

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

PRODUCCIÓN Y RENTABILIDAD EN UNA PLANTACIÓN DE TECA
***(Tectona grandis)* EN COSTA RICA**

Tesis con formato artículo científico para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
en Ciencias Forestales con énfasis en Manejo Forestal

Presentado por:

Adrián Delgado Torres
Luis Alberto Palma Saborío

Heredia, Costa Rica

Año:2022

Trabajo de graduación aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional de Costa Rica, para optar al grado de Licenciatura en **Ingeniería en Ciencias Forestales con énfasis en Manejo Forestal**.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

.....

Dr. Sergio Molina Murillo

Representante del Decanato de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

.....

Nancy Zamora Cervantes
Dirección de EDECA

.....

Marielos Alfaro Murillo
Tutor

.....

Rafael Murillo Cruz
Lector

.....

William Fonseca González
Lector

.....

Adrián Delgado Torres

.....

Luis Palma Saborío

Postulantes del trabajo

Tabla de volumen de plantaciones de *Tectona grandis* L. f. en diferentes índices de sitio en la zona norte de Costa Rica

Volume table of *Tectona grandis* L. f. plantations at different site indices, northern zone of Costa Rica

Adrián Delgado Torres ¹, Luis Alberto Palma Saborío ²

Resumen

[Introducción]: Las tablas de despiece son herramientas de gran utilidad para cuantificar el volumen de una plantación forestal, facilitando los procesos productivos y comerciales. **[Objetivo]:** Construir una tabla de despiece con el volumen por hectárea para diferentes productos en cada índice de sitio de la plantación. **[Metodología]:** La plantación se ubica en Los Chiles, Alajuela, donde se establecieron parcelas temporales para determinar la distribución diamétrica por índice de sitio (IS). Se seleccionaron 509 árboles en cinco índices de sitio. A cada árbol, en el piso, se le midió el diámetro en secciones (trozas) de 1.5 m, partiendo desde la base hasta el extremo más delgado, luego se calculó el volumen con la fórmula de Smalian. Las trozas se clasificaron según su diámetro en cinco categorías: Aserrío grueso, aserrío delgado, tarima, leña y desperdicio. Con volumen por sección y la densidad de árboles por hectárea, según las parcelas temporales, se estimó el volumen por hectárea para cada producto en cada índice de sitio **[Resultados]:** El volumen se clasificó en aserrío grueso (AG) y delgado (AD), tarimas, leña y desperdicio. Se obtuvo un volumen comercial (AG, AD) de 39.41; 82.65; 104.82; 126.39 y 125.22 m³*arb⁻¹ para el IS 18, 21, 24, 27 y 30, respectivamente. **[Conclusiones]:** Los resultados muestran que la plantación presenta un volumen que con un manejo adecuado se pueden obtener una producción que genere un proyecto rentable

Palabras clave: Tablas de despiece, producción, teca, volumen total, volumen comercial.

Abstract

[Introduction]: This investigation presents a cutting table by product in different site indexes for *Tectona grandis* L.F. based on cubage collected in the area of Los Chiles, Alajuela. **[Objective]:** To build a cutting table with the volume per hectare for different products in each plantation site index. **[Methodology]:** The data was obtained from the selection of 509 trees on floor, at the age of 17-year-old, selected according to the diametric distributions in

¹ Asistente académico, Universidad Nacional, Costa Rica. adrian.delgado.torres@una.cr;

² Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. luis.palma.saborio@est.una.ac.cr;
<https://orcid.org/0000-0002-2077-8827>

five site indices present in the plantation. These were cubed every 1.5 meters, from the base to the apex, measuring the diameter at the thin end. Then the data was tabulated classifying each log according to its diameter into five categories: thick sawmill, thin sawmill, pallet, firewood and waste, with the information of the temporary plots that were raised to define the diametric ranges, the densities per hectare were obtained and the volume per hectare was estimated for each product in each site index. **[Results]**: The volume was classified into thick (AG) and thin (AD) sawmills, pallets, firewood and waste. A trade volume (AG, AD) of 39.41, 82.65 was obtained; 104.82; 126.39; 125.22 m³*árb-1 for IS 18, 21, 24, 27 and 30, respectively. **[Conclusions]**: The results show that the plantation has an optimal volume despite the fact that its genetic source is seed and not cloned and that with proper management of it, an attractive production for the investor can be achieved.

Keywords: Cutting tables, production, teak, total volume, commercial volume.

1. Introducción

La teca (*Tectona grandis*) es la especie de madera preciosa más plantada en el mundo, se emplea en una gran variedad de usos: muebles, pisos, usos marinos, también en la fabricación de puentes y embarcaderos (Keogh, 2013). Según Kollert & Kleine (2017), diversas estimaciones cubren entre 4.35 y 6.89 millones ha, a nivel mundial; por su parte, se reporta 47.167 ha, en Costa Rica (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2015).

El manejo de plantaciones requiere de la armonización de aspectos silviculturales, genéticos y culturales, que maximicen la productividad al menor costo (Moret *et al.*, 1998). Las prácticas culturales inciden en el crecimiento de la especie; además, las condiciones de sitio y genéticas también afectan la producción. Según Cao (1999) una plantación de teca presenta tasas de crecimiento de 10 a 20 m³*ha⁻¹*año⁻¹, decreciendo hasta niveles de 4-8 m³*ha⁻¹*año⁻¹ a medida que envejece la plantación.

El despiece comercial o desglose por productos ha sido estudiado escasamente por investigadores forestales. Hernández & Mora (2007) hicieron una tabla de despiece para teca utilizando 22 “árboles tipo” aplicando el método del análisis fustal, generaron información para 373 árboles de teca, con diámetro normal (DAP) entre 7.88-47.8 cm., Salazar *et al.* (2020) publicaron una distribución de productos para Cedro en un sistema agroforestal con café, en donde usaron 74 árboles medidos, unos en el piso y otros con un dendrómetro digital.

La tabla de despiece comercial es una herramienta de aplicación fácil, facilita la estimación del volumen de plantaciones a partir de mediciones simples como el diámetro (DAP) y clasifica los volúmenes para cada uno de los productos que se deseen obtener (Hernández y Mora, 2007). El objetivo de esta investigación fue construir una tabla de despiece comercial con el volumen por hectárea, para diferentes productos en índice de sitio para la plantación ubicada en Los Chiles, Alajuela.

2. Metodología

2.1 El sitio de estudio

El muestreo se realizó en el año 2019, en una plantación en la zona norte de Costa Rica, plantada con *Tectona grandis* establecida en el año 2002, con una extensión de 300 ha, de la empresa PROTEAK S.A. La propiedad presenta topografía plana, en algunas secciones, suelos con drenaje natural moderado y drenajes artificiales en algunos sitios. La finca está ubicada entre 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 presenta un clima lluvioso, con precipitaciones anuales entre 1636-2000 mm y un promedio de 25 °C (Instituto Meteorológico Nacional [IMN], 2020). Los suelos son ultisoles (Universidad de Costa Rica [UCR], 2016); caracterizados por sus tonalidades pardo rojizas a rojizas, alto contenido de aluminio extraíble y bajos en calcio, por lo que se pueden definir como ácidos, profundos y bien desarrollados, con una transición difusa entre los horizontes, (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria [INTA], 2016).

La plantación se estableció con material de semilla proveniente de Trinidad y Tobago y tuvo un manejo homogéneo en toda su extensión. Las labores silviculturales iniciaron con la preparación del terreno (subsulado), aplicación de cal, chapeas y dos raleos a los 7 y 12 años.

2.2 Identificación de los índices de sitio

PROTEAK S.A cuenta con información de 74 parcelas permanentes (PPM) distribuidas en toda la finca; con ella se clasificaron las plantaciones por índice de sitio (IS) según las curvas de IS desarrolladas por Meza (2002), en las cuales se describen cinco índices que van desde el 18 hasta el 30. Para la ubicación de las PPM en el campo, se tuvo acceso a las coordenadas que fueron introducidas en un dispositivo GPS Garmin Map 62s.

2.3 Tamaño de la muestra y cálculo de variables

Aleatoriamente se seleccionaron parcelas (PPM) en cada IS (IS 18: 5 PPM, IS 21: 3 PPM, IS 24: 3 PPM, IS 27: 4 PPM, IS 30: 1 PPM) y se talaron todos los árboles en estas, en total 509 árboles: 132, 101, 100, 106, 70 en los IS 18, 21, 24, 27, 30, respectivamente.

El índice de sitio 30 tuvo un muestreo menor debido a que al momento de realizar el trabajo de campo, la empresa suspendió el aprovechamiento y no permitieron cortar más árboles de la mejor calidad por razones comerciales (que no iban a ser vendidos en ese momento).

Antes de cortar los árboles, se midió en pie el diámetro normal (DAP) con cinta diamétrica, luego se midió el diámetro en la base de la primera troza y, en cada sección de 1.5 m de largo se midió el extremo delgado. La altura total se determinó sumando la cantidad de secciones de 1.5 m más el largo del ápice y la altura comercial hasta un diámetro de 15 cm. El volumen total y comercial se determinó con la fórmula de Smallian aplicada a cada troza, ecuación 1.

$$\left(\frac{d_1+d_2}{2}\right)^2 \times 0.7854 \times \text{Largo troza} \quad (\text{E.1})$$

Donde:

d_1 : diámetro mayor

d_2 : diámetro menor

El grosor de la corteza (mm) se midió con un pie de rey digital mediante la extracción de una porción de la corteza en cada punto de medición del diámetro.

2.4 Tabla de volumen

Para los IS se elaboró una tabla de volumen promedio por clase diamétrica, con rango de 2 cm, amplitud definida por PROTEAK S.A según el precio de la madera. Se utilizó el diámetro de la troza en el extremo delgado para clasificar su volumen en los siguientes productos: aserrío grueso, aserrío delgado, tarimas y leña (**Cuadro 1**). La sección con diámetro menor a 5 cm se consideró desperdicio.

Para el cálculo del volumen por hectárea, se usó la densidad por hectárea obtenida de las parcelas temporales hechas para la cubicación.

Cuadro 1. Parámetros de clasificación de cada troza según el diámetro en el extremo delgado.

Table 1. Classification parameters of each log according to the diameter at the thin end.

Categoría	Diámetro Menor (cm)	Diámetro Mayor (cm)
Aserrío grueso (AG)	30	
Aserrío delgado (AD)	20	29.9
Tarima (T)	12	19.9
Leña (L)	5	11.9
Desperdicio (D)	>5	

3. Resultados

3.1 Tabla de despice IS18

El IS18 es el de menor producción, tiene 300 árb*ha⁻¹, el volumen comercial se concentra en los productos de aserrío delgado (45.2%), tarimas (37.5%) y leña (12.4%) y en menor medida en aserrío grueso (3.6%). El 48.8% del volumen se considera exportable, tomando en cuenta que el mercado internacional consume diámetros a partir de 20 cm. La plantación puede producir hasta 39.4 m³*ha⁻¹ (**Cuadro 2**). Debido a que el 37.5% del volumen clasifica para

fabricar tarimas, el manejo podría orientarse a la producción de éstas, haciendo un manejo diferenciado de la densidad, aumentando la cantidad de árboles por hectárea, con esto se maximizarían los recursos que se destinan a estas áreas. Además, el valor de la madera en pie para tarimas es de USD\$34.5*m³ (Barrantes & Ugalde 2020), lo que podría convertirse en un ingreso adicional al obtenido por los otros productos comerciales.

Cuadro 2. Tabla de volumen total con corteza (árbol*ha⁻¹) para teca de 17 años para el índice de sitio 18, Zona Norte, Costa Rica.

Table 2. Total volume table with bark (tree*ha⁻¹) for seventeen-year-old teak for site index 18, in North zone, Costa Rica.

Clase diamétrica	Árb*ha ⁻¹	AG m ³ *ha ⁻¹	AD m ³ *ha ⁻¹	T m ³ *ha ⁻¹	L m ³ *ha ⁻¹	D m ³ *ha ⁻¹
8-9.9	4.4				0.1	0.0
10-11.9	20				1.2	0.1
12-13.9	13.3			0.3	0.9	0.0
14-15.9	17.8			1.2	0.9	0.1
16-17.9	13.3			1.7	0.6	0.1
18-19.9	40.0			7.2	1.5	0.2
20-21.9	46.7		3.2	9.3	1.5	0.2
22-23.9	55.6		7.5	9.5	1.9	0.2
24-25.9	31.1		6.7	5.0	0.8	0.1
26-27.9	17.8		5.5	2.6	0.5	0.1
28-29.9	31.1		12.1	3.7	1.1	0.1
30-31.9	2.2		0.5	0.5	0.1	0.0
32-33.9	6.7	1.0	3.0	0.7	0.2	0.0
Promedio	300.0	1.0	38.4	41.6	11.2	1.1

AG: Aserrío grueso, AD: Aserrío delgado, T: Tarima, L: Leña, D: Desperdicio.

3.2 Tabla de despiece IS21

En este índice, el aserrío delgado representa el 49.2%, el aserrío grueso el 9.5% y el producto para tarimas 32.1%. Entre los productos de mayor valor (AG y AD) y, considerando la abundancia (247 árb*ha⁻¹), tiene un volumen comercial aproximado de 82.6 m³*ha⁻¹ (**Cuadro 3**). En este IS el rodal ofrece todos los productos, pero la cantidad destinada a tarima y leña disminuye y aumenta el volumen de aserrío delgado. Esto favorece la producción de madera para un proceso industrial, aprovechando los diámetros menores para elaborar tableros listonados u otros productos similares.

Cuadro 3. Tabla de volumen total con corteza (árbol*ha⁻¹) para teca de 17 años para el índice de sitio 21, Zona Norte, Costa Rica.

Table 3. Total volume table with bark (tree*ha⁻¹) for seventeen-year-old teak for site index 21, in North zone, Costa Rica.

Clase diamétrica	Árb*ha ⁻¹	AG m ³ *ha ⁻¹	AD m ³ *ha ⁻¹	T m ³ *ha ⁻¹	L m ³ *ha ⁻¹	D m ³ *ha ⁻¹
14-15.9	2.5			0.2	0.1	0.0
16-17.9	4.9			0.7	0.2	0.0
18-19.9	2.5			0.4	0.1	0.0
20-21.9	7.4		0.4	1.5	0.2	0.0
22-23.9	39.5		5.1	8.0	1.4	0.2
24-25.9	46.9		11.9	7.8	1.6	0.2
26-27.9	74.1		26.6	11.4	2.6	0.3
28-29.9	32.1		14.7	4.3	1.0	0.1
30-31.9	29.6	3.8	15.0	3.1	0.9	0.1
34-35.9	7.4	2.2	3.0	0.5	0.3	0.0
TOTAL	247.0	6.0	76.7	37.9	8.4	1.0

AG: Aserrío grueso, AD: Aserrío delgado, T: Tarima, L: Leña, D: Desperdicio

3.3 Tabla de despiece IS24

Los productos para aserrío (AG, AD) aumentan ligeramente (64%) con respecto al IS21 (58.7%); sin embargo, se obtiene una categoría diamétrica más en aserrío grueso (32-33.9 cm), con 16.8 m³*ha⁻¹ (**Cuadro 4**). El volumen para tarimas sigue siendo significativo (28.2%), lo cual indica se podría obtener hasta un 92.7% de madera con valor comercial. La densidad es de 266.7 arb*ha⁻¹.

Cuadro 4. Tabla de volumen total con corteza (árbol*ha⁻¹) para teca de 17 años para el índice de sitio 24, Zona Norte, Costa Rica.

Table 4. Total volume table with bark (tree*ha⁻¹) for seventeen-year-old teak for site index 24, in North zone, Costa Rica.

Clase diamétrica	Árb*ha ⁻¹	AG m ³ *ha ⁻¹	AD m ³ *ha ⁻¹	T m ³ *ha ⁻¹	L m ³ *ha ⁻¹	D m ³ *ha ⁻¹
16-17.9	8.0				0.4	0.0
18-19.9	18.7				0.7	0.1

20-21.9	5.3		0.4	1.2	0.2	0.0
22-23.9	45.3		6.4	9.6	1.6	0.2
24-25.9	21.3		5.4	4.0	0.9	0.1
26-27.9	21.3		8.7	2.7	0.8	0.1
28-29.9	77.3		37.5	9.4	2.7	0.3
30-31.9	40.0	5.3	20.4	4.5	1.6	0.2
32-33.9	24.0	4.3	12.5	2.1	0.7	0.1
34-35.9	5.3	1.9	2.1	0.3	0.2	0.0
TOTAL	266.7	11.5	93.3	33.9	9.7	1.1

AG: Aserrío grueso, AD: Aserrío delgado, T: Tarima, L: Leña, D: Desperdicio

3.4 Tabla de despiece IS27

En este índice, con una densidad de 215 arb*ha⁻¹, el 69.4% de los productos corresponden a aserrío grueso y delgado, 24.6% a tarimas; es decir, el 94% del volumen del árbol se considera comercial (**Cuadro 5**). Esto es un ligero incremento (1.8%) en productos comerciales respecto al IS 24, también aumentó el aserrío grueso en 15m³*ha⁻¹, lo que se traduce en mayor valor monetario de la plantación.

Cuadro 5. Tabla de volumen total con corteza (árbol*ha⁻¹) para teca de 17 años para el índice de sitio 27, Zona Norte, Costa Rica.

Table 5. Total volume table with bark (tree*ha⁻¹) for seventeen-year-old teak for site index 27, in North zone, Costa Rica.

Clase diamétrica	Árb*ha ⁻¹	AG m ³ *ha ⁻¹	AD m ³ *ha ⁻¹	T m ³ *ha ⁻¹	L m ³ *ha ⁻¹	D m ³ *ha ⁻¹
20-21.9	7.2		0.9	1.6	0.3	0.0
22-23.9	16.9		3.1	3.9	0.6	0.1
24-25.9	4.8		1.2	1.0	0.2	0.0
26-27.9	41.1		16.2	7.0	1.5	0.2
28-29.9	19.3		10.3	2.9	0.7	0.1
30-31.9	19.3	3.1	11.3	2.6	0.8	0.1
32-33.9	70.1	13.0	36.5	8.5	2.1	0.3
34-35.9	36.2	10.5	20.3	3.4	1.2	0.2
TOTAL	215.0	26.5	99.9	31.0	7.4	0.9

AG: Aserrío grueso, AD: Aserrío delgado, T: Tarima, L: Leña, D: Desperdicio

3.5 Tabla de despiece IS30

Es el índice de mayor producción y tiene una densidad de 200 arb*ha⁻¹, el volumen comercial (77.9%) se concentra en el aserrío grueso y delgado, mayormente en el delgado y,

principalmente, en la categoría 34-35.9 cm (14.7%). El aserrío grueso presenta un ligero aumento y es similar al de la categoría 27, mostrando una leve disminución en el volumen comercial (AG Y AD) de $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, posiblemente influenciado por el bajo muestreo en este sitio (**Cuadro 6**).

Cuadro 6. Tabla de volumen total con corteza (árbol* ha^{-1}) para teca de 17 años para el índice de sitio 30, Zona Norte, Costa Rica.

Table 6. Total volume table with bark (tree* ha^{-1}) for seventeen-year-old teak for site index 30, in North zone, Costa Rica.

Clase diamétrica	Árb* ha^{-1}	AG $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$	AD $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$	T $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$	L $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$	D $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$
26-27.9	28		10.6	5.3	0.8	0.1
28-29.9	53		25.2	8.1	1.7	0.2
30-31.9	62	8.3	33.2	7.9	2.0	0.3
32-33.9	40	7.0	20.9	5.3	1.2	0.2
34-35.9	37	10.8	21.7	3.8	1.0	0.2
TOTAL	220.0	26.2	111.6	0.4	6.7	0.9

AG: Aserrío grueso, AD: Aserrío delgado, T: Tarima, L: Leña, D: Desperdicio.

La plantación, a pesar de ser establecida con solo una fuente genética y de recibir el mismo manejo silvicultural, posee diferencias en crecimiento y distribución de sus productos maderables (**Cuadro 7**).

Cuadro 7. Distribución del volumen por hectárea, por tipo de producto en árboles de teca plantados, Zona Norte, Costa Rica.

Table 1 Volume distribution per hectare, by product type in planted teak trees, in North zone, Costa Rica.

IS	AG $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$	AD $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$	T $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$	L $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$	D $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$	Total $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$
18	0.97	38.44	41.56	11.22	1.12	93.31
21	5.95	76.69	37.89	8.39	1.00	129.92
24	11.49	93.33	33.86	9.72	1.09	149.49
27	26.52	99.88	30.98	7.42	0.91	165.71
30	26.16	111.59	30.42	6.69	0.93	175.79

AG: Aserrío grueso, AD: Aserrío delgado, T: Tarima, L: Leña, D: Desperdicio.

4. Discusión

Las categorías de aserrío grueso y aserrío delgado, productos de mayor valor monetario suman 39.41; 82.65; 104.82; 126.39 y 125.22 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, en los IS 18, 21, 24, 27 y 30, respectivamente, tendencia clara de que la productividad y el valor de la cosecha aumenta con la calidad de sitio. También hay similitud entre el IS 27 y el IS 30, lo cual indica que ambas categorías se pueden manejar como una sola a nivel operativo. El análisis de las distribuciones demostró que, en las categorías superiores a 30 cm, se ubicaron el 3%, 15%, 20%, 58%, 63% de los árboles por hectárea para los IS 18, 21, 24, 27, 30, respectivamente. El cambio en los productos que presenta la plantación varía conforme cambia la categoría diamétrica, aumentando gradualmente los productos de mayor valor comercial (AG Y AD) y decreciendo los otros productos (T, L, D). Entre los productos con mayor valor comercial, el aserrío grueso posee menor volumen promedio por hectárea ($14.22 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) seguido del aserrío delgado ($83.99 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$).

El volumen ponderado para aserrío delgado (57.4%) tiene dominancia en todos los índices de sitio, excepto en el IS18, que es levemente menor al de tarimas. Esto indica que muchos árboles tienen una mayoría de trozas con diámetro entre 20 y 29.9 cm, tamaño atractivo para el mercado mundial de la teca. En las clases diamétricas superiores a 32 cm, el AG alcanzó la máxima producción (71% del volumen de AG total). Hernández & Mora (2007) determinaron que la especie ofrece cuatro productos (AG, AD, T, Postes) a partir de los 30 cm; también indican que se presenta más variabilidad de productos conforme aumenta el diámetro, por su lado Salazar *et al.* (2020) determinaron que a partir de los 25 cm se diversifican los productos de mayor valor (AG). En este estudio no se incluyó el producto postes ya que la madera de tarima sustituye a los postes, teniendo este mayor demanda y precio en el mercado local.

En estudios similares como Hernández & Mora (2007) registraron 0.26 y $0.65 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$ para aserrío grueso y delgado, respectivamente, para la categoría de 30-34.9 cm, siendo el índice 30 el que más se acerca a esta producción con 0.29 y $0.58 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$. En *Cedrela odorata* L. Salazar *et al.* (2020) determinaron $0.27 \text{ m}^3 \cdot \text{árbol}^{-1}$ en aserrío grueso, 0.28 en aserrío delgado y 0.13 para tarima, en un sitio productivo alto.

El volumen disponible para tarima tiene una presencia importante en todos los IS (29.8% del total de volumen) y representa un ingreso adicional a la exportación de productos de mayor tamaño, principalmente por la cercanía de la plantación a vastas extensiones de cultivo de piña que requieren de este material para el embalaje de su producto. Según Barrantes & Ugalde (2020), para el 2019 en Costa Rica, se destinaron 407 741 m^3 rollo para la elaboración de tarimas (79% de la producción de madera de uso local), esto indica que la madera clasificada como tarimas puede tener un nicho de mercado importante a nivel nacional. La leña es el producto que tiene menor presencia (6.8%), no tiene un mercado consolidado, pero se contabiliza para conocer la distribución máxima de todos los productos de la plantación.

5. Conclusiones

El productor de teca requiere de información precisa sobre la producción, distribuida por categoría diamétrica y por categoría de uso por tamaño de las trozas a fin de poder cuantificar los volúmenes de venta y estimar los ingresos a obtener. El destino de la producción de teca en Costa Rica es la exportación y al disponer de tablas de volumen es posible para vendedores y compradores estimar de forma rápida y fiable el volumen a negociar. Contar con una herramienta como las tablas de despiece, facilita el proceso de comercialización a los productores conociendo al momento de la negociación los volúmenes que están en pie en la plantación.

La plantación presenta los cuatro productos (aserrío grueso, aserrío delgado, tarima y leña) en todos los índices de sitio a partir de los 30 cm de diámetro, siendo los índices 24, 27 y 30 producen la mayor cantidad de volumen de aserrío grueso, el aserrío delgado, por su lado, está presente en todos los índices de sitio, el índice 18 es el que presenta menos volumen en el aserrío grueso y, a su vez, concentra el mayor volumen para el producto de tarimas, lo que concuerda en cómo la calidad del sitio está directamente relacionada con la partición de los productos en los diferentes índices.

Estimar el volumen disponible para tarimas por este medio, permite que el productor pueda contemplar en sus ingresos un rubro que antes no se consideraba de importancia, con lo que puede negociar con diferentes actores del mercado según el producto a vender. En esta plantación la estimación fue de hasta un 26% del volumen que podría utilizarse con este fin. Sin embargo, en este momento para el productor y exportador de madera este volumen no es prioritario y solo lo consideran de forma fortuita si hay algún comprador dispuesto a entrar y extraerlo por cuenta propia.

6. Agradecimientos

Principal agradecimiento al proyecto “Evaluación del crecimiento de plantaciones clonadas de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* 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 logístico y financiero. Se expresa agradecimiento a la empresa Proteak S.A, por proporcionar acceso a sus fincas para la obtención de información. A las personas que ayudaron con la recolección de la información y a los tutores por las recomendaciones y seguimiento de esta investigación

7. Referencias

Barrantes Rodríguez, A., & Ugalde Alfaro, S. (2020). *Usos y aportes de la madera en Costa Rica Estadísticas 2019 & Precios 2020*. Oficina Nacional Forestal (ONF). <https://onfcr.org/wp-content/uploads/Usos-y-Aportes-2019.pdf>.

Cao QN (1999) The process of establishment of teak (*Tectona grandis*) plantations in Vietnam and the results obtained. In: Regional Seminar on Site, Technology and Productivity of Teak Plantations, 25-29 January, Chiang Mai, Thailand, pp 1-14.

Hernández, W., & Mora, F. (2007). Estimación del volumen comercial por producto para rodales de teca en el Pacífico de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 31.

Instituto Meteorológico Nacional. (2020). *Base datos de mediciones de precipitación y temperatura de la estación meteorológica Los Chiles de Upala*.

Instituto Nacional de Estadística y Censo (2015). Censo Nacional Agropecuario, Costa Rica.

Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. (2016). *Suelos de Costa Rica-Orden Ultisol, Boletín Técnico*. Departamento de Transferencia e Información Tecnológica-INTA. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1604.PDF>

Kollert, W., & Kleine, M. (2017). *The Global Teak Study Analysis, Evaluation and Future Potential of Teak Resources*.

Krishnapillay, B. (2000). Silviculture and management of Teak plantations. *Unasyuva*, 51, 14-21.

Meza Picado, Victor Hugo. (2002). Curvas de índice de sitio para Teca (*Tectona grandis* Linn.) en la Vertiente del Pacífico de Costa Rica.

Moret, A., Jerez, M., & 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*, 42, 41-50.

Salazar Ruiz, A. G., Murillo Cruz, R., Salas Rodríguez, R., & Fonseca González, W. (2020). Distribución de productos de *Cedrela odorata* L. en un sistema agroforestal con café en Pérez Zeledón, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 18(42), 74-80.

Universidad de Costa Rica. (2016). *Mapa digital de Suelos de Costa Rica* [Map]. http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139

Modelos para estimar volumen de árboles de plantaciones de *Tectona grandis* L.f. en diferentes índices de sitio, Zona Norte de Costa Rica.

Models for volume estimation of *Tectona grandis* L. F. tree plantations at different site indices, Northern zone of Costa Rica.

Luis Alberto Palma Saborío², Adrián Delgado Torres³

Resumen

[Introducción]: El proceso de toma de decisiones para el manejo forestal sostenible debe contar con herramientas de trabajo que faciliten la cuantificación del volumen de la madera producida de forma confiable. **[Objetivo]:** Elaborar modelos para estimar el volumen total con corteza, volumen comercial con corteza y volumen comercial sin corteza para *Tectona grandis* en 5 índices de sitio. **[Metodología]:** Se determinaron 5 índices de sitio (IS) 18, 21, 24, 27 y 30. Se derribaron 391 árboles (93 árboles para el IS18, 79 para el IS21, 80 para el IS24, 83 para el IS27 y 56 para el IS30), además 91 árboles seleccionados aleatoriamente para el proceso de validación, se midió el diámetro a la base del árbol, a continuación, cada 1.5 m hasta el ápice. La altura total (HT) se obtuvo de la suma de cada sección de 1.5 m más la última sección del árbol, la altura comercial (HC) se determinó hasta un diámetro mínimo de 15 cm. En cada punto se midió la corteza con un pie de rey digital. Para cada índice de sitio y tipo de volumen se ajustaron modelos de regresión lineal con el programa Statgraphics Centurion XVI.I. **[Resultados]:** Mediante la prueba de Durbin-Watson se comprobó el cumplimiento de los supuestos de autocorrelación. La selección del modelo se realizó mediante la metodología de normalización de parámetros estadísticos. Para cada modelo se realizó una validación. Los modelos presentan ajustes de ($R^2 \geq 87.8\%$), bajos errores de estimación ($\leq 12.4\%$) y validaciones con variaciones porcentuales bajas ($\leq 6.1\%$). **[Conclusiones]:** Los modelos seleccionados son robustos y prácticos para su uso, por lo que son una herramienta útil para la estimación de volumen.

Palabras claves: teca, modelos de regresión, volumen, ecuación, índice de sitio.

² Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. luis.palma.saborio@est.una.ac.cr; <https://orcid.org/0000-0002-2077-8827>

³ Asistente académico, Universidad Nacional, Costa Rica. adrian.delgado.torres@una.cr;

Abstract

[Introduction]: Forest projects management must have reliable tools to facilitate the quantification of timber volume. **[Objective]:** Elaborate models to estimate the total volume with bark, commercial volume with bark and commercial volume without bark for *Tectona grandis* in five site indices. **[Methodology]:** 5 site indices (SI) 18, 21, 24, 27 and 30 were determined. 491 trees were felled (93 trees for SI18, 89 for SI21, 80 for SI24, 83 for SI27 and 50 for SI30) also 91 randomly selected trees for the validation process, the diameter at the base of the tree was measured at every 1.5 m to the apex. The total height (HT) was obtained from the sum of each section of 1.5 m plus the last section of the tree, the commercial height (HC) was determined up to a minimum diameter of 15 cm. At each point the cortex was measured with a digital king's foot. For each site index and volume type, linear regression models were adjusted with the Statgraphics Centurion XVI.I program. **[Results]:** The Durbin-Watson test proved compliance with the autocorrelation assumptions. The selection of the model was made using the methodology of normalization of statistical parameters. For each model, a validation was performed. The models present adjustments of ($R^2 \geq 87.8\%$), low estimation errors ($\leq 12.4\%$) and validations with low percentage variations ($\leq 6.1\%$). **[Conclusions]:** The selected models are robust and practical for its use, making them a useful tool for volume estimation.

Keywords: teak, regression models, volume, equation, site indexes.

1. Introducción

En Costa Rica, las plantaciones forestales aportan el 79.2% de la madera cosechada en el país, aporte que incrementa un 2% anualmente desde el año 2016. Sin embargo, existe una disminución de los metros cúbicos totales aprovechados, en el año 2019 se reporta un total de 692 811 m³, por su parte en el año 2016 se reporta un total de 745 267 m³, lo cual representa una disminución del 7% en la madera aprovechada de plantaciones forestales entre estos años (Barrantes y Ugalde 2017 y 2020). Las plantaciones forestales seguirán siendo la principal fuente de madera, siendo la especie teca la que posee mayor terreno reportando para el 2017 un total de 45 853 ha (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2017).

Los propietarios de plantaciones forestales deben tener en cuenta un conjunto de elementos para garantizar una productividad óptima, entre estos el valor de la madera, procesos silviculturales, selección de material, información técnica y manejo de las plantaciones. (Moret *et al*, 1998; Sianturi, 2015; Ureigho Y Akpobome, 2018). Por lo tanto, existe una necesidad de contar con herramientas de trabajo para que los productores y profesionales puedan diseñar escenarios de producción en plantaciones de teca, entre estas herramientas encontramos las ecuaciones para la estimación de diferentes tipos de volumen.

Además de las prácticas culturales de manejo y selección de material para plantar, otro factor que influye en el desarrollo y productividad de los árboles es el índice de sitio, el cual está relacionado con la condiciones climáticas, edáficas y topográficas de cada sitio, afectando el rendimiento de la plantación (Minoche *et al*, 2017; Dantani *et al*, 2019, Armijos, 2013, Camacho-Linton *et al*, 2013, Salgado, 2011). Es por esto que al momento de estimar el

volumen de una futura plantación forestal es importante incluir este parámetro para dar mayor confianza en los proyectos de teca.

En Costa Rica se han desarrollado diversos modelos para la estimación de volumen de teca, entre los que se encuentran: los de Camacho y Madrigal (1997), Pérez & Kanninen (2003), Hernández y Mora (2007), Fallas (2017), Bermejo *et al* (2004), Barrantes *et al* (2021). Estos modelos se han realizado con información de plantaciones sometidas a diferentes regímenes de manejo de la densidad, diferentes prácticas culturales sobre nutrición, control de malezas y manejo del suelo, por lo que esto genera árboles con relaciones dasométrica dispares y que dificultan el ajuste de las ecuaciones de volumen.

Los modelos como el de Camacho y Madrigal (1997), con un total de 140 individuos de árboles de Teca procedentes del Pacífico Seco, de la Zona Norte y de la Zona Atlántica de Costa Rica ajustaron 6 modelos, para estimar: a) el volumen total del árbol con corteza y sin corteza. b) el volumen del fuste, con corteza y sin corteza, hasta un diámetro mínimo de 8 cm. c) el volumen del fuste con corteza y sin corteza, hasta un diámetro mínimo de 5 cm. También Pérez & Kanninen (2003) utilizando una muestra de 122 árboles aprovechados en plantaciones de Teca en: Guanacaste, Puntarenas, Limón y San Carlos, con diámetros entre 2.4 cm y 58.7 cm, con edades entre los 5 y 47 años, desarrollaron ecuaciones de volumen total y comercial. Para esto, probaron un total de 15 modelos, lineales y no lineales, con el fin de relacionar el volumen total con el DAP, así como el DAP con la altura total.

Debido a la necesidad de crear herramientas para estimar el volumen en plantaciones de teca y ante la falta de estudios a nivel nacional que incluya plantaciones con un manejo homogéneo y en diferentes índices de sitios, es que el objetivo del presente estudio fue el de elaborar 15 ecuaciones matemáticas para la estimación de volumen total comercial con y sin corteza, en 5 índices de sitio en la Zona Norte de Costa Rica.

2. Metodología

2.1 Sitio de estudio

El estudio se realizó en el año 2019, en plantaciones de *T. grandis* de 17 años de edad plantada en el año 2002, finca propiedad a la empresa PROTEAK S.A de 300 ha, ubicada en el cantón Los Chiles, provincia Alajuela. El sitio presenta un clima, con un promedio de precipitación anual de 3020 mm y una temperatura de 26 °C. La topografía es plana y en algunos sitios ligeramente ondulada; cuenta tanto con drenajes naturales como drenajes artificiales. Los suelos son ultisoles, de color pardo-rojizo y rojizos, cuenta con bajo contenido de calcio y alto contenido de aluminio, son suelos ácidos y profundos (Solano y Villalobos, 2000).

La plantación fue establecida con semilla procedente de Trinidad y Tobago y fue manejada de forma homogénea en su totalidad. Dentro de las actividades realizadas se encuentra en el año 0 la preparación del terreno mediante subsolado, uso de camellones, aplicación de cal y fertilizante rastra, control de plagas, elaboración de drenajes y elaboración de caminos, posteriormente. En actividades de mantenimiento se realizó eliminación de malezas, encalado y fertilizante, deshija, desbejudada, mantenimiento de drenajes, caminos y cerca; además: podas, rodajas químicas circulares y dos raleos intermedios a la edad de 7 y 12 años.

2.2 Identificación de los índices de sitio

La empresa propietaria de la finca proporcionó una base de datos con información dasométrica obtenida de 74 parcelas permanentes (PPM), establecidas en la plantación en estudio. Cada parcela fue clasificada por índice de sitio (IS), utilizando las curvas de IS desarrolladas por Mora y Meza (2003) para Costa Rica, que fueron elaboradas con una edad base de 16 años y con 5 índices: 18, 21, 24, 27 y 30. Para la ubicación de las PPM se utilizó un dispositivo GPS Garmin Map 62s y coordenadas proporcionadas.

2.3 Muestreo

Para el estudio se derribaron y se ubicaron 482 árboles distribuidos en los índices de sitio (**cuadro 1**). El índice de sitio 30 presenta una menor cantidad de árboles para el muestreo, debido a que, en el momento de la corta, se detuvo la labor de extracción de madera por cuestiones de mercado y de poca demanda de árboles con diámetros representativos del IS, por ese motivo se decidió terminar la fase de toma de datos en campo con la información ya obtenida.

Se localizó en campo las PPM para marcar y derribar árboles para cada IS. Primeramente, en cada árbol se midió en pie el diámetro altura a pecho (DAP) con cinta diamétrica y se hizo una marca en el fuste a esa altura, posteriormente se derribó y se midió el diámetro a la base del árbol (a 10 cm del suelo), desde ese punto se midió cada 1.5 m hasta el ápice. La altura total (HT) se obtuvo de la suma de cada sección de 1.5 m más la última sección del árbol, la altura comercial (HC) se determinó hasta un diámetro mínimo de 15 cm. Además, se extrajo en cada punto mencionado un trozo de corteza el cual se midió (mm) con un pie de rey digital.

Cuadro 1. Cantidad de árboles cortados por índice de sitio.

Table 1. Number of trees cut by site index.

Índice de sitio	Nº árboles para modelos	Nº árboles para validación
18	93	20
21	79	20
24	80	20
27	83	21
30	56	10
Total	391	91

2.4 Procesamiento de información

Se confeccionó una base de datos en Excel, año 2019, se analizó numérica y gráficamente los valores obtenidos para eliminar valores atípicos (números dudosos en alguna variable de

medición, árboles descopados, entre otros). Seguidamente se obtuvo el volumen total con corteza (VTcc), volumen comercial con corteza (VCcc) y volumen comercial sin corteza (VCsc).

El volumen total y comercial con corteza se determinó con la fórmula de Smalian.

$$V = \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right)^2 \times 0.7854 \times \text{Largo troza}$$

Donde:

V: Volumen

d₁: diámetro mayor

d₂: diámetro menor

El volumen comercial sin corteza se determinó con la fórmula de Smalian.

$$V = \left(\frac{(d_1 - c) + (d_2 - c)}{2} \right)^2 \times 0.7854 \times \text{Largo troza}$$

Donde:

V: Volumen

d₁: diámetro mayor

d₂: diámetro menor

c: corteza

2.5 Análisis estadístico y desarrollo de modelos

Se generaron modelos de regresión lineal para cada IS y para cada tipo de volumen: VTcc, VCcc y VCsc con el programa Statgraphics Centurion XVI.I, se utilizó como variable independiente (X) el DAP y como variable dependiente (Y) el volumen. Para cada IS y tipo de volumen se desarrollaron “n” modelos posibles y se seleccionaron aquellos 10 con el R² más alto. De cada conjunto de 10 modelos se seleccionó el mejor, utilizando una metodología de normalización de los siguientes parámetros estadísticos: el coeficiente de determinación (R²), el error estándar del estimado (EEE), el error medio absoluto (EMA), la prueba de Durbin Watson (DW), cuadrado medio del error (ECM), la diferencia agregada (DA), el Índice de Furnival (IF), la sumatoria del cuadrado de los residuos (PRESS), el error porcentual (E %) y el Criterio de Información de Akaike (AIC). La normalización consistió en establecer una escala con un rango de 0 a 1, donde el valor más deseable es el más cercano a 1 y el menos deseable el más cercano a 0. Se realizó la normalización debido a que los

valores de los parámetros tienen distintas unidades, no son aditivos y tampoco comparables. El modelo con la sumatoria más alta de los estadísticos normalizados fue elegido como el mejor modelo.

2.6 Validación de los modelos

Se seleccionó una muestra aleatoria de árboles en cada IS (**cuadro 1**), con el fin de validar cada modelo seleccionado por IS y por tipo de volumen. La muestra de validación no se utilizó en el cálculo de los parámetros de la regresión. La validación se realizó restando el volumen calculado con el modelo seleccionado respectivo, menos el volumen cubicado, obteniendo la diferencia absoluta y porcentual de los residuos y determinando el sesgo de cada fórmula. Se estableció que menos de 10% de diferencia porcentual es un modelo válido.

3. Resultados

3.1 Modelos para la estimación de volumen de teca

En el **Cuadro 2** se presenta las estimaciones de los parámetros utilizados para la selección de los modelos elegidos por categoría de volumen para todos los índices de sitios. Todos los IS presentan un buen ajuste en sus modelos con un R^2 , que presenta un rango de 87.8% a 95.4%. Además, el DA Y ECM presentan valores bajos que se reflejan en los errores de estimación porcentual (E%), también bajos los cuales son de 5.3% a 12.4% en su dato más alto. El parámetro de prueba de DW nos muestra valores muy cercanos a 2 (1.33 a 2.26) lo que indica que no existe una autocorrelación de los residuos; por tanto, no se quebranta el principio de normalidad. EEE Y EMA presentan valores bajos y similares, lo que significan un error máximo entre 0.027 a 0.52 por árbol. Por su parte, el AIC muestra valores bajos entre -3.16 a -2.69. El IF también muestra valores bajos.

Cuadro 2. Modelos seleccionados para la estimación de volumen total con corteza (VTcc), comercial con corteza (VCcc) y comercial sin corteza (VCsc) de la especie teca en 5 índices de sitio (IS), Zona Norte, Costa Rica.

Table 2. Selected models for the estimate of total volume with bark (TVwb), commercial volume with bark (TCwb) and commercial volume without bark (TCwtb) of teak species in 5 site indices (IS), in North zone, Costa Rica.

IS	Modelo	R ² aj.	EEE	EMA	DW	ECM	DA	IF	PRESS	E%	AIC
18	VTcc: (-0,0289034 + 0,000701384*DAP ²)	92.8	0.036	0.027	1.33	0.035	0.0000	0.04	0.12	7.9	-3.11
18	VCcc: (-0,548692 + 0,0360708*DAP)	93.2	0.037	0.028	1.42	0.037	0.0000	0.04	0.13	12.4	-3.08

18	VCsc: $(-0,116118 + 0,000668308 \cdot \text{DAP}^2)$	92.9	0.034	0.025	1.38	0.034	0.0000	0.03	0.11	12.3	-3.16
21	VTcc: $(-0,779291 + 0,292549 \cdot \text{raíz}(\text{DAP}))^2$	90.2	0.034	0.027	1.72	0.048	0.0011	0.03	0.18	7.8	-2.81
21	VCcc: $(-0,662526 + 0,0425348 \cdot \text{DAP})$	89.3	0.052	0.042	1.70	0.051	0.0000	0.05	0.21	11.1	-2.76
21	VCsc: $(-0,609683 + 0,0388439 \cdot \text{DAP})$	88.8	0.048	0.039	1.64	0.048	0.0000	0.05	0.18	11.7	-2.82
24	VTcc: $(-0,722075 + 0,282585 \cdot \text{raíz}(\text{DAP}))^2$	95.4	0.027	0.020	2.17	0.040	0.0007	0.03	0.13	5.6	-2.97
24	VCcc: $(-1,68205 + 0,420288 \cdot \text{raíz}(\text{DAP}))$	94.9	0.043	0.033	2.26	0.042	0.0000	0.04	0.14	8.2	-2.93
24	VCsc: $(-1,52072 + 0,379965 \cdot \text{raíz}(\text{DAP}))$	94.8	0.039	0.030	2.26	0.039	0.0000	0.04	0.12	8.3	-3.01
27	VTcc: $(-0,826782 + 0,309755 \cdot \text{raíz}(\text{DAP}))^2$	90.9	0.029	0.023	2.08	0.049	0.0008	0.03	0.19	5.6	-2.81
27	VCcc: $(-1,04808 + 0,343059 \cdot \text{raíz}(\text{DAP}))^2$	90.4	0.033	0.025	1.95	0.052	0.0011	0.03	0.23	6.6	-2.75
27	VCsc: $(-1,02389 + 0,331374 \cdot \text{raíz}(\text{DAP}))^2$	90.6	0.032	0.025	1.96	0.048	0.0010	0.03	0.19	6.6	-2.82
30	VTcc: $(-1,11794 + 0,361349 \cdot \text{raíz}(\text{DAP}))^2$	88.2	0.028	0.023	1.62	0.049	0.0007	0.03	0.13	5.3	-2.72
30	VCcc: $(0,320667 + 0,000553926 \cdot \text{DAP}^2)^2$	87.9	0.030	0.026	1.85	0.050	0.0008	0.05	0.14	6.1	-2.69
30	VCsc: $(0,298386 + 0,000533852 \cdot \text{DAP}^2)^2$	87.8	0.029	0.025	1.79	0.046	0.0008	0.05	0.12	6.3	-2.76

VTcc: Volumen Total con corteza, VCcc: Volumen Comercial con corteza, VCsc: Volumen comercial sin corteza. Todos los modelos poseen una $P < 0.0001$.

3.2 Gráficos de los modelos

En la **Figura 1, 2, 3, 4 y 5**, en la columna izquierda, se observan gráficos en relación con el volumen y el DAP de los modelos seleccionados para los índices del sitio: 18, 21, 24, 27 y 30, respectivamente, en donde la línea central indica el modelo ajustado, las 2 siguientes líneas representan el intervalo de predicción y las líneas externas el intervalo de confianza. Por su parte, la columna derecha indica la distribución de los residuos del volumen. En todos los modelos la distribución sobre la línea central es uniforme, lo que muestra que no se rompe el supuesto de normalidad en la distribución residual. Por su parte, el DAP muestreado en el IS 18 registra un rango en los valores de 15 cm a 35 cm. Al comparar con el IS 21 no se aprecia un aumento en categoría diamétrica pero sí un aumento en el ingreso de individuos en clases superiores. En los índices posteriores sí existe un cambio de los rangos diamétricos conforme incrementa una curva en el índice de sitio.

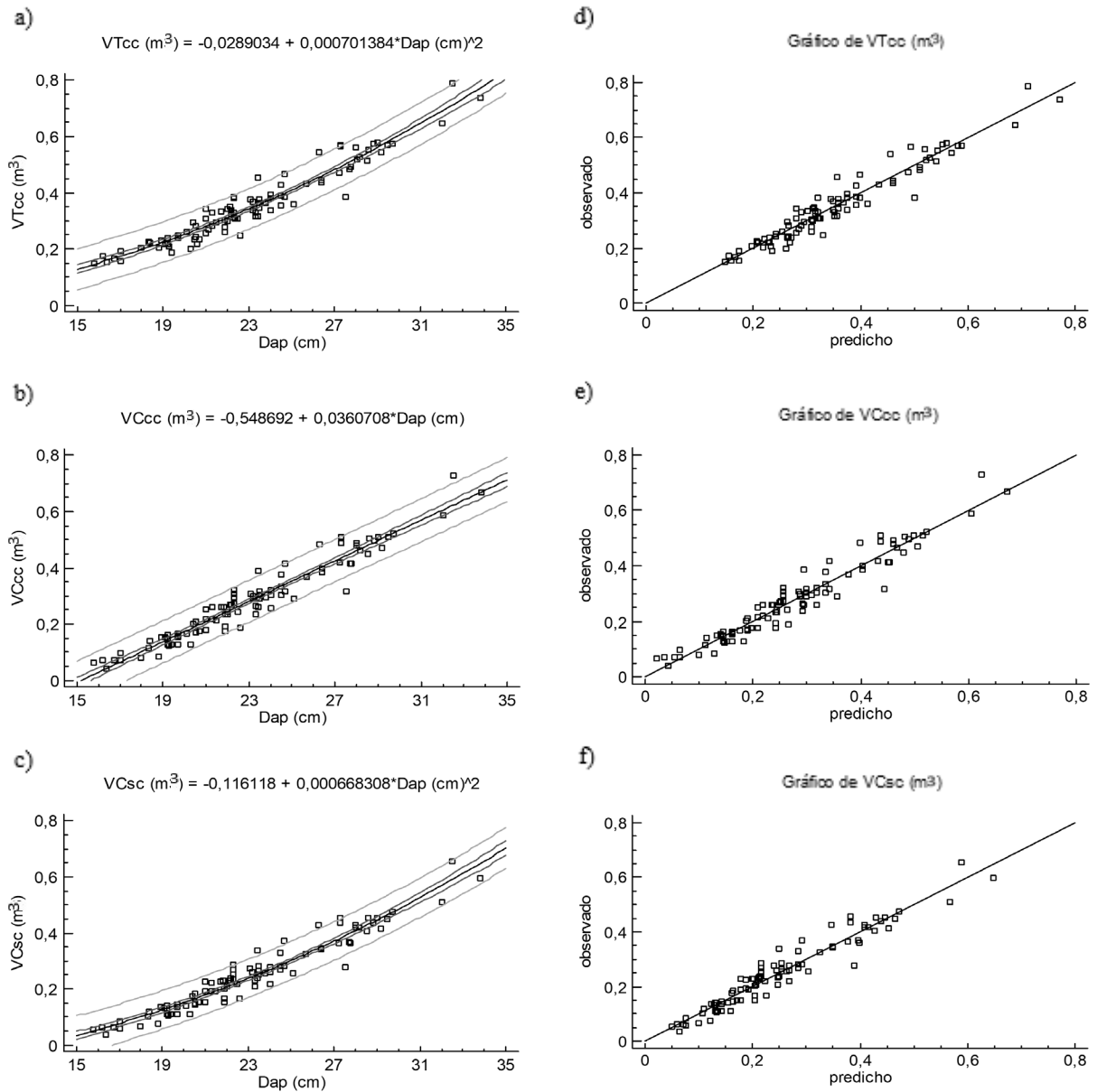


Figura 1. Representación gráfica de los modelos del índice de sitio 18, a) VT_{cc} , b) VC_{cc} y c) VC_{sc} y de los valores predichos y observados, d) VT_{cc} , e) VC_{cc} y f) VC_{sc} para teca, Zona Norte, Costa Rica.

Figure 1. Graphical representation of the models of site index 18, a) TV_{wb} , b) CV_{wb} and c) CV_{wtb} and of the predicted and observed values, d) TV_{wb} , e) CV_{wb} and f) CV_{wtb} for teak, in North zone, Costa Rica.

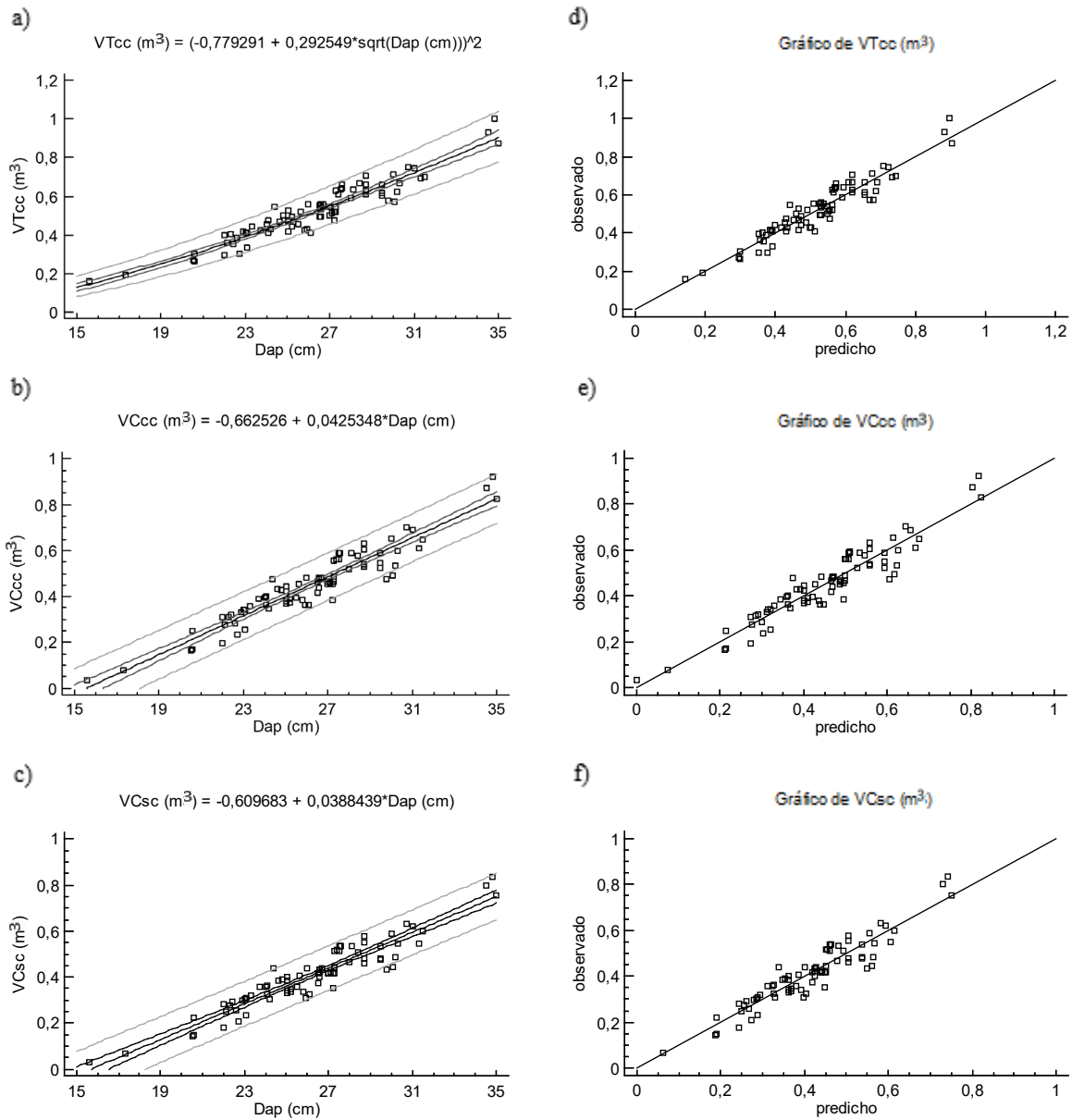


Figura 2. Representación gráfica de los modelos del índice de sitio 21, a) VTcc, b) VCcc y c) VCsc y de los valores predichos y observados, d) VTcc, e) VCcc y f) VCsc para teca, Zona Norte, Costa Rica.

Figure 2. Graphical representation of the models of site index 21, a) TVwb, b) CVwb and c) CVwtb and of the predicted and observed values, d) TVwb, e) CVwb and f) CVwtb for teak, in North zone, Costa Rica.

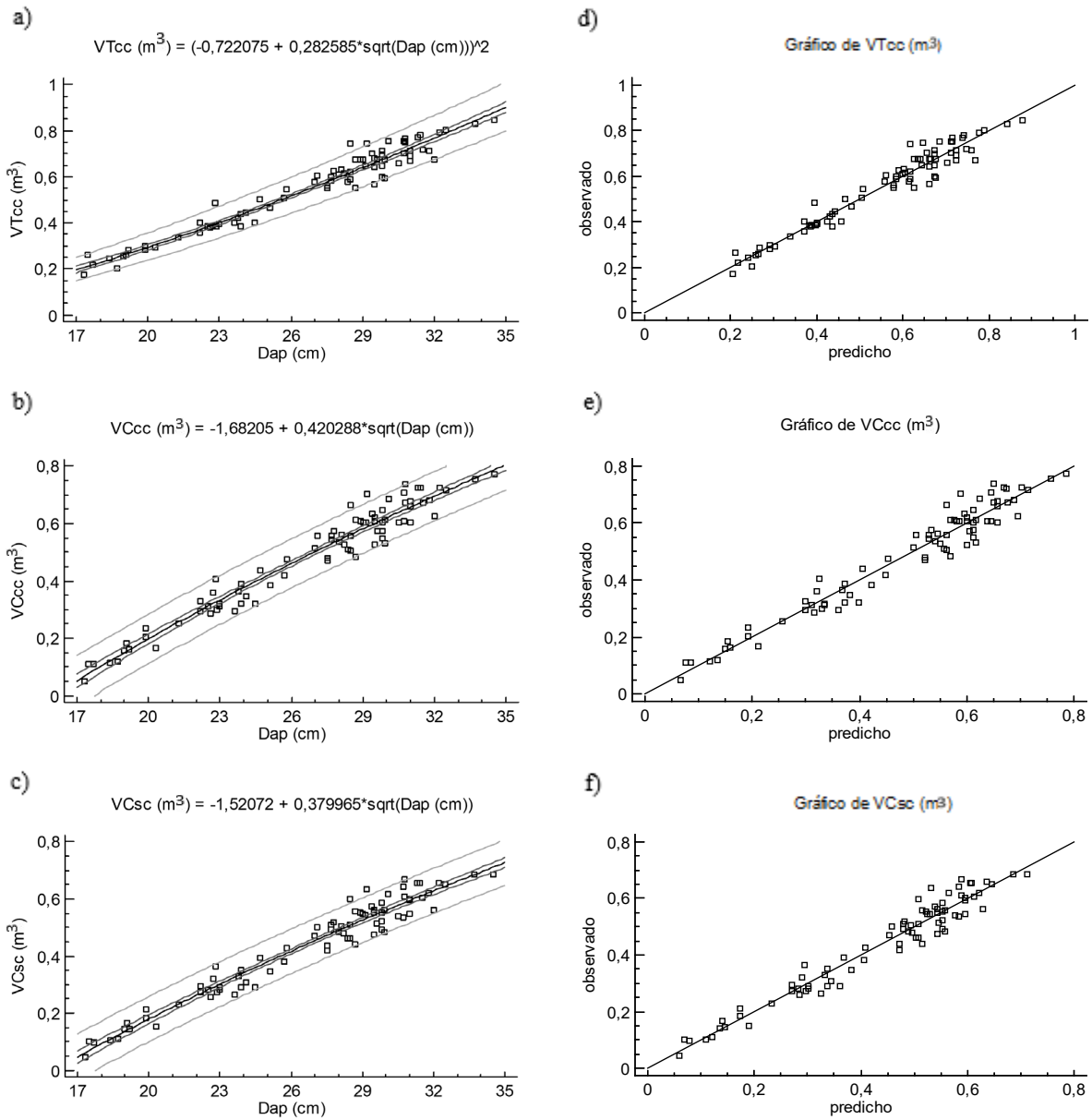


Figura 3. Representación gráfica de los modelos del índice de sitio 24, a) VTcc, b) VCcc y c) VCsc y de los valores predichos y observados, d) VTcc, e) VCcc y f) VCsc para teca, Zona Norte, Costa Rica.

Figure 3. Graphical representation of the models of site index 24, a) TVwb, b) CVwb and c) CVwtb and of the predicted and observed values, d) TVwb, e) CVwb and f) CVwtb for teak, in North zone, Costa Rica.

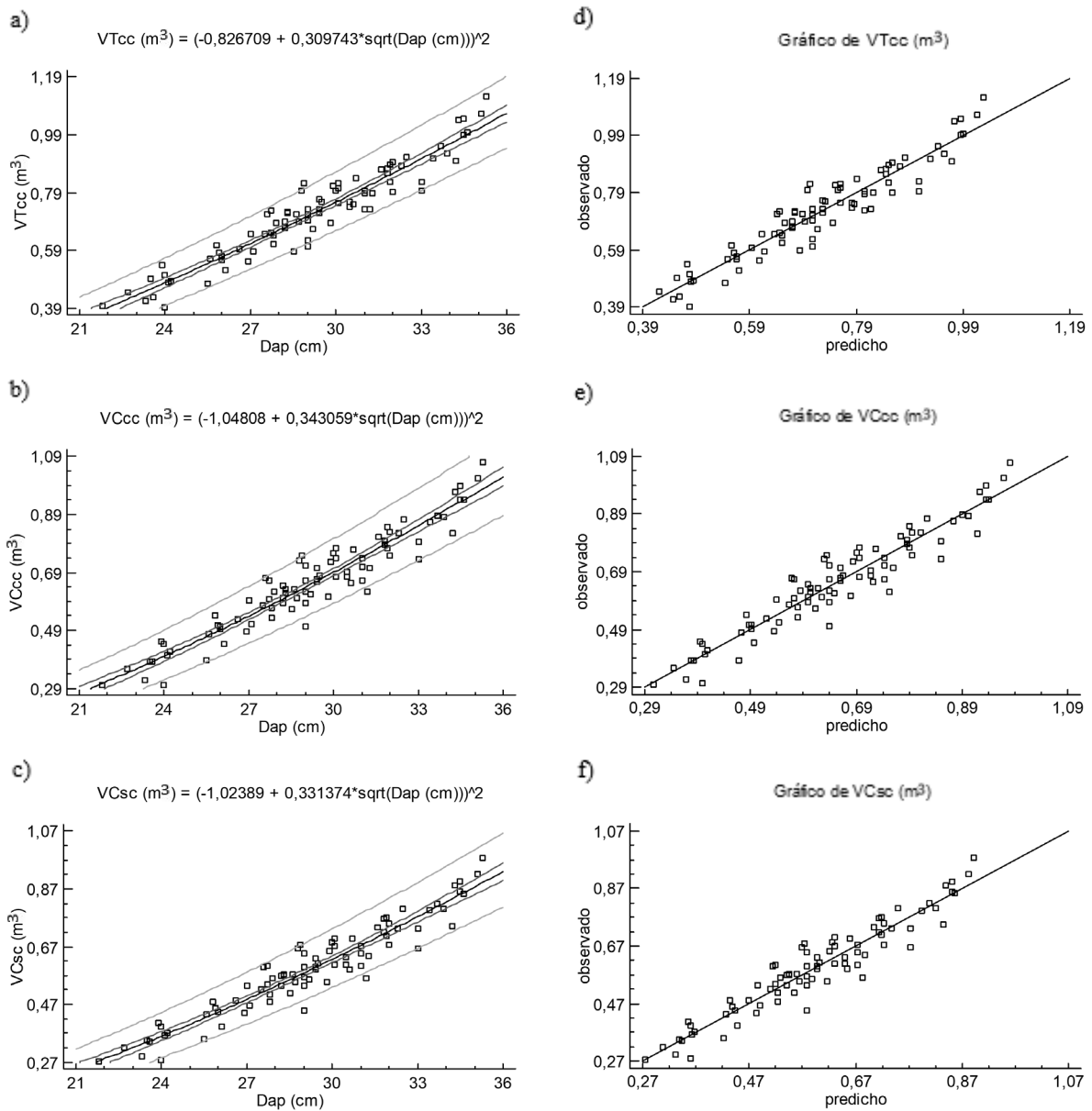


Figura 4. Representación gráfica de los modelos del índice de sitio 27, a) VT_{cc} , b) VC_{cc} y c) VC_{sc} y de los valores predichos y observados, d) VT_{cc} , e) VC_{cc} y f) VC_{sc} para teca, Zona Norte, Costa Rica.

Figure 4. Graphical representation of the models of site index 27, a) TV_{wb} , b) CV_{wb} and c) CV_{wb} and of the predicted and observed values, d) TV_{wb} , e) CV_{wb} and f) CV_{wb} for teak, in North zone, Costa Rica.

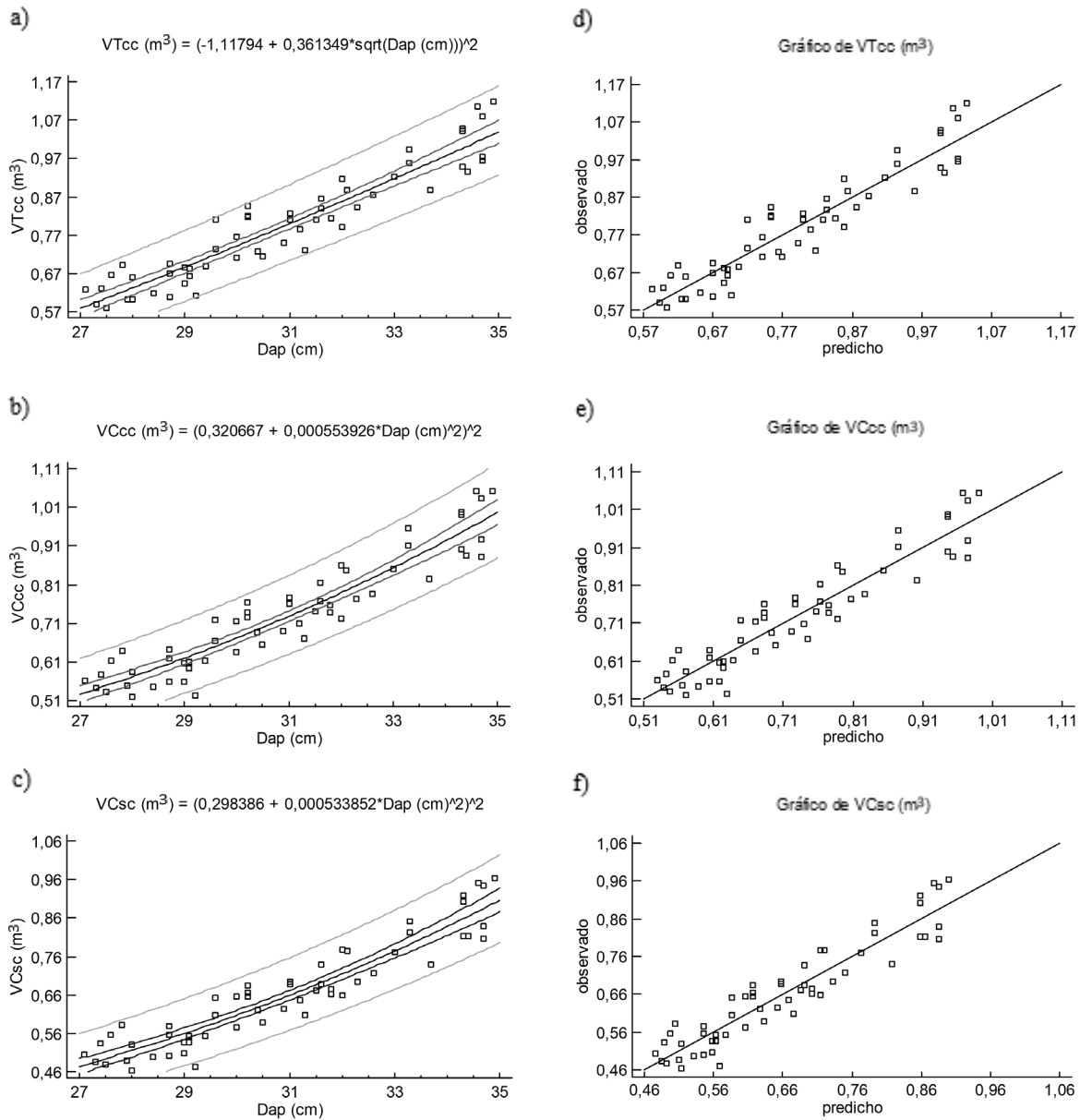


Figura 5. Representación gráfica de los modelos del índice de sitio 30, a) VTcc, b) VCcc y c) VCsc y de los valores predichos y observados, d) VTcc, e) VCcc y f) VCsc para teca, Zona Norte, Costa Rica.

Figure 5. Graphical representation of the models of site index 30, a) TVwb, b) CVwb and c) CVwtb and of the predicted and observed values, d) TVwb, e) CVwb and f) CVwtb for teak, in North Zone, Costa Rica.

3.3 Validación de los modelos

En el **Cuadro 3** podemos observar la validación de los modelos seleccionados para 5 índices de sitio. La diferencia absoluta muestra un rango de 0.004 a 0.033 m³, lo que representa a diferencia porcentual entre 0.8% a 6.1%, cifra inferior al 10%, lo que indica precisión en la predicción del modelo (Huang *et al.*, 2003).

Cuadro 3. Validación de los modelos seleccionados por índice de sitio (IS) de volumen para teak en Costa Rica.

Table 3. Validation of selected volume models for site index (IS) for teak in Costa Rica.

Índice de sitio	Tipo	Volumen promedio modelo (m ³)	Volumen promedio smalian (m ³)	Diferencia absoluta (m ³)	Diferencia porcentual (%)
18	VTcc	0.310	0.314	0.004	1.1
18	VCcc	0.257	0.269	0.012	4.8
18	VCsc	0.225	0.236	0.012	5.3
21	VTcc	0.528	0.550	0.021	4.0
21	VCcc	0.459	0.487	0.028	6.1
21	VCsc	0.414	0.438	0.023	5.6
24	VTcc	0.640	0.660	0.020	3.1
24	VCcc	0.572	0.604	0.032	5.6
24	VCsc	0.517	0.546	0.029	5.7
27	VTcc	0.734	0.727	0.008	1.0
27	VCcc	0.668	0.678	0.010	1.5
27	VCsc	0.605	0.610	0.005	0.8
30	VTcc	0.797	0.765	0.033	4.1
30	VCcc	0.739	0.719	0.013	2.1
30	VCsc	0.669	0.651	0.012	1.8

VTcc: Volumen Total con corteza, VCcc: Volumen Comercial con corteza, VCsc: Volumen comercial sin corteza.

4. Discusión

4.1 Modelos

Con el fin de garantizar ecuaciones apropiados para estimar el volumen, Barrantes *et al* (2021) mencionan la importancia de la representatividad del muestreo empleado para su creación y de la rigurosidad utilizada para la selección del modelo validación. En este estudio se dispuso de una base de datos de 482 árboles: 93 en el IS 18, 79 para el IS 21, 80 en el IS 24, 83 para el IS 27 y 50 en el IS 30 y 91 árboles para la validación. Autores, como Barrantes *et al* (2021) y Bermejo *et al* (2004) utilizan muestras similares en sus estudios para cada

índice de sitio. Por su parte, en esta investigación se analizaron 10 parámetros para la selección de modelos, (Fonseca *et al*, 2021) usa los mismos 10 parámetros para obtener ecuaciones con el fin de predecir biomasa en teca y melina, en Costa Rica; otros autores, como (Pérez y Kaniken 2003, Fallas 2017 y Camacho y Madrigal 1997) utiliza R^2 , EEE y DW.

En el presente estudio, se obtuvieron modelos lineales simples de una entrada (DAP), coincidiendo con lo mencionado por Myung *et al*. (2003), la cual señala la facilidad del uso de ecuaciones con una sola entrada. Este estudio registra buenos ajustes con un ($R^2 > 87.8\%$), siendo el IS 24, el que presenta los valores más altos de R^2 (VTcc = 95.4%, VCcc = 94.9%, VCsc = 94.8%), valores similares nos muestra (Tewari *et al*, 2013) que logró un ajuste en R^2 de 98% en VTcc, 97.1% en VCcc y 94.7% en VCsc; por su parte los R^2 más bajos se observan en el IS 30 (VTcc = 88.2, VCcc = 87.9, VCsc = 87.9%). Torres y Magaña (2001) menciona que los modelos pueden presentar diferencias entre sí, pues a mayor diámetro se obtienen mayores errores en el volumen, lo que explica por qué el índice 30 registra R^2 más bajos, ya que es el índice de sitio que tiene mayores diámetros.

Otros estudios de modelos de volumen para teca presentan R^2 similares, Tewari y Sighn, (2018) obtuvieron un R^2 de 91.2%. Por otra parte, Telles *et al* (2018) registró un ajuste de 82.5%. Koirala *et al* (2017), en Nepal, alcanzaron un R^2 de 94.4%. Drescher *et al* (2014) obtuvo un R^2 de 98.1%. En Costa Rica, Pérez y Kaniken (2003) presentan un ajuste de 98.9% en volumen comercial y de 98.8% en volumen total. Por su parte, Fallas (2017) registra en su volumen total 94% y de 98% en volumen comercial; Pérez (2008) para volumen total registra R^2 de 96,1%. Los anteriores estudios obtuvieron resultados similares al presentado en esta investigación, lo que nos indica confiabilidad en las ecuaciones obtenidas.

El presente trabajo obtuvo resultados bajos, se encuentra entre 5.3% y 12.4%, resultados similares se registran Drescher *et al* (2014), en Brasil, para una muestra de 2 a 10 años de edad obtuvo un E% de 3.45; por su parte, también en Brasil, Cerqueira *et al* (2017) presenta a una edad de 10 años, registra un E% en los modelos estudiados de 10.16% a 14.95%, siendo de 10,26% el E% del mejor modelo; En el caso de Costa Rica, Fallas (2017) reporta un E% de 2% a 4% en sus modelos. En el caso de la prueba DW, los resultados obtenidos se mantienen cercanos a 2; en los modelos seleccionados en este estudio se observa un rango que va de 1.33 a 2.26, cifra consistente reportado en la literatura: Telles *et al* (2018) obtuvo un valor de 2.01 en, por su parte Tewari *et al*, 2013 registra 1.98 y, en Costa Rica Barrantes *et al* (2021) datan resultados de DW que van de 1.41 a 2.07; según Da Cunha *et al* (2009) los valores más cercanos a 2 no violan los supuestos de regresión, dándole confiabilidad a los modelos seleccionados.

El parámetro EEE registran valores que se encuentran entre 0.029 a 0.052, por su parte, para AIC se obtuvo resultados entre -3.16 a -2.69, Koirala *et al* (2017) en Nepal presenta resultados similares en ambos parámetros siendo EEE de 0.068, equivalente a lo registrado en este estudio y para AIC de 1.16, en ambos casos datos cercanos a 0. De igual manera ECM resulta datos bajos entre 0.034 a 0.052, los datos generados se encuentran dentro del intervalo reportado en estudios similares, Moret *et al* (1998) reporta ECM de 0.010 y 0.011 en sus modelos seleccionados; Tewari *et al* (2013) obtuvo datos de 0.021 a 0.023. El parámetro IF arrojó resultados cercanos a 0, entre 0.03 a 0.05, Barrantes *et al* (2021) obtuvo registra 0.01

a 0.03; Moretz *et al* (1998) menciona que el mejor modelo con el ajuste óptimo es el menor o más cercano a 0.

4.2 Validación de modelos

Las pruebas de validación registraron valores bajos para el sesgo, los cuales son menores a 6.1% entre el valor medido y el valor predicho, siendo el valor más de 0.8%. Esta cifra es consistente con los hallazgos que presenta otros estudios. Tewari *et al* (2013) obtuvo resultados en su validación entre 1.47% y 3.65%; en Costa Rica, Camacho y Madrigal (1997) registran valores por debajo del 10%, mientras que Fallas (2017) reportó validaciones por debajo del 2%.

5. Conclusiones

Los modelos seleccionados para cada IS y cada volumen presentan simplicidad en su aplicación por utilizar DAP, como única variable independiente. El uso del diámetro disminuye el tiempo de medición y su costo. La selección de modelos para la estimación de volumen total con corteza, volumen comercial con corteza y sin corteza por medio de parámetros estadísticos ponderados, en conjunto con el análisis de los gráficos de residuos y la validación, determina que las 15 ecuaciones seleccionadas son confiables para su utilización.

Los modelos ajustados pueden ser utilizadas en todas las regiones de Costa Rica en plantaciones menores a 17 años, sin embargo, el uso del modelo en edades menores o mayores es posible si se utiliza con precaución y en diámetros similares a los registrados en el estudio (15 cm a 38 cm), además de tomar en cuenta el manejo de la plantación (dos raleos, aplicación de fertilizante, aplicación de cal, entre otras).

6. Agradecimientos

Principal agradecimiento al proyecto “Evaluación del crecimiento de plantaciones clonadas de *T. grandis* y *G. arborea* 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 logístico y financiero. Agradecimiento especial a la empresa Proteak S.A. por proporcionar acceso a sus fincas para la obtención de información. Además, a las personas que colaboraron en la recolección de la información y a los tutores por las recomendaciones y seguimiento de este trabajo.

7. Referencias

- 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.
- Barrantes, A., Ugalde, S. (2017). *Usos y aporte de la madera 2016*. San José, Costa Rica.

- Barrantes, A., Ugalde, S. (2020). *Usos y aporte de la madera 2019*. San José, Costa Rica.
- Barrantes, K., Murillo, R., Ávila, C. Fonseca, W., Barquero, A. (2021). Tabla de volumen comercial para teca clonal en diferentes índices de sitio en la Zona Norte de Costa Rica. *Revista de ciencias ambientales*, 55(1), 211-229. <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.10>
- Bermejo, I., Cañellas, I. y 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, Adair., Ramírez-Maldonado, Hugo., de los Santos-Posadas, Héctor Manuel., Zamudio Sánchez, Francisco José. (2013). Tablas de rendimiento para teca (*Tectona grandis* L.) en el estado de Campeche. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19), 92-101. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i19.381>
- Cerqueira, C., Dos Santos, G., De Jesús, L., Mora, R., Marques, G., Salles, T. y Brianezi, D. (2017). Modelagem da altura e volume de *Tectona grandis* L. F. na mesorregião Nordeste do Pará. *Nativa: Pesquisas Agrarias e Ambientais*, 5(Especial), 606-611. <https://doi.org/10.5935/2318-7670.V05nespa22>
- Da Cunha, T., Vargas, J. y Escalier, M. (2009). *Ajuste y selección de modelos de regresión para estimar el volumen total de árboles*. <https://www.researchgate.net/publication/236657148>
- 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.org/10.9734/ajee/2019/v10i130110>
- 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.
- Fonseca, W., Murillo, R., Ávila, C., Rojas, M. y Spínola, R. (2021). Modelo de biomasa y carbono para árboles de *Gmelina arborea* en plantaciones clonales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 143-159. <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.7>
- Huang S, Yang Y, Wang Y. (2003). *Una mirada crítica a los procedimientos para validación de modelos de crecimiento y rendimiento*.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (2018). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2017*. Instituto Nacional de Estadística y Censos. San José, Costa Rica.

Koirala, A. Kizha, A. Y Baral, S. (2017). Modeling Height-Diameter Relationship and Volume of Teak (*Tectona grandis* L. F.) in Central Lowlands of Nepal. *Journal of Tropical Forestry and Environment*, 7(1), 28-42.

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. *Ciencia e Investigación Agraria*, 44(2), 154-167. <http://rcia.uc.cl/index.php/ijanr/article/view/1645>

Hernández, W y Mora, F. (2007). Estimación del volumen comercial por producto para rodales de teca en el Pacífico de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 31(1), 101-112. https://www.mag.go.cr/rev_agr/v31n01_101.pdf

Mora, F. y Meza, V. (2003). Curvas de índice de sitio para teca (*Tectona grandis* Linn.) en la vertiente del Pacífico de Costa Rica. En 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.

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. <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/24242>

Myung, J., Pitt, M. y Kim, W. (2003). *Model Evaluation, Testing and Selection*. Ohio, USA. <https://dx.doi.org/10.4135/9781848608177.n19>

Pérez, D. (2008). Growth and volume equations developed from STEM analysis for *Tectona grandis* in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science*, 20(1), 66-75.

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).

Salgado, J. (2011). ¿Cómo generar modelos de índice de sitio?. *Recursos Naturales y Ambiente*. 64, 28-31.

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*.

Solano, J. y Villalobos, R. (2000). Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.

Telles, R., Gómez, M., Alanís, E., Aguirre, O. y 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.org/10.21829/myb.2018.2431544>

Tewari, V. y 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>

Tewari, V., Mariswamy, K. y Arunkumar, A. (2013). Total and Merchantable Volume Equations for *Tectona grandis* Linn. f. Plantations in Karnataka, India. *Journal of Sustainable Forestry*, 32, 213–229. <https://doi.org/10.1080/10549811.2013.762187>

- Torres, R. y Magaña, T. (2001). *Evaluación de plantaciones forestales*. D.F, México. 472 p.
- Ureigho, 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.

Análisis financiero de una plantación de *Tectona grandis* L. f. en diferentes índices de sitio, Zona Norte de Costa Rica.

Financial analysis of a *Tectona grandis* L. f. plantation at different site indices, North Zone of Costa Rica.

Adrián Delgado-Torres¹, Luis Palma Saborío⁴

Resumen

[Introducción]: El uso de indicadores financieros para la toma de decisiones en el manejo de plantaciones forestales permite al productor conocer la relación beneficio/costo de su inversión. **[Objetivo]:** Determinar los indicadores financieros VAN, TIR, B/C, para los diferentes índices de sitio, y realizar un análisis de sensibilidad para una plantación de teca de 300 ha, ubicada en Los Chiles de Upala, Costa Rica. **[Metodología]:** Los costos se recopilaban de la empresa dueña de la plantación. Los precios de raleo se obtuvieron por medio de estadísticas publicadas por la Oficina Nacional Forestal; por su parte, los precios de cosecha final son del mercado del año de corta de los árboles. La estimación de la producción se realizó usando proyecciones a partir de una tabla de volumen de la zona para los raleos de los años 7 y 12, para la cosecha final se usaron datos provenientes de cubicaciones de campo realizadas en la finca en su corta final. Se realizó un análisis de sensibilidad aplicando castigos al precio y volumen. **[Resultado]:** Los indicadores para todos los índices de sitio son positivos, obteniéndose un VAN, TIR y B/C, respectivamente, para el IS 18: \$363, 7.9% y 1.1; IS 21: \$4 711, 15.3%, 2.5; IS 24: \$7 338 18.1%, 3.3, IS 27: \$10 139, 20.2%, 4.1, IS 30: \$11 308, 21.1%, 4.5. En el análisis de sensibilidad sólo el IS18 es negativo en todos los escenarios excepto en el escenario base, por lo que el proyecto deja de ser financieramente viable en este IS. **[Conclusiones]:** Los proyectos de producción de teca son financieramente viables, incluso en los sitios de baja productividad analizados. El análisis de sensibilidad demuestra que la fortaleza de la plantación radica en la alta producción de volumen.

Palabras clave: Teca, tasa interna de retorno, valor actual neto, costos, relación beneficio/costo.

¹ Asistente académico, Universidad Nacional, Costa Rica. adrian.delgado.torres@una.cr;

² Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. luis.palma.saborio@est.una.ac.cr;

<https://orcid.org/0000-0002-2077-8827>

Abstract

[Introduction]: The use of financial indicators for decision-making in the management of forest plantations allows the producer to know the benefit/cost ratio of his investment. **[Objective]:** To determine the financial indicators VAN, TIR, B/C, for the different site indices, and to perform a sensitivity analysis for a 300 ha. teak plantation located in Los Chiles de Upala, Costa Rica. **[Methodology]:** The costs were collected from the company owner of the plantation. The thinning prices were obtained through statistics published by the National Forestry Office, on the other hand, the final harvest prices are from the market of the year in which the trees were cut. The estimation of the production was made using projections from a volume table of the area for the thinning of years 8 and 12, for the final harvest, the data used came from field volumes made into the farm in its final cut. A sensitivity analysis was performed applying price and volume penalties. **[Result]:** The indicators for site indices 21, 24, 27 and 30 are positive, IS 18 is negative, obtaining a NPV, IRR and B/C, respectively, for IS 18: \$363, 7.9% and 1.1; IS 21: \$4,711, 15.3%, 2.5; IS 24: \$7,338 18.1%, 3.3, IS 27: \$10,139, 20.2%, 4.1, IS 30: \$11,308, 21.1%, 4.5. In the sensitivity analysis only index 18 in all scenarios, the project is no longer financially viable. **[Conclusions]:** Teak production projects are financially viable both at low productivity sites and in those with the highest production per hectare. The sensitivity analysis shows that the strength of the plantation lies in high volume production.

Keywords: Teaks, internal rate of return, net present value, costs, benefit/cost.

1. Introducción

El volumen comercial de madera *Tectona grandis* que proviene de plantaciones forestales a nivel mundial es de unos 2 500 000 m³ anuales (Keogh, 2013). En Costa Rica, la teca es la especie forestal maderable que presenta más área plantada, con 47 167 ha y 150 268 árboles dispersos (INEC, 2017). El color y veta atractiva, la estabilidad de la madera, trabajabilidad y durabilidad, buenas tasas de crecimiento, facilidad de diferentes usos, la alta demanda en el mercado internacional, su fácil propagación, establecimiento y manejo es lo que hace a esta especie tan importante y valiosa (Armijos, 2013 y 2014). En Costa Rica, los mejores sitios para su establecimiento son los suelos fértiles, de origen aluvial y calcáreo, moderadamente profundos (>90 cm), bien drenados, de textura media (Camacho-Linton *et al.*, 2013).

En el año 2021, se exportó un 37% de la madera en bruto y aserrada hacia la India, por un monto de \$25.3 millones, siendo la teca la principal madera exportada, otros países importantes para la exportación de teca son China y Vietnam. (ONF 2021) El valor de la madera de teca para los mercados internacionales que oscila entre los \$263 m⁻³ y los \$652 m⁻³ hace que sea muy apetecida por compradores para llevarla a estos países (International Tropical Timber Organization [ITTO], 2022).

Integrar la información financiera, la contabilidad de costos y la producción es clave para que todo proyecto que promueva alguna actividad productiva se desarrolle adecuadamente y mediante el análisis previo se puede determinar la viabilidad de un proyecto forestal. Desarrollar una estructura de costos real facilitará el surgimiento de nuevos proyectos de

inversión en el sector forestal (González, 2014). Por ejemplo, el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) que posee diversos programas para el financiamiento de proyectos forestales, entre esos el crédito para plantaciones, carece de información precisa sobre costos y producción, lo que le impide brindar mejores condiciones en sus productos financieros (Fallas & Zúñiga, 2014).

La producción de madera, en las plantaciones de teca, es un tema de debate dados los abundantes estudios que se han realizado y que presentan información muy diferente. González (2014) reporta volúmenes para teca por hectárea promedio de $78.3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ y Camacho-Linton *et al.* (2013) registra valores de $133.87 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$; sin embargo, muchos autores indican que la producción de la teca está asociada a la calidad del sitio, por esto la importancia del uso de índices de sitio o categorías de producción para separar las áreas de alta de las de baja producción (Armijos, 2013; Bermejo, s. f.; Camacho-Linton *et al.*, 2013 y Nunifu & Murchison, 1999).

Al igual que la producción agrícola, en las tierras forestales la producción depende de la capacidad del sitio (Meza, 2002). Por eso, determinar la calidad del sitio es una herramienta básica que permite tomar en cuenta la productividad de la plantación (Hernández, 2012), estos permiten optimizar el uso de los recursos monetarios para potenciar los sitios con mejores crecimientos y maximizando aquellos con producciones más moderadas o bajas.

En general, los productores no llevan un registro detallado de costos que les permita construir una estructura de inversión en establecimiento, manejo y mantenimiento, para sustentar las evaluaciones financieras y tomar decisiones acertadas sobre sus plantaciones. Cuando las plantaciones llegan a un diámetro entre 20 y 25 cm, el mercado internacional de teca ejerce presión sobre el productor, el cual no posee datos suficientes para decidir si continúa con la plantación o cosecha en su totalidad (Hernández, 2012).

En esta investigación se realizó un análisis financiero de una plantación forestal de 300 ha, ubicada en Los Chiles de Upala, con el fin de determinar diferentes indicadores financieros que sean usados como referencia para la toma de decisiones en proyectos de inversión forestal, fundamentados en costos reales y una producción estimada para diferentes índices de sitio (IS).

2. Materiales y métodos

2.1 Descripción del sitio.

Esta investigación se desarrolla con datos provenientes de una plantación de teca de 17 años, ubicada en Los Chiles de Upala, provincia de Alajuela de Costa Rica. Las precipitaciones rondan los 3020 mm anuales y la temperatura promedio es de $26 \text{ }^\circ\text{C}$. Cuenta con dos estaciones definidas, una que va entre los meses de diciembre a abril, teniendo las mayores precipitaciones entre los meses de mayo y noviembre.

La zona presenta un clima tropical lluvioso, con una estación seca que va entre los meses de marzo a mayo y una lluviosa entre los meses mayo a enero o febrero, con precipitaciones anuales entre 2000-1636 mm y una temperatura promedio de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (Instituto Meteorológico Nacional [IMN], 2020). Los suelos son ultisoles (Universidad de Costa Rica [UCR], 2016),

caracterizados por sus tonalidades pardo rojizas a rojizas, alto contenido de aluminio extraíble y bajos en calcio, por lo que se pueden definir como ácidos, profundos y bien desarrollados, con una transición difusa entre los horizontes (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria [INTA], 2016). El origen del material genético de la plantación es de semilla, proveniente de Trinidad y Tobago.

2.2. Producción

Los datos dasométricos para la estimación de la producción intermedia se generaron usando como base la tabla de rendimiento, publicada por González (2014) en sus tesis de Maestría “Determinación del momento óptimo de cosecha final en una plantación de teca de la Zona Norte de Costa Rica”. Esta tabla se usó como base ante la ausencia de datos de las cosechas intermedias (8 y 12 años) y, a partir de ésta, se realizó una extrapolación para los diferentes IS que se manejaban en la plantación. Para los datos de cosecha final se usaron los datos del estudio no publicado de Delgado y Palma (2021).

Estas extrapolaciones se realizaron tomando el diámetro y la altura a los 18 años que presenta la tabla base, luego usando información de las parcelas para cada IS, se usaron los diámetros y se calculó el volumen por hectárea. El turno de 18 años fue definido por la empresa según el criterio de oportunidad de venta de la madera, no correspondió a un criterio técnico de producción o de máxima renta.

2.3 Precios

Para la madera obtenida de los raleos programados para los años 8 y 12 se usaron los precios publicados por la Oficina Nacional Forestal (ONF) en los boletines de Paniagua & Salazar (2011) (correspondía usar el del 2010 pero ese año no hubo publicación) y ONF (2013) que corresponden con los años en los que se realizaron dichos raleos. Se usaron estos precios debido a que la empresa tiene la información, pero la clasifica como confidencial. Para la madera obtenida en el año 17 se utilizaron precios de mercado de venta en pie del año 2019, obtenidos de consultas a empresas y profesionales.

2.4 Estructura de costos

Para el estudio, se elaboró una estructura de costos que incluye establecimiento, mantenimiento y manejo de la plantación de teca. Para la construcción de esta estructura de costos se trabajó bajo los siguientes supuestos: 1. La plantación ha sido manejada de igual forma en las 300 ha, o sea, la aplicación de fertilizante, la aplicación de chapeas, podas y raleos se aplicó de manera uniforme en toda el área plantada.

Para la recopilación de información sobre los costos, se realizó entrevistas a productores de la zona y se usaron algunos datos históricos generales proporcionados por la empresa. No se consideró el valor de la tierra, ya que esta es un activo que seguirá bajo el modelo de producción forestal permanente.

La estructura de costos se dividió en dos categorías: establecimiento y manejo. No se consideró los costos de cosecha, pues la empresa realizó las ventas en pie y el costo de la misma lo asumieron los compradores en los diferentes momentos de producción. Todos los valores se expresan en dólares americanos (US\$) utilizando un tipo de cambio de 700 colones.

Para actualizar los costos e ingresos a valor presente se utilizó la siguiente fórmula:

$$Va = C \times \left(\frac{1}{(1 + p)^n} \right)$$

Donde:

Va= Valor actualizado

C= Costo o ingreso calculado para cada año

P= Tasa de interés (7%)

n= Año que se desea calcular

2.5. Indicadores financieros

El análisis financiero se realizó usando el valor actual neto (VAN), la relación beneficio-costo (B/C) y la tasa interna de retorno (TIR) para definir la rentabilidad de la plantación. Estos cálculos se hicieron para cada índice de sitio, dado que los volúmenes y diámetros varían en función de cada sitio y, por lo tanto, los ingresos obtenidos también.

En los primeros ocho años de la plantación no se obtuvo ningún ingreso por concepto de raleos, por lo que se considera que la plantación no posee valor comercial en estos primeros años; sin embargo, el valor de la misma como un activo lo comprenden los costos de establecimiento y mantenimiento.

Para el cálculo del VAN definido como la sumatoria de los flujos de efectivo netos descontados a valor presente al costo del capital de la empresa (Godsey, 2010), se usó la siguiente fórmula:

$$VAN = \left(\frac{Bn - Cn}{(1 + i)^n} \right)$$

Donde:

Bn= Beneficios netos

Cn= Costos netos

I= Tasa de descuento

N= número de años

La tasa interna de retorno (TIR) se deriva del VAN y es la tasa de descuento con la que el valor actual neto (VAN) se iguala a cero (Godsey, 2010), para esto se usó la fórmula:

$$VAN = I + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+r)^n} = 0$$

Donde:

I= Inversión inicial

C_n= Flujo de caja o de beneficios generados por la inversión en cada período

N= Número total de períodos

N= Año en el que se van obteniendo los beneficios de cada período

r= TIR

La relación Beneficio/Costo (B/C) muestra la cantidad de dinero actualizado que recibirá el proyecto por cada unidad monetaria invertida, se determina dividiendo los ingresos brutos actualizados entre los costos actualizados (Herrera Durán, 2001), para esto se usó la fórmula:

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Valor actual de los ingresos}}{\text{Valor actual de los costos}}$$

Se utilizó una tasa de actualización del 7% en concordancia con la tasa del programa de crédito del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO).

2.6 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se elaboró creando una serie de escenarios, en donde se bajó la producción, precios y se realizaron las diferentes combinaciones posibles de estas dos variables para analizar el comportamiento de los indicadores financieros en cada uno de los escenarios; se le aplicó una reducción al volumen y al precio de un 15% en primera instancia y una reducción del 30% en segunda instancia, para ambas variables. Para fines del análisis sólo se usó la reducción del volumen, esto porque aplicar los mismos porcentajes al precio y no modificar el volumen hace que se repitan los resultados, de estas reducciones se obtuvieron los escenarios observados en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Escenarios aplicados para la producción y el precio de la plantación de teca, Zona Norte, Costa Rica.

Table 1. Applied Scenarios for the production and price of teak plantation, in North zone, Costa Rica.

Escenario	Condición
1	Reducción del 15% volumen
2	Reducción del 30% en volumen
3	Reducción de 15% al volumen y 15% al precio
4	Reducción de 15% al volumen y 30% al precio
5	Reducción de 30% al volumen y 30% al precio
6	Escenario base

2.7 Postulados de la valoración

Para la valoración de la madera producida en la plantación se utilizaron los siguientes postulados:

- Los volúmenes comerciales obtenidos del año 8 y 12 son aproximaciones dada la inexistencia de registros de parte de la empresa.
- Los volúmenes del año 18 son reales y provenientes de cubicaciones de campo realizadas en cada índice de sitio en esta finca.
- Los costos pueden no estar abarcando la totalidad de la inversión realizada en la plantación.
- Existen opciones para la inversión de capitales pudiendo variar la tasa interés para prestar dinero.
- Los precios no expresan castigos por corteza, duramen o color y provienen de comunicaciones de productores y compradores.

3. Resultados y discusión

3.1 Producción

Los volúmenes de los años 8 y 12 son el resultado de extrapolaciones a partir de la tabla base, obteniéndose volúmenes por árbol y con las densidades se transformaron a volúmenes por hectárea. Para el año 18, los volúmenes son el resultado de cubicaciones de campo, obteniéndose diferencias entre los IS 18 y 30 de $5.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $8.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $98.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en los diferentes años de producción (**cuadro 2**).

Cuadro 2. Volúmenes comerciales en $m^3 \cdot ha^{-1}$ por IS en diferentes edades de aprovechamiento, Zona Norte, Costa Rica.

Table 2. Commercial volumes in $m^3 \cdot ha^{-1}$ per SI at different exploitation age, in North zone, Costa Rica.

IS	Raleo año 8 ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	Raleo año 12 ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	Corta Final ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	Total ($m^3 \cdot ha^{-1}$)
18	5.1	6.7	39.4	51,2
21	10.7	14.0	82.6	107.4
24	13.8	18.9	104.8	137.5
27	16.0	21.8	126.4	164.2
30	17.4	23.8	137.7	178.9

Estudios de Pérez & Kanninen (2003) en plantaciones de 20 años muestran que es posible obtener un volumen comercial de hasta $160 m^3 \cdot ha^{-1}$ en lugares de calidad media y de $117 m^3 \cdot ha^{-1}$ en sitios de calidad baja. Comparando estos volúmenes con los obtenidos en el **Cuadro 2**, se observa que son cercanos a los obtenidos en la producción final de esta finca. Por su parte, Camacho-Linton *et al.* (2013) reporta hasta $133.8 m^3 \cdot ha^{-1}$ a los 19 años para un IS15.

3.2 Costos

Para la determinación de los costos de producción, se desarrolló un esquema de producción del trabajo en jornales por hectárea para cada una de las actividades incluidas en el sistema de producción aplicado a la plantación. El **Cuadro 3** presenta los rangos de rendimientos usados por la empresa Proteak, en cada una de las actividades de establecimiento y manejo para la plantación de teca.

Cuadro 3. Labores y rendimientos en el establecimiento, manejo y mantenimiento de plantaciones forestales, utilizadas en la finca propiedad de Proteak.

Table 3. Tasks and yields in the establishment, management and maintenance of forest plantations, used in Proteak farm.

Labores	Unidad	Jornales/ha
Hoyado	Jornales/ha	1.0
Apuntalado	Jornales/ha	0.9
Camellones	Jornales/ha	0.5
Chapea química total	Jornales/ha	2.0
Control de calidad	Jornales/ha	1.1
Control de plagas	Jornales/ha	0.3
Control fitosanitario	Jornales/ha	4.8
Desbejudada	Jornales/ha	0.9

Deshija	Jornales/ha	7.5
Diseño y elaboración de drenajes	Jornales/ha	0.1
Distribución y siembra	Jornales/ha	1.9
Elaboración y diseño de caminos	Jornales/ha	0.1
Encalado	Jornales/ha	3.0
Estaquillado y marcado	Jornales/ha	1.2
Fertilización	Jornales/ha	1.6
Limpieza de residuos	Jornales/ha	0.3
Limpieza de sitio mecanizada	Jornales/ha	0.6
Mantenimiento de camino y puentes	Jornales/ha	3.9
Mantenimiento de cerca	Jornales/ha	0.3
Mantenimiento de drenajes	Jornales/ha	1.5
Mantenimiento de infraestructura	Jornales/ha	3.0
Poda	Jornales/ha	12.3
Poda de árboles externos en bordes de plantación	Jornales/ha	2.1
Protección contra incendios	Jornales/ha	4.8
Rastra	Jornales/ha	0.4
Resiembra árboles dañados	Jornales/ha	0.1
Rodaja química circular	Jornales/ha	5.0
Subsolado	Jornales/ha	0.3

En el año de establecimiento la inversión inicial es de \$1 284 ha⁻¹, que incluyen las labores de mecanización, plantas, fertilización, encalado, entre otras; comparando este costo con el establecimiento de otras plantaciones. González (2014) reporta una inversión inicial \$1 193 y Kottman (2013) registra \$1 100. En los siguientes cuatro años se concentran los mayores costos principalmente en las labores de fertilización, donde se aplicaron 3.6 quintales por hectárea de fertilizante de fórmula completa, en las cuatro aplicaciones realizadas, cantidad parecida a lo obtenido por Fallas y Zúñiga (2014), en plantaciones de teca en un ensayo de fertilización realizado en la Zona Norte, encalado en el año 2 y 3, seguidos de la deshija (año 2) y la poda (años 2, 3 y 4), para el encalado se aplicaron 18.8 quintales por hectáreas todas las veces que se aplicaron las enmiendas, en el año 7 se presenta un incremento en los costos debido al marcaje del raleo, la poda y la aplicación de productos agroquímicos para proteger las áreas en donde se podaron las ramas y, además, la realización de una chapea mecanizada. Los costos actualizados con una tasa del 3% se pueden observar en el **Cuadro 4**.

Arias (2004) y Arce & Barrantes (2006) señalan que el alto porcentaje de los costos de una plantación (80%) corresponden a mano de obra. En la plantación en estudio este valor alcanzó el 58% de los costos totales durante el período de análisis; el 42% restante fueron insumos concentrando el mayor gasto en la compra de las plantas (20.8%), la cal dolomita (22.4%) y la fertilización química (21.4%).

En el **Cuadro 4** se presentan los costos de establecimiento y mantenimiento durante los 18 años de vida de la plantación. Los costos son iguales para todos los índices de sitio, pues la empresa aplicó un mantenimiento estándar en toda la finca sin diferenciar del índice de sitio.

Cuadro 4. Costos totales de establecimiento, mantenimiento y manejo, utilizados en la finca propiedad de Proteak.

Table 4. Establishment, management and maintenance costs used in Proteak farm.

Año	Costo final total (\$/ha)
0	\$1 284
1	\$362
2	\$527
3	\$503
4	\$224
5	\$55
6	\$28
7	\$230
8	\$28
9	\$36
10	\$28
11	\$39
12	\$28
13	\$28
14	\$28
15	\$28
16	\$28
17	\$36

Tipo de cambio: \$1= 700 colones

3.3 Ingresos

En el **Cuadro 5** se muestran los precios por índice de sitio en los 8, 12 y 17 en dólares por metro cúbico. Los ingresos (**Cuadro 6**) son mayores en los IS de mejor calidad, siendo el volumen de cada IS el factor determinante para el ingreso obtenido por hectárea. La diferencia en los ingresos entre el IS 18 y el IS 30 es de un 76% en la corta final, explicada por el mayor volumen de madera comercial obtenido en el IS30. Los ingresos podrían variar según como se acuerde la venta de la madera, Chavarría *et al.* (2011), esto es en pie o indica que la madera aserrada presenta precios de venta más altos que en troza, debido al valor agregado que se le da al producto.

Cuadro 5. Precios para cada año de producción y cada índice de sitio para teca, Zona Norte, Costa Rica.

Table 5. Production prices per year and each site index for teak, in North zone, Costa Rica.

IS	Precio \$*m ³ año 8	Precio \$*m ³ año 12	Precio \$*m ³ año 17
18	\$225	\$296	\$184
21	\$225	\$296	\$196.1

24	\$225	\$296	\$211.5
27	\$225	\$296	\$228.1
30	\$225	\$296	\$228.9

IS 18: Índice de sitio 18, IS 21: Índice de sitio 21, IS 24: Índice de sitio 24, IS 27: Índice de sitio 27, IS 30: Índice de sitio 30.

Cuadro 6. Ingresos para cada año de producción y cada índice de sitio para teca, Zona Norte, Costa Rica.

Table 6. Income per hectare for each year production and each site index for teak, in North zone, Costa Rica.

IS	Raleo año 8 (\$*ha ⁻¹)	Raleo año 12 (\$*ha ⁻¹)	Corta Final (\$*ha ⁻¹)	Total \$*ha ⁻¹
18	1 153	1 983	6 428	9 564
21	2 417	4 159	14 789	21 365
24	3 113	5 583	19 812	28 508
27	3 604	6 464	26 518	36 586
30	3 924	7 038	28 819	39 781

IS 18: Índice de sitio 18, IS 21: Índice de sitio 21, IS 24: Índice de sitio 24, IS 27: Índice de sitio 27, IS 30: Índice de sitio 30.

3.4 Rentabilidad

En el **Cuadro 7** se muestran los resultados de los indicadores financieros de la plantación, como es de esperar conforme mejora la calidad del sitio, los indicadores tienen un comportamiento a incrementarse. En este caso, el proyecto es rentable para todos los índices sitio, con sus lógicas diferencias en los IS de mejor calidad respecto a sus antecesores, siendo el IS 30 el que aporta más rendimiento financiero al proyecto. El IS 18 presenta valores de VAN, TIR y B/C muy cercanos al límite mínimo de rentabilidad requerido, indicando que este sitio no fue tan rentable en su producción, teniendo una TIR de 7.9% lo que da un margen solo de 0.9% en la tasa de interés a la que podría funcionar el proyecto.

El VAN muestra que, la plantación después de cubrir los costos genera, al final de los 18 años, ingresos que hacen viable financieramente la inversión, por supuesto que la decisión de inversión final de un inversionista dependerá del uso alternativo de la tierra y la renta que genere este uso. Los valores obtenidos en el IS 27 Y 30 de este estudio se encuentran; por encima de los US\$ 8342.4 reportados por Herrera (2001) en plantaciones en Panamá, y del monto indicado por Ortiz (2005), Godsey (2010), Sage *et al.* (2013), que muestran valores en diferentes países que rondan entre \$602 ha⁻¹ y \$8 556 ha⁻¹.

Para plantaciones forestales en Panamá, Herrera (2001) obtuvo una TIR de 12%, por su lado Armijos (2014) registra un TIR de 16%, Rivera (2015) muestra entre 23% y 25%, valores

cercanos a los IS 27 Y 30 de esta investigación. Además, Ortiz (2005), Godsey (2010), Sage *et al.* (2013), muestran valores en diferentes países que rondan entre 10% y 18.8% para la TIR, valores similares a los IS 21 Y 24. Los TIR indican que, la inversión soporta hasta una tasa de 21.1%, por lo que un inversionista podría obtener financiamiento de FONAFIFO, pues este ente ofrece crédito para proyectos de plantaciones forestales con una tasa del 7% (hipotecaria) y 5% (fiduciaria).

La Relación Beneficio Costos (B/C) nos muestra valores entre 1.1 en el IS18 hasta 4.5 en el IS 30, Fasoro (2021) muestra datos de 2.04 y Rabelo *et al* (2020) de 10.59 en donde en este último se evaluó la inversión asumiendo los costos de cosecha y transporte del aprovechamiento.

Los indicadores financieros por IS permiten al productor tomar decisiones sobre el sistema de manejo a aplicar con sus costos asociados, ya que realizar labores silviculturales de alto costo en sitios de baja productividad no siempre genera la rentabilidad deseada. Por eso, cada inversión debe ser valorada en función de la relación beneficio/costo que genera.

Comparativamente con otras actividades agropecuarias de la zona como lo es la piña Y la ganadería, estas actividades según estudios de diversos autores presentan rentabilidades en VAN y TIR de: \$407 797, 23% (Barillas, 2011); \$128 851, 134% (Mejía *et al*, 2021), respectivamente, lo que muestra la fuerte competencia por suelo que tienen las plantaciones forestales respecto a otras actividades anuales y más rentables.

Cuadro 7. Indicadores financieros por índice de sitio.

Table 7. Financial indicators per site index.

Indicador financiero	IS 18	IS 21	IS 24	IS 27	IS 30
VAN	\$363	\$4 711	\$7 338	\$10 139	\$11 308
TIR	7.9%	15.3%	18.1%	20.2%	21.1%
B/C	1.1	2.5	3.3	4.1	4.5

IS 18: Índice de sitio 18, IS 21: Índice de sitio 21, IS 24: Índice de sitio 24, IS 27: Índice de sitio 27, IS 30: Índice de sitio 30.

3.5 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad muestra que a excepción del índice 18, los demás índices son viables financieramente, incluso reduciendo hasta un 30% el volumen y precio. En el IS 18 que es el de más baja producción en los escenarios 1, 2, 3, 4, y 5, la plantación no es rentable, como se ve en los cuadros 9,10 y 11 de las variaciones del TIR, VAN y B/C, solo en el escenario 6 es rentable con valores muy cercano al mínimo requerido. El propietario debe considerar el nivel de riesgo para analizar si se invierte en una actividad de mayor rentabilidad, considerando la distribución de áreas por IS que tenga la plantación.

Vásconez (2002) para plantaciones en Ecuador indica que a pesar de una reducción de un 50% en la producción y un aumento en la tasa de descuento, la TIR fue de un 20% y la relación B/C fue de 1.84.

La plantación en estudio muestra valores semejantes en el escenario 6, en donde no se realizó ninguna modificación a los parámetros, debido posiblemente a una mayor expectativa de producción de ese estudio.

Cuadro 8. Análisis de sensibilidad del VAN en diferentes escenarios para una plantación de teca, Zona Norte, Costa Rica.

Table 8. Sensitivity analysis of NPV in different scenarios for teak plantation in North zone, Costa Rica.

IS	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
18	-198	-732	-652	-1 106	-1 480	336
21	7020	5 212	5 484	2 783	1 413	6 240
24	5702	4 127	4 363	3 024	1 921	7 277
27	7940	5 970	6 265	4 591	3 212	9 910
30	8 950	6 801	7 124	5 298	3 794	11 098

IS 18: Índice de sitio 18, IS 21: Índice de sitio 21, IS 24: Índice de sitio 24, IS 27: Índice de sitio 27, IS 30: Índice de sitio 30.

Cuadro 9. Análisis de sensibilidad del TIR en diferentes escenarios para una plantación de teca, Zona Norte, Costa Rica.

Table 9. Sensitivity analysis of IRR in different scenarios for teak plantation in North zone, Costa Rica.

IS	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
18	6.4%	4,8%	5,0%	3.4%	1.8%	7.9%
21	17.1%	15.3%	15.6%	12.5%	10.1%	16.6%
24	16.4%	14.5%	14.8%	13.0%	11.2%	18.1%
27	18.5%	16.5%	16.8%	15.0%	13.1%	20.1%
30	19.3%	17.4%	17.7%	15.8%	13.9%	21.0%

IS 18: Índice de sitio 18, IS 21: Índice de sitio 21, IS 24: Índice de sitio 24, IS 27: Índice de sitio 27, IS 30: Índice de sitio 30.

Cuadro 10. Análisis de sensibilidad del B/C en diferentes escenarios para una plantación de teca, Zona Norte, Costa Rica.

Table 10. Sensitivity analysis of B/C in different scenarios for teak plantation in North zone, Costa Rica.

IS	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
----	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

18	0.9	0.8	0.8	0.7	0.5	1.1
21	3.2	2.6	2.7	1.9	1.4	2.9
24	2.8	2.3	2.4	1.9	1.6	3.3
27	3.5	2.9	2.9	2.4	2.0	4.1
30	3.8	3.1	3.2	2.6	2.2	4.4

IS 18: Índice de sitio 18, IS 21: Índice de sitio 21, IS 24: Índice de sitio 24, IS 27: Índice de sitio 27, IS 30: Índice de sitio 30.

4. Conclusiones

Las labores de preparación del sitio, siembra, selección del material genético, encalados, fertilización y otras labores silviculturales con un alto nivel técnico en los primeros cinco años de la plantación, aunque son los de mayor inversión, son determinantes en el óptimo crecimiento, producción y calidad de madera y estos se reflejan en los ingresos obtenidos.

Los indicadores financieros son rentables en todos los índices sitios, sin embargo, en el índice de sitio 18 la rentabilidad no es atractiva para invertir recursos, por lo que puede orientarse los esfuerzos productivos en índices de sitio con mejores rendimientos y redefinir si estos sitios de baja producción pueden utilizarse con alguna otra especie menos exigente y que permita maximizar el aprovechamiento de toda el área de siembra.

Las cortas intermedias tienen una participación importante en la rentabilidad final del proyecto por lo que el contar con un plan de manejo adecuado que combine la optimización del crecimiento y el flujo financiero incidirán generaran proyectos financieramente más atractivos.

La competencia por suelos de buena calidad contra otras actividades productivas altamente rentables, es una de las barreras que presentan las plantaciones forestales, sin embargo, las plantaciones forestales tienen la ventaja de que al ser un cultivo que puede aplazar su momento de producción tiene más seguridad que cultivos anuales como la piña o la palma, los cuales en el momento determinado deben cosechar o perder la producción si no lo hacen, lo que acarrea un alto riesgo financiero.

Los ingresos están sujetos a variaciones en los precios de mercado y sobre los que no se tiene control, estos pueden verse afectados por diversas distorsiones del mercado mundial como lo son variaciones abruptas en el tipo de cambio en monedas extranjeras como lo es la rupia de la India, ya que mucha de la madera se dirige hacia este país e incide en el precio final de compra, por su parte la plantación tiene la fortaleza de tener una alta producción al momento de su cosecha final lo que permite compensar variaciones en el precio de la madera.

Variaciones en la producción del volumen final, grosor de la madera, color y duramen afecta el ingreso final, situaciones que pueden combinarse para crear escenarios donde los indicadores financieros muestran un proyecto menos rentable, por esto la importancia de analizar posibles variaciones para conocer el margen de maniobra en cada zona de producción.

6. Agradecimientos

Principal agradecimiento al proyecto “Evaluación del crecimiento de plantaciones clonadas de *T. grandis* y *G. arbórea* 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 logístico y financiero. Agradecimiento especial a la empresa Proteak S.A. por proporcionar acceso a sus fincas para la obtención de información. Además, a las personas que colaboraron en la recolección de la información y a los tutores por las recomendaciones y seguimiento de este trabajo.

5. Referencias

Arce, H., y Barrantes, A. (2006). *La madera en Costa Rica: Situación actual y perspectivas*. FONAFIFO, ONF.

Arias, G. (2004). Análisis del impacto económico y social de las plantaciones forestales en Costa Rica. *FUNDECOR, Costa Rica*.

Armijos, D. (2013). *Construcción de tablas volumétricas y cálculo de factor de forma (ff.) para dos especies, teca (Tectona grandis) y melina (Gmelina arbórea) en tres plantaciones de la empresa Reybanpac ca. en la provincia de los Ríos*. (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.

Armijos, L. (2014). *Modelo De Negocios Y Fuente De Financiamiento A Través De Un Fideicomiso De Inversión En El Cultivo De Teca (Tectona grandis)*. 7, 4-29.

Barillas, (2011). Estudio de Mercado Y Financiero Para La Exportación De Piña MD2 Hacia Los Estados Unidos, Proyecto Especial de Graduación, Zamorano, Honduras.

Camacho-Linton, A., Ramírez Maldonado, H., De Los Santos-Posadas, H. M., & Zamudio Sánchez, F. (2013). Tablas de rendimiento para teca (*Tectona grandis* L.) en el Estado de Campeche. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 4(19), 92-101. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i19.381>

Chavarría, A., Detlefsen, G., Ibrahim, M., Galloway, G., & Camino, R. d. (2011). Análisis de la productividad y la contribución financiera del componente arbóreo en pequeñas y medianas fincas ganaderas de la subcuenca del río Copán, Honduras. *Agroforestería de las Américas*, 48, 146-156.

Delgado, A., & Palma, L. (2021). Cuantificación por productos para una plantación de *Tectona grandis* L.f., de 18 años de edad, en diferentes índices de sitio, en los Chiles de Upala. Datos no publicados.

Fallas, J., & Zúñiga, F. (2014). *Respuesta a la Fertilización de la Teca (Tectona grandis L.f) con NPK en Ultisoles de la Zona Norte de Costa Rica*. <https://doi.org/10.13140/2.1.5133.3129>

Fasoro, O. (2021). Investment Analysis of Large-Scale Private Forest Plantation Development in Ogun State. *European Journal of Wildlife Research*, 13, 215-223.

Godsey, L. (2010). Economic budgeting for agroforestry practices. Agroforestry in action. Extension publications. *University of Missouri Center for Agroforestry*, 1(12), 12.

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.

Hernández, J. (2012). *Curvas Polioricas de Índice de Sitio Para Pinus montezumae*.

Herrera, J. (2001). *Análisis de crecimiento de procedencias y rentabilidad financiera de Tectona grandis L.f. En la zona oeste del canal de Panamá*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

Instituto Meteorológico Nacional. (2020). *Base datos de mediciones de precipitación y temperatura de la estación meteorológica Los Chiles de Upala*.

Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. (2016). *Suelos de Costa Rica-Orden Ultisol, Boletín Técnico*. Departamento de Transferencia e Información tecnológica-INTA. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1604.PDF>

International Tropical Timber Organization . (2022). *Tropical Timber Market Report*. Volumen 26, Number 4, 28th February.

Keogh, R. M. (2013). *La teca y su importancia económica a nivel mundial. En de Camino, R. & Pierre, J. (Eds.), Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y Realidades*. CATIE.

Kottman, F. (2013). Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades. *Capítulo 17. En: De Camino, R.; Morales, J.P. (eds), Boletín técnico 117, 330-341*.

Mejía, Y. (2021). Estudio de viabilidad económica financiera para la producción y comercialización de ganado de engorde, mediante la utilización del sistema suplementación estratégica en pastoreo, para la Hacienda El Guabo, ubicada en Santa Cruz. Tesis de grado, Universidad Nacional, Costa Rica.

Meza Picado, V. H. (2002). *Curvas de índice de sitio para Teca (Tectona grandis Linn.) en la Vertiente del Pacífico de Costa Rica*.

Nunifu, T., & Murchison, H. (1999). Provisional yield models of Teak (Tectona grandis Linn F.) plantations in northern Ghana. *Forest Ecology and Management - FOREST ECOL MANAGE*, 120, 171-178. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00529-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00529-5)

Oficina Nacional Forestal (ONF). (2013). *Precios de la madera para las principales especies comercializadas en Costa Rica*. Oficina Nacional Forestal (ONF).

Oficina Nacional Forestal (ONF). (2021). *Balanza comercial y principales tendencias de las exportaciones e importaciones de madera y muebles de madera en Costa Rica*. Oficina Nacional Forestal (ONF).

Ortiz, E. (2005). *Esquemas financieros alternativos para promover la reforestación en países en desarrollo* (p. 53) [Informe Final]. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Paniagua, R., & Salazar, G. (2011). *Precios de la Madera en Costa Rica 2011 y tendencias de las principales especies comercializadas*. Oficina Nacional Forestal (ONF).

Pérez, D., & Kanninen, M. (2003). Aboveground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science*, 15, 199-213.

Rivera, M. (2015). *Análisis de la producción maderable de teca (Tectona grandis Linn. F.) en plantaciones y sistemas agroforestales en Hojancha, Costa Rica, y bases para el desarrollo de un plan de incidencia política para promover su cultivo*. CATIE.

Sage, L., Kent., J., & Morales, J. P. (2013). Rentabilidad de las inversiones de teca. *Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades*, 202-225.

Universidad de Costa Rica. (2016). *Mapa digital de Suelos de Costa Rica* [Map]. http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139

Vásconez, L. (2002). *Estudio Técnico y Económico para el establecimiento de una plantación de teca (Tectona grandis, L.f.) en El Empalme, Guayas, Ecuador* [Tesis]. Zamorano.