialidad, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, CR, 1990.
- [44] M. Garro-Chavarría, "Efecto del alcohol y el hidróxido de sodio sobre la humectabilidad de la superficie de la madera de *Tectona grandis* L.F. de plantaciones de rápido crecimiento", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 6, n° 17, pp. 42-50, 2009.
- [45] J. Lopes, R. A. Garcia y A. M. Nascimento, "Wettability of the surface of heat-treated juvenile teak wood assessed by drop shape analyzer", *Maderas, Ciencia y Tecnología*, vol. 20, n° 2, pp. 249-256, 2018.
- [46] A. Kramer, A. Barbosa y A. Sinha, "Viability of hybrid poplar in ANSI approved cross laminated timber applications", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, n° 7, 2013.
- [47] H. Erniwati, Y. Sudo, H. Yusram, N. Naresworo, "Pengembangan Papan Komposit Berlapis Anyaman Bambu dari Jenis Kayu Cepat Tumbuh dengan Perekat Poliuretan", *Disertación*, Universidad IPB, Bogor, Indonesia, 2008. <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/41130>
- [48] AS. Yusoh, PMd. Tahir, MK. Anwar Uyup, SH. Lee, H. Husain, MO. Khaidzir, "Effect of wood species, clamping pressure and glue spread rate on the bonding properties of cross-laminated timber (CLT) manufactured from tropical hardwoods", *Construction and Building Materials*, vol. 273, no. 1, pp. 121721, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.12172
- [49] Z. Sun, G. Du y L. Huang, "Effect of microwave plasma treatment on surface wettability of common teak wood", *Frontiers of Forestry in China*, vol. 4, no. 2, pp. 249-254, 2009. DOI: 10.1007/s11461-009-0028-0
- [50] M. Gindl, G. Sinn y S. Stanzl-Tschegg, "The effects of ultraviolet light exposure on the wetting properties of wood", *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 20, n° 8, pp. 817-828, 2006
- [51] N. Mohd Yusof, P. L. S. Md Tahir, M. Asim Khan y R. Suffian James, "Mechanical and physical properties of Cross-Laminated Timber made from *Acacia mangium* wood as function of adhesive types", *Journal of Wood Science*, vol. 65, n° 20, pp. 1-11, 2019. DOI <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1799-z>
- [52] JK. Oh, JJ. Lee y JP. Hong, "Prediction of compressive strength of cross-laminated timber panel", *Journal of Wood Science*, vol. 61, pp. 28-34, 2015.
- [53] Asociación Española de Normalización (UNE), *Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada*, Asociación Española de Normalización (UNE), Madrid, 2017.
- [54] CLT Handbook Cross Laminated Timber Special Publication SP-529E. Eds. Erol Karacabeyli & Brad Douglas. Co-published by U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Binational Softwood Lumber Council (BSLC), 572 pp. 2013.
- [55] KS. Sikora, DO. McPolin, AM. Harte, "Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear", *Construction and Building Materials*, vol. 116, no. 1, pp. 141-150, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145