

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES

**DESPIECE COMERCIAL POTENCIAL DE TECA (*Tectona grandis*
L.f) CLONAL A LA EDAD DE 10 AÑOS EN DIFERENTES
CALIDADES DE SITIO, EN ZONA NORTE DE COSTA RICA**

Tesis con formato artículo científico para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en
Ciencias Forestales con énfasis en Comercio de Productos Forestales.

Presentado por
Katherine Vanessa Barrantes Madrigal

Campus Omar Dengo
Heredia, Costa Rica
2020

Despiece comercial potencial de teca clonal a la edad de diez años en diferentes calidades de sitio, en zona norte de Costa Rica

Trabajo de graduación bajo la modalidad de tesis con formato artículo científico.
Licenciatura en Ingeniería en Ciencias Forestales con énfasis en comercio de productos forestales.

Miembros del tribunal examinador:

M.Sc. Luis Gustavo Hernández Sánchez
Representante del decano de la Facultad

Ph.D. Sergio Molina Murillo
Representante Dirección EDECA

M.Sc. Rafael Murillo Cruz
Director del trabajo

M.Sc. Carlos Ávila Arias
Lector del trabajo

M.Sc. Marielos Alfaro Murillo
Lectora del trabajo

Bach. Katherine Vanessa Barrantes
Madrigal
Postulante del trabajo

Dedicatoria

Definitivamente, las personas a las que les dedico este trabajo son mis padres: Ana Ligia Madrigal y Jaime Barrantes, quienes han dado todo su amor, apoyo incondicional y sacrificio siempre, para alentarme a lograr mis metas no pude ser más bendecida, sin ellos no hubiera sido posible.

A mis hermanos Jimmy y Brayan, por ser los mejores del mundo, excelentes seres humanos.

A mi pareja Adrián Campos, por apoyarme y estar conmigo en los momentos difíciles y toda su paciencia en este proceso, a quien amo profundamente.

Y, muy en especial, a mi pequeño amor, a mi bebé, a mi amado hijo Liam, quien llegó para ser mi mayor inspiración y por quien siempre prometo dar todo mi esfuerzo.

Agradecimientos

Al culminar esta etapa de mi vida profesional, quiero dar gracias a Dios por no abandonarme nunca y permitirme concluir.

A mi familia, Barrantes Madrigal, por el apoyo incondicional que me han brindado durante este proceso, y en todos los aspectos de mi vida.

A mi tutor de tesis, Rafael Murillo Cruz, por siempre estar dispuesto a enseñarme, motivarme y exigir lo mejor de mí, de quien aprendí que nada es fácil, pero al final el esfuerzo vale la pena.

De manera muy en especial, a mi lector Carlos Ávila Arias, gran profesional a quien admiro muchísimo, siempre le estaré agradecida, por tanto apoyo, y ser pieza clave en mi formación profesional desde tiempo atrás.

A William Fonseca por su gran apoyo en la revisión de este documento.

A Marielos Alfaro lectora del trabajo por su ayuda.

A mis colegas, Moisés, Isaac, Guillermo, Marilyz, Alejandro, Andrés, Ana Barquero, Rodrigo, Maikol, Luis, a quienes siempre voy a agradecer su ayuda durante el trabajo de campo.

Índice General

Contenido	Página
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos	iii
Índice de cuadros.....	vi
Índice de figuras.....	vii
RESUMEN GENERAL	8
GENERAL ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN GENERAL	10
REFERENCIAS	12
ARTÍCULOS COMPLETOS	16
Capítulo I: Tabla de volumen comercial para teca clonal en diferentes índices de sitio en la Zona Norte de Costa Rica	16
Resumen	16
Abstract	16
1. Introducción	17
2. Metodología	18
2.1 Área de estudio	18
2.2 Determinación del índice de sitio (IS).....	19
2.3 Selección de árboles para calcular el volumen	20
2.4 Procesamiento de los datos.....	20
2.5 Desarrollo, selección y comparación de modelos	20
3. Resultados.....	22
3.1. Índices de sitio	22
3.2. Modelos para estimar volumen por Índice de sitio	22
3.3. Comparación de los modelos entre IS y con los reportados en la literatura	24
3.4. Tabla de volumen.....	25
4. Discusión	26
4.1. Índice de sitio	26
4.2. Modelos para estimar volumen por índice de sitio	26

4.3. Comparación de modelos	28
4.4. Tabla de volumen.....	28
5. Conclusiones	29
6. Agradecimientos	29
7. Referencias.....	29
Capítulo II: Despiece comercial para <i>Tectona grandis</i> L.f clonal de diez años en diferentes índices de sitio, Zona Norte, Costa Rica.	33
Resumen	33
Abstract	34
1. Introducción	34
2. Materiales y métodos.....	36
3. Resultados.....	37
3.1. Estado silvicultural del ecosistema	37
3.2. Tabla de despiece	38
3.3. Distribución de los productos por IS	41
4. Discusión de resultados.....	42
4.1. Estado silvicultural del ecosistema	42
4.2. Tabla de despiece	43
4.3. Distribución de los productos por IS	44
5. Conclusiones	45
6. Referencias.....	46
CONCLUSIONES GENERALES.....	49

Índice de cuadros

Capítulo I. Tabla de volumen comercial para teca clonal en diferentes índices de sitio, Zona Norte, Costa Rica.

Contenido	Página
Cuadro 1. Estadísticos de las variables evaluadas en árboles de <i>Tectona grandis</i> por IS	22
Cuadro 2. Modelos seleccionados para estimación de volumen comercial con corteza. Todos los modelos poseen una $P < 0.001$	22
Cuadro 3. Tabla de volumen comercial con corteza ($m^3 * \text{árbol}^{-1}$) para teca clonal de diez años para el índice de sitio 27, 24 y 21; en zona norte, Costa Rica.	25

Capítulo II. Despiece comercial por producto para teca (*Tectona grandis* L.f) clonal de diez años en diferentes índices de sitio, Zona Norte, Costa Rica.

Contenido	Página
Cuadro 1. Estadísticos de las variables evaluadas en árboles de <i>Tectona grandis</i> por IS.	37
Cuadro 2. Despiece comercial de <i>Tectona grandis</i> a los diez años en índice de sitio 27, en Zona Norte de Costa Rica.	38
Cuadro 3. Despiece comercial de árbol de <i>Tectona grandis</i> a los diez años en índice de sitio 24, en Zona Norte de Costa Rica.	39
Cuadro 4. Despiece comercial de árbol de <i>Tectona grandis</i> a los diez años en índice de sitio 21, en Zona Norte de Costa Rica.	40

Índice de figuras

Capítulo I. Tabla de volumen comercial para teca clonal en diferentes índices de sitio, Zona Norte, Costa Rica.

Figura 1. Ubicación de las plantaciones de teca evaluadas, Pocosal, San Carlos, Costa Rica.	19
Figura 2. Cubicación de árbol.....	20
Figura 3. Modelos para los IS27, 24 y 21: a) gráfico para el modelo ajustado b) gráfico de los valores predichos vs observados.	24
Figura 4. Comparación del modelo ajustado para volumen comercial con corteza de teca con otros modelos para volumen comercial en Costa Rica.....	24

Capítulo II. Despiece comercial por producto para teca (*Tectona grandis* L.f) clonal de diez años en diferentes índices de sitio, Zona Norte, Costa Rica.

Figura 1. Distribución diamétrica de los árboles por índice de sitio.....	38
Figura 2. Distribución porcentual del volumen por tipo de producto en <i>Tectona grandis</i> a los diez años de edad.....	42

Despiece comercial potencial de teca clonal a la edad de diez años en diferentes calidades de sitio, en zona norte de Costa Rica

RESUMEN GENERAL

Resulta esencial cuantificar el volumen de madera y de los productos comercializables a obtener del rodal. El objetivo de este estudio consiste en elaborar tablas de volumen comercial y obtener el despiece comercial por producto en distintas calidades de sitio, para plantaciones clonales de *Tectona grandis*. A 266 árboles (119 en IS 27, 119 en IS 24 y 28 en IS 21, se le midió el diámetro a 1,3 m y cada 1,5 m hasta la altura total. El volumen del árbol se obtuvo mediante la sumatoria de cada sección cubicada mediante Smalian. Para cada índice de sitio, se ajustaron modelos por el método de mínimos cuadrados ordinarios, utilizando Statgraphics Centurion XVI. Se verificó la autocorrelación de los residuos mediante Durbin-Watson. La selección del modelo se basó en la sumatoria de los parámetros estadísticos normalizados. Para el despiece comercial se evaluaron los siguientes productos: aserrío grueso (≥ 30 cm de diámetro), aserrío delgado (< 30 cm ≥ 20 cm), tarima (< 20 cm ≥ 12 cm), leña (< 12 cm ≥ 5 cm) y los residuos < 5 cm. Los modelos seleccionados tuvieron ajustes aceptables ($R^2 \geq 94$ %), bajos errores de estimación (< 3 %), y practicidad por utilizar el diámetro normal (DAP) como única variable predictora, tornándose en una herramienta útil para conocer, rápido y preciso, el volumen comercial. En el despiece comercial en el IS 27, diámetros < 13 cm corresponde a leña (88-40 %), desde 13 cm hasta 24 cm, corresponde a tarima, en adelante domina el aserrío delgado, mientras > 28 cm, el aserrío grueso y delgado (representan el 75% del volumen comercial). Las tablas de volumen y el despiece comercial por árbol, son herramientas útiles para la cuantificación del volumen comercial y la distribución potencial por tipo de producto, en teca clonal de diez años, en zona norte de Costa Rica.

Palabras clave: ecuaciones de volumen; tabla de volumen; despiece comercial, *Tectona grandis*, Costa Rica

GENERAL ABSTRACT

It is essential to reliably quantify and predict the volume of timber and marketable products to be obtained from the stand, to assist in the management and planning of forest production. This study aimed to develop commercial volume tables and commercial assortment by product in different qualities of site, for clonal plantations of *Tectona grandis*. A sample of 263 trees (119 in IS 27, 120 in IS 24 and 28 in IS 21), the stump diameter was measured, 1.3 m from the ground and every 1.5 m to the total height. The volume of each section was obtained with the Smalian formula and the volume of the tree by the sum of each section. For each site index, models were adjusted by the method of ordinary least squares with the Stat graphics Centurion XVI statistical package. The self-correlation of the residues was verified using Durbin-Watson. The model selection was based on the sum based on the standardization of the statistical parameters evaluated. For the elaboration of the assortment table the following products were evaluated: thick sawmill (≥ 30 cm in diameter), thin sawmill (< 30 cm ≥ 20 cm), pellets (< 20 cm ≥ 12 cm) and firewood (< 12 cm ≥ 5 cm) and residues < 5 cm. The selected models had good adjustments ($R^2 \geq 94\%$), low estimation errors ($< 3\%$), very practical for using only the normal diameter (DAP) as a predictor variable and are an important tool to quantify, quickly and accurately, the commercial volume with clonal teak bark up to 15 cm in diameter. The volume of the product with the highest value increased as the tree diameter increased and the volume of the products with the lowest value decreased. In IS 27, wood with diameter < 13 cm corresponds to firewood (88-40%), from 13 cm to 24 cm, corresponds to pallet, from now on dominates the thin sawmill, diameter > 28 cm the thick and thin sawmill (75% of the commercial volume). The five products evaluated are present in trees of IS 27 and IS 24; in IS 21 no wood was registered for this product. The volume and commercial assortment tables represent an important tool in the quantification and distribution of the potential commercial volume by type of product in 10-year-old clonal teak, in northern Costa Rica.

Keywords: volume equations; volume table; commercial assortment, *Tectona grandis*, Costa Rica.

INTRODUCCIÓN GENERAL

Las plantaciones forestales se han convertido en la principal fuente de madera local en Costa Rica, el 77.5% del total, proviene de estas (Oficina Nacional Forestal (ONF, 2018); parte importante del desarrollo exitoso de las plantaciones es su alta productividad, la cual depende, en gran medida, de la óptima planificación de la masa (Aguiar, 2019; Da Rocha, 2018). La teca (*Tectona grandis* L.f) es una de las especies maderables más importantes del planeta, se estima 6.8 millones de hectáreas plantadas en el mundo (Madeiros, Nogueira, Siqueira y García, 2018). En Costa Rica es la especie forestal más utilizada en la reforestación con fines comerciales con 47 167 ha establecidas (Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2015), debido principalmente a las excelentes propiedades de durabilidad, calidad de la madera y gran variedad de usos (Ladrach, 2009; Mora y Hernández, 2007). Lo anterior ha propiciado su creciente demanda en el mercado y la consecuente expansión del cultivo intensivo con dicha especie (Fallas, 2017; Pérez y Kanninen, 2007).

Los mejores sitios para el establecimiento de la especie se ubican en terrenos de menos de 1000 m s.n.m., en suelos con pendientes menores a 30 %, mientras que suelos poco profundos, arcillosos, planos, con un bajo contenido de calcio, magnesio y fósforo, limitan el buen desarrollo de la especie, así como el alto contenido de hierro (Fe) y de aluminio (Al) intercambiable puede ser limitante (Armijos, 2013; Molina, 2018). En la zona norte de Costa Rica se registran rendimientos de $57 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ a los diez años (González, 2014).

Usualmente la madera de teca se exporta en rollo a países asiáticos principalmente (Oficina Nacional Forestal (ONF, 2018); Sin embargo, a nivel nacional existe potencial para comercializar distintos productos de acuerdo a sus dimensiones.

La productividad de una especie en un sitio se mide a través del índice de sitio (IS), que está asociado a variables climáticas y edáficas, que condicionan su crecimiento y rendimiento. Para definir el IS, en general, se utilizan indicadores intrínsecos al rodal, siendo la altura dominante la más apropiada debido a su baja dependencia de la densidad, a los tratamientos silviculturales y a la gran correlación con la producción (Dantani *et al.*, 2019). Diversos autores apuntan, que el rendimiento de

una plantación es afectado por la calidad de sitio (Armijos, 2013; Bermejo *et al.*, 2004, Camacho *et al.*, 2013), de ahí la importancia de su determinación para predecir con la mayor confiabilidad posible, la futura producción del sistema establecido.

Kohler *et al.*, (2013), apuntan que, mediante la planificación estratégica aplicada al manejo forestal, es posible maximizar los beneficios económicos de sistemas de producción forestal, por tanto, el objetivo de las prácticas de manejo estaría dirigido hacia este enfoque, por ejemplo, el uso de material genético con algún grado de selección para incrementar el rendimiento volumétrico comercial (Badilla y Murillo, 2017). Adicionalmente, la selección de sitios adecuados para la especie, tiene un efecto significativo en el crecimiento en altura, en diámetro y en la calidad de la madera, por lo tanto, la productividad del sitio afecta el volumen comercial por tipo de producto (Armijos, 2013, Cometti, 2018).

Previamente a la aplicación de las distintas prácticas silvícolas, se necesitan herramientas técnico-científicas de fácil aplicación que permitan planificar los procesos de producción de manera estratégica (Da Rocha, 2018); de tal modo, aumenta la precisión de las predicciones (Furtado *et al.*, 2013) y con ello contribuye a mejorar la rentabilidad de los negocios (Armijos, 2013; Tewari y Singh, 2018). Mediante modelos matemáticos se pueden generar ecuaciones de predicción de volumen (Ureigho y Akpobome, 2018). Las ecuaciones o modelos matemáticos son la base para desarrollar tablas de volumen, a través de las cuales se puede obtener el volumen de madera de un árbol, a partir de su altura y/o diámetro (Armijos, 2013, Camacho *et al.*, 2013; Sianturi, 2015).

Por otra parte, el despiece comercial del árbol es el término utilizado para resumir la cantidad de madera comercializable de un árbol, basado en una lista de múltiples productos a obtener según sus dimensiones (Aguiar, 2019; Da Rocha, 2018; Mora y Hernández, 2007). A partir del despiece comercial, es posible agregar valor a la madera, diversificando los sectores de mercado disponibles para acceder (Kohler *et al.*, 2013).

Por ello, varios investigadores han ajustado funciones matemáticas para estimar la producción en volumen de teca (Armijos, 2013; Cerqueira *et al.*, 2017; Telles, 2018; Tewari y Singh, 2018; Ureigho y Akpobome, 2018,) y para Costa Rica (Bermejo *et al.*, 2004; Camacho y Madrigal, 1997; Fallas, 2017; Gómez y Mora, 2003; Pérez y Kaninnen, 2007). De igual forma, muchos estudios han investigado cómo se distribuyen los distintos productos comerciales de madera en el árbol para distintas especies (Kohler, 2013; Martinelli, 2009; Pigatto, 2012), específicamente para teca (Carvalho, 2014; Cometti, 2018; Da Rocha, 2018; Mora y Hernández, 2007).

Debido a la importancia de cuantificar el volumen y el despiece comercial por producto, con el fin de obtener información que respalde las actividades silviculturales óptimas para mejorar y garantizar la productividad de los negocios forestales con teca (Fallas, 2017) y en ausencia de esta información para *T. grandis* producida a nivel clonal, esta investigación se planteó como objetivo realizar el despiece comercial potencial de teca clonal a la edad de diez años en diferentes calidades de sitio, en zona norte de Costa Rica. Para lo cual se desarrollaron dos capítulos para cumplir con el objetivo propuesto: el primero consistió en elaborar tablas de volumen comercial, a partir del ajuste y selección de ecuaciones matemáticas; y en el segundo, se elaboró una tabla del despiece comercial por producto del volumen comercial, ambas tablas del volumen comercial con corteza de una sola entrada (DAP), por clase diamétrica en distintas calidades de sitio. El primer artículo se elaboró bajo las normas de la Revista de Ciencias Ambientales, entre tanto, el segundo artículo, se realizó con base en las normas de publicación de la Revista Forestal Mesoamericana Kurú.

REFERENCIAS

- Aguiar, M. (2019). *Sortimentos de eucalipto na Região centro-oeste de Mato Grosso*. (Tesis de maestría). Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá. 104 p.
- Armijos, D. (2013). *Construcción de tablas volumétricas y cálculo de factor de forma (ff.) para dos especies, teca (Tectona grandis) y melina (Gmelina arborea) en tres plantaciones de la empresa Reybanpac ca. En la provincia de los Ríos*. (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.

- Badilla, Y. y Murillo, O. (2017). Ganancia realizada en plantaciones clonales de teca en Costa Rica. En: I Simposio Internacional GENFORES. 26-27 enero, 2017. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Bermejo, I., Cañellas, I., San Miguel, A. (2004). Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* (189), 97-110. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.031>
- Camacho, P., y Madrigal, T. (1997). Ecuaciones de volumen preliminares para *Tectona grandis*. En 3. Congreso Forestal Nacional. 27-29 agosto 1997. No. 634.9097286063 C749 1997. (pp. 131–133). San José, Costa Rica.
- Camacho-Linton, A., Ramírez-Maldonado, H., de los Santos-Posadas, H. M., y Zamudio-Sánchez, F. J. (2013). Tablas de rendimiento para teca (*Tectona grandis* L.) en el Estado de Campeche. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19), 92–101.
- Cerqueira, C., Dos Santos, G., De Jesus, L., Mora, R., Marques, G., Salles, T., y Brianezi, D. (2017) Modelagem da altura e volume de *Tectona grandis* LF na mesorregião Nordeste do Pará. *Nativa: Pesquisas Agrárias e Ambientais*, 5(Especial), 606-611. <https://doi.org/10.5935/2318-7670.V05nespa22>
- Cometti., C. (2018). *Estruturação da produção de Tectona grandis Linn f. em Mato Grosso, Santa Maria*. (Tesis de doctorado). Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria. 225 p.
- Da Rocha., K. (2018). *Afilamento e otimização de sortimentos de Tectona grandis linn f. para maximização do volume e da renda, Santa Maria*. (Tesis de doctorado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 207 p.
- Dantani, A., Shamaki, S., Gupa, M., Sa'idu, M., Mukhtar, R., Umar, M. y Abubakar, A. (2019). Allometric Models for Estimating Site Index of Teak (*Tectona grandis Linn F.*) in Kanya Forest Plantation, Kebbi State, Nigeria." *Asian Journal of Environment & Ecology*, 10(1), 1-7. <https://doi:10.9734/ajee/2019/v10i130110>
- De Carvalho, L. (2014). *Modelagem do afilamento de fuste com casca, sem casca, cerne e medula de Tectona grandis L.f. (teca) na otimização de multiprodutos*. (Tesis de Maestría). Universidade de Brasília, Brasília. 31p.
- Fallas, J. (2017). *Funciones alométricas, de volumen y de crecimiento para clones de teca (Tectona grandis L.f) en Costa Rica*. (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Furtado, B; Breda, D; Lopes da Silva, M; Garcia, H; Marques da Silva, M. (2013). Conversão de árvores em multiprodutos da madeira utilizando. *Revista Árvore*. 37(5): 881-887.

- González, E. (2014). Determinación del momento óptimo de cosecha final en una plantación de *Tectona grandis* de la zona norte de Costa Rica. (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago. 41 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (2015). VI Censo Nacional Agropecuario: Resultados Generales. Instituto Nacional de Estadística y Censos. 1 ed. San José, C.R. 146 pp.
- Kohler., S. (2013). *Evolução do afilamento do tronco e do sortimento em plantios de Pinus taeda nos estados do Paraná e Santa Catarina, Mato Grosso, Brasil.* (Tesis de Maestría). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.84 p.
- Ladrach, W. (2009). Manejo de plantaciones de la teca para productos sólidos, ISTF,(Sociedad Internacional de Forestales Tropicales). Disponible en http://www.istf-bethesda.org/specialreports/teca_teak/teca.pdf
- Madeiros, R., Nogueira, H., Siqueira, F. & Garcia, H. (2018). Growth and yield of teak stands at different spacing .*Pesq. agropec. bras. Brasília.* 53(10):1109-1118.
- Martinelli, C. (2009). *Modelos de afilamento para Pinus taeda I. ajustados segundo a forma do tronco e métodos de estratificação.* (Tesis de doctorado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 120 p.
- Molina-Quesada, S., Alfaro, C., Murillo, O., Badilla, Y., & Luján, R. (2018). Evaluación del comportamiento de clones de *Tectona grandis* L. f. en suelos vertisoles de la Península de Nicoya, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 16(38), 24-34. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i38.3993>
- Mora, F., y Hernández, W. (2007). Estimación del volumen comercial por producto para rodales de teca en el pacífico de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 31(1), 101-112.
- Oficina Nacional Forestal [ONF]. (2017). Usos y aportes de la madera en Costa Rica: Estadísticas 2014. Heredia, Costa Rica.
- Pérez, L., y Kanninen, M. (2007). Estimación del volumen comercial a diámetros y alturas variables para *Tectona grandis* L F en Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente*, (49-50).
- Pigatto, P. (2012). *Estrutura bi econômica da produção no manejo da densidade de Pinus taeda L. na região do planalto catarinense.* (Tesis de doctorado). Universidade Federal de Santa Maria. 188p.
- Sage, L y Quirós, R., (2001). Mercadeo e industrialización de madera proveniente de plantaciones forestales. Fondo nacional de financiamiento forestal (FONAFIFO), Documento técnico.

Sianturi, A., (2015). Development of the Local Volume Table wood carpentry of Jati (*Tectona grandis* L.f.) in KPH Ngawi Perum Perhutani Division Regional East Java.

Telles, R., Gómez, M., Alanís, E., Aguirre, O., Jiménez, J. (2018). Ajuste y selección de modelos matemáticos para predecir el volumen fustal de *Tectona grandis* L. f. en Nuevo Urecho, Michoacán, México. *Madera y Bosques*, 24(3), 1-12. [https://doi: 10.21829/myb.2018.2431544](https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431544).

Tewari, V; Singh, B. (2018). Total Wood Volume Equations for *Tectona Grandis* Linn F. Stands in Gujarat, India. *Journal of Forest and Environmental Science*, 34(4),313-320. <https://doi.org/10.7747/JFES.2018.34.4.313>.

Ureigo, U y Akpobome, W. (2018). Models for volume estimation of *Tectona grandis* stands atoke-eri plantation in ijebu-ode, Ogun state, Nigeria. *Nigerian Journal of Agriculture, Food and Environment*, 14(1), 13-19.

ARTÍCULOS COMPLETOS

Capítulo I: Tabla de volumen comercial para teca clonal en diferentes índices de sitio en la Zona Norte de Costa Rica

Resumen

[Introducción]: Es necesario cuantificar y predecir con confiabilidad el volumen de madera para ayudar en la gestión y planificación de la producción forestal. **[Objetivo]:** Elaborar tablas de volumen comercial a partir de la selección de modelos matemáticos en distintas calidades de sitio, para plantaciones clonales de *Tectona grandis*. **[Metodología]:** Se evaluaron tres calidades de sitio, según el índice de sitio 27, 24 y 21, respectivamente. A 263 árboles en pie (119 árboles para el IS27, 120 para el IS24 y 28 para el IS21) se les midió el diámetro al tocón, a 1.3 m sobre el nivel del suelo. Posteriormente, cada 1.5 m, hasta completar la altura total. El volumen del árbol se obtuvo mediante la sumatoria de cada sección cubificada con la fórmula de Smalian. Para cada índice de sitio, se ajustaron modelos por el método de mínimos cuadrados ordinarios con el paquete estadístico Statgraphics Centurion XVI. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de auto correlación de los residuos mediante la prueba de Durbin-Watson. La selección del modelo se hizo a partir de la sumatoria basada en la normalización de los parámetros estadísticos evaluados. **[Resultados]:** Los modelos seleccionados tuvieron buenos ajustes ($R^2 \geq 94\%$), bajos errores de estimación ($\leq 3\%$), muy prácticos por usar solo el diámetro normal (DAP) como variable predictora y **[Conclusiones]:** son una herramienta útil para cuantificar, de forma rápida y precisa, el volumen comercial con corteza de teca clonal hasta 15 cm de diámetro mínimo.

Palabras clave: Clones; ecuaciones de volumen; tabla de volumen; *Tectona grandis*.

Commercial volume table for clonal teak at different site indices, North Zone, Costa Rica.

Abstract

It is essential to reliably quantify and predict the volume of wood to assist in the management and planning of forest production. This study aimed to generate and select equations to estimate the volume from which to draw up commercial volume tables, at different site qualities, for clonal plantations of *Tectona grandis*. Three site qualities were evaluated according to site index 27, 24 and 21, respectively. 263 standing trees (119 for IS27, 120 for IS24 and 28 IS21) were measured in diameter to the stump, 1.3 m above ground level, and then every 1.5 m, until the total height was completed. The volume of the tree was obtained by adding each section cubed with the Smalian formula. For each site index, models were adjusted by the method of ordinary least squares with the Statgraphics Centurion XVI statistical package. Compliance with the assumptions of self-correlation of the waste was verified by the Durbin-Watson test. The model was selected based on the sum based on the normalization of the statistical parameters evaluated. The selected models had good adjustments ($R^2 \geq 94\%$), low estimation errors ($<3\%$), very practical for using only the normal diameter (DAP) as a predictor variable and are an important tool to quantify, quickly and accurately, the commercial volume with clonal teak bark up to 15 cm in diameter.

Keywords: Clones; *Tectona grandis*, volume equations; volume table.

1. Introducción

La teca (*Tectona grandis* Lf) representa una de las especies maderables más importantes, con cerca de 6.8 millones de hectáreas (ha) plantadas alrededor del mundo (Madeiros, Nogueira, Siqueira, García, 2018). En Costa Rica es la especie forestal más utilizada en la reforestación comercial con 47 167 ha establecidas (Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2015), debido, principalmente, a las excelentes propiedades de durabilidad y a la calidad de la madera, buen crecimiento e idoneidad para una gran variedad de usos (Ladrach, 2009; Mora y Hernández, 2007). Lo anterior ha propiciado su creciente demanda del mercado y la consecuente expansión del cultivo intensivo de dicha especie (Fallas, 2017; Pérez y Kanninen, 2007).

El manejo de plantaciones, además del valor de la madera, requiere de la conjunción de aspectos silviculturales, genéticos y culturales, que garanticen la máxima productividad al menor costo (Moret, Jerez, y Mora, 1998). Lo anterior hoy en día aplicable a cualquier sistema de producción forestal y para lograrlo se necesita de información técnica, especialmente, cuando se maneja una plantación para la producción de valor comercial (Sianturi, 2015; Ureigho y Akpobome, 2018). Dada la urgencia de aumentar la productividad, el uso de material genético de calidad superior (clones seleccionados), supone mejores rendimientos que el método de semilla (Badilla y Murillo, 2017; Fallas, 2017), sin suponer que este aspecto pueda lograr el objetivo final por sí mismo.

Al respecto, además de las prácticas culturales de manejo y el material genético en sí mismo, la calidad del sitio influye en el crecimiento de los árboles, y por ende, en la producción (Armijos, 2013; Michone, Herrero, Domínguez y Martínez, 2017). Para *Tectona grandis* los mejores sitios para su establecimiento se ubican en terrenos de menos de 1000 msnm, en suelos con pendientes no mayores a 30 %. Los suelos poco profundos, arcillosos, planos con bajo contenido de calcio, magnesio y fósforo, limitan el buen desarrollo de la especie, también el alto contenido de hierro (Fe) y de aluminio (Al) intercambiable (Armijos, 2013; Molina, Alfaro, Murillo, Badilla, y Luján, 2018),

La productividad de una especie en un sitio se mide a través del índice de sitio (IS), que está asociado a variables climáticas y edáficas, que condicionan su crecimiento y rendimiento. Para definir el IS, en general, se utilizan indicadores intrínsecos al rodal, siendo la altura dominante la más apropiada debido a su baja dependencia de la densidad, de los tratamientos silviculturales y a la gran correlación con la producción (Alder, 1980; Akindele, 1991; Dantani, Shamaki, Gupa, Sa'idu, Mukhtar, Umar y Abubakar, 2019; Michone *et al.*, 2017; Mora y Meza, 2003; Torres y Restrepo, 2012;). Diversos autores apuntan que el rendimiento de una plantación es afectado por la calidad de sitio (Armijos, 2013; Bermejo, Cañellas, San Miguel, 2004; Camacho, Ramírez, Santos, y Zamudio, 2013; Nunifu y Murchison, 1999), de ahí la importancia de su determinación para predecir con la mayor confiabilidad posible la futura producción del sistema establecido.

Es esencial cuantificar y predecir con certeza el volumen de madera, de esta forma, se facilita la gestión de los proyectos forestales. Por lo anterior, las personas productoras necesitan de herramientas prácticas, generadas a partir de variables de fácil medición en campo, para calcular el volumen de madera, de forma sencilla y precisa (Armijos, 2013; Tewari y Singh,

2018); y que les beneficie en sus transacciones de compra y/o venta (Sulastri, 2015). El volumen de un árbol se puede obtener a partir del diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura, ambas variables medidas durante las actividades de inventario (Armijos, 2013; Sianturi, 2015; Sulastri 2015). Por otra parte, mediante modelos matemáticos, se pueden generar ecuaciones de predicción de volumen que logren el mismo fin (Akindele, 1991; Ureigho y Akpobome, 2018), generados a partir de las mismas dos variables predictoras.

Así pues, varias investigaciones han ajustado funciones matemáticas para estimar la producción en volumen de teca (Armijos, 2013; Cerqueira, Dos Santos, De Jesus, Mora, Marques, Salles, y Brianezi, 2017; Drescher, Gava, Pelissari, Acosta, y Silva, 2014; Telles, 2018; Tewari y Singh, 2018; Ureigho y Akpobome, 2018) y para Costa Rica (Bermejo *et al.*, 2004; Camacho y Madrigal, 1997; Fallas, 2017; Gómez y Mora, 2003; Pérez y Kaninnen, 2007). Las ecuaciones o modelos matemáticos son la base para desarrollar tablas de volumen, por medio de las cuales se puede obtener el volumen de madera de un árbol, a partir de su altura o diámetro (Armijos, 2013; Camacho *et al.*, 2013; Sinaturi, 2015; Sulastri, 2015; Tamarit, De los Santos, Aldrete, Valdez, Ramírez, Guerra, 2013).

El objetivo de este trabajo fue elaborar tablas de volumen comercial con corteza, de una sola entrada (DAP), por clase diamétrica, a partir del ajuste y selección de ecuaciones matemáticas para teca clonal de diez años, en diferentes índices de sitio, en la zona norte de Costa Rica.

Conocer el volumen a obtenerse en las diferentes etapas de crecimiento del árbol, tanto actual como futuro, se puede planificar en forma óptima la producción de la masa; con lo cual puede mejorarse las posibilidades de venta, ya que se podría comercializar en productos de mayor valor agregado, y no se estaría limitado a comercializar productos para exportación de madera en troza, como generalmente ocurre en la actualidad.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el año 2016 en plantaciones clonales de *Tectona grandis* de diez años en una finca privada de más de 70 ha, la cual fue plantada y manejada en forma homogénea; la preparación del terreno incluyó rastra, se realizaron 2 raleos, se utilizaron enmiendas al suelo y se aplicaron chapeas y rodajas. El material clonal fue producido de forma aleatoria por la empresa, donde se utilizaron no más de 20 genotipos diferentes en total. Se localizan en el distrito Pocosol, cantón San Carlos, provincia de Alajuela, en la zona norte de Costa Rica. Las mismas están ubicadas alrededor de las coordenadas geográficas 10°49'34,607" N y 84°25'45.287" W, donde se registra una altitud promedio de 100 m s.n.m. La zona se caracteriza por presentar un clima lluvioso, con un promedio anual de precipitación de 3020 mm y una temperatura media de 26 °C. La topografía es moderadamente ondulada con pendientes de 15 y 30 %. Mayoritariamente, los suelos son ultisoles, por lo general profundos y bien drenados, color rojo o amarillo y de baja fertilidad (Solano y Villalobos, 2000).

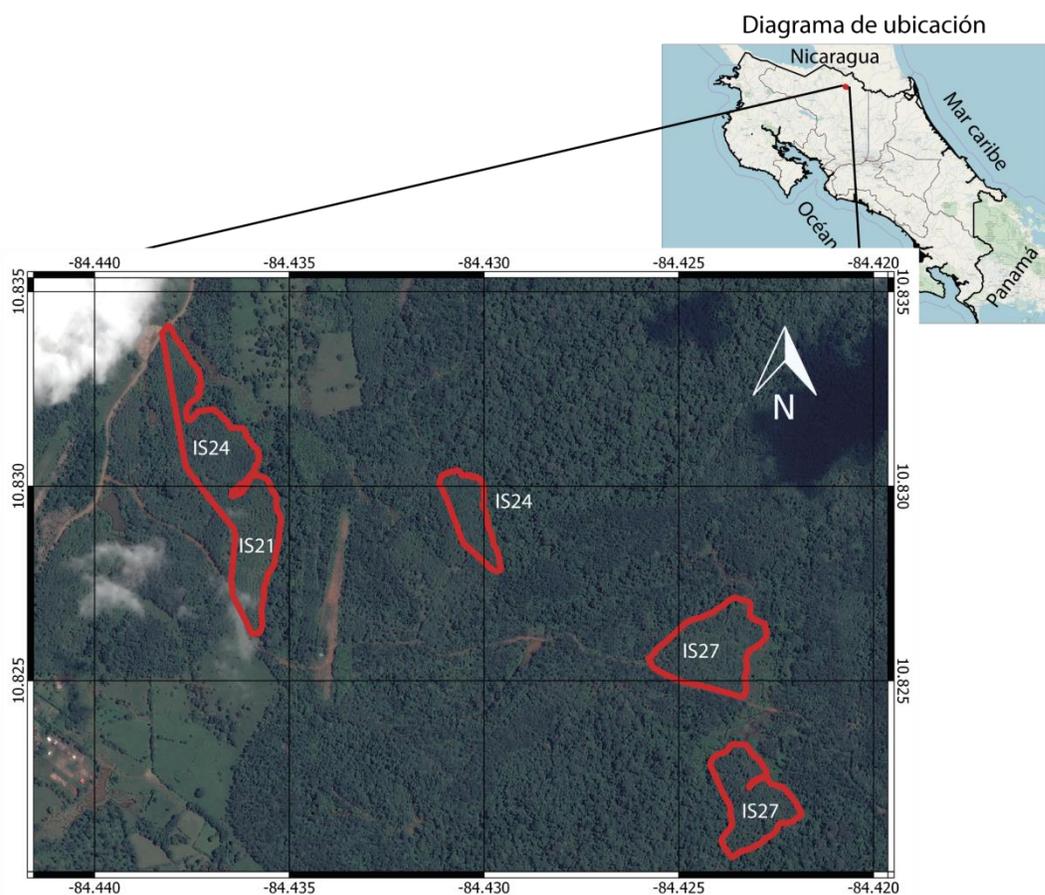


Figura 1. Ubicación de las plantaciones de teca evaluadas, Pocosal, San Carlos, Costa Rica.

Figure 1. Location of the teak plantations evaluated, Pocosal, San Carlos, Costa Rica.

2.2 Determinación del índice de sitio (IS)

La empresa propietaria de las plantaciones aportó la base de datos con información dasométrica, obtenida a través de la medición de parcelas permanentes de monitoreo (PPM). La altura dominante se determinó como el promedio de la altura total (H) del 10 % de los árboles más gruesos y más altos de cada unidad de muestreo. Los árboles se eligieron utilizando como factor de selección el DAP y la altura total, para crear un índice y seleccionar los árboles más gruesos y más altos, con una ponderación de 30 % (DAP) y 70 % (H), ya que de esta forma se evita utilizar árboles que no cumplan con lo anterior es decir árboles gruesos pero bajos o árboles altos pero delgados. Al utilizar el índice creado, se reordenan los árboles de mayor a menor, con base en la altura total, luego se promedia la altura de los árboles que representan el 10%. El índice de sitio se determinó al contrastar la altura dominante obtenida para cada lote con las curvas de índice de sitio desarrolladas por Mora y Meza (2003) para Costa Rica a una edad base de dieciséis años, las cuales son las más apropiadas para teca en el país.

2.3 Selección de árboles para calcular el volumen

Inicialmente se seleccionaron en forma aleatoria 2 parcelas para cada IS, sin embargo, en campo se decidió eliminar una parcela del IS21 debido a la poca homogeneidad del lote donde se ubicaban, dando como resultado 5 parcelas. Se determinó en oficina la cantidad de árboles en una distribución diamétrica de 3 cm para cada PPM. Se localizó en campo las PPM para marcar y cortar los árboles de la muestra alrededor de la parcela. En total se cortaron un total de 266 árboles (119 para IS27, 119 para el IS24 y 28 para el IS21).

Cada árbol fue derribado, previamente se midió el DAP y se hizo una marca en el fuste a 1,3 m; posteriormente, se midió el diámetro (cm) a la base (a 10 cm del suelo), y a partir de este punto, cada 1.5 m hasta el ápice. Además, se midió la altura comercial en metros (HC) hasta un diámetro mínimo de 15 cm con corteza (**Figura 2**).

2.4 Procesamiento de los datos

En Excel se creó una base de datos, para realizar el cálculo del volumen de cada segmento del árbol, obtenido mediante la fórmula de Smalian (Ecuación 1). El volumen comercial fue la suma del volumen parcial de cada segmento hasta la altura comercial, según se muestra en la Ecuación 1.

$$Vm^3: (d_1+d_2)^2*\pi/4*l \quad (E1)$$

Dónde:

V = volumen del segmento en metros cúbicos.

l = longitud del segmento en metros.

d₁ = diámetro con corteza en el extremo mayor de la troza, en metros.

d₂ = diámetro con corteza en el extremo menor de la troza, en metros.

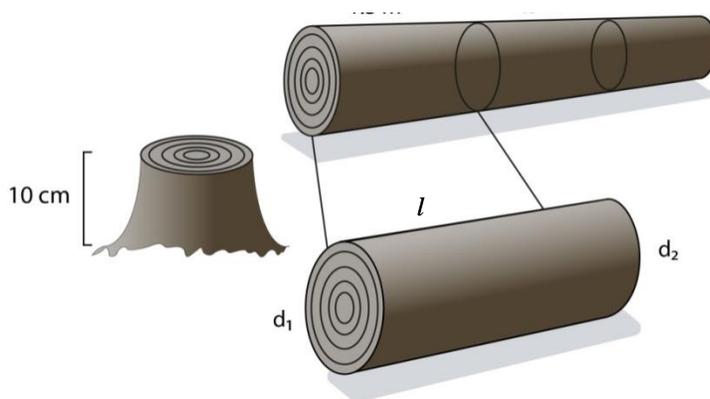


Figura 2.Cubicación de árbol.

Figure 2.Tree Cubing.

2.5 Desarrollo, selección y comparación de modelos

Los modelos se ajustaron mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios con el programa Statgraphcs Centurion XVI, y se empleó como variable independiente el diámetro (DAP). Para cada índice de sitio se probaron aproximadamente 10 modelos, seleccionando el de mejor ajuste, según la metodología abajo indicada.

A cada uno de los modelos, se les calculó los siguientes estadísticos: Coeficiente de determinación (R^2), error estándar de la estimación (EEE), error medio absoluto (EMA), tamaño de la muestra (n), error del modelo o sesgo (E %), error cuadrático medio (ECM), la (diferencia agregada (DA) y la suma de cuadrados de los residuos de los valores predichos (PRESS). Adicionalmente, se calculó el criterio de información de Akaike (AIC); para comparar los modelos con transformación de la variable dependiente se utilizó el Índice de Furnival (IF) y para comprobar la autocorrelación de los residuos se utilizó la prueba de Durbin-Watson (DW).

Para evaluar los modelos y seleccionar el de mejor ajuste, los estadísticos citados arriba se normalizaron convirtiéndolos a una escala común para compararlos. La escala utilizada fue de 0 a 1, donde 0 es el valor menos deseable y 1 el más deseable. En aquellos casos en los que la variable tiene un sentido inverso de valor (relación negativa), por ejemplo, todas las medidas de error son representadas por valores absolutos o relativos, cuyo mejor valor es aquel que se acerque a cero, por lo tanto en estos casos hay que invertir el sentido del valor de la variable para que las medidas de los errores queden normalizadas de 0 a 1 (relación directa positiva) pero representando el mejor valor por la cercanía a uno (Ecuación 2).

$$\Sigma_{vn} = (R^2_{vn}) + (EEE_{vn}) + (EMA_{vn}) + (DW_{vn}) + (n_{vn}) + (ECM_{vn}) + (DA_{vn}) + (IF_{vn}) + (PRESS_{vn}) + (E\%_{vn}) + (AIC_{vn}) \quad (E2)$$

Donde: Σ_{vn} = sumatoria de valores normalizados de 0 a 1, R^2_{vn} = valor normalizado del coeficiente de determinación ajustado, EEE_{vn} = valor normalizado del error estándar de la estimación, EMA_{vn} = valor normalizado del error absoluto medio, DW_{vn} = valor normalizado de Durwin Waston, n_{vn} = valor normalizado del tamaño de la muestra, ECM_{vn} = valor normalizado del error cuadrático medio, DA_{vn} = valor normalizado de la diferencia agregada, IF_{vn} = valor normalizado del Índice de Furnival, $PRESS_{vn}$ = valor normalizado de la sumatoria de los residuos al cuadrado, $E\%_{vn}$ = valor normalizado del error relativo, AIC_{vn} = valor normalizado del criterio de Información de Akaike.

Se utilizaron las siguientes ecuaciones para normalizar los errores (EEE, EMA, ECM, PRESS, E%), la diferencia agregada (DA) e índice de Furnival (IF) se usó la siguiente ecuación $(1 - E_{ec} * 1 / E_{max})$, la prueba de Durbin-Watson (DW) se utilizó la ecuación: $(1 * DW_{ec} / 4)$, mientras que para el criterio de información de Akaike (AIC) se utilizó $(1 * AIC_{ec} / AIC_{min})$. Donde: E_{ec} = Valor del error de la ecuación, E_{max} : Valor de error máximo de todas las ecuaciones DW_{ec} = Valor de DW de la ecuación, AIC_{ec} = Valor AIC de la ecuación, AIC_{min} : Valor mínimo del AIC de todas las ecuaciones. V_{Ccc} : Volumen comercial con corteza

El modelo elegido fue el que resultó con el valor más alto en la sumatoria de los estadísticos normalizados; después, se analizaron los residuos ($V_{observado} - V_{predicho}$) en función de la variable dependiente. El modelo seleccionado para cada índice de sitio se comparó con otros modelos de predicción de volumen para *T. grandis* en Costa Rica. Finalmente, a partir de la ecuación seleccionada se generó la tabla de volumen comercial con corteza.

3. Resultados

3.1. Índices de sitio

Según el inventario de campo, las plantaciones evaluadas se clasifican en tres Índices de sitio, el mayor (IS27) con una altura dominante de 22.2 m, 19.5 m para el IS24 y 15.5 m en el IS21. La condición dasométrica (DAP, altura y volumen) de las plantaciones disminuyó con la calidad de sitio, con diferencias en diámetro de más de 8 cm (39% aproximadamente) para el árbol promedio entre el IS27 y el IS21. En volumen la diferencia fue de 0.2519 m³ (90 % aproximadamente) entre los mismos índices. A pesar de ser plantaciones clonales, se observa un amplio rango diamétrico, 19.3; 19.0 y 10.1 cm para el IS27, 24 y 21, respectivamente (**Cuadro 1**)

Cuadro 1. Estadísticos de las variables evaluadas en árboles de *Tectona grandis* por IS.

Table 1. Statistics of the variables evaluated in *Tectona grandis* trees by IS.

Estadísticos	Índice de sitio 27			Índice de sitio 24			Índice de sitio 21		
	DAP	Vol c	HC	DAP	Vol c	HC	DAP	Vol c	HC
n	119	119	119	119	119	113	28	28	28
X	22.8	0.2854	8.35	17.6	0.1054	4.04	13.9	0.0305	1.56
SD	0.04	0.15	3.23	0.03	0.08	2.53	0.02	0.03	1.16
CV	19.1	53.5	38.7	19.6	78.6	62.5	17.3	101.0	74.5
Mínimo	13.8	0.0200	1.00	9.0	0.0000	0.10	9.0	0.0000	0.30
Máximo	33.1	0.6524	15.30	28.0	0.3970	9.75	19.1	0.1180	4.50

n:tamaño de la muestra, X:promedio SD: desviación estándar, CV: coeficiente de variación (%), DAP (cm), Vol c: volumen comercial (m³*árb⁻¹), HC: Altura comercial(m).

3.2. Modelos para estimar volumen por Índice de sitio

Los modelos elegidos “Raíz Cuadrada-Y Log-X” para los IS27 y 24 y “Raíz cuadrada doble” para el IS21, presentaron un ajuste muy aceptable con R² > 0.94 y errores de estimación (E %) inferiores al 3 %. El valor de la prueba de DW para los índices 24 y 21 sugiere que no existe autocorrelación de los residuos, ya que los resultados estuvieron muy cercanos a 2, mientras que para el IS27 el valor valor “P” es menor que 0.05, se incluye indicación de una posible correlación serial. Los otros estadísticos también muestran cifras muy bajas (**Cuadro 2**)

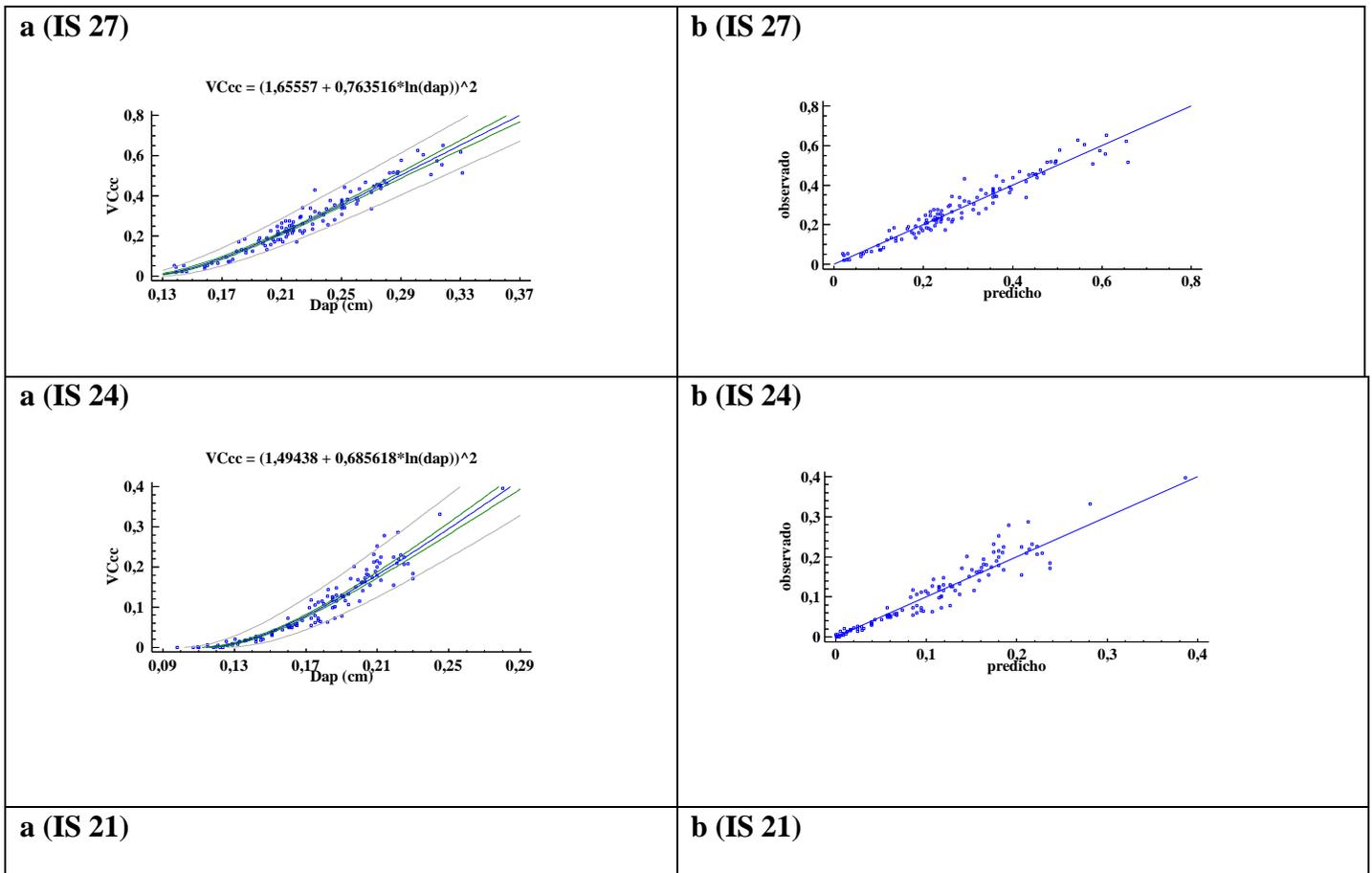
Cuadro 2. Modelos seleccionados para la estimación de volumen comercial con corteza. Todos los modelos poseen una P < 0.001.

Table 2. Selected models for estimating commercial volume with bark. All models have a P < 0.001.

Índice de sitio	Modelo seleccionado	R ²	EEE	EMA	DW	ECM	DA	IF	PRESS	E%	AIC
IS27	$V_{c,c} = (1.65557 + 0.763516 * \ln(DAP))^2$	0.94	0.037	0.029	1.41(P=0,0006)	0.038	0.0013	0.025	0.173	2.3	-3.1

IS24	$V_{Ccc} = (1.49438 + 0.685618 \cdot \ln(DAP))^2$	0.94	0.036	0.027	1.92(P=0,3380)	0.024	0.0014	0.0146	0.069	3	-3.52
IS21	$V_{Ccc} = (-0,881107 + 2,76768 \cdot \sqrt{\ln(DAP)})^2$	0.94	0.022	0.017	2.07(P=0,5198)	0.007	0.0000	0.022	0.001	-1.4	-3.73

La forma de la curva que resultó de la relación entre el DAP y el volumen comercial se presenta en la **Figura 3a**, el modelo ajustado lo representa la línea central, las siguientes el intervalo de predicción y las líneas externas el intervalo de confianza. La **Figura 3b** muestra la distribución de residuos del volumen comercial con corteza; en los tres modelos se observa una distribución homogénea de los datos sobre el eje principal. Esta es una indicación de que el supuesto de normalidad en la distribución residual no se viola.



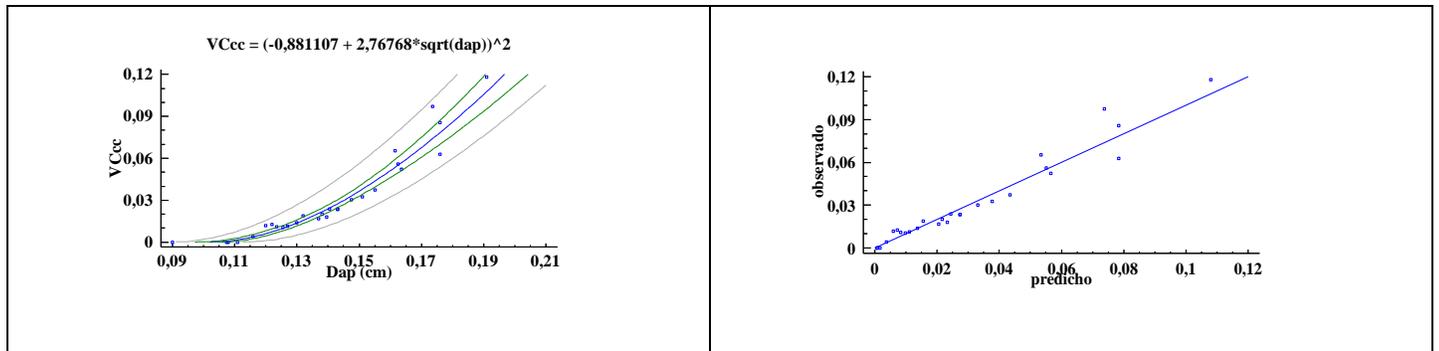


Figura 3. Modelos para los IS27, 24 y 21: a) gráfico para el modelo ajustado b) gráfico de los valores predichos vs observados.

Figure 3. Models for IS27, 24 and 21: a) graph for the adjusted model b) graph of predicted vs. observed values.

3.3. Comparación de los modelos entre IS y con los reportados en la literatura

En árboles con DAP inferior a 16 cm, los tres modelos registraron un comportamiento muy similar, arrojando cifras en volumen prácticamente iguales; sin embargo, a partir de los 16 cm, se observan diferencias en la evolución del volumen, con una superioridad marcada del modelo que grafica el índice de sitio 27 (**Figura 4**).

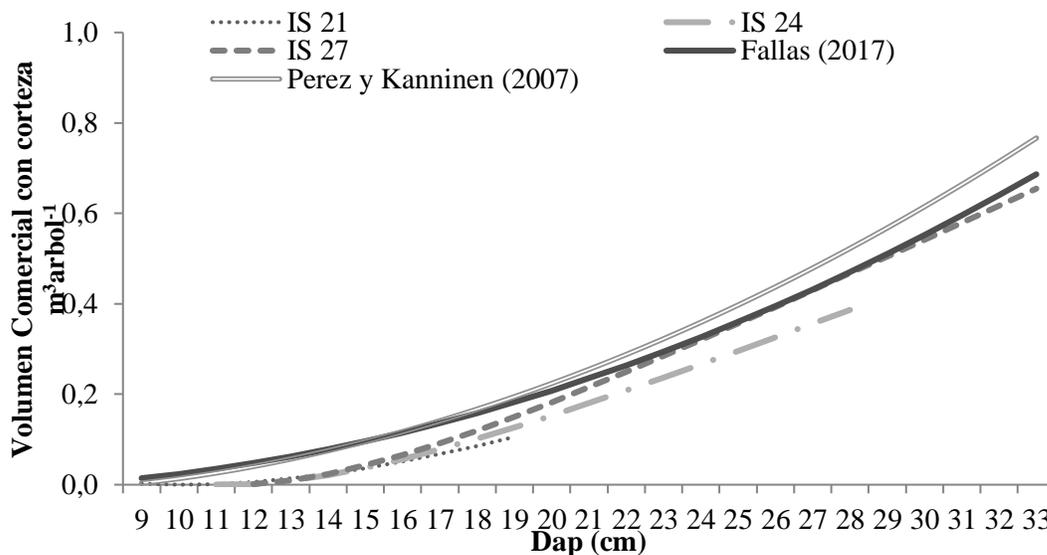


Figura 4. Comparación del modelo ajustado para volumen comercial con corteza de teca con otros modelos para volumen comercial en Costa Rica.

Figure 4. Comparison of the adjusted model for commercial volume with teak bark with other models for commercial volume in Costa Rica.

El volumen comercial con corteza obtenido con el modelo elegido para cada IS, se comparó con el predicho con otros modelos reportados en la literatura, se observa en la **Figura 4** que

los modelos seleccionados por Fallas (2017) y Pérez y Kanninen (2007) tienen una curva muy similar al modelo del IS27, mientras que los modelos de los índices de sitio 24 y 21 predicen valores inferiores (**Figura 4**).

3.4. Tabla de volumen

El volumen comercial con corteza para árboles de teca se presenta en el **Cuadro 3**, esta es la herramienta de uso práctico, a través de la cual es posible obtener el volumen (actual o futuro) del árbol con solo conocer el diámetro. La tabla de volumen incluye el diámetro desde 11 hasta 33 cm.

Cuadro 3. Tabla de volumen comercial con corteza ($\text{m}^3 \text{ árbol}^{-1}$) para teca clonal de diez años para el índice de sitio 27, 24 y 21; en zona norte, Costa Rica.

Table 3. Commercial volume table with bark ($\text{m}^3 \text{ tree}^{-1}$) for ten-year clonal teak for site index 27, 24 and 21; in north zone, Costa Rica.

DAP (cm)	IS27	IS24	IS21
11		0.0004	0.0014
12		0.0017	0.0060
13	0.0096	0.0091	0.0136
14	0.0238	0.0214	0.0239
15	0.0429	0.0375	0.0364
16	0.0657	0.0566	0.0511
17	0.0916	0.0781	0.0676
18	0.1199	0.1016	0.0859
19	0.1502	0.1266	0.1058
20	0.1821	0.1528	
21	0.2153	0.1801	
22	0.2495	0.2082	
23	0.2846	0.2369	
24	0.3203	0.2662	
25	0.3565	0.2958	
26	0.3932	0.3258	
27	0.4302	0.3560	
28	0.4674	0.3864	
29	0.5047		
30	0.5422		
31	0.5797		
32	0.6172		
33	0.6546		

IS27: Índice de sitio 27, IS24: Índice de sitio 24, IS21: Índice de sitio 21.

4. Discusión

4.1. Índice de sitio

Para este estudio, se identificó con mayor productividad el IS27; la altura dominante de 22.2 m coincide con la mejor calidad de sitio calculada por Vaides *et al.* (2004) en Guatemala y Drescher *et al.* (2014) en Brasil, ambos a los diez años determinaron como clase de productividad alta desde 20 m hasta 24 m en altura dominante, mientras fue superior a las mejores clases de sitio en Ghana a los diez años con 15 m (Nunifu y Murchinson 1999).

En el IS24 la altura de 19.5 m está dentro del rango determinado por Vaides *et al.* (2004) en Guatemala para sitios promedio (16-20 m) a los diez años, mientras Bermejo *et al.* (2004) reportó 20.7 m para sitios promedio a la misma edad. En el índice de sitio 21, la altura (15.5 m) es superior a lo reportado por Corona *et al.* (1999) en Cuba y Nunifu y Murchinson (1999) en Ghana, en estas investigaciones, para la mejor calidad de sitio, se registró 6.9 m a los diez años y 14.6 m a los doce años, respectivamente. La gran diferencia entre el IS21 y el IS27 sugiere que el IS21 no es ideal para desarrollar plantaciones comerciales debido a que el volumen comercial será muy bajo. Según Vaides *et al.* (2004), una altura menor a 16 m representa un sitio bajo en productividad.

El promedio en diámetro para el IS27 es superior a lo reportado en algunas investigaciones, incluso para edades superiores, tal es el caso de Camacho *et al.* (2013), en Méjico con 20.7 cm a once años, mientras que Fallas (2017) calculó para plantaciones clonales menores a doce años desde 8.6 a 32 cm con mayor concentración de individuos en el rango de 10 a 15 cm; Bermejo *et al.* (2004) reportó 10-21.8 cm para plantaciones de once años en Costa Rica.

El diámetro promedio para el IS24 (17.6 cm) es similar al indicado por Telles *et al.* (2018) (16.55 cm en Méjico a 11 años); Nunifu y Murchinson (1999) en sitios buenos en Ghana (clase 1 según Nunifu y Murchinson 1999) reportaron 16.3 cm; mientras que para Costa Rica, Bermejo *et al.* (2004) determinó un DAP promedio de 17.6 cm en sitios clase I a la edad de once años. El IS21 presenta un DAP promedio de IS21 14.56 cm, similar a lo que encontró Cerqueira *et al.* (2017), un DAP promedio de 13.2 cm y un promedio de altura total de 10.2 m a los diez años en Brasil.

La variabilidad observada en el volumen comercial, entre los índices de sitio para las mismas clases diamétricas, pese a que fueron manejados de la misma forma y utilizando el mismo material genético, son producto de las diferencias en diámetro y altura comercial, que pueden ser consecuencia de la calidad del sitio (productividad del sitio) (Camacho *et al.*, 2013; Corona *et al.*, 1999; Bermejo *et al.*, 2004; Nunifu y Murchinson 1999), recalcando la necesidad de clasificar los sitios para estimar su productividad potencial, por lo que se considera que este estudio es de utilidad en la predicción realista de los volumen, cortas intermedias y cosecha final.

4.2. Modelos para estimar volumen por índice de sitio

El índice de sitio 27 registró el mayor volumen comercial promedio ($0,28 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$), valor similar al obtenido por Fallas (2017) ($0,30 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$) para plantaciones de material clonal de menos de doce años, y al indicado por Camacho *et al.* (2013) ($0,269 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$) para sitios de nivel medio con nueve años en México, mientras que Drescher *et al.* (2014) en Brasil, reportó un volumen total de $0,3129 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$ a los diez años. Sin embargo, inferior a lo

reportado por Armijos (2013), quien determinó $0.41 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$ de volumen comercial a los trece años en Ecuador.

En el índice de sitio 24, el promedio fue de $0.1054 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$, en el mismo diámetro y altura total Drescher *et al.* (2014) reportaron $0.1570 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$ para volumen total. Una cifra igual al obtenido en el presente estudio reportó Corona *et al.* (1999), para plantaciones en Cuba en calidad de sitio 2, con una altura dominante de 8.10 m a la edad de diez años. En el índice de sitio 21 el volumen fue de $0.0356 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$, ligeramente menor a lo reportado por Camacho *et al.* (2013) para sitios de nivel bajo en México ($0.0685 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$, volumen total del fuste con corteza a los diez años). El volumen comercial es en parte indicación de la influencia de la calidad del sitio.

Diversos investigadores, desde 1997, han ajustado modelos para predecir el volumen total de árboles de teca utilizando como variables el DAP y altura (Nunifu y Murchinson 1999 ; Moret *et al.* 1998, Pérez y Kanninen 2007, Camacho y Madrigal 1997) y para volumen comercial (Bermejo *et al.*, 2004 y Pérez y Kanninen 2007).

Recientemente, Tamarit *et al.* (2013), Telles (2018), Camacho *et al.* (2013), Tewari y Singh (2018), Tewari (2013), Drescher *et al.* (2014) y Cerqueira *et al.* (2017), ajustaron modelos para predecir el volumen total a partir del DAP y la altura. Modelos para predecir el volumen comercial a partir del DAP desarrolló Armijos (2013) en Ecuador, Tewari *et al.* (2013) y Tewari y Singh (2018) en la India, mientras Fallas (2017) en Costa Rica, ajustó modelos para volumen total y comercial para material clonal.

La rigurosidad en la selección del modelo garantiza que la ecuación escogida sea la más adecuada para los datos, ya que los valores coincidirán con los parámetros estadísticos calculados. Algunos autores recomiendan utilizar el criterio de selección expuesto por Sakici *et al.* (2008), que consiste en jerarquizar los estadísticos de mayor a menor calificación (Telles, 2018; Tamarit *et al.*, 2013; Tewari, 2013; Tewari y Singh, 2018).

El proceso de selección de los modelos depende en primer lugar de la representatividad de la información usada en su construcción, y en segundo lugar, de la rigurosidad en la determinación del mejor modelo. La rigurosidad está condicionada a ser mejor con base en un número creciente de parámetros estadísticos. En este estudio se contó con un base de datos robusta de de 119 observaciones para los IS27 y 24 y de 28 para el IS21 y se calcularon 11 parámetros estadísticos, por lo que los modelos seleccionados se pueden utilizar con confiabilidad.

Los resultados para la prueba de Durbin-Watson con valores cercanos a 2 demuestran que no violan los supuestos de regresión, al no determinar auto correlación de los residuos. Con el criterio de información de Akaike (AIC), según Tewari y Singh (2018) valores menores a 2 deben ser considerados para el ajuste del modelo, seleccionando como mejor modelo el de menor valor. En este estudio se obtuvo para todos los modelos valores inferiores a 2, este criterio de selección también fue considerado por Tamarit *et al.* (2013). La distribución de los residuos sobre la línea central indica que no se violó el supuesto de normalidad, coincidente con los hallazgos de Telles (2018), Fallas (2017), Cerqueira *et al.* (2017), Drescher *et al.* (2014); Ureigho y Akpobome (2018); Nurudeen *et al.* (2014).

Por lo general, en la mayoría de los estudios de esta naturaleza, la selección de ecuaciones se basa en parámetros como el R^2 ajustado, error estándar de la medición, desviación estándar. Al respecto, Pérez y Kanninen (2007) se basaron en el R^2 ajustado para escoger un modelo que predice el volumen total con base en el DAP y la altura total. Moret *et al.* (1998); Camacho y Madrigal (1997); Sulastri (2015); Sianturi (2015); Telles (2018), utilizaron entre 3 y 5 parámetros para realizar la escogencia de las ecuaciones, mientras que Bermejo *et al.* (2004) y Tamarit *et al.* (2013) utilizaron 6 y 7 parámetros, respectivamente. Moret *et al.*, (1998) y Pérez y Kanninen (2007) también incluyeron el índice de Furnival (IF); la prueba de Durbin-Watson fue utilizada por Telles (2017) y Tamarit *et al.* (2013), el criterio de información de Akaike (AIC) fue considerado como criterio de selección en los trabajos de Tewari y Singh (2018); Tewari (2013), Tamarit *et al.* (2013).

El buen ajuste exhibido por los modelos seleccionados en este trabajo ($R^2 \geq 94\%$) y ($E \% < 3 \%$), para los 3 índices de sitio muestran mucha confiabilidad, además de la facilidad en su aplicación por utilizar solo una variable predictora. Condición similar fue reportada por Tewari y Singh (2018) en la India quienes obtuvieron R^2 de 97.7 %; Fallas (2017) obtuvo un R^2 de 98 % y errores de estimación bajos ($< 2 \%$) para material clonal en plantaciones de menos de doce años en Costa Rica, este último autor señala que la silvicultura clonal genera crecimientos más homogéneos en los árboles y plantaciones, que proporciona facilidades en el ajuste de modelos matemáticos con mayor precisión.

4.3. Comparación de modelos

La forma de la curva del modelo elegido para el IS27 presenta una tendencia muy similar al escogido por Pérez y Kanninen (2007) y prácticamente igual al modelo de Fallas (2017); dicha semejanza puede ser explicada por utilizar material clonal con cierto nivel de selección genética (clon) (**Figura 4**). Ambos autores ajustaron modelos con datos de árboles de 2 a 47 años y con un diámetro mínimo comercial de 10 cm.

Los modelos para los tres índices de sitio mantienen una tendencia muy similar en las primeras clases diamétricas, a partir de un DAP de 16 cm se muestra superior el IS27, y los IS24 y 21 reportan menor DAP y volumen.

La variabilidad observada en el volumen comercial entre los índices de sitio para las mismas clases diamétricas, pese a que fueron manejados de la misma forma y utilizando el mismo material genético, son producto de las diferencias en diámetro y alturas comerciales, mismas que, los resultados sugieren, son consecuencia de las diferencias entre calidad de los sitios encontrada en éste estudio (productividad del sitio) (Nunifu y Murchison 1999; Corona *et al.* 1999; Bermejo *et al.* 2004; Camacho *et al.* 2013). Lo anterior ratifica la importancia de clasificar los sitios, para, con ello, obtener un estimado más preciso de la productividad potencial de la totalidad de la finca.

4.4. Tabla de volumen

La tabla de volumen construida en este estudio presenta la ventaja de requerir únicamente el DAP del árbol, y no necesita medir la altura lo cual representa un proceso lento y muchas veces poco exacto (Armijos, 2013). A pesar de su utilidad, se debe tener cuidado que al utilizar esta herramienta se considere la calidad del sitio y el material genético evaluado. Autores como; Corona *et al.* (1999), Torres *et al.* (2012); Akindele 1991, Minchone *et al.* (2017) apuntan que mediante el índice de sitio es posible clasificar la productividad,

permitiendo una estimación más precisa del volumen; por tanto, la planificación y prescripción de actividades para el manejo silvicultural óptimo de la masa.

5. Conclusiones

Las plantaciones evaluadas corresponden a los IS 27, IS 24 e IS 21, este último no es recomendable para el establecimiento de plantaciones comerciales por su baja productividad.

Los modelos elegidos para estimar el volumen comercial en los tres índices de sitio, presentaron una bondad de ajuste muy buena ($R^2 > 0.94$), con bajos errores de estimación. Asimismo, muestran la ventaja de la simplicidad en su uso, por utilizar como variable predictora el diámetro a la altura del pecho (DAP).

Los resultados ratifican confiabilidad del DAP como variable predictora, en la estimación del volumen comercial del árbol individual, mediante la generación de ecuaciones de regresión.

El volumen del árbol se ve influenciado por la calidad de los terrenos, se genera mayor o menor volumen para una misma clase diamétrica y altura en condiciones idénticas de edad, manejo y material genético.

Los modelos ajustados en este estudio representan una importante herramienta que puede ser utilizada en la cuantificación del volumen comercial con corteza de teca clonal desde 15 cm de diámetro, únicamente para plantaciones con características similares a las del presente estudio. Por tanto, se recomienda ser cauteloso al intentar aplicarlos en condiciones distintas a las aquí evaluadas.

6. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al “Proyecto Evaluación del crecimiento de plantaciones clonadas de teca y melina y determinación de la rentabilidad de la producción de madera de ambas especies” desarrollado en el Instituto de Investigación y Servicios Forestales de la Universidad Nacional (INISEFOR-UNA), por su apoyo en la logística y financiamiento de la presente investigación. A la Empresa Proteak S. A. por facilitar el acceso a las fincas para la recolección de información y a los revisores anónimos de la revista por sus aportes, los cuales enriquecieron el manuscrito.

7. Referencias

- Alder, D. (1980). Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Armijos, D. (2013). *Construcción de tablas volumétricas y cálculo de factor de forma (ff.) para dos especies, teca (Tectona grandis) y melina (Gmelina arborea) en tres plantaciones de la empresa Reybanpac ca. En la provincia de los Ríos.* (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.
- Akindele, S.O. (1991). Development of a site index equation for teak plantations in Southwestern Nigeria. *Journal of Tropical Forest Science.* 4(2), 162-169.

- Badilla, Y. y Murillo, O. (2017). Ganancia realizada en plantaciones clonales de teca en Costa Rica. En: I Simposio Internacional GENFORES. 26-27 enero, 2017. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Bermejo, I., Cañellas, I., San Miguel, A. (2004). Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* (189), 97-110. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.031>
- Dantani, A., Shamaki, S., Gupa, M., Sa'idu, M., Mukhtar, R., Umar, M. y Abubakar, A. (2019). Allometric Models for Estimating Site Index of Teak (*Tectona grandis* Linn F.) in Kanya Forest Plantation, Kebbi State, Nigeria." *Asian Journal of Environment y Ecology*, 10(1), 1-7. <https://doi: 10.9734/ajee/2019/v10i130110>
- Camacho-Linton, A., Ramírez-Maldonado, H., de los Santos-Posadas, H. M., y Zamudio-Sánchez, F. J. (2013). Tablas de rendimiento para teca (*Tectona grandis* L.) en el Estado de Campeche. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19), 92-101.
- Camacho, P., y Madrigal, T. (1997). Ecuaciones de volumen preliminares para *Tectona grandis*. En 3. *Congreso Forestal Nacional*. 27-29 Agosto 1997. No. 634.9097286063 C749 1997. (pp. 131-133). San José, Costa Rica.
- Cerqueira, C., Dos Santos, G., De Jesus, L., Mora, R., Marques, G., Salles, T., y Brianezi, D. (2017) Modelagem da altura e volume de *Tectona grandis* LF na mesorregião Nordeste do Pará. *Nativa: Pesquisas Agrárias e Ambientais*, 5(Especial), 606-611. <https://doi.org/10.5935/2318-7670.V05nespa22>
- Corona, I., Jacas, F., Tamayo, F., y Pereira, A. (1999). Índice de sitio y tablas de crecimiento para plantaciones jóvenes de *Tectona grandis* L. en la Unidad silvícola Guisa, Cuba.
- Drescher, R., Gava, F. H., Pelissari, A. L., Acosta, F. C., y Silva, V. (2014). Equações volumétricas para *Tectona grandis* Linn F. em povoamentos jovens no estado de Mato Grosso. *Advances in Forestry Science, Cuiabá*, 1(2), 65-70.
- Fallas, J. (2017). *Funciones alométricas, de volumen y de crecimiento para clones de teca (Tectona grandis L.f) en Costa Rica*. (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Gómez, M, y Mora F. (2003). Comparación de modelos y unificación de ecuaciones de volumen para árboles individuales en plantaciones de Teca (*Tectona grandis* Linn) en Costa Rica.. In *Plantaciones de Teca (Tectona grandis)*: Posibilidades y perspectivas para su desarrollo. Seminario y Grupo de Discusión Virtual. (Disco compacto), 26 al 28 de Noviembre de 2003, Heredia, Costa Rica, 16 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (2015). VI Censo Nacional Agropecuario: Resultados Generales. Instituto Nacional de Estadística y Censos. 1 ed. San José, C.R. 146 pp.

- Ladrach, W. (2009). Manejo de plantaciones de la teca para productos sólidos, ISTF,(Sociedad Internacional de Forestales Tropicales). Disponible en http://www.istf-bethesda.org/specialreports/teca_teak/teca.pdf
- Madeiras, R., Nogueira, H., Siqueira, F. & Garcia, H. (2018). Growth and yield of teak stands at different spacing .*Pesq. agropec. bras. Brasília*. 53(10):1109-1118.
- Minoche, D. Herrero C., Domínguez M y Martínez. P. (2017). Determinación del índice de sitio de las plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) en Tabasco, México. *Cien. Inv. Agr.* 44(2), 154-167. <http://dx.doi.org/10.7764/rcia.v44i2.1645>.
- Molina-Quesada, S., Alfaro, C., Murillo, O., Badilla, Y., & Luján, R. (2018). Evaluación del comportamiento de clones de *Tectona grandis* L. f. en suelos vertisoles de la Península de Nicoya, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 16(38), 24-34. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i38.3993>
- Mora, F., y Hernández, W. (2007). Estimación del volumen comercial por producto para rodales de teca en el pacífico de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 31(1), 101-112.
- Mora, F., y Meza, V. (2003). Curvas de índice de sitio para Teca (*Tectona grandis* Linn.) en la Vertiente del Pacífico de Costa Rica. In *Plantaciones de Teca (Tectona grandis): Posibilidades y perspectivas para su desarrollo*. Seminario y Grupo de Discusión Virtual. (Disco compacto), 26 al 28 de Noviembre de 2003, Heredia, Costa Rica, 16 p.
- Moret, A. Y., Jerez, M., y Mora, A. (1998). Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal Caparo, Estado Barinas–Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 42(1), 41-50.
- Nunifu, K., y Murchison, H. (1999). Provisional yield models of teak (*Tectona grandis* Lf.) plantations in northern Ghana. *Forest Ecology and management*, 120(1-3), 171-178. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00529-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00529-5)
- Nurudeen, T., Abiola, J., Salami, K., Erinle, O., y Olaniyi, W. (2014). Regression Models for Tree Volume Prediction in Stands of *Tectona grandis* Linn at Federal College of Forestry, Jericho, Ibadan, Oyo State Nigeria. *Science Journal of Agricultural Research and Management*, 2014. <https://doi.org/10.7237/sjarm/233>
- Sakici, O., Misir, N., Yavuz, H., y Misir, M. (2008). Stem taper functions for *Abies nordmanniana* subsp. *bornmulleriana* in Turkey. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23(6), 522-533. <https://doi.org/10.1080/02827580802552453>.
- Sianturi, A. (2015). Development of the Local Volume Table wood carpentry of Jati (*Tectona grandis* L.f.) in KPH Ngawi Perum Perhutani Division Regional East Java.
- Sulastri, R. (2015). Volume Table of Jati (*Tectona grandis* L.f) using Felled Tree in Private Forest Standing (Case Study in Private Forest, Regency Kulon Progo Special Region Yogyakarta).

- Solano, J., y Villalobos, R. (2000). Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.
- Pérez, L., y Kanninen, M. (2007). Estimación del volumen comercial a diámetros y alturas variables para *Tectona grandis* L F en Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente*, (49-50).
- Tamarit, J., De los Santos, H., Aldrete, A., Valdez, R., Ramirez, H., Guerra, V. (2013). Sistema de cubicación para árboles individuales de tectona *grandis* l. f. mediante funciones compatibles de ahusamiento-volumen. *Rev. Mex. Cien. For*, 5 (21), 59-75.
- Telles, R., Gómez, M., Alanís, E., Aguirre, O., Jiménez, J. (2018). Ajuste y selección de modelos matemáticos para predecir el volumen fustal de *Tectona grandis* L. f. en Nuevo Urecho, Michoacán, México. *Madera y Bosques*, 24(3), 1-12. [https://doi: 10.21829/myb.2018.2431544](https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431544).
- Torres Del Valle, E., y Restrepo, G. (2012). Site index for teak in Colombia. *Journal of Forestry Research* 23(3), 405–411. [https:// doi/ 10.1007/s11676-012-0277-x](https://doi.org/10.1007/s11676-012-0277-x).
- Tewari, V. P., Mariswamy, K. M., y Arunkumar, A. N. (2013). Total and merchantable volume equations for *Tectona grandis* Linn. f. plantations in Karnataka, India. *Journal of sustainable forestry*, 32(3), 213-229. <https://doi.org/10.1080/10549811.2013.762187>.
- Tewari, V; Singh, B. (2018). Total Wood Volume Equations for *Tectona Grandis* Linn F. Stands in Gujarat, India. *Journal of Forest and Environmental Science*, 34(4),313-320. <https://doi.org/10.7747/JFES.2018.34.4.313>.
- Ureigo, U y Akpobome, W. (2018). Models for volume estimation of *Tectona grandis* stands atoke-eri plantation in ijebu-ode, Ogun state, Nigeria. *Nigerian Journal of Agriculture, Food and Environment*, 14(1), 13-19.
- Vaides, E., Ugalde, L., Galloway, G. (2004). Crecimiento y productividad de teca en plantaciones forestales jóvenes en Guatemala. *Recursos Naturales y Ambiente*. 46-47,13

Capítulo II: Despiece comercial para *Tectona grandis* L.f clonal de diez años en diferentes índices de sitio, Zona Norte, Costa Rica.

Commercial assortment for 10-year clonal *Tectona grandis* L.f at different site indices, North Zone, Costa Rica.

Resumen

La producción forestal requiere conocer el volumen de los productos comercializables. El objetivo de este estudio fue generar una tabla de despiece comercial para plantaciones clonales de *Tectona grandis*, en diferentes índices de sitio. A una muestra de 263 árboles (119 en IS 27, 120 en IS 24 y 28 en IS 21, se le midió el diámetro al tocón, a 1,3 m del suelo y cada 1,5 m hasta la altura total. El volumen de cada sección se obtuvo con la fórmula de Smalian y el volumen del árbol mediante la sumatoria de cada sección. Se evaluaron los siguientes productos: aserrío grueso (≥ 30 cm de diámetro), aserrío delgado (< 30 cm ≥ 20 cm), tarima (< 20 cm ≥ 12 cm) y leña (< 12 cm ≥ 5 cm) y los residuos < 5 cm. El volumen del producto con mayor valor aumentó conforme incrementa el diámetro de árbol y el volumen de los productos de menor valor disminuyó. En el IS 27, madera con diámetro al DAP < 13 cm corresponde a leña (88-40 %), entre 13 cm y 24 cm, predomina tarima, en adelante domina el aserrío delgado, con más de 28 cm el aserrío grueso y delgado representan más del 75% del volumen comercial. Los cinco productos evaluados están presentes en árboles del IS 27 e IS 24; en el IS 21 no se registró madera para aserrío. Las tablas de despiece comercial representan una herramienta útil para determinar la tendencia y distribución del volumen comercial potencial por tipo de producto en teca clonal de diez años, en zona norte de Costa Rica.

Palabras clave: *Tectona grandis*, tabla de despiece comercial, índice de sitio, Costa Rica.

Abstract

Forest production requires knowing the volume of marketable products. The objective of this study was to generate a commercial assortment table for clonal plantations of *Tectona grandis*, at different site indices. A sample of 263 trees (119 in IS 27, 120 in IS 24 and 28 in IS 21, the stump diameter was measured, 1.3 m from the ground and every 1.5 m to the total height. The volume of each section was obtained with the Smalian formula and the volume of the tree through the sum of each section. The following product was evaluated: thick sawmill (≥ 30 cm in diameter), thin sawmill (< 30 cm ≥ 20 cm), pallets (< 20 cm ≥ 12 cm) and firewood (< 12 cm ≥ 5 cm) and waste < 5 cm. The volume of the product with the greatest value increased as the tree diameter increased and the volume of the products with the lowest value decreased. In IS 27, wood with a diameter < 13 cm corresponds to firewood (88-40%), between 13 cm and 24 cm, pallet predominates, henceforth the thin sawmill dominates, with more than 28 cm the thick and thin sawmill represent more than 75% of the commercial volume. The five products evaluated are present in trees of IS 27 and IS 24; in IS 21 no wood was registered for thick sawmill. The commercial assortment tables represent an useful tool to determine the trend and distribution of the potential commercial volume by type of product in 10-year-old clonal teak, in northern Costa Rica.

Key words: *Tectona grandis*, commercial assortment table, site index, Costa Rica

1. Introducción

La teca es una especie maderable de rápido crecimiento, posicionada en el mercado mundial por la calidad de su madera y alto valor económico. En el planeta se estima un área plantada de 6,8 millones de hectáreas (ha) [1] y en Costa Rica es la más utilizada en la reforestación con fines comerciales con 47167 ha [2]. La madera se destaca por su durabilidad natural, trabajabilidad, calidad y resistencia a condiciones ambientales [3] [4], de ahí su gran potencial para utilizarla en la elaboración de diversos productos forestales [5].

Los mejores sitios para el establecimiento de la especie se ubican en terrenos a una altitud menor a los 1 000 m s.n.m., en suelos con pendientes inferiores a 30 %. Los

suelos poco profundos, arcillosos, con bajo contenido de calcio, magnesio y fósforo, limitan el potencial de crecimiento del material genético superior de la especie que se multiplica en el país; de la misma manera el alto contenido de hierro (Fe) y aluminio (Al) intercambiable [6]; [7]. En la zona norte de Costa Rica registra rendimientos de $57 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ de volumen total a los diez años [8]; por lo general, su madera se exporta en rollo a países asiáticos principalmente [9], no obstante, existe potencial de comercialización a nivel nacional para distintos usos según las dimensiones. Usualmente, el volumen comercializable se estima hasta un diámetro mínimo aprovechable de 15 cm, y la mayoría de las trozas comerciales se encuentran en la categoría de 15 a 20 cm, a los catorce años [10]. Sin embargo, productos con menores dimensiones también pueden representar ingresos al productor.

Algunos autores [11] apuntan que, mediante la planificación estratégica aplicada al manejo forestal, permite maximizar los beneficios económicos de sistemas de producción forestal y el objetivo de las prácticas de manejo estaría dirigido a la maximización con este enfoque, por ejemplo, el uso de material genético con algún grado de selección para incrementar el rendimiento volumétrico comercial [12]. Aunado a ello, la selección de sitios adecuados para la especie tiene un efecto significativo en el crecimiento en altura, en diamétrico y la calidad de la madera, por lo tanto, la productividad del sitio afecta el volumen comercial por tipo de producto [5] [4] [13]. Previamente a la aplicación de las distintas prácticas silvícolas, se necesitan herramientas técnico-científicas de fácil aplicación que permitan planificar los procesos de producción de manera estratégica [5], aumentando la precisión de las predicciones [14] y con ello contribuyan a mejorar la rentabilidad de los negocios. Determinar el volumen comercial total no es suficiente para garantizar la óptima planificación de negocios forestales, pero conocer el volumen de los posibles productos comercializables se vuelve necesario [15].

El despiece comercial del árbol es el término empleado para resumir la cantidad de su madera comercializable, con base en una lista de múltiples productos a obtener según sus dimensiones [3] [16] [5] [13]. Su principal objetivo es agregar valor a la

materia prima producida, mediante la diversificación de los sectores de mercado disponibles para acceder [13]. Este permite planificar la industrialización y comercialización de distintos productos sin limitarlos a una sola línea, con lo cual se perdería el volumen de madera producido que no logre ahí incorporarse.

La tabla de cubicación comercial, por tipo de producto, es la herramienta técnica ideal para planificar estratégicamente el manejo de la masa forestal [15], y brinda al tomador de decisiones, valores porcentuales y volumétricos, por clase de diámetro, para una especie determinada [3]. Lo anterior permitiría precisar el cálculo del retorno financiero del rodal [14]. Diversos autores han investigado sobre la distribución de los distintos productos comerciales de madera en el árbol; a partir de ello, generar tablas de despiece a partir del DAP para varias especies forestales [17], [18], [19] [16]. Específicamente para teca, [3] desarrolló una tabla de despiece comercial en el pacífico de Costa Rica, por su parte, [5] en Brasil, generó una tabla de distribución de productos para clases de DAP cada 2 cm, en diferentes calidades de sitio, Favalessa [4], desarrolló un modelo de distribución de diámetros y una estructura del rendimiento de la producción. Finalmente, en el 2014 [20], estimó la ganancia en multiproductos con la optimización generada al aplicar ecuaciones cónicas que mejor representen el tallo, la corteza, la médula y el duramen de teca.

Debido a la importancia de entender la dinámica del despiece por producto, y en ausencia de esta información para *T. grandis* producida a nivel clonal en Costa Rica, es que el objetivo de la presente investigación fue generar una tabla de despiece del volumen comercial con corteza de una sola entrada (DAP) en distintas calidades de sitio, en una plantación de diez años en la Zona Norte de Costa Rica.

2. Materiales y métodos

Se siguió la misma metodología utilizada en el capítulo 1, en los puntos del 2.1 al 2.4.

2.5. Desarrollo de la tabla de despiece

El volumen por árbol se obtuvo por la suma de los volúmenes parciales de cada uno de los segmentos, considerando la restricción en diámetro de cada producto de la

siguiente manera: aserrío grueso (≥ 30 cm), aserrío delgado (≥ 20 y < 30 cm), tarima (≥ 12 y < 20 cm), leña (≥ 5 y < 12 cm), residuos (< 5 cm).

Obtenido el volumen por producto para cada árbol, se clasificaron los árboles en clases de 1 cm de diámetro y se calculó el volumen promedio de cada producto. Con esta información se desarrolló la tabla de despiece por IS.

3. Descripción de resultados

3.1. Estado silvicultural del ecosistema

Las plantaciones evaluadas se clasificaron en tres índices de sitio (IS 27, IS 24, IS 21), con considerable variabilidad en el crecimiento en DAP, altura y volumen, a pesar del uso de clones; nótese para el IS 27 una amplitud diamétrica de 19,3 cm y 11,2 m en altura; en los IS 24 y 21 también son marcadas esas diferencias (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Valor de las variables por IS evaluadas en árboles de *Tectona grandis*.

Table 1. Value of the variables for IS evaluated in the trees

Estadísticos	Índice de sitio 27			Índice de sitio 24			Índice de sitio 21		
	DAP	HT	VT	DAP	HT	VT	DAP	HT	VT
n	119	119	119	120	120	120	28	28	28
X	0,2277	19,4	0,3600	0,1753	15,41	0,1790	0,1396	12,06	0,0970
SD	0,043	2,09	0,0400	0,0332	2,22	0,0700	0,024	2,11	0,0400
CV	19,10	10,8	38,900	18,9	14,4	44,100	17,32	17,5	43,200
Mínimo	0,138	12,6	0,1010	0,098	10,3	0,0380	0,090	7,9	0,0350
Máximo	0,331	23,8	0,7070	0,280	20	0,4750	0,191	16,5	0,2050

n: tamaño de la muestra, X: promedio SD: desviación estándar, CV: coeficiente de variación (%), DAP (m), VT : volumen total ($m^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$), HT: Altura Total (m).

La mayoría de árboles se agruparon en la clase diamétrica de 20-25,9 cm (65 individuos); 16-22,9 cm (70 árboles), y de 12-14,9 cm (catorce individuos), para los índices de sitio 27, 24 y 21, respectivamente. Los árboles por debajo del promedio se calificaron como rezagados (**Figura 1**).

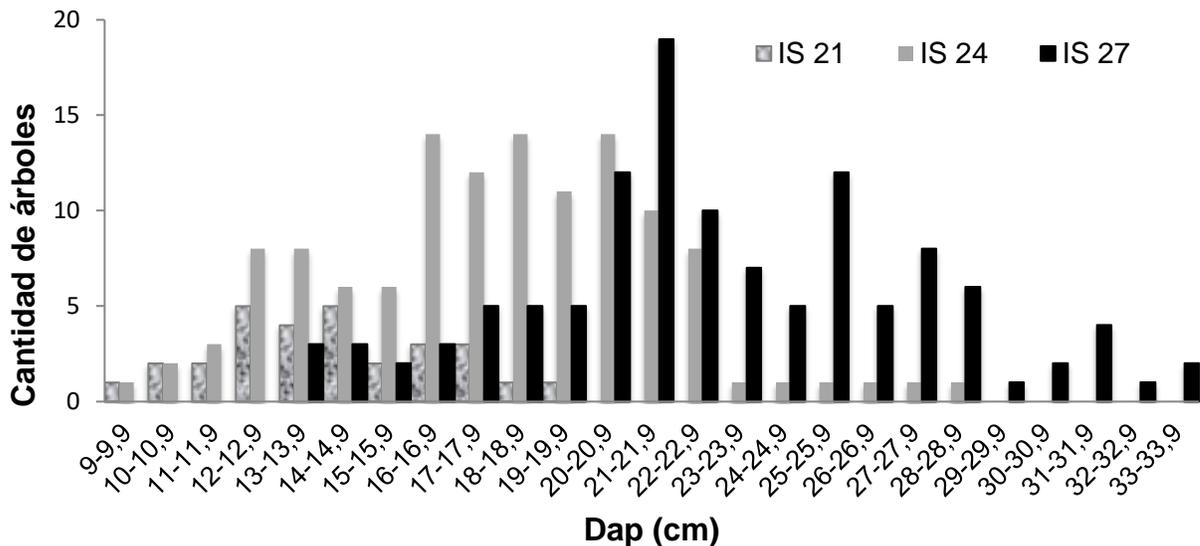


Figura 1. Distribución diamétrica de los árboles por índice de sitio.

Figure 1. Diametric distribution of trees by site index.

3.2. Tabla de despiece

El despiece comercial para árboles de teca en los índices de sitio 27, 24 y 21 se presenta en los **Cuadro 2, Cuadro 3 y Cuadro 4**, respectivamente, de donde es posible obtener el volumen por producto durante su crecimiento con solo conocer el diámetro. La tabla de despiece comercial se elaboró para un rango diamétrico entre 9 y 33 cm y conforme el árbol crece en diámetro, aumenta el volumen de los productos de mayor valor y tamaño.

La tendencia de crecimiento es similar entre los sitios, la cantidad de residuos fue de menos del 10% del volumen total, lo que puede considerarse como bajo. Árboles con DAP mayor a 10 cm tienen troncos con dimensiones adecuadas para madera de tarimas. Este producto debería decrecer a partir de los 20 cm, a partir del que se aprovecharía para aserrío delgado y grueso.

Cuadro 2. Despiece comercial de *Tectona grandis* a los diez años en índice de sitio 27, en Zona Norte de Costa Rica.

Table 2. Commercial assortment of *Tectona grandis* at age 10 on site index 27, in the North Zone of Costa Rica.

DAP	HT	Aserrío grueso		Aserrío delgado		Tarima		Leña		Residuos		VT
		(m ³)	%	(m ³)	%							
13-13,9	16,4	0,000	0,0	0,002	1,5	0,077	59,8	0,047	36,2	0,003	2,5	0,129
14-14,9	14,1	0,000	0,0	0,000	0,0	0,081	67,8	0,035	29,4	0,003	2,8	0,119
15-15,9	14,4	0,000	0,0	0,014	11,8	0,072	61,3	0,028	24,1	0,003	2,8	0,117
16-16,9	16,8	0,000	0,0	0,012	7,1	0,112	66,9	0,042	24,9	0,002	1,1	0,167
17-17,9	17,7	0,000	0,0	0,022	11,5	0,132	70,1	0,031	16,6	0,003	1,7	0,189
18-18,9	18,6	0,000	0,0	0,036	16,0	0,155	68,3	0,034	14,9	0,002	0,8	0,227
19-19,9	19,5	0,000	0,0	0,047	18,4	0,161	63,8	0,043	16,9	0,002	0,9	0,253
20-20,9	18,3	0,015	5,2	0,068	23,5	0,170	58,7	0,034	11,9	0,002	0,6	0,289
21-21,9	19	0,016	4,9	0,095	29,3	0,181	55,5	0,032	9,9	0,002	0,5	0,325
22-22,9	20	0,022	6,0	0,128	35,3	0,178	49,1	0,033	9,1	0,002	0,6	0,363
23-23,9	20	0,034	8,6	0,153	39,5	0,172	44,4	0,028	7,1	0,002	0,4	0,388
24-24,9	20,4	0,018	4,4	0,145	36,0	0,205	50,7	0,035	8,6	0,001	0,3	0,404
25-25,9	20,4	0,042	9,5	0,198	44,6	0,176	39,5	0,027	6,0	0,002	0,5	0,445
26-26,9	20	0,048	10,4	0,246	53,2	0,142	30,6	0,025	5,4	0,002	0,4	0,462
27-27,9	20,8	0,067	13,4	0,280	56,1	0,125	25,1	0,025	5,0	0,002	0,4	0,499
28-28,8	21,3	0,085	15,2	0,331	59,3	0,112	20,1	0,028	5,0	0,002	0,4	0,558
29-29,9	22,3	0,103	16,4	0,439	70,0	0,050	7,9	0,033	5,3	0,002	0,4	0,627
30-30,9	21,7	0,139	21,6	0,350	54,3	0,136	21,1	0,017	2,7	0,002	0,3	0,646
31-31,9	21,5	0,158	25,3	0,321	51,5	0,119	19,1	0,024	3,8	0,002	0,3	0,623
32-32,9	20,9	0,172	27,7	0,301	48,4	0,124	20,0	0,023	3,7	0,001	0,2	0,621
33-33,9	20,3	0,187	30,2	0,282	45,5	0,126	20,4	0,023	3,6	0,001	0,2	0,619

Cuadro 3. Despiece comercial de árbol de *Tectona grandis* a los diez años en índice de sitio 24, en Zona Norte de Costa Rica

Table 3. Commercial assortment of *Tectona grandis* at age 10 on site index 24, in the North Zone of Costa Rica.

DAP	HT	Aserrío grueso		Aserrío delgado		Tarima		Leña		Residuos		VT
		(m ³)	%	(m ³)	%	(m ³)	%	(m ³)	%	(m ³)	%	
9-9,9	10,2	0,000	0,0	0,000	0,0	0	0,0	0,034	88,4	0,004	11,6	0,038
10-10,9	13,1	0,000	0,0	0,000	0,0	0,011	17,0	0,048	76,3	0,004	6,7	0,063
11-11,9	12,7	0,000	0,0	0,000	0,0	0,015	22,5	0,047	72,3	0,003	5,2	0,065
12-12,9	12,5	0,000	0,0	0,000	0,0	0,031	40,9	0,042	55,3	0,003	3,9	0,076
13-13,9	13,2	0,000	0,0	0,000	0,0	0,05	53,5	0,04	43,1	0,003	3,3	0,093
14-14,9	13,1	0,000	0,0	0,001	0,8	0,064	64,0	0,032	32,3	0,003	2,9	0,100
15-15,9	14,3	0,000	0,0	0,003	2,3	0,081	68,0	0,032	26,9	0,003	2,8	0,119
16-16,9	14,7	0,000	0,0	0,013	9,3	0,09	63,1	0,036	25,5	0,003	2,1	0,142
17-17,9	15,7	0,000	0,0	0,02	11,4	0,117	67,8	0,033	18,9	0,003	1,8	0,173
18-18,9	15,8	0,000	0,0	0,032	16,6	0,124	64,5	0,034	17,5	0,003	1,5	0,193

19-19,9	16	0,003	1,5	0,042	19,4	0,134	62,7	0,033	15,2	0,003	1,3	0,215
20-20,9	16,5	0,000	0,0	0,058	24,5	0,146	61,5	0,031	13,1	0,002	0,9	0,237
21-21,9	17,3	0,014	4,8	0,095	33,4	0,148	52,0	0,025	8,7	0,003	1,1	0,285
22-22,9	17,2	0,007	2,5	0,105	36,9	0,141	49,5	0,029	10,1	0,003	1,0	0,285
23-23,9	16,3	0,000	0,0	0,090	37,3	0,123	50,9	0,027	11,0	0,002	0,8	0,242
24-24,9	19,7	0,014	3,6	0,165	43,6	0,173	45,6	0,025	6,6	0,003	0,7	0,380
25-25,9	19,8	0,025	6,3	0,202	50,8	0,146	36,6	0,022	5,6	0,003	0,6	0,398
26-26,9	19,9	0,037	8,8	0,240	57,4	0,119	28,5	0,020	4,8	0,002	0,6	0,418
27-27,9	20	0,048	11,0	0,277	63,5	0,092	21,0	0,017	4,0	0,002	0,5	0,436
28-28,9	20	0,060	12,5	0,314	66,1	0,065	13,6	0,035	7,3	0,002	0,4	0,476

Cuadro 4. Despiece comercial de árbol de *Tectona grandis* a los diez años en índice de sitio 21, en Zona Norte de Costa Rica.

Table 4. Commercial assortment of *Tectona grandis* at age 10 on site index 21, in the North Zone of Costa Rica.

DAP (cm)	HT (m)	Aserrío grueso		Aserrío delgado		Tarima		Leña		Residuos		VT
		(m ³)	%	(m ³)	%	(m ³)	%	(m ³)	%	(m ³)	%	
9-9,9	9,8	0,00	0,0	0,000	0,0	0,001	2,9	0,031	88,6	0,003	8,6	0,035
10-10,9	11,1	0,00	0,0	0,000	0,0	0,011	20,8	0,039	73,6	0,003	5,7	0,053
11-11,9	9,4	0,00	0,0	0,000	0,0	0,014	28,6	0,033	67,3	0,002	4,1	0,049
12-12,9	10,3	0,00	0,0	0,000	0,0	0,026	40,0	0,037	56,9	0,002	3,1	0,065
13-13,9	10,9	0,00	0,0	0,000	0,0	0,041	50,6	0,038	46,9	0,002	2,5	0,081
14-14,9	13,1	0,00	0,0	0,009	8,0	0,066	58,9	0,035	31,3	0,002	1,8	0,112
15-15,9	14,7	0,00	0,0	0,006	4,6	0,081	62,3	0,041	31,5	0,002	1,5	0,13
16-16,9	13,6	0,00	0,0	0,019	14,7	0,072	55,8	0,036	27,9	0,002	1,6	0,13
17-17,9	13,4	0,00	0,0	0,026	17,2	0,090	59,6	0,033	21,9	0,002	1,3	0,151
18-18,9	14,9	0,00	0,0	0,037	20,5	0,112	62,6	0,028	15,7	0,002	1,1	0,178
19-19,9	16,5	0,00	0,0	0,047	22,9	0,133	64,9	0,023	11,2	0,002	1,0	0,205

El diámetro para aserrío delgado aparece en la clase diamétrica de 14,5 cm en todos los sitios. El aserrío grueso en el IS 27 representa entre el 5,2% en árboles de 20 cm de DAP a 30,2 % cuando alcanza 34 cm, Este producto disminuye severamente en el IS 24 y no se registra en el IS 21 (Cuadros 2, 3 y 4).

La madera para leña y tarima en los Índices de sitio 24 y 21 representa el 88% en las primeras clases diamétricas; baja a 36% en el IS 27 a los 13 cm, y después de los 20 cm este producto representa menos del 10%.

Los productos de mayor valor económico (aserrío grueso y aserrío delgado) en los índices de sitio 27 y 24, tienden a incrementar conforme al árbol crece en DAP, excepto para los DAP mayor a 29,5 cm donde decrece el aserrío delgado, pero aumenta significativamente el aserrío grueso.

3.3. Distribución de los productos por IS

El volumen de madera para tarima es el predominante en todos los índices de sitio, representa un promedio de 40 % del volumen total. Productos para aserrío grueso solo aparecen en los IS 27 y IS 24, con 9 y 3 % del volumen total, respectivamente (Figura 2).

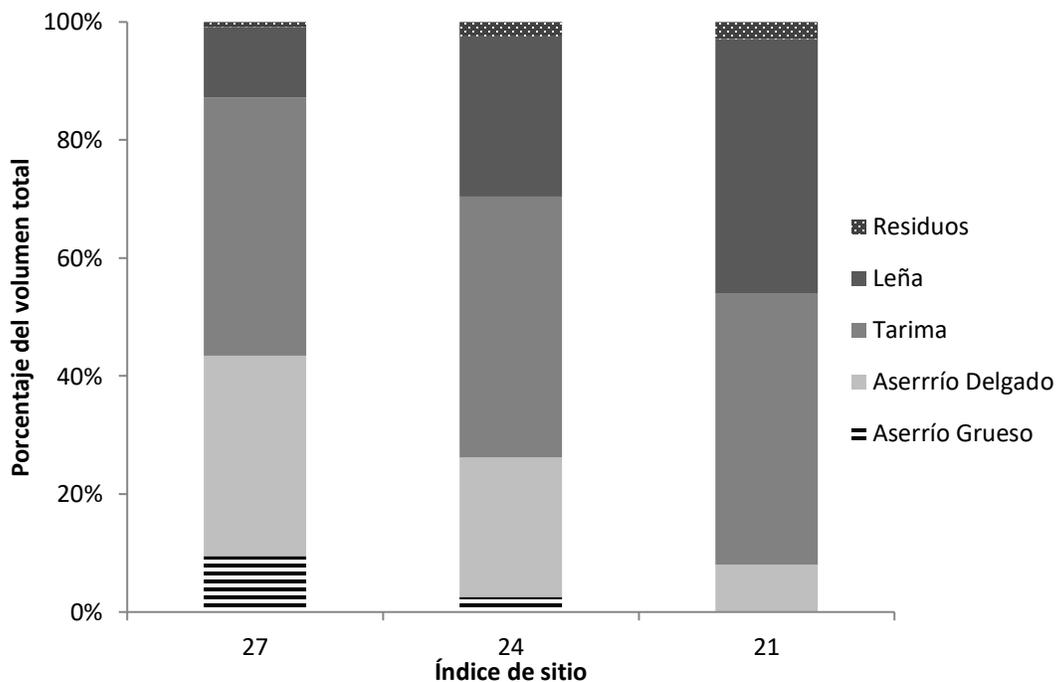


Figura 2. Distribución porcentual del volumen por tipo de producto en *Tectona grandis* a los diez años de edad.

Figure 2. Percentage distribution of the volume by type of product in *Tectona grandis* at 10 years of age

El volumen para aserrío delgado aumentó rápidamente con la calidad de sitio, el mismo representó el 8 % y 33% para el IS 21 e IS 27, respectivamente. La leña acumula un 27 %, 42 % y 11 % en los IS 24, 21 y 27, de modo proporcional. El volumen de residuos en los tres índices de sitio fue menor al 3 %.

Por tanto, en conjunto la madera para aserrío (grosso y delgado) que posee mayor valor en el mercado representa mayores ingresos para el productor, corresponde en los índices de sitio 27 y 24, con un 44 % y 27% del volumen total.

4. Discusión de resultados

4.1. Estado silvicultural del ecosistema

El IS 27 presentó una tendencia a concentrar la mayor cantidad de árboles (65 individuos) con DAP desde 20 cm hasta 25 cm, similar a lo encontrado por [3] en plantaciones de teca en Costa Rica, donde el mayor número de árboles poseía DAP de 20 cm a 24,9 cm; pero diferente de [23] quién reportó que la mayoría de los individuos tenían un DAP desde 15 cm hasta 20 cm en plantaciones clonales de trece años. Según [4], la mayor cantidad de individuos, se ubica en las clases diamétricas entre 20 cm a 30 cm en plantaciones de teca de dieciséis años para los sitios de mayor calidad, e indica que conforme aumenta la calidad de sitio, los árboles se concentran en las clases superiores. Una posible explicación a la baja cantidad de árboles con diámetro mayor a 30 cm, es su joven edad. Lo cual coincide con lo reportado por [23] quien encontró pocos individuos en categorías diamétricas mayores a 25 cm, para plantaciones clonales en el país, con edades desde uno hasta once años de edad.

No obstante, no es conveniente afirmar que esto sea consecuencia únicamente a la relación DAP vs edad, es bien conocida la estrecha relación que mantiene el desarrollo en diámetro ante cambios en la densidad o competencia del rodal [18]. A pesar que las plantaciones aquí evaluadas fueron igualmente manejadas, tanto la variación del efecto del sitio, como tratamientos silvícolas inadecuados, además de una mala selección de los árboles por extraer en los raleos, pudieron influir significativamente en la variación en el crecimiento diamétrico como ha sido reportado en otros estudios en teca [23] [24] [25] [19] [26].

Por otra parte, toda disminución de factores limitantes para la especie se reflejará en aumentos en el crecimiento dasométrico para una misma edad de referencia [13], por lo que las condiciones de sitio influyen en la forma del tronco de los árboles,

dando lugar a diferencias en diámetro, altura y volumen, esto explica el desarrollo diferenciado de dichas variables en los sitios con mejor calidad.

4.2. Tabla de despiece

Los individuos de mayor dimensión ($DAP \geq 25$ cm) presentan todos los productos comerciales, estos disminuyen conforme baja el DAP. El diámetro al cual se obtiene aserrío grueso es menor al reportado por [3], quien determinó que es a partir de 30 cm. Sin embargo, cada vez que el árbol obtiene las dimensiones para un producto nuevo (de mayor valor por su tamaño), tienden a disminuir los productos de menor dimensión (de menor precio), lo que permite que el rodal vaya adquiriendo a través del aumento en crecimiento, mayor cuantía monetaria. Esta tendencia fue descrita por [3], para *Tectona grandis* en el pacífico de Costa Rica, este autor encontró que el volumen de madera para aserrío delgado disminuyó a partir del momento cuando aparece en mayor proporción volumen de madera para aserrío grueso.

Por otra parte en Brasil [5] para diámetros mayores a 30 cm, obtuvo volumen de madera para tres de los cinco productos comerciales evaluados, y hasta los 58 cm registró volumen para todos los productos, lo cual ratifica el patrón que el rodal se diversifica con el crecimiento en diámetro.

Por otra parte, [13], observaron una tendencia similar en la evolución de los productos de *Pinus taeda*, donde la madera destinada para aserrío, aumenta con la edad, al incrementar su diámetro. [27] Determinaron que el volumen total de un árbol de *Araucaria* con DAP 20 cm y 10,4 m de altura, clasifica 100 % de volumen para el producto de menor valor (madera para energía), mientras que uno con 78 DAP y 20 m de altura únicamente posee un 1,1 % para este mismo producto y el 90% corresponde a los productos de mayor valor.

En una de tabla de despiece para Eucalipto, [16] mostró la evolución del diámetro entre las clases diamétricas, y determinó que los individuos con dimensiones mayores presentan mejores posibilidades de diversificar su comercialización; en clases de diámetros más pequeñas la mayor proporción de la madera se destina a pulpa y energía; mientras que los troncos de mayor diámetro son utilizados para

productos de mayor valor, con un bajo volumen de residuos, madera para energía y pulpa. Por otra parte, en este estudio al alcanzar un diámetro de más 30 cm, los árboles aportan materia para aserrío grueso (21,6 %) y aserrío delgado (54,3 %), y un porcentaje muy bajo para productos tales como leña (2,7 %), lo cual es similar a lo que obtuvieron [3] para los mismos productos. Las clases diamétricas superiores son más productivas en aserrío grueso, lo cual muestra el potencial valor económico que puede tener la madera de esta especie, conforme aumenta en diámetro.

La diversidad de productos comerciales por obtener de las plantaciones durante su crecimiento, amplía los posibles mercados a acceder, y por ende potencia la obtención de mayores ingresos económicos. Lo anterior se contrapone a la antigua idea que las plantaciones son destinadas a un único producto, con el inconveniente que la madera que no cumpla las dimensiones establecidas para tal uso usualmente se vende a un muy bajo precio, o no se comercializa. En ese sentido [3], señalan que a través de la tabla de despiece comercial, el volumen para productos como leña y postes, cobra importancia al cuantificar la dimensión real de sus volúmenes sobre todo en las primeras clases de diámetro; ello se traduce en mayor valor económico para el rodal, porque, por lo general, este volumen no se incluye dentro del valor del sistema, debido a que se trabaja con métodos que solo cuantifican el volumen total (tablas y ecuaciones de volumen). Asimismo [14], obtuvieron un 65% de incremento en los ingresos, al convertir el cultivo en multiproductos, comparado con el ingreso promedio de un rodal con un solo producto. De esta forma, se mejora la rentabilidad y la competitividad de las plantaciones.

4.3. Distribución de los productos por IS

Los árboles en el índice de sitio inferior se vieron limitados para generar productos con mayor valor de mercado, o bien, requieren de más tiempo para lograr el diámetro adecuado a dichos productos, lo cual refuerza la afirmación de que los mejores sitios son más productivos, y consecuentemente, generarán mayores ingresos. Los efectos del sitio son más evidentes al comparar la producción (volumen de madera) entre índices de sitio.

Al respecto [5] concluyó que, uno de los productos de más valor (S3- considerando el diámetro en el extremo delgado ≥ 29 cm), solo se presentó en los índices de sitio de mayor calidad. Adicionalmente [28], apunta que el volumen total en teca es dependiente y directamente proporcional a factores como la calidad del sitio. En esta misma línea [5] observó que la distribución del volumen para teca en Brasil registró una fuerte variabilidad entre las calidades de sitio, en la misma clase diamétrica; resultado atribuible al hecho que la forma del árbol se ve afectada por el crecimiento y medio ambiente, por lo tanto, árboles del mismo DAP, en diferentes sitios, no necesariamente tienen la misma forma geométrica. Resultados similares fueron registrados por [13], donde los mejores sitios producen mayores registros en menor tiempo y por ende mayor variedad de los productos a obtener. Otros autores describieron la forma de los árboles de eucalipto ligado al cálculo del volumen para los diferentes despieces, con el objetivo de un mejor aprovechamiento de su fuste [16].

Según [4], se encontraron diferencias biológicas en los sitios, por lo cual las actividades silviculturales como los raleos, deberían ser a distintas edades acorde a sus condiciones, es decir que en los mejores sitios las intervenciones deberían realizarse antes, debido a que la competencia se establece antes, en comparación con los peores sitios. Adicional a esto, [20] señala que, el índice de sitio también influye de forma indirecta sobre la calidad de la madera, la cantidad de albura disminuye a medida que aumenta el diámetro del árbol, mientras la cantidad de duramen en la madera es mayor en sitios de buena calidad, lo cual se traduce en un mejor tono de la madera, una mayor resistencia natural y mejores propiedades mecánicas de los productos.

De todo lo anterior se rescata que, al considerar como objetivo final el mayor retorno económico de la masa, es necesario seleccionar con cuidado los sitios por plantar.

5. Conclusiones

Las plantaciones corresponden a los IS 27, IS 24 e IS 21. Este último no es recomendable para el establecimiento de plantaciones comerciales por su bajo rendimiento en productos de mayor valor ($> 8\%$ del volumen total).

Con las tablas de volumen comercial creadas por índice de sitio, basadas en la medición del diámetro se puede conocer con facilidad el despiece de los árboles individuales de teca clonal de diez años.

Las plantaciones evaluadas en los índices IS 27 e IS 24 producen madera para los cuatro tipos de productos establecidos (aserrío grueso, aserrío delgado, tarima y leña), mientras que el IS 21 ofrece tres clases de ellos solamente (aserrío delgado, tarima y leña).

La calidad del sitio influye en la dinámica de distribución de los productos comerciales por tanto la determinación de los rendimientos en los diferentes índices de sitio es crucial para la planificación estratégica de la gestión forestal.

Con base en la mayor obtención de productos de alto valor en los sitios más productivos se recomienda intensificar la evaluación preliminar de las fincas a plantar para escogerlas mejor y para sectorizar la plantación en los lugares de mayor rendimiento.

6. Referencias

[1] R. A. Madeiros , H. Nogueira, F. Siqueira y H. Garcia, "Growth and yield of teak stands at different spacing ", *Pesq. agropec. bras.* Brasilia, vol. 53, no. 10, pp. 1109-1118, 2018.

[2] INEC (Instituto Nacional de Estadística y censos), VI Censo Nacional Agropecuario: Resultados Generales 2015. Disponible en: <http://inec.cr/documento/cenagro-2014-cultivos-agricolas-total-de-fincas-con-cultivo-de-teca-por-extension-sembrada>. [Último acceso: 03 02 2018].

[3] O. Mora y W. Hernández, "Estimación del volumen comercial por producto para rodales de teca en el Pacífico de Costa Rica", *Agronomía Costarricense* vol. 31, no.1, 2007.

[4] C. M. Cometti, "Estruturação da produção de *Tectona grandis* Linn f. em Mato Grosso, Santa Maria", Dr. Tese, Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria, RS, 2018.

- [5] K. Da Rocha, "Afilamento e otimização de sortimentos de *Tectona grandis* linn f. para maximização do volume e da renda, Santa Maria, 2018," Dr. Tese, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.
- [6] D. D. Armijos, "Construcción de tablas volumétricas y cálculo de factor de forma (ff.) Para dos especies, teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) en tres plantaciones de la empresa Reybanpac ca. En la provincia de los ríos. Ecuador," Tesis de Licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Riobamba, 2013
- [7] S. Molina, C. Alfaro, O. Murillo, Y. Badilla, R. Luján, "Evaluación del comportamiento de clones de *Tectona grandis* L.f. en suelos vertisoles de la Península de Nicoya, Costa Rica," Revista Forestal Mesoamericana Kuru, vol.16, no. 38, pp. 24-34, 2018.
- [8] E. Gonzáles, "Determinación del momento óptimo de cosecha final en una plantación de *Tectona grandis* de la zona norte de Costa Rica," M. S. Tesis, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, CR, 2014.
- [9] ONF (Oficina Nacional Forestal), Usos y aportes de la madera en Costa Rica. Estadísticas 2017 y precios 2018, Disponible en <https://onfcr.org/media/uploads/documents/usos-y-aportes-de-la-madera-2017.pdf>.
- [10] L. Sage y R. Quirós, "Mercadeo e industrialización de madera proveniente de plantaciones forestales", Fondo nacional de financiamiento forestal (FONAFIFO), Documento técnico. Marzo. 2001.
- [11] S. Kohler, H. Kohler, A. Figueiredo, J. E. Arce y S. Do Amaral, "Evolução do sortimento em povoamentos de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina," Floresta, vol. 45, no. 3, pp. 545-554, 2015.
- [12] Y. Badilla y O. Murillo, Ganancia realizada en plantaciones clonales de teca en Costa Rica., Cartago: En: I Simposio Internacional GENFORES. 26-27 enero, 2017. Instituto Tecnológico de Costa Rica., 2017.

- [13] S. Kohler, N. Wolff, A. Figueiredo y J. E. Arce, "Dynamic of assortment of *Pinus taeda* L. plantation," *Sci. For* vol. 42, no. 103, pp. 403-410, 2014.
- [14] B. P. Furtado, D. H. Breda, M. Lopes da Silva, H. Garcia y M. L. Marques da Silva, "Conversão de árvores em multiprodutos da madeira utilizando", *Revista Árvore*, vol. 37, no. 5 , pp. 881-887, 2013.
- [15] J. Hernández, A. Hernández, X. García, J. Tamarit, L. Martínez y J. García, "Ecuaciones de Volumen total y de razón para estimar el volumen comercial de *Swietenia macrophylla King*," *Colombia Forestal*, vol. 21, no. 1, 2018.
- [16] M. Aguiar, "Sortimentos de eucalipto na Região centro-oeste de Mato Grosso," M. S. Tese, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2019.
- [17] C. A. Martinelli, "Modelos de afilamento para *Pinus taeda* l. ajustados segundo a forma do tronco e métodos de estratificação," Dr. Tese, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009
- [18] P. S. Pigatto, "Estrutura bi econômica da produção no manejo da densidade de *Pinus taeda* L. na região do planalto catarinense," Dr. Tese, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2012.
- [19] S. V. Kohler, "Evolução do afilamento do tronco e do sortimento em plantios de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina, Mato Grosso, Brasil," M. S. Tese, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- [20] L. De Carvalho, "Modelagem do afilamento de fuste com casca, sem casca, cerne e medula de *Tectona grandis* l.f. (teca) na otimização de multiprodutos", M. S. Tese, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.
- [21] IMN (Instituto Meteorológico Nacional), "Regiones y Subregiones Climáticas de Costa Rica," 2000. Disponible en <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica>.

- [22] F. Mora y V. Meza, "Curvas de índice de sitio para Teca (*Tectona grandis* Linn.) En la Vertiente del Pacífico de Costa Rica, Posibilidades y perspectivas para su desarrollo," *Seminario y Grupo de Discusión Virtual*. (Disco compacto), Heredia, 2013.
- [23] J. Fallas, "Funciones alométricas, de volumen y de crecimiento para clones de teca (*Tectona grandis* L.f) en Costa Rica," M. S. Tesis, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2017.
- [24] E. Vaides, L. Ugalde, G. Galloway, "Crecimiento y productividad de teca en plantaciones forestales jóvenes en Guatemala," *Recursos Naturales y Ambiente*, no. 46-47, pp. 137-145, 2004.
- [25] A. Barboza, "Uso da programação linear como suporte de decisão para regimes de manejo de teca (*Tectona grandis* l. f.)," Tesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2017.
- [26] A. Libanio, Pelissari, M. Roveda, S. F. Caldeira, C. R. Sanquetta, A. P. Dalla, C. Krulikowski, "Geostatistical modeling of timber volume spatial variability for *Tectona grandis* l. f. precision forestry", *CERNE*, vol. 23, no.1, pp. 115-122, 2017.
- [27] E. A. Costa, C. A. Guimarães, P. R. Schneider, A F. Hess, "Função de afilamento e sortimentos de madeira para *Araucaria angustifolia*," *Ciência Florestal*, vol .26, no.2, pp. 523-533, 2016.
- [28] ISTF, (Sociedad Internacional de Forestales Tropicales) "Manejo de plantaciones de la teca para productos sólidos," 2009. Disponible en http://www.istf-bethesda.org/specialreports/teca_teak/teca.pdf

CONCLUSIONES GENERALES

Las plantaciones de teca clonal evaluadas a los 10 años resultaron ser IS 27, IS 24 e IS 21, este último no es recomendable para el establecimiento de plantaciones comerciales por su baja productividad.

Los modelos elegidos para estimar el volumen comercial en los tres índices de sitio, presentaron una bondad de ajuste muy buena ($R^2 > 0.94$) con bajos errores de estimación. Asimismo, muestran la ventaja de la simplicidad en su uso, por utilizar como variable predictora únicamente el diámetro a la altura del pecho para la estimación del volumen comercial del árbol individual, mediante la generación de ecuaciones de regresión.

Los modelos ajustados en este estudio representan una herramienta útil que puede ser utilizada en la cuantificación del volumen comercial con corteza de teca clonal desde 15 cm de diámetro, únicamente para plantaciones con características similares a las del presente estudio. Por tanto, se recomienda utilizar con cautela en condiciones distintas a las aquí evaluadas.

Con las tablas de volumen comercial creadas por índice de sitio, basadas en la medición del diámetro se puede conocer con facilidad el despiece de los árboles individuales de teca clonal de diez años.

Las plantaciones evaluadas en los índices IS 27 e IS 24 producen madera para los cuatro tipos de productos establecidos (aserrío grueso, aserrío delgado, tarima y leña), mientras que el IS 21 ofrece tres clases de ellos solamente (aserrío delgado, tarima y leña).

La calidad del sitio influye en la dinámica de distribución de los productos comerciales, por tanto, se recomienda que su determinación debería hacerse a priori o en su defecto, sectorizar los buenos sitios para el establecimiento de las plantaciones.