

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**FUNCIONES ALOMÉTRICAS, DE VOLUMEN Y
RENDIMIENTO DE ASERRÍO PARA CEBO (*Vochysia
guatemalensis* Donn. Sm.) EN PLANTACIONES MIXTAS,
ZONA NORTE, COSTA RICA.**

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO
ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

JOSHUA JESÚS JIMÉNEZ JIMÉNEZ

**CARTAGO, COSTA RICA
ENERO 2020**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**FUNCIONES ALOMÉTRICAS, DE VOLUMEN Y
RENDIMIENTO DE ASERRÍO PARA CEBO (*Vochysia
guatemalensis* Donn. Sm.) EN PLANTACIONES MIXTAS,
ZONA NORTE, COSTA RICA.**

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO
ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

JOSHUA JESÚS JIMÉNEZ JIMÉNEZ

**CARTAGO, COSTA RICA
ENERO 2020**

FUNCIONES ALOMÉTRICAS, DE VOLUMEN Y RENDIMIENTO DE ASERRÍO PARA CEBO (*Vochysia guatemalensis* Donn. Sm.) EN PLANTACIONES MIXTAS, ZONA NORTE, COSTA RICA.

Joshua Jesús Jiménez Jiménez *

RESUMEN

El cebo (*Vochysia guatemalensis* Donn. Sm.) es una especie considerada de rápido crecimiento y valiosa para la restauración de sitios degradados debido a su adaptación a suelos arcillosos, ácidos y con alta concentración de hierro y aluminio. En la actualidad la implementación de especies como esta en las plantaciones forestales es cada vez más importantes para satisfacer la demanda de productos maderables y disminuir la presión existente sobre la explotación de los bosques. El objetivo de este trabajo fue desarrollar funciones para la estimación de volumen comercial y volumen total, modelos de perfil de fuste y valores de rendimiento de aserrío para cebo en plantaciones mixtas, Sarapiquí, Zona Norte, Costa Rica. Para la función de volumen comercial se ajustaron tres modelos con corteza (Volumen para uso en construcción, volumen para uso en tarimas y la combinación de volumen de ambos). Con respecto a la ecuación de perfil de fuste se ajustó el modelo de Kozak, generando un sistema de dos ecuaciones. Los valores de rendimiento se obtuvieron en relación con tres diferentes calidades de trozas.

Palabras clave: biometría, volumen conicidad, especies nativas, aserrío.

ABSTRACT

Cebo (*Vochysia guatemalensis* Donn. Sm.) is considered to be fast growing and valuable species for the restoration of degraded sites due to its adaptation to clayey, acidic soils with a high concentration of iron and aluminium. Currently, the implementation of species like this in forest plantations is increasingly important to satisfy the demand for wood products and reduce the existing pressure on forest exploitation. The objective of this work was to develop functions for estimating commercial volume and total volume, stem profile models and performance values of sawn of cebo in mix pantations, Sarapiquí, Northern Zone, Costa Rica. For the commercial volume function, the models including bark were adjusted (volume for pallet use , volume for use in construction and the combination of both volumes). For the stem profile equation, Kozak's model was adjusted, generating a system of two equations. The yield values were obtained in relation to three different qualities of the logs

Keywords: biometry, volume, conicity, native species, sawn.

*Jiménez Jiménez, JJ . 2020. Funciones alométricas, de volumen y rendimiento de aserrío para cebo (*Vochysia guatemalensis* Donn. Sm.) en plantaciones mixtas, Zona Norte, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 61 p.

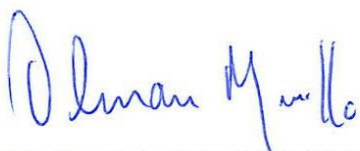


CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

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

FUNCIONES ALOMÉTRICAS, DE VOLUMEN Y RENDIMIENTO DE ASERRÍO PARA CEBO (*Vochysia guatemalensis* Donn. Sm.) EN PLANTACIONES MIXTAS, ZONA NORTE, COSTA RICA.

Miembros del Tribunal Evaluador



Olman Murillo Gamboa Ph.D.
Director de tesis.



Anna Mohr M.Sc.
Puro Verde Paraíso Forestal S.A.



Mario Guevara Bonilla M.Sc.
Profesor lector.



Dorian Carvajal Venegas M.Sc.
Coordinador de trabajos finales de graduación.



Joshua Jesús Jiménez Jiménez .
Estudiante

DEDICATORIA

A mis padres Ana Jiménez Vargas y Eddier Jiménez Moscoso por sus consejos, confianza y apoyo incondicional durante mi formación profesional, gracias por ser mi mayor fuente de inspiración y estar siempre a mi lado.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Puro Verde Paraíso Forestal y al programa ASA; por la ayuda y el apoyo económico, por permitirme la oportunidad de generar la investigación y darme el privilegio de vivir una grata experiencia en mi pasantía en Alemania-Costa Rica , en especial a Anna Mohr, Pablo Angulo y Alexis Quirós quienes fueron una parte importante durante el proceso, además de todo el apoyo brindado en la realización de este trabajo. Un agradecimiento especial al Ing. Walbersy y a las compañeras pasantes quienes fueron participes con su grano de arena en todo el proceso.

Al Dr. Olman Murillo, por su ayuda, apoyo y consejos que permitieron la culminación de esta etapa.

Al M.Sc. Mario Guevara y a la M.Sc Anna Mohr, lectores de este documento, por su contribución y consejos durante la última etapa de este proyecto.

Al M.Sc. Dorian Carvajal y a la M.Sc. Yorleny Badilla, por amistad, su apoyo y colaboración a lo largo de la carrera y en especial en el proceso de tesis

Al personal docente y administrativo de la Escuela de Ingeniería Forestal, quienes fuero de apoyo y ayuda a lo largo de la formación.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	I
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE GENERAL.....	V
ÍNDICE DE CUADROS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
CAPÍTULO 1. PERFIL DE FUSTE Y ESTIMACIÓN DE ALTURA TOTAL PARA PLANTACIONES MIXTAS DE CEBO (<i>Vochysia guatemalensis</i>) EN SARAPIQUÍ, COSTA RICA.....	1
Resumen.....	1
Introducción	3
Materiales y métodos	5
1. Ajuste del modelo de conicidad	5
2. Ajuste de modelo para predicción de altura total a partir del diámetro.....	8
3. Verificación del ajuste de los modelos:	8
4. Validación de los modelos ajustados	9
Resultados	11
Discusión	16
Conclusiones	20
Recomendaciones	20
CAPÍTULO 2. ESTIMACIÓN DE VOLUMEN COMERCIAL Y TOTAL EN PLANTACIONES MIXTAS DE CEBO (<i>Vochysia guatemalensis</i>), SARAPIQUÍ, ZONA NORTE DE COSTA RICA.....	21
Resumen.....	21
Introducción	22
Materiales y métodos	24
1. Cálculo de volumen.....	26

2. Ajuste de modelos de volumen	28
3. Verificación del ajuste de los modelos:	29
4. Validación de los modelos ajustados	30
Resultados	32
1. Modelos de volumen combinado (construcción + tarima)	33
2. Modelos de volumen para construcción	35
3. Modelos de volumen para tarimas	38
4. Modelos de volumen total	40
Conclusiones	47
Recomendaciones	47
CAPÍTULO 3. RENDIMIENTO EN ASERRÍO PARA TROZAS DE CEBO (<i>Vochysia guatemalensis</i>) SEGÚN SU CALIDAD, SARAPIQUÍ, COSTA RICA.	48
Resumen.....	48
Introducción	49
Materiales y métodos	50
Resultados	53
Discusión	55
Conclusión	57
Recomendaciones	57
REFERENCIAS.....	58

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Distribución por clase diamétrica (dap) de la muestra de árboles de <i>V. guatemalensis</i> , utilizados para el ajuste y validación del modelo de conicidad, en plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	11
Cuadro 2. Sistema de ecuaciones derivadas del ajuste del modelo de Kozak para <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	13
Cuadro 3. Estructura de base de datos para la cubicación de árboles de <i>V. guatemalensis</i> para el ajuste de modelos de volumen de plantaciones mixtas en Costa Rica.	24
Cuadro 4. Distribución de la muestra de árboles de <i>V. guatemalensis</i> utilizados en el ajuste y validación de modelos de volumen comercial, para plantaciones mixtas en la zona norte, Costa Rica.	26
Cuadro 5. Distribución por clase diamétrica (dap) de árboles utilizados para el ajuste y validación de modelos de volumen, para árboles de <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	32
Cuadro 6. Funciones generadas para estimación de volumen combinado en árboles de <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	34
Cuadro 7. Funciones generadas para la estimación del volumen para construcción (dap > 20 cm) en árboles de <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	36
Cuadro 8. Funciones generadas para estimación de volumen para tarimas (dap > 12 cm) en árboles de <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	39
Cuadro 9. Funciones generadas para estimación de volumen total en árboles de <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	41
Cuadro 10. Formulario de campo para toma de datos del estudio de rendimiento en aserrío en trozas de <i>V. guatemalensis</i> , Sarapiquí, zona norte, Costa Rica.	50
Cuadro 11. Clasificación de calidad de troza según las características visuales del fuste.	51

Cuadro 12. Determinación del tamaño de muestra para el estudio de rendimiento en aserrío de trozas de <i>V. guatemalensis</i> , Sarapiquí, zona norte.....	53
Cuadro 13. Valores de rendimiento de aserrío por calidad.	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre d_i/d_{ap} y h_i/ht en árboles de <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	12
Figura 2. Distribución de residuos con respecto a la variable lineal independiente $(h_i/ht)-1$ (izquierda). Distribución de residuos con respecto a la variable independiente $(h_i^2/ht^2)-1$ (derecha), para el ajuste del modelo de Kozak para <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	13
Figura 3. Relación entre d_{ap} y ht en árboles de <i>V. guatemalensis</i> , de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	14
Figura 4. Distribución de residuos con respecto a la variable independiente d_{ap} (izquierda) y con respecto a la variable independiente d_{ap}^2 (derecha), para el modelo de estimación de altura total de <i>V. guatemalensis</i> en plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.....	15
Figura 5. Esquema para cálculo de volumen para el ajuste y validación de 4 modelos de estimación de volumen: a) volumen combinado, b) volumen para construcción, c) volumen para tarima, d) volumen total.	28
Figura 6. Relación entre diámetro a la altura del pecho (d_{ap}) y el volumen comercial (m^3), en árboles de <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.....	33
Figura 7. Distribución de residuos para cada una de las variables del modelo (segundo grado sin intercepto) para estimación del volumen combinado.....	34
Figura 8. Relación entre diámetro a la altura del pecho (d_{ap}) y el volumen comercial para construcción ($d_{ap} > 20$ cm), en árboles de <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	35

Figura 9. Distribución de residuos para las variables independientes del modelo (tercer grado sin intercepto) de estimación del volumen para uso en construcción (dap > 20 cm), en árboles de <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	37
Figura 10. Relación entre el dap y el volumen para tarimas (dap > 12 cm), en árboles de <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	38
Figura 11. Distribución de residuos para cada una de las variables del modelo (segundo grado sin intercepto) para estimación de volumen para tarimas (dap > 12 cm), en árboles de <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	39
Figura 12. Relación entre diámetro a la altura del pecho (dap) y el volumen total (m ³), en árboles de <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	40
Figura 13. Distribución de residuos para cada una de las variables de modelo (tercer grado sin intercepto) para estimación del volumen total, en árboles de <i>V. guatemalensis</i> de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.	42
Figura 14. Distribución por clase diamétrica y categoría de calidad, de las trozas utilizadas en el estudio de rendimiento en aserrío para <i>V. guatemalensis</i> , zona norte, Costa Rica.....	53

CAPÍTULO 1. PERFIL DE FUSTE Y ESTIMACIÓN DE ALTURA TOTAL PARA PLANTACIONES MIXTAS DE CEBO (*Vochysia guatemalensis*) EN SARAPIQUÍ, COSTA RICA.

Resumen

El cebo, una especie de rápido crecimiento trasladada de sus condiciones naturales como potreros y bosques, a sistemas de plantaciones monoespecíficas y mixtas. No obstante, en el campo de la alometría existen vacíos de información para la especie establecida en plantaciones, lo cual crea la necesidad de ajustar una ecuación de perfil de fuste con el fin de mejorar la estimación de variables de interés.

Para este estudio se utilizó la información proveniente de 168 árboles volteados y medidos a diversas alturas, con edad entre 7 y 9 años, y diámetros a la altura de pecho desde 7,8 cm hasta 39,4 cm. Los datos fueron obtenidos de plantaciones mixtas establecidas en La virgen de Sarapiquí, zona norte de Costa Rica. Se ajustó el modelo de Kozak $y = -2,1833(x - 1) + 0,9808(x^2 - 1)$ con un alto coeficiente de determinación $r^2 = 0,9724$ y un bajo valor de error estándar $Syx = 0,114$.

La validación de modelo ajustado de Kozak se realizó con una muestra de 17 árboles distribuidos en todo el rango diamétrico. El porcentaje de sesgo mostró un valor de 2,57%. Al ser sometido a la prueba de Wilcoxon indicó que el modelo no está sesgado.

Del modelo ajustado de Kozak se derivó una función para la estimación de diámetro a cualquier altura deseada:

$$di = \sqrt{dap^2 \left[-2,1833 \left(\frac{hi}{ht} - 1 \right) + 0,9808 \left(\frac{hi^2}{ht^2} - 1 \right) \right]}, \text{ con un sesgo de } 0,46\%. \text{ También}$$

se derivó una función para la estimación de altura a cualquier diámetro deseado:

$$hi = ht \left(\frac{2,1833 \pm \sqrt{4,7668 - 3,9232 \left(-\frac{di^2}{dap^2} + 1,2025 \right)}}{1,9616} \right), \text{ con un sesgo de } 1,74\%.$$

Para términos de practicidad de las funciones derivadas del modelo de Kozak se ajustó un modelo cuadrático para predecir altura total a partir del dap: $ht = 1,1033dap - 0,0159dap^2$, con un alto valor de coeficiente de determinación $r^2 = 0,995$. La validación de esta mostró un porcentaje de sesgo correspondiente a 1,93% y la prueba de Wilcoxon indicó que el modelo no está sesgado.

Palabras claves: biometría, especies nativas, reforestación.

Introducción

En la actualidad los aprovechamientos de madera proveniente de plantaciones forestales abastecen un 77,5% de la producción nacional, no obstante, los principales usos de la madera se encuentran enfocados en la producción de tarimas y la construcción [1]. Lo que convierte a la estimación del volumen comercial en un elemento esencial en la optimización y rendimiento de la madera en función a sus diferentes usos.

Para cuantificar el volumen comercial aprovechable de un árbol, se debe conocer las características alométricas asociadas con la forma que presenta el fuste y el comportamiento relacionado con el crecimiento, conocido también como perfil de fuste [2]. El comportamiento de estas variables puede cambiar en función de factores como densidad de siembra, intensidad y frecuencia de raleos, edad, entre otros. Toda empresa forestal requiere de métodos para estimar su volumen aprovechable con precisión, con el objetivo de poder ser utilizado como herramienta en la toma de decisiones [3]. La estimación del rendimiento usualmente se expresa en tablas de volumen que simplifican su estimación por unidad de área o por árbol individual [4]; estas son tradicionalmente usadas para estimar el volumen de productos con características específicas.

Estudios similares sobre perfil de fuste se han desarrollado recientemente en el país, con valores muy confiables de ajuste estadístico [5], [6]. Con *Vochysia guatemalensis* se registra un primer estudio sobre su conicidad y volumen total a partir del dap para plantaciones mixtas [7]. Sin embargo, en el trabajo no se tomó en consideración la variación en la altura comercial, ni la posibilidad de diferenciar la estimación del volumen para distintos productos

Los modelos de perfil de fuste son una herramienta comúnmente utilizada en el cálculo de volumen, debido a que facilitan la obtención de información diamétrica a lo largo del fuste, a partir de variables como el diámetro normal (dap) y la altura total [2]. Este tipo de modelos permiten la estimación de un diámetro a cualquiera altura deseada o

también, la altura del fuste a cualquier diámetro deseado. Con esta información es posible generar, por ejemplo, escenarios de volumen comercial con un diámetro mínimo diferente, o también, el volumen comercial existente para una altura de fuste conocida. [8].

La estimación de la altura total es relevante en este tipo de estudios, dado que los modelos de conicidad ordinariamente se basan en ambos, el dap y la altura total del árbol. Su utilidad se extiende a estudios de crecimiento, fijación de carbono y cuantificación de biomasa en general [8].

Dadas las limitaciones que contemplan los modelos generales de estimación de volumen total y el posible efecto en la conicidad de *V. guatemalensis*, al crecer en plantaciones mixtas con otras especies nativas se requiere desarrollar un modelo de perfil de fuste y de estimación de altura total para su uso en estas plantaciones mixtas existentes en la zona norte del país. Esta investigación tuvo como objetivo desarrollar un nuevo modelo de perfil de fuste para *V. guatemalensis*, de utilidad para plantaciones mixtas manejadas por la empresa Puro Verde Paraíso Forestal S.A., en la zona norte del país.

Materiales y métodos

La información se obtuvo a partir de mediciones de árboles tumbados de *V. guatemalensis* en plantaciones mixtas con especies nativas del proyecto La Virgen manejado por la empresa Puro Verde Paraíso Forestal S.A. [9], ubicado en La Virgen de Sarapiquí, zona norte de Costa Rica. Para el estudio se cortaron 168 árboles con edades entre 7 y 9 años, con diámetros a la altura de pecho desde 7,8 cm hasta 39,4 cm. De esta muestra se utilizaron 151 árboles en la construcción de la regresión y 17 árboles en el proceso de validación (10%).

La cubicación de los árboles en el suelo se realizó mediante la medición del diámetro con corteza (cm) a diferentes alturas del fuste: (0,10 m; 1 m; dap o 1,3m; 1,70 m; 2 m; 3m; 4m; 5m; 6m; 7m; 8m; 9m; 10m; 11m; 12m, etc, cada 1m hasta alcanzar un diámetro mínimo de 5 cm. Finalmente, en todos los árboles se midió la altura total del árbol en m.

Cada una de las alturas fue medida con cinta métrica, mientras que con los diámetros la medición se realizó mediante la toma de dos lecturas con forcípula de forma perpendicular. Al momento de registrar cada uno de los diámetros se tomó en cuenta la opción de moverse +/- 30 cm como máximo, para evitar un valor sesgado debido a la presencia de ramas o malformaciones del fuste.

Los datos fueron digitalizados en una hoja de Excel y se revisaron de forma minuciosa para eliminar información inconsistente, datos faltantes, errores de digitado, entre otros.

1. Ajuste del modelo de conicidad

En la base de datos creada en EXCEL se agregaron dos columnas adicionales donde se incorporó: 1) el cociente entre d_i y d_{ap} (d_i/d_{ap}), 2) el cociente entre h_i y h_t (h_i/h_t). Posteriormente, se construyó un gráfico de la variable independiente (d_i/d_{ap}) contra la variable dependiente (h_i/h_t), con el objeto de detectar la presencia de datos sesgados, así como poder verificar que la variable independiente (d_i/d_{ap}), tuviese una buena relación con respecto a la variable dependiente (h_i/h_t). La elaboración de la función de

conicidad se realizó a través del ajuste por regresión del modelo de Kozak (ecuación 1) [8].

Modelo de Kozak: $y = a + b * x + c * x^2$

donde:

$$y = \frac{di^2}{dap^2} \quad x = \frac{hi}{ht}$$

Al modelo se le incorporó la restricción de $a+b+c=0$; esto aseguró que cuando el valor de $hi=ht$ el $di=0$, simplificando la ecuación a:

$$\frac{di^2}{dap^2} = b \left(\frac{hi}{ht} - 1 \right) + \left(\frac{hi^2}{ht^2} - 1 \right) \quad (1)$$

Debido a que el modelo se forzó a pasar por el origen, su intercepción fue igual a cero. De manera simplificada se puede derivar de la función ajustada [6] las siguientes funciones:

- a) La estimación de cualquier diámetro deseado (di) a una altura conocida (hi) (ecuación 2).
- b) La estimación de cualquier altura deseada (hi) a un diámetro conocido (di) (ecuación 3).

La ecuación simplificada para estimar el diámetro (di) a cualquier altura deseada es la siguiente:

$$di = \sqrt{dap^2 * \left[b \left(\frac{hi}{ht} - 1 \right) + c \left(\frac{hi^2}{ht^2} - 1 \right) \right]} \quad (2)$$

donde:

dap = diámetro a la altura del pecho (cm).

hi = altura a la que se desea conocer el diámetro (m).

ht = altura total del árbol (m).

b y c , constantes de regresión.

La ecuación simplificada para estimar a que altura del fuste (hi) se encuentra un diámetro deseado (di), se obtiene de la siguiente expresión:

$$\frac{di^2}{dap^2} = b \left(\frac{hi}{ht} - 1 \right) + c \left(\frac{hi^2}{ht^2} - 1 \right)$$

$$\frac{di^2}{dap^2} = \frac{b * hi}{ht} - b + \frac{c * hi^2}{ht^2} - c$$

$$0 = \frac{b * hi}{ht} + \frac{c * hi^2}{ht^2} + \left(\frac{-di^2}{dap^2} - b - c \right)$$

Esta expresión corresponde a la solución de una función general de segundo grado,

$$0 = ax^2 + b + c$$

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$hi = ht \left(\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4c \left(\frac{-di^2}{dap^2} - b - c \right)}}{2c} \right) \quad (3)$$

2. Ajuste de modelo para predicción de altura total a partir del diámetro

Para poder utilizar las ecuaciones simplificadas 2 y 3 que se describieron anteriormente, es necesario conocer el valor de la altura total [8].

Debe recordarse que el modelo ajustado de Kozak no permite estimar la altura total (ht), ya que la función se indefiniría cuando $h_i = h_t$. Con la misma base de datos utilizada se procedió a ajustar el modelo de predicción de altura total (ht), en función del diámetro a la altura del pecho (dap) (ecuación 4), con base en la opción de regresión que ofrece EXCEL.

$$ht = b * dap + c * dap^2 \quad (4)$$

3. Verificación del ajuste de los modelos:

Todos los modelos ajustados fueron verificados mediante los siguientes parámetros y procedimientos:

a) Coeficiente de determinación (r^2): Indica la proporción de la variación total observada en la variable dependiente, explicada por el modelo utilizado. Se calculó de la siguiente manera:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum(Y_{obs} - Y_{med})^2}$$

Donde:

Y_{obs} = corresponde a cada uno de los valores de la variable dependiente.

Y_{est} = corresponde a cada uno de los valores de la variable dependiente estimadas a través del modelo de regresión desarrollado.

Y_{med} = es la media aritmética de la variable dependiente

b) Error estándar de la media (S_{yx}): es el segundo estadístico más utilizado para comparar modelos de regresión [8]. Se calculó de la siguiente manera:

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})^2}{n - p}}$$

Donde:

n: corresponde al número de observaciones incluidas en el análisis.

p: corresponde al número de coeficientes en el modelo de regresión.

c) Análisis de residuos: Un residuo ($resd$) corresponde a la diferencia entre el valor observado de la variable dependiente (Y_{obs}) y el valor estimado por el modelo desarrollado (Y_{est}). Se calculó de la siguiente manera:

$$Resd = Y_{obs} - Y_{est}$$

4. Validación de los modelos ajustados

Todo modelo debe ser verificado con base en una muestra independiente de datos. Estos árboles fueron seleccionados de forma aleatoria en todas las clases diamétricas, de donde se procuró retirar previamente un 10% de los árboles tumbados y medidos. Los diámetros de esta base de datos oscilaron desde los 9,1 cm hasta los 39,0 cm. Los datos se organizaron de igual forma a la base de datos utilizada para el ajuste del modelo. Para la validación del modelo ajustado se empleó el análisis de los siguientes criterios.

a) Sesgo: Se calculó de la siguiente manera:

$$S\% = \frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})}{\sum(Y_{obs})} * 100$$

b) Prueba de signos de Wilcoxon: Se ordenaron los valores absolutos de los residuos de menor a mayor. A cada dato se le asignó un número consecutivo según su posición. Cuando varios residuos presentaron igual valor, se les asignó el valor promedio de sus posiciones en el ranking [8]. A cada uno de los datos se les asignó el signo (+/-) del residuo correspondiente. Posterior a la colocación de los signos, se calculó de forma independiente la suma de todos los valores positivos y negativos del ranking. Se tomó el valor absoluto más bajo entre ambas sumatorias ($\Sigma+$ o $\Sigma-$) y se utilizó como valor T para el cálculo del estadístico de prueba:

$$Z_c = \frac{T \frac{n(n+1)}{4}}{\sqrt{\left(\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}\right)}}$$

Donde:

T: Corresponde al menor valor absoluto de la suma de ranking(+/-).

n: Corresponde al número de observaciones utilizadas en la validación.

Las hipótesis revisadas fueron:

- Hipótesis nula (H₀): la suma de los valores positivos del ranking es igual a la suma de valores negativos del ranking.
- Hipótesis alternativa: la suma de valores positivos del ranking es diferente a la suma de valores negativos del ranking.

Después de obtenido el valor de Z calculado (Z_c), se comparó con el valor de Z tabular (Z_t) de la tabla de distribución normal con una significancia de $\alpha=0,05$.

Resultados

En el cuadro 1 se muestra la distribución diamétrica de los 168 árboles utilizados (151 en la regresión y 17 en la validación) para el ajuste y validación de la ecuación de conicidad y la ecuación de estimación de altura total. Los árboles fueron organizados en 8 clases diamétricas con intervalos de 4 cm, con valores que iban desde los 7,8 cm hasta los 39,4 cm. La altura de los árboles osciló desde los 7,25 m hasta los 22,50 m.

Cuadro 1. Distribución por clase diamétrica (dap) de la muestra de árboles de *V. guatemalensis*, utilizados para el ajuste y validación del modelo de conicidad, en plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

Dap (cm)	Número de árboles
< 12	21
12,1-16,0	20
16,1-20,0	22
20,1-24,0	21
24,1-28,0	22
28,1-32,0	21
32,1-36,0	21
>36,1	21
Total	169

La relación entre la variable dependiente (d_i/dap) y la variable independiente h_i/ht se muestra en la figura 1.

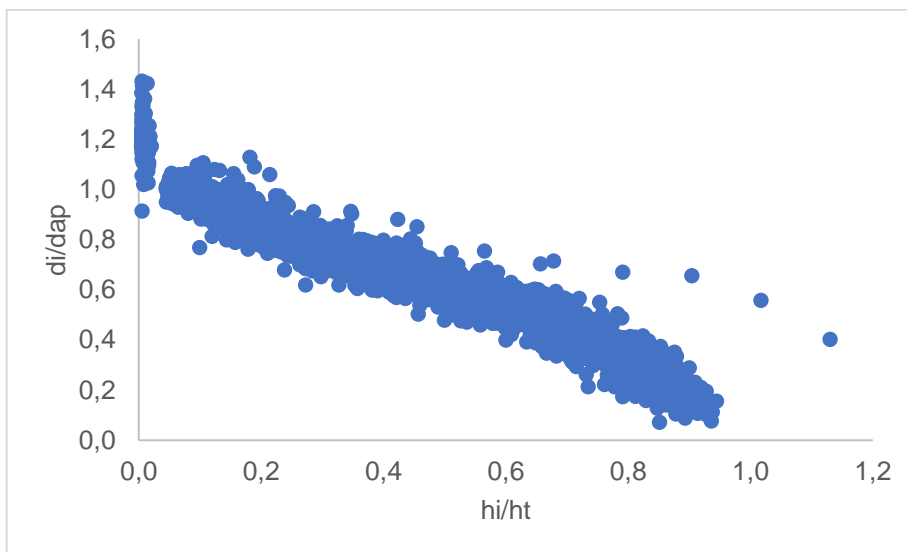


Figura 1. Relación entre d_i/d_{ap} y h_i/h_t en árboles de *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

El ajuste del modelo de Kozak mediante el análisis de regresión fue el siguiente:

$$y = -2,1833(x - 1) + 0,9808(x^2 - 1)$$

Donde:

$$y = \frac{d_i^2}{d_{ap}^2} \quad x = \frac{h_i}{h_t}$$

El ajuste del modelo registró un coeficiente de determinación (r^2) de 0,972 y un error estándar (Syx) de 0,1138. El análisis de residuos del modelo se observa en la figura 2. La sección 2a muestra la distribución de residuos con respecto a la variable independiente lineal $(h_i/h_t)-1$, mientras que la sección 2b muestra la distribución de residuos con respecto a la variable independiente en segundo grado $(h_i^2/h_t^2)-1$.

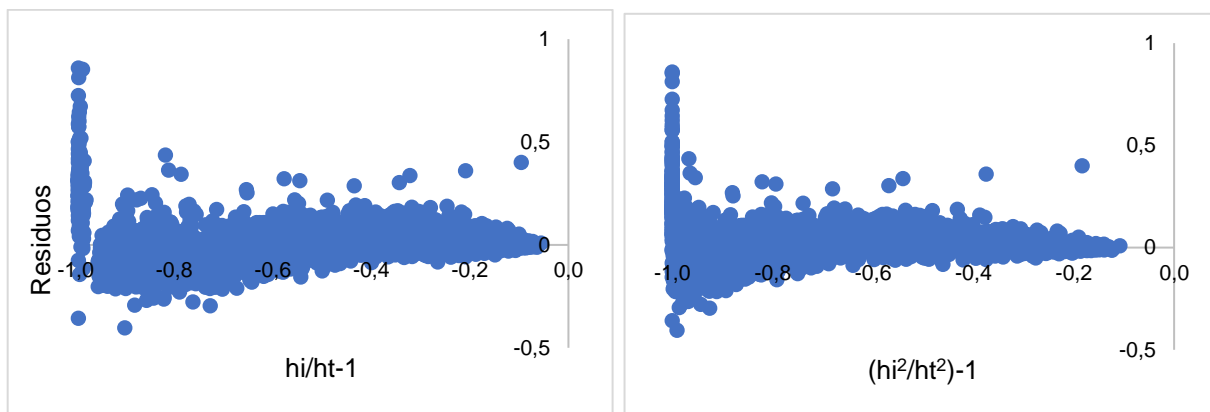


Figura 2. Distribución de residuos con respecto a la variable lineal independiente $(h_i/h_t)-1$ (izquierda). Distribución de residuos con respecto a la variable independiente $(h_i^2/h_t^2)-1$ (derecha), para el ajuste del modelo de Kozak para *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

El porcentaje de sesgo (S%) general de todo el modelo registró un valor de 2,57%. El Z calculado (Z_c) obtuvo un valor de 0,47 para una significancia del 0,05%, mientras que el valor de Z tabular (Z_t) correspondiente para el respectivo Z calculado (Z_c) fue de 0,64.

Del modelo ajustado de perfil de fuste se derivó un sistema de ecuaciones que permiten calcular un diámetro a cualquier altura deseada y también, una altura hasta cualquier diámetro deseado (cuadro 2).

Cuadro 2. Sistema de ecuaciones derivadas del ajuste del modelo de Kozak para *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

Modelo	Descripción	Función
1	Determinación de un diámetro (d_i) a cualquier altura deseada.	$d_i = \sqrt{dap^2 * \left[-2,1833 \left(\frac{h_i}{h_t} - 1 \right) + 0,9808 \left(\frac{h_i^2}{h_t^2} - 1 \right) \right]}$
2	Determinación de una altura (h_i) a cualquier diámetro deseado.	$h_i = h_t \left(\frac{2,1833 \pm \sqrt{4,7668 - 3,9232 \left(-\frac{d_i^2}{dap^2} + 1,2025 \right)}}{1,9616} \right)$

El modelo para estimar el diámetro (di) a una altura deseada (cuadro 2, modelo 1) registró un valor de sesgo de 0,46%. Mientras que para el modelo de estimación de una altura (hi) a cualquier diámetro deseado (cuadro 2, modelo 2) registró un valor de sesgo de 1,74%.

La relación entre la variable dependiente (dap) y la variable independiente (ht) se muestra en la figura 3.

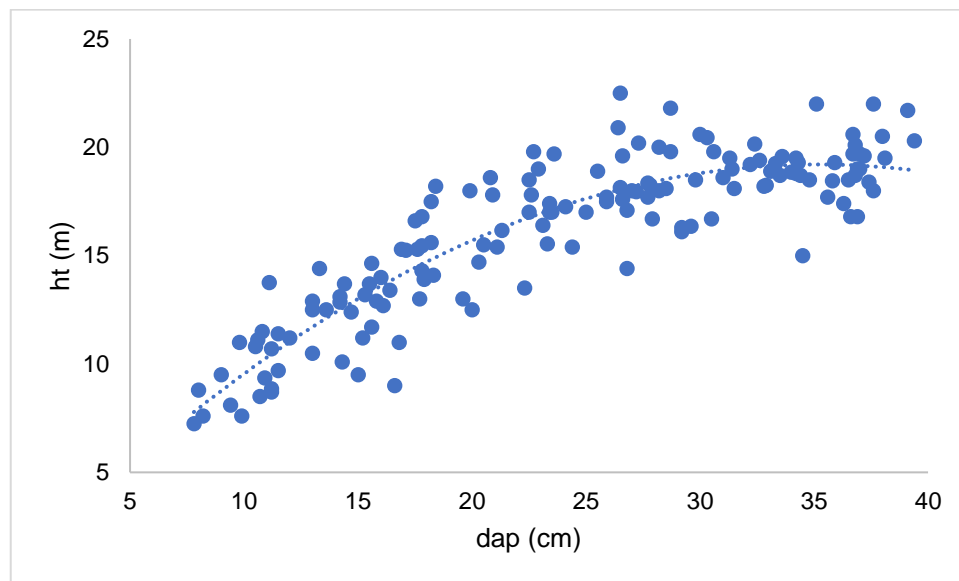


Figura 3. Relación entre dap y ht en árboles de *V. guatemalensis*, de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

El modelo ajustado para estimar la altura total a partir del dap fue el siguiente:

$$y = 1,1033 * x - 0,0159 * x^2$$

Donde:

$$y = ht \quad x = dap$$

Los valores del coeficiente de regresión (r^2) fueron de 0,995; mientras que el error estándar (Syx) fue de 1,620. El análisis de residuos respectivo se muestra en la figura 4. La sección 4a muestra la distribución de residuos con respecto a la variable

independiente dap , mientras que la sección 4b, muestra la distribución de residuos con respecto a la variable independiente dap^2 .

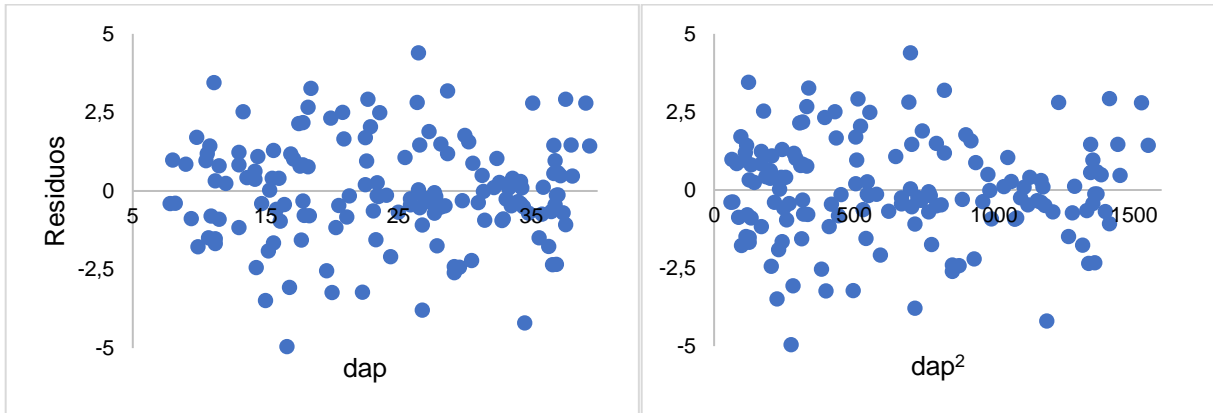


Figura 4. Distribución de residuos con respecto a la variable independiente dap (izquierda) y con respecto a la variable independiente dap^2 (derecha), para el modelo de estimación de altura total de *V. guatemalensis* en plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

Para la validación del modelo el porcentaje de sesgo ($S\%$) registró un valor de 1,93%. El Z calculado (Z_c) mostró un valor de 0,45 para una significancia del 0,05%, mientras que el valor de Z tabular (Z_t) correspondiente fue de 0,65.

Discusión

Las plantaciones mixtas donde se encuentra la especie se localizan en su zona de distribución natural y presentan una adaptación y crecimiento apropiado según se recomienda [10].

Los árboles utilizados en el ajuste de ambos modelos eran de edades entre los 7 y 9 años, que puede considerarse como representativos de plantaciones avanzadas de esta especie, cuyo ciclo de producción se estima en 12 años. Se puede observar en el cuadro 1 que hay una distribución homogénea de los individuos en las todas las clases diamétricas, la muestra total cubre un rango de diámetro que va de los 7,8 cm a los 39,4 cm. que puede considerarse como representativa de los diámetros que se pueden obtener de una plantación comercial de la especie. Los árboles de *V. guatemalensis* tumbados y cubicados provienen de plantaciones mixtas con especies nativas, establecidas con diseños donde cada una de las especies que interactúan cumplen un papel ecológico de acuerdo con su crecimiento. En estas plantaciones la especie en estudio es la única de rápido crecimiento [9]. Esto permite asegurar que para la muestra utilizada las condiciones para el crecimiento de la especie en estudio no se evidencia afectación por el crecimiento de las otras especies que conformaron la mezcla.

La figura 1 muestra una buena relación entre la variable dependiente (di/dap) y la variable independiente (hi/ht), que establece la existencia de una buena relación entre ambas variables, donde se puede estimar el diámetro con precisión ante el efecto de un cambio en una unidad de altura [2]. En la figura 1 se observa una tendencia en la distribución de los datos, que permiten que la variación de un diámetro de interés (di) pueda ser relacionad a una altura (hi). De donde se puede establecer que cuando la relación $di/dap = 1$, $hi = 1,30m$.

Los valores de los parámetros r^2 y el error estándar utilizados para seleccionar el mejor modelo, fueron sumamente altos y con baja variabilidad. Otros criterios utilizados fueron la facilidad de medición de las variables de entrada y la facilidad de aplicación

para el usuario. Por estas razones se decidió ajustar únicamente el modelo de Kozak. No obstante, en estudios similares realizados en el país para melina y teca [5], [6], se observó como este modelo fue el mejor en cuanto a facilidad y operatividad, además de sus bondades de ajuste.

Las figuras 2a y 2b muestran la distribución de residuos con respecto a las variables independientes del modelo. Para ambos casos se muestra un mismo patrón de distribución, donde en la parte inicial se da una ligera dispersión de valores positivos, que luego disminuyen y se distribuyen de forma homogénea a lo largo del eje horizontal. En su mayoría, la desviación de los residuos a lo largo de su eje vertical se observa en menos de un 0,5 de la unidad de medición de la dispersión.

El resultado de los estadísticos en el proceso de validación para el modelo ajustado mostró que el porcentaje de sesgo fue de 2,57%. Este valor positivo puede interpretarse como que el modelo tiende ligeramente a subestimar los valores. Podría también deducirse, que el modelo de conicidad es ligeramente conservador en sus estimados.

La prueba de signos de Wilcoxon determinó que el valor de Z calculado (Z_c) fue menor que el valor del Z tabular (Z_t) establecido con una significancia del 0,05%. Esta diferencia fue debido a que en la obtención del valor de Z_c , el valor absoluto de la suma del ranking negativo fue menor que la suma de los valores absolutos del ranking positivo. De esta forma se acepta la hipótesis nula establecida, que implica como resultado que el modelo no se encuentra sesgado.

El modelo de Kozak permite acceder a diversas funciones, como la que permite estimar cualquier diámetro a una altura deseada o también, estimar cualquier altura a un diámetro de interés. La utilidad de estas funciones puede verse reflejada en propósitos diversos, por ejemplo, conocer el volumen comercial que se puede obtener para cualquier diámetro mínimo de acuerdo con el producto deseado. Para *V. guatemalensis*, el mercado de madera en el país asigna la utilización de diámetro menores basado en el mercado de madera para la industria de tarimas (trozas cortas

de 1,2m de largo), o también la utilización de diámetros mayores para industria de productos como reglas o tablas para formaleta (trozas largas de 2,5m de largo). El sesgo para la función que permite estimar diámetros a diferentes alturas (cuadro 2, modelo 1) fue sumamente bajo, con una leve tendencia a subestimar el verdadero valor en un 0,46%. Lo cual afirma la exactitud y confiabilidad del modelo. Mientras que el sesgo para la función que permite estimar la altura a un determinado diámetro (cuadro 2, modelo 2) fue de tan solo un 1,74%. Esto puede interpretarse como que el modelo tiene una leve tendencia a subestimar los valores con respecto al valor real. No obstante, para ambas funciones que se derivan del modelo de Kozak, puede concluirse que los valores de sesgo son muy bajos y ratifican su confiabilidad y uso [11]. La utilización de una amplia toma de mediciones a lo largo del fuste en los árboles muestreados, así como una muestra equilibrada con árboles en todas las categorías diamétricas, resultó en una mejor estimación de la conicidad de la especie. La base de datos puede considerarse que fue sumamente robusta, lo que permitió el buen ajuste de un modelo de conicidad altamente confiable para la especie en esta región.

En la figura 3 se observa una buena relación entre la variable dependiente dap y la variable independiente altura total (ht). Que sugiere un patrón de leve tendencia de disminución de la variable altura, conforme incrementa la variable diámetro. Esta tendencia es conocida y biológicamente esperada para una gran mayoría de especies forestales, que suelen registrar una tasa de crecimiento sumamente alta en sus primeros cinco años de vida en ambas variables, en una relación cercana a 1:1. Que poco a poco, la tasa de crecimiento en altura empieza a disminuir mientras que la tasa de incremento del dap continúa a un mejor ritmo por un tiempo mucho mayor [12].

Los estadísticos para el modelo de estimación de altura total (ht) a partir del dap, exhibieron un buen ajuste, con valores altos, que permiten confirmar su robustez, exactitud y confiabilidad del modelo.

Una de las grandes ventajas de este modelo para estimar la altura total basado solamente en el dap, es su gran facilidad y confiabilidad de uso. Es bien conocido que, en el inventario forestal, la altura total del árbol se estima y no se mide, a diferencia

del dap que por lo general siempre es posible medirlo. Los instrumentos de estimación de la altura tienen en su mayoría un sesgo natural, que puede significar un error de desviación de hasta +/- 2 m [12]. En muchas ocasiones, en plantaciones muy densas no es posible tan siquiera poder ver la altura total del árbol. Si se añade el factor costo de inventario, se requiere de mucho mayor cantidad de tiempo para obtener un valor de altura. Por lo tanto, de ser posible obtener un modelo simple de estimación de la altura total a partir de una única variable como el dap, sin duda significará un muy buen aporte para el procedimiento regular de inventario y cálculo de volumen de esta especie.

Las secciones 4a y 4b de la figura 4, muestran una buena distribución de residuos con respecto a las variables independientes del modelo de estimación de altura total (ht). En ambos casos se presentó el mismo patrón de distribución homogénea a lo largo del eje horizontal. En su totalidad, la desviación de los residuos a lo largo del eje vertical registró valores de menos de 0,5 en la unidad de dispersión.

El resultado de la validación de este modelo obtuvo un porcentaje de sesgo de 1,93%. El valor positivo sugiere que el modelo tiende a subestimar ligeramente los valores, con lo que puede interpretarse que es relativamente conservador y confiable para ser utilizado [11].

La prueba de signos de Wilcoxon determinó que el valor de Z calculado (Z_c) fue menor que el valor del Z tabular (Z_t) establecido, con una significancia del 0.05%. Esto determina una aceptación de la hipótesis nula, con lo que se concluye que el modelo no se encuentra sesgado y es de alta confiabilidad.

Conclusiones

El modelo de Kozak ajustado para árboles de *V. guatemalensis* procedentes de plantaciones mixtas en la zona norte del país, es de fácil utilización, funcional y seguro para individuos con dap menor a 39 cm. El modelo de ahusamiento ajustado por regresión y validado fue basado en la función de Kozak cuya expresión es la siguiente:

$y = -2,1833(x - 1) + 0,9808(x^2 - 1)$, con un valor de $r^2 = 0,9724$ y un sesgo de 2,57%.

Las ecuaciones que se derivan del modelo de Kozak son las siguientes:

$$di = \sqrt{dap^2 * \left[-2,1833 \left(\frac{hi}{ht} - 1 \right) + 0,9808 \left(\frac{hi^2}{ht^2} - 1 \right) \right]}$$
$$hi = ht \left(\frac{2,1833 \pm \sqrt{4,7668 - 3,9232 \left(-\frac{di^2}{dap^2} + 1,2025 \right)}}{1,9616} \right)$$

La ecuación ajustada por regresión para estimación de altura total es la siguiente:

$ht = 1,1033dap - 0,0159 * dap^2$, con un $r^2 = 0,9952$ y un sesgo de 1,93%.

Recomendaciones

Se recomienda aumentar la muestra en todas las clases diamétricas y a futuro incluir individuos, preferiblemente con dap superior a 40 cm.

CAPÍTULO 2. ESTIMACIÓN DE VOLUMEN COMERCIAL Y TOTAL EN PLANTACIONES MIXTAS DE CEBO (*Vochysia guatemalensis*), SARAPIQUÍ, COSTA RICA.

Resumen

Las plantaciones forestales son cada vez más importantes para satisfacer la demanda de madera, ya que disminuyen la presión existente sobre la explotación de los bosques. La implementación de modelos para la estimación de volumen son herramientas prácticas que ayudan en la cuantificación de un determinado producto, convirtiéndose de gran ayuda para la toma de decisiones silviculturales en función al rendimiento y productividad de una plantación. Para este estudio se utilizó la información proveniente de 168 árboles volteados y medidos a diversas alturas, con edad entre 7 y 9 años, y diámetros a la altura de pecho desde 7,8 cm hasta 39,4 cm. Los datos fueron obtenidos de plantaciones mixtas establecidas en Sarapiquí, Heredia, Costa Rica. Los modelos ajustados y seleccionados presentaron un alto coeficiente de determinación (r^2) y valores bajos de error estándar, así como una distribución adecuada de los residuos. La validación de los modelos se realizó con una muestra independiente del 10% de los árboles de todas las clases diamétricas, que registró valores menores al 2%. Con la prueba de signos de Wilcoxon se confirmó que ninguno de los modelos está sesgado. Las funciones de volumen desarrolladas son confiables, fáciles de usar y pueden ser utilizados en árboles con dap menores a 40 cm. La función determinada para la estimación del volumen combinado (construcción + tarima) fue: $V_{c+t} = -0,00621 \text{ dap} + 0,00077 \text{ dap}^2$; para la estimación del volumen para construcción fue: $V_c = -0,022327 \text{ dap} + 0,001348 \text{ dap}^2 - 0,000006 \text{ dap}^3$; para la estimación del volumen para tarimas fue: $V_t = -0,00546 \text{ dap} + 0,00072 \text{ dap}^2$. Finalmente, la función para la estimación del volumen total fue: $V_T = -0,01065 \text{ dap} + 0,00127 \text{ dap}^2 - 0,00001 \text{ *dap}^3$.

Palabras clave: Especies nativas, mezcla de especies, volumen, biomasa.

Introducción

En la actualidad los aprovechamientos de madera provenientes de plantaciones forestales cubren un 77,5% de la producción nacional. No obstante, los principales usos de la madera se enfocan en la producción de tarimas y la construcción [1]. Lo que implica que la cuantificación del volumen es un elemento clave en procesos de optimización y rendimiento del manejo de la plantación.

Las plantaciones forestales además de proporcionar madera también ofrecen servicios ambientales como la protección del suelo, control de erosión y captura de dióxido de carbono [13]. De manera adicional la utilización de especies nativas en plantaciones puede contribuir significativamente con la regeneración natural y a la conservación, además proporcionar diversas funciones ecosistémicas.

El cebo (*Vochysia guatemalensis* Donn. Sm.) se distribuye desde el sur de México hasta Panamá; es una especie de rápido crecimiento y valiosa para la restauración de sitios degradados, se adapta muy bien a suelos arcillosos, ácidos y con alta concentración de hierro y aluminio [14] [15].

En el marco de una empresa forestal, el momento óptimo para la realización de una actividad de aprovechamiento está influenciada por condiciones económicas. Donde el cálculo de volumen refleja la rentabilidad de la actividad y juega un papel crucial en la toma de decisiones [3].

El rendimiento de una plantación forestal está conformado por la acumulación de biomasa total por unidad de área (toneladas/hectárea), constituida por la suma de la biomasa de cada uno de los árboles [8]. El desarrollo y utilización de modelos matemáticos se convierten en una herramienta esencial para la determinación precisa del volumen de acuerdo con los productos de interés.

En el desarrollo de funciones de estimación del volumen comercial, por lo general se utiliza el dap y algún valor de altura comercial o total, con el fin de que el modelo logre una mayor explicación de la variación. Sin embargo, los modelos de este tipo tienen como limitante que los valores de estimación de la altura comercial o total que

proviene del inventario suelen traer un error significativo que puede afectar seriamente la estimación final del volumen. Otra de las limitantes de la estimación de la altura comercial, es el tiempo/costo que conlleva durante el trabajo de campo, en particular en rodales con alta densidad donde no es fácil visualizar al árbol completo. Por estas razones, se ha propuesto realizar esfuerzos en el desarrollo de modelos de estimación del volumen comercial, basados únicamente en el dap del árbol [5], [6]. Su mayor limitación, como es de esperarse, es que el dap no sea suficiente para lograr una estimación adecuada del volumen comercial del árbol. Situación que se acentúa cuando hay una alta variación en la calidad del fuste o también, cuando hay presencia significativa de árboles con pobre dominancia apical.

En el cálculo de volumen comercial de *V. guatemalensis* se han reportado funciones basadas en d_{ap} y h_t como variables de entrada, para la zona norte del país [16]. Sin embargo, la base de datos fue limitada a diámetros de 10 a 29 cm y edades entre 4 y 9 años.

Para la zona de Sarapiquí Petit & Montagnini [17] reportan una función en la que se utiliza la edad para la estimación de volumen total por hectárea, con un valor de r^2 de 0,73. Este tipo de funciones son de utilidad relativa, ya que la variable edad no permite la explicación completa de la variación en crecimiento volumétrico de los árboles

El objetivo de este trabajo fue ajustar y validar funciones de volumen total con corteza y volumen comercial con corteza para diferentes productos (construcción, tarimas y la combinación de ambos), para árboles de cebo (*Vochysia guatemalensis*) procedentes de plantaciones mixtas en la zona norte de Costa Rica.

Materiales y métodos

La información se obtuvo a partir de mediciones de árboles tumbados de la especie *V. guatemalensis* en las plantaciones mixtas con especies nativas manejadas por la empresa Puro Verde Paraíso Forestal S.A. [9], Sarapiquí, Heredia. Para el estudio se logró tumbar y medir en el suelo 168 árboles con una edad entre 7 y 9 años, y con dap desde 7,8 cm hasta 39,4 cm. Los árboles fueron elegidos por su fuste con dominancia apical y se aseguró que la muestra incluyera 21 individuos por clase diamétrica, con un ancho de clase de 4 cm.

A todos los árboles tumbados se les midió en el suelo el diámetro con corteza (cm) en la base (aproximadamente a 0,10 m), a 1 m, al dap (1,30 m), a los 2 m, 3 m y sucesivamente cada metro hasta alcanzar la altura donde el diámetro se redujo a 5 cm (Cuadro 3). Todas las mediciones de cada diámetro se realizaron con la ayuda de una forcípula en dos direcciones perpendiculares. Se midió también con una cinta métrica la altura total del árbol (m).

Cuadro 3. Estructura de base de datos para la cubicación de árboles de *V. guatemalensis* para el ajuste de modelos de volumen de plantaciones mixtas en Costa Rica.

N° de árbol	ht	d _{base}	dap	d _{2,5m}	d _{3,75m}	d _{5m}	d _{6,25m}	d _{7,5m}	d _{8,75m}	d _{10m}	d _{11,25m}	d _{12,50m}	d _{13,75m}	d _{15m}	d _{16,25m}	d _{17,50m}	d _{18,75m}	d _{20m}
-------------	----	-------------------	-----	-------------------	--------------------	-----------------	--------------------	-------------------	--------------------	------------------	---------------------	---------------------	---------------------	------------------	---------------------	---------------------	---------------------	------------------

El punto exacto de medición de los diámetros a lo largo del fuste pudo sufrir una variación leve de +/- 30 cm como máximo, debido a presencia de ramas y malformaciones del fuste o provocados por alguna poda.

Los datos fueron revisados de forma minuciosa para eliminar información inconsistente que pudiera afectar el ajuste del modelo. Por ejemplo, datos con errores de digitalización, árboles con mediciones incompletas, diámetros de magnitud superior a mayor altura en el fuste, entre otros.

Previo al ajuste de los modelos, se realizó una normalización de los datos con el propósito de corregir todo tipo de inconsistencias mencionadas. En los casos donde el diámetro a una mayor altura en el fuste fuera superior, se anuló el valor y se extrapoló el dato con base en los diámetros anterior y superior inmediatos.

La base de datos se organizó pensando en el ajuste de modelos para estimación de diferentes tipos de volumen:

- a) Volumen combinado (construcción + tarima): consiste en la suma de volumen redondo estimado para uso en construcción (trozas de 2,5 m de largo y con un diámetro mínimo de 20 cm) y, el volumen destinado a trozas para producción de tarimas (trozas de 1,2 m de largo, con diámetros entre 12 cm y 20 cm con corteza).
- b) Volumen para Construcción: consiste en el volumen redondo destinado para su uso en construcción (2,5 m de largo, a partir de un diámetro mínimo de 20 cm).
- c) Volumen para tarimas: consiste en el volumen redondo destinado a la producción de tarimas (piezas de 1,2 m de largo y desde un diámetro mínimo de 12 cm, hasta un diámetro máximo de 20 cm).
- d) Volumen total: la suma del volumen para a) uso en construcción (trozas de 2,5 m de largo, a partir de un diámetro mínimo de 20 cm sobre corteza), b) el volumen para tarimas (trozas de 1,2 m de largo, con diámetro máximo de 20 cm y mínimo de 12 cm) y c) el volumen de residuos (todo el volumen con menos de 12 cm de diámetro con corteza).

La muestra de árboles volteados se distribuyó de acuerdo con el tipo de volumen calculado, como se muestra en el cuadro 4.

Cuadro 4. Distribución de la muestra de árboles de *V. guatemalensis* utilizados en el ajuste y validación de modelos de volumen comercial, para plantaciones mixtas en la zona norte, Costa Rica.

Tipo de volumen	Número de árboles		
	Modelo	Validación	Total
Volumen combinado	133	15	148
Volumen construcción	86	10	96
Volumen tarima	133	15	148
Volumen total	151	17	168

Con el propósito de poder calcular diferentes escenarios de cubicación en cada árbol, se construyó una base datos en la que se registró el diámetro a diferentes alturas establecidas: en la base, a 1,30 m, a 5 m, a 10 m, a 15 m y a 20 m. y se extrapolaron los diámetros intermedios en múltiplos de 1,25m (posible uso en tarima): a 2,50 m, 3,75 m, 6,25 m, 7,50 m, 8,75 m, 11,25 m, 12,50 m, 13,75 m, 16,25 m, 17,5 m, 18,75 m. Toda la información fue ordenada y registrada en una hoja de EXCEL siguiendo la estructura de mediciones como se muestra en el cuadro 3.

1. Cálculo de Volumen

El cálculo de volumen se realizó mediante el método Smalian en cada una de las trozas dentro de cada árbol. La suma del volumen independiente de cada troza correspondió al volumen total comercial de cada árbol. En la figura 5 se muestra los escenarios de estimación del volumen comercial por árbol: a) volumen combinado; b) volumen para construcción; c) volumen para tarima y d) volumen total.

Para el cálculo del volumen (m^3) se tomó como referencia el esquema mostrado en la figura 5:

- a) Volumen combinado: Se cubicó troza por troza, desde la parte baja del árbol hacia arriba a lo largo del fuste, con base en el procedimiento de Smalian. El largo de cada troza (2,5 m para construcción o 1,2 m para tarima) se definió con

base en el diámetro en la cara menor. Si esta medición fue igual o superior a 20 cm sobre corteza, la troza se clasificó para construcción con un largo de 2,5m. De lo contrario, esta troza y todas las siguientes se clasificaron para tarima, con un largo definido en múltiplos de 1,25m. El diámetro mínimo para tarima se estableció en 12 cm sobre corteza.

- b) Volumen para uso en construcción: En este modelo de volumen se cubicó troza por troza, desde la base hacia arriba, en largos de 2,5m, hasta que en alguna de ellas su diámetro menor fuera inferior a los 20 cm sobre corteza. El volumen desde este punto hacia arriba en el fuste no fue incluido en el volumen comercial del árbol.
- c) Volumen tarimas: En este modelo se cubicó troza por troza, desde la base hacia arriba en el fuste, en largos de 1,25m. En la primera troza se tomó como diámetro mayor el dato en la base del árbol, mientras que para el diámetro menor se utilizó el valor del dap (1,3 m). Se continuó cubriendo troza por troza hasta que en alguna de ellas su diámetro menor fuera inferior a los 12 cm sobre corteza. El volumen desde este punto hacia arriba en el fuste no fue incluido en el volumen comercial del árbol.
- d) Volumen total: para este cálculo se tomó el valor del volumen comercial combinado y se le sumó un estimado de volumen del segmento apical del árbol. Para estimar este volumen apical se tomó como diámetro mayor el último diámetro utilizado en el cálculo de volumen combinado y, para el diámetro menor se utilizó un valor de 0,1 cm. La longitud de este segmento se determinó del valor conocido de la altura total del árbol y, su diferencia con respecto a la altura del fuste hasta la última troza cubicada.

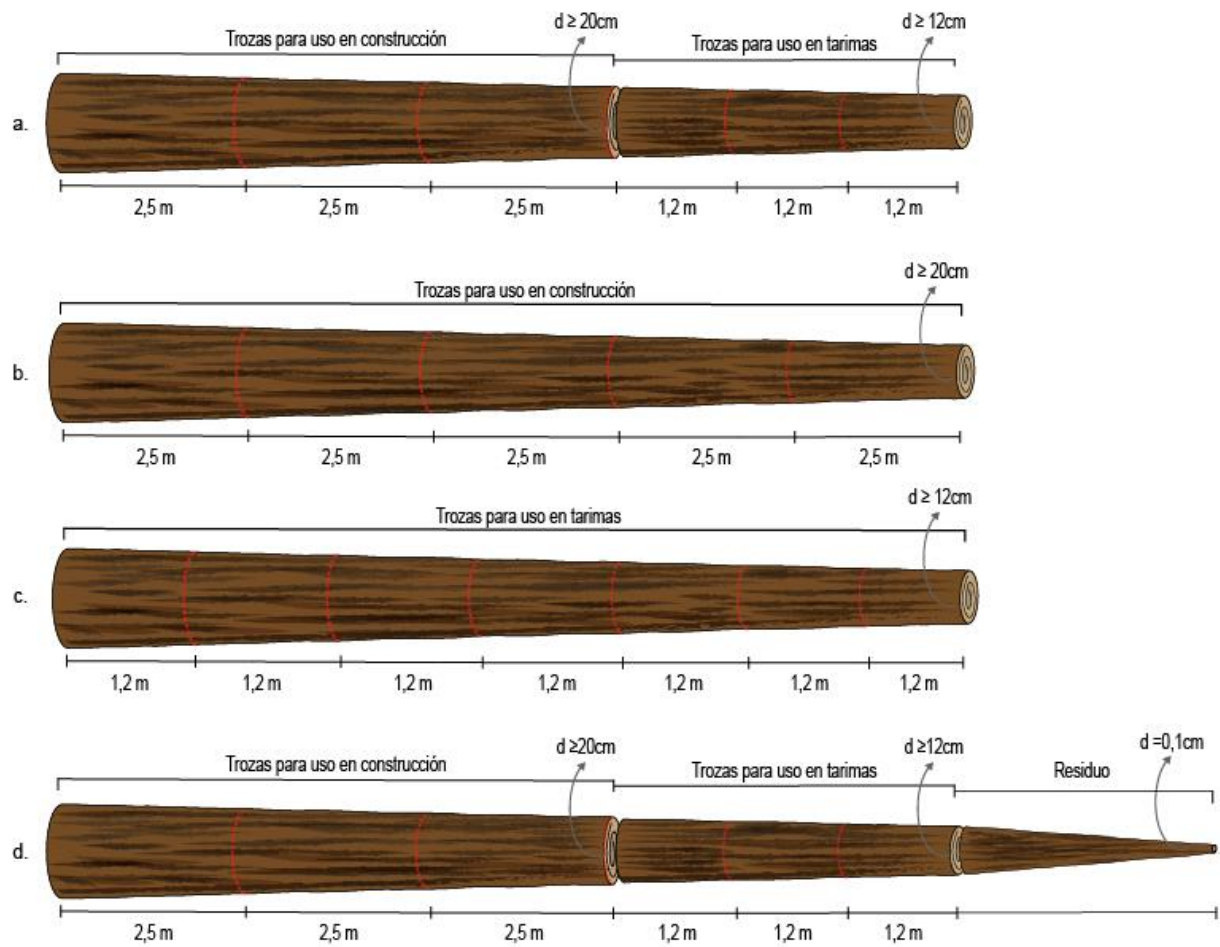


Figura 5. Esquema para cálculo de volumen para el ajuste y validación de 4 modelos de estimación de volumen: a) volumen combinado, b) volumen para construcción, c) volumen para tarima, d) volumen total.

2. Ajuste de modelos de volumen

Se revisó gráficamente la relación entre el dap y cada uno de los volúmenes estimados, con el fin de visualizar la tendencia de los datos e identificar la existencia de datos atípicos.

Se evaluó un total de 4 funciones para cada una de las estimaciones de volumen deseadas. Se seleccionaron ecuaciones lineales de una sola entrada (*dap*), de grado 2 y grado 3, con y sin intercepto. Las ecuaciones se analizaron y evaluaron mediante la opción de Regresión, en la Hoja de Cálculo de EXCEL:

a) $V = a + b(dap) + c(dap^2)$

b) $V = b(dap) + c(dap^2)$

c) $V = a + b(dap) + c(dap^2)$

d) $V = b(dap) + c(dap^2) + d(dap^3)$

Las evaluaciones fueron de forma independiente para todos los modelos propuestos.

3. Verificación del ajuste de los modelos:

Todos los modelos ajustados fueron verificados mediante los siguientes parámetros y procedimientos:

a) Coeficiente de determinación (r^2): Indica la proporción de la variación total observada en la variable dependiente, explicada por el modelo utilizado. Se calculó de la siguiente manera:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum(Y_{obs} - Y_{med})^2}$$

Donde:

Y_{obs} = corresponde a cada uno de los valores de la variable dependiente.

Y_{est} = corresponde a cada uno de los valores de la variable dependiente estimadas a través del modelo de regresión desarrollado.

Y_{med} = es la media aritmética de la variable dependiente

b) Error estándar de la media (S_{yx}): es el segundo estadístico más utilizado para comparar modelos de regresión [8]. Se calculó de la siguiente manera:

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum(Y_{obs}-Y_{est})^2}{n-p}}$$

Donde:

n: corresponde al número de observaciones incluidas en el análisis.

p: corresponde al número de coeficientes en el modelo de regresión.

c) Análisis de residuos: Un residuo ($resd$) corresponde a la diferencia entre el valor observado de la variable dependiente (Y_{obs}) y el valor estimado por el modelo desarrollado (Y_{est}). Se calculó de la siguiente manera:

$$Resd = Y_{obs} - Y_{est}$$

4. Validación de los modelos ajustados

Se utilizó una muestra independiente del 10% procedente de la base de datos original y que no se utilizó para el ajuste del modelo. Los árboles fueron seleccionados de forma aleatoria en todas las clases diamétricas, que oscilaron entre los 9,1 cm hasta los 39 cm. Los datos se organizaron de igual forma a la base de datos utilizada para el ajuste del modelo. Para la validación del modelo ajustado se empleó el análisis de los siguientes criterios.

a) Sesgo: Se calculó de la siguiente manera:

$$S\% = \frac{\sum(Y_{obs}-Y_{est})}{\sum(Y_{obs})} * 100$$

b) Prueba de signos de Wilcoxon: Se ordenaron los valores absolutos de los residuos de menor a mayor. A cada dato se le asignó un número consecutivo según su posición. Cuando varios residuos presentaron igual valor, se les asignó el valor promedio de su

posición en el ranking [8]. A cada uno de los datos se le asignó el signo (+/-) del residuo correspondiente. Posterior a la colocación de los signos, se calculó de forma independiente la suma de todos valores positivos y negativos del ranking. Se tomó el valor absoluto más bajo entre ambas sumatorias ($\Sigma+$ o $\Sigma-$) y se utilizó como el valor T para el cálculo del estadístico de prueba:

$$Zc = \frac{T^{\frac{n(n+1)}{4}}}{\sqrt{\left(\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}\right)}}$$

Donde:

T: Corresponde al menor valor absoluto de la suma de ranking(+/-).

n: Corresponde al número de observaciones utilizadas en la validación.

Las hipótesis revisadas fueron:

- Hipótesis nula (H_0): la suma de los valores positivos del ranking es igual a la suma de valores negativos del ranking.
- Hipótesis alternativa: la suma de valores positivos del ranking es diferente a la suma de valores negativos del ranking.

El valor de Z calculado (Z_c) se comparó con el valor de Z tabular (Z_t) de la tabla de distribución normal, a una significancia de $\alpha=0,05$.

Resultados

El cuadro 5 muestra la distribución diamétrica de los árboles utilizados para el ajuste y validación de las ecuaciones para estimación de volumen. Los árboles fueron organizados en clases diamétricas con intervalos de 4 cm, con valores que van desde los 7,8 cm hasta los 39,4 cm. La altura total de los árboles osciló desde los 7,25 m hasta los 22,50 m

Cuadro 5. Distribución por clase diamétrica (dap) de árboles utilizados para el ajuste y validación de modelos de volumen, para árboles de *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

Dap (cm)	Número de árboles			Volumen total
	Volumen Com. combinado	Volumen para construcción	Volumen para tarimas	
< 12	*	**	*	20
12,1-16,0	20	**	20	22
16,1-20,0	23	**	23	23
20,1-24,0	21	12	21	21
24,1-28,0	22	22	22	22
28,1-32,0	20	20	20	20
32,1-36,0	21	21	21	21
>36,1	21	21	21	21
Total	148	96	148	168

* Solo se incluyeron árboles con dap > 12 cm. ** Solo se incluyeron árboles con dap > 20 cm.

1. Modelos de volumen combinado (construcción + tarima)

En la figura 6 se muestra la relación entre la variable independiente dap y el volumen comercial combinado (construcción + tarima). Se observa que los individuos con dap cercano a los 40 cm logran acumular casi un m³ comercial.

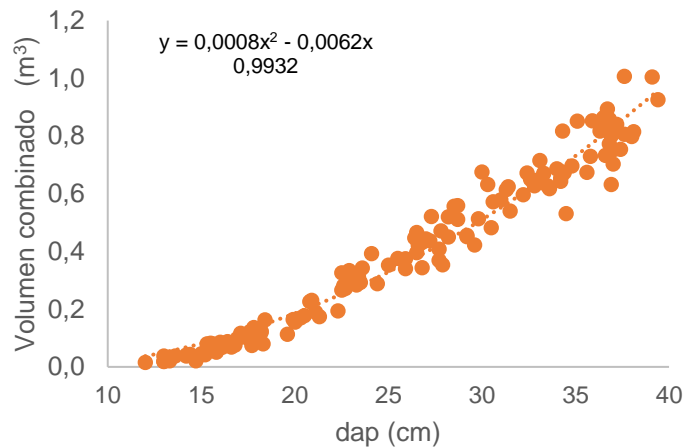


Figura 6. Relación entre diámetro a la altura del pecho (dap) y el volumen combinado (m³), en árboles de *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

En el cuadro 6 se muestran los modelos generados y sus respectivos estadísticos para el ajuste de las funciones de estimación de volumen combinado. Debido a que los modelos 2 y 4 presentaron los mejores valores estadísticos, se calculó el porcentaje de sesgo para ambos modelos. Lo que permitió elegir al modelo 2, cuya función es una ecuación de segundo grado sin intercepto.

En general, los cuatro modelos evaluados registraron valores estadísticos sumamente elevados, con una alta explicación de la variación en la variable dependiente. No se observan diferencias significativas entre ninguno de los modelos evaluados.

Cuadro 6. Funciones generadas para estimación de volumen combinado en árboles de *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

Modelo	R ²	Sy.x	CV%	S%
1. $V_{c+it} = - 25566 + 0,01457 \text{ dap} + 0,00039 \text{ dap}^2$	0,9815	0,9628	13,17	-
2. $V_{c+it} = - 0,00621 \text{ dap} + 0,00077 \text{ dap}^2$	0,9932	0,9788	14,15	1,28
3. $V_{c+it} = 0,014847 - 0,020889 \text{ dap} + 0,001837 \text{ dap}^2 - 0,000019 \text{ dap}^3$	0,9818	0,9631	13,12	-
4. $V_{c+it} = - 0,018999 \text{ dap} + 0,001762 \text{ dap}^2 - 0,000018 \text{ dap}^3$	0,9943	0,9807	13,07	1,57

En la figura 7 se muestra la distribución de residuos en comparación con cada una de las variables que componen el modelo seleccionado para estimación de volumen combinado. Puede observarse una dispersión baja con relación al eje x, con valores ligeramente por debajo de $\pm 0,2$ unidades, con una tendencia clara a aumentar proporcional al aumento en el dap. La dispersión de los residuos sigue un patrón equitativo entre los valores positivos y negativos, que se mantiene prácticamente idéntica entre las variables dap y dap^2 .

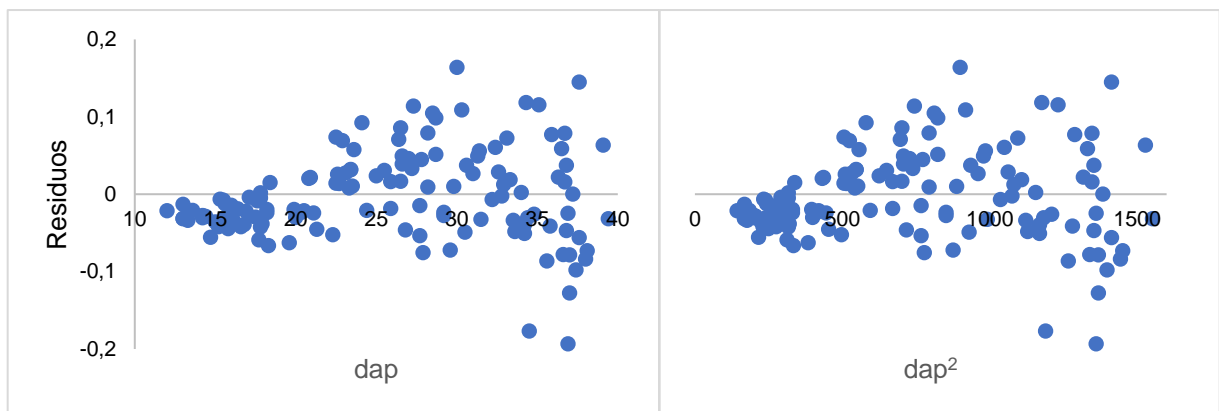


Figura 7. Distribución de residuos para cada una de las variables del modelo (segundo grado sin intercepto) para estimación del volumen combinado, en árboles de *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

Para la validación del modelo el porcentaje de sesgo (S%) registró un valor de 1,28%. El Z calculado (Zc) mostró un valor de 0,40 para una significancia del 0,05%. El valor de Z tabular (Zt) correspondiente para el respectivo Z calculado (Zc) fue de 0,69.

2. Modelos de volumen para construcción

En la figura 8 se muestra la relación entre la variable independiente dap y el volumen comercial para uso en construcción (dap > 20 cm). Puede observarse que los árboles con dap cercano a los 40 cm, logran acumular un volumen comercial cercano a 0,9 m³. Los datos muestran un comportamiento escalonado en el ámbito de volúmenes de 0,1 m³ hasta aproximadamente 0,6 m³/árbol.

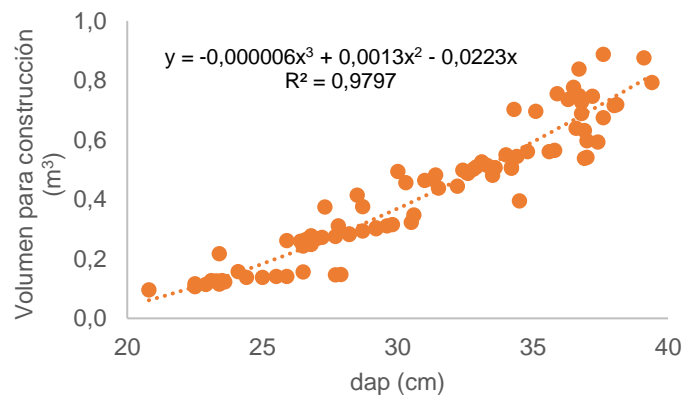


Figura 8. Relación entre diámetro a la altura del pecho (dap) y el volumen comercial para construcción (dap > 20 cm), en árboles de *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

En el cuadro 7 se muestra los modelos investigados y sus respectivos estadísticos para el ajuste de función de estimación de volumen para construcción. Debido a que los modelos 2 y 4 presentaron los mejores estadísticos, con una diferencia casi imperceptible entre sí, se calculó el porcentaje de sesgo para ambos. El modelo elegido fue una ecuación de tercer grado sin intercepto (modelo 4), el cual registró el menor valor de sesgo entre los dos modelos preseleccionados.

Cuadro 7. Funciones generadas para la estimación del volumen para construcción (dap > 20 cm) en árboles de *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

Modelo	R ²	Sy.x	CV%	S%
1. $V_c = -0,147129 - 0,006398 \text{ dap} + 0,000786 \text{ dap}^2$	0,9029	0,0691	16,33	-
2. $V_c = -0,01616 \text{ dap} + 0,00094 \text{ dap}^2$	0,9796	0,0687	16,25	4,63
3. $V_c = 0,86717 - 0,11031 \text{ dap} + 0,00428 \text{ dap}^2 - 0,00004 \text{ dap}^3$	0,9032	0,0694	16,40	-
4. $V_c = -0,022327 \text{ dap} + 0,001348 \text{ dap}^2 - 0,000006 \text{ dap}^3$	0,9797	0,0690	16,32	0,45

En la figura 9 se muestra la distribución de residuos en cada una de las variables independientes del modelo seleccionado. Puede observarse que el patrón y magnitud de la dispersión de los residuos fue muy similar para las tres variables independientes del modelo (dap, dap² y dap³). A mayor valor del dap, mayor dispersión de los datos en la variable dependiente.

Los valores de dispersión de los residuos con respecto al eje x, se mantuvieron en una magnitud ligeramente inferior a $\pm 0,2$ unidades. Los datos residuales muestran una distribución de tipo escalonado, que se asocia con la misma distribución escalonada del volumen/árbol (Figura 8).

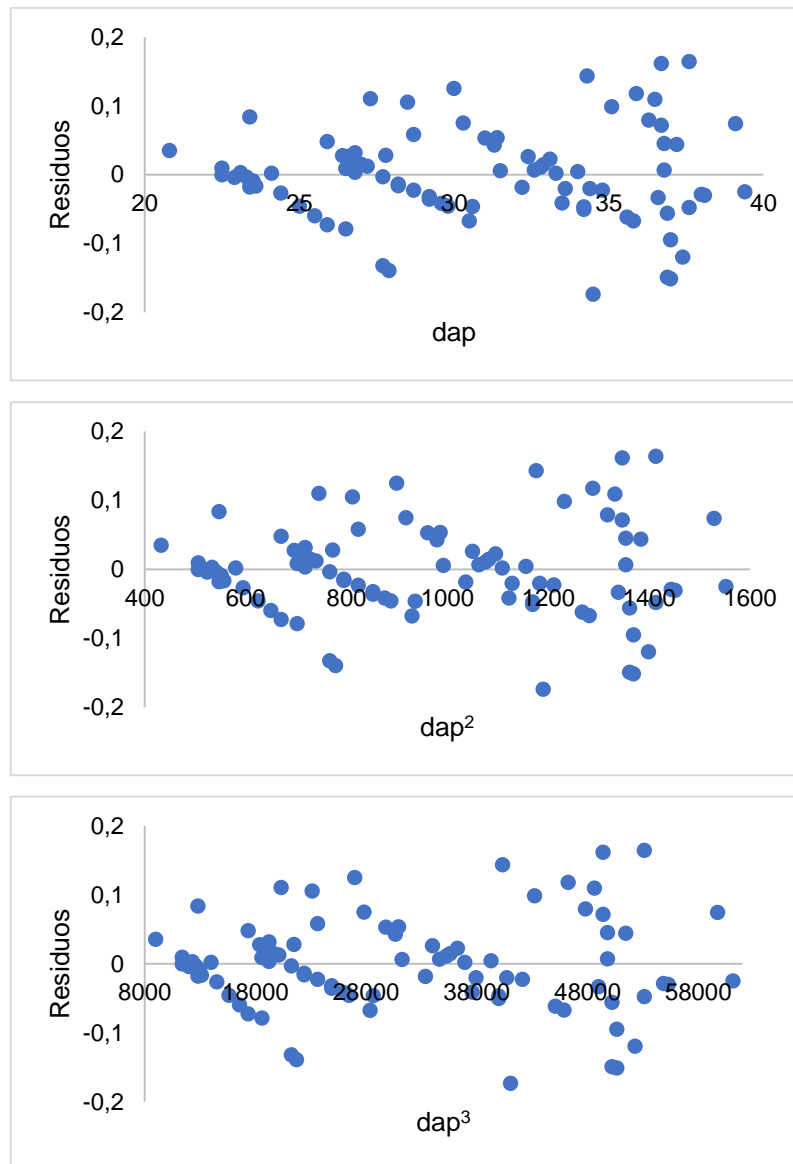


Figura 9. Distribución de residuos para las variables independientes del modelo (tercer grado sin intercepto) de estimación del volumen para uso en construcción ($dap > 20$ cm), en árboles de *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

Para la validación del modelo el porcentaje de sesgo (S%) registró un valor de 0,45%. El Z calculado (Z_c) mostró un valor de 0,56 para una significancia del 0,05%. El valor de Z tabular (Z_t) correspondiente para el respectivo Z calculado (Z_c) fue de 0,57.

3. Modelos de volumen para tarimas

En la figura 10 se muestra la relación entre la variable independiente dap y el volumen para tarimas (dap > 12 cm). Puede observarse una excelente relación con el modelo de predicción del volumen ajustado. Los árboles con dap cercano a los 40 cm, registran un volumen comercial para tarimas de aproximadamente 1 m³.

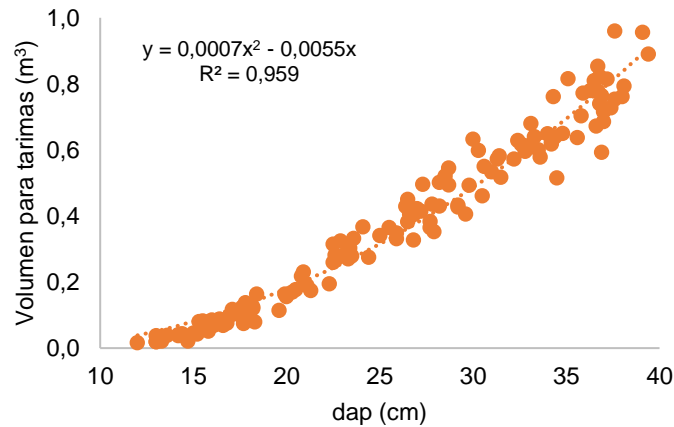


Figura 10. Relación entre el dap y el volumen para tarimas (dap > 12 cm), en árboles de *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

En el cuadro 8 se muestra los modelos generados y sus respectivos estadísticos de ajuste de la función de estimación de volumen para tarima. Debido a que los modelos 2 y 4 presentaron los mejores valores estadísticos, con diferencias muy leves entre sí, se calculó el porcentaje de sesgo para ambos. El modelo elegido fue una ecuación de segundo grado sin intercepto (modelo 2), que registró el menor valor de sesgo. Todos los modelos investigados lograron explicar una proporción muy alta de la variación en el volumen comercial.

Cuadro 8. Funciones generadas para estimación de volumen para tarimas (dap > 12 cm) en árboles de *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

Modelo	R ²	Sy.x	CV%	S%
1. $V_t = -0,23919 + 0,01398 \text{ dap} + 0,00036 \text{ dap}^2$	0,9823	0,9643	12,74	-
2. $V_t = -0,00546 \text{ dap} + 0,00072 \text{ dap}^2$	0,9936	0,9795	13,71	0,31
3. $V_t = -0,079953 - 0,006894 \text{ dap} + 0,001214 \text{ dap}^2 - 0,000011 \text{ dap}^3$	0,9824	0,9642	12,75	-
4. $V_t = -0,017072 \text{ dap} + 0,001620 \text{ dap}^2 - 0,000016 \text{ dap}^3$	0,9945	0,9813	12,71	-1,16

En la figura 11 se muestra la distribución de residuos en cada una de las variables independientes del modelo seleccionado para estimación de volumen para tarimas. Los residuos muestran una distribución muy homogénea en relación con el eje x, con valores inferiores a $\pm 0,2$ unidades. El patrón de dispersión aumenta en proporción al valor del dap, para ambas variables independientes. Los residuos se distribuyen equitativamente, de manera positiva y negativa, a lo largo del eje del dap.

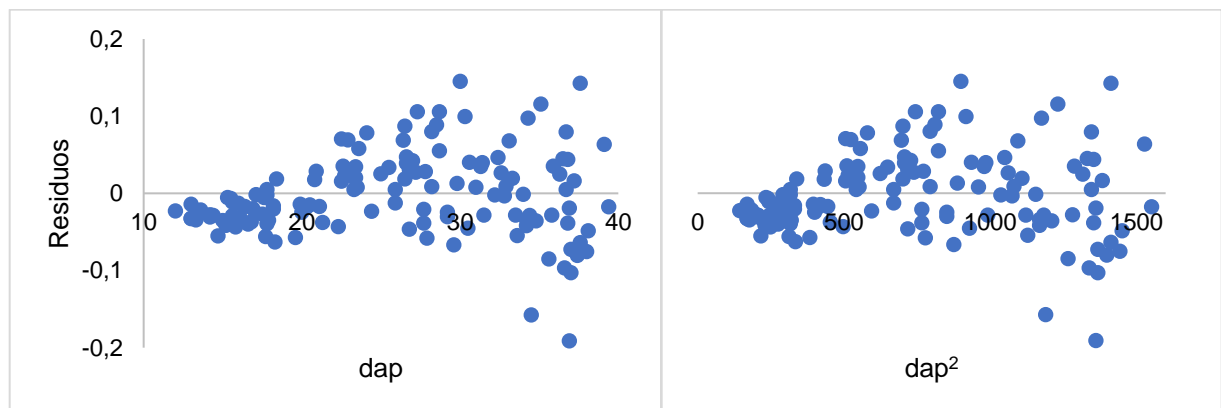


Figura 11. Distribución de residuos para cada una de las variables del modelo (segundo grado sin intercepto) para estimación de volumen para tarimas (dap > 12 cm), en árboles de *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

Para la validación del modelo el porcentaje de sesgo (S%) registró un valor de 0,31%. El Z calculado (Zc) mostró un valor de 0,06 para una significancia del 0,05%. El valor de Z tabular (Zt) correspondiente para el respectivo Z calculado (Zc) fue de 0,95.

4. Modelos de volumen total

En la figura 12 se puede observar la relación entre la variable independiente dap y el volumen total por árbol. El modelo ajustado logra un ajuste muy alto del modelo, con una amplia explicación de la variación del volumen. Los árboles que alcanzan los 40 cm a los 9 años superan levemente el m³ de volumen acumulado.

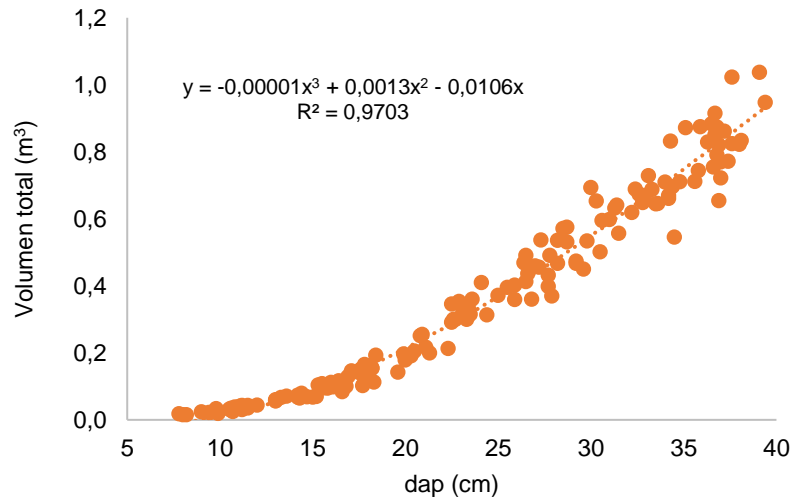


Figura 12. Relación entre diámetro a la altura del pecho (dap) y el volumen total (m³), en árboles de *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

En el cuadro 9 se muestra los modelos investigados y sus respectivos estadísticos para el ajuste de la función de estimación de volumen total. Debido a que los modelos 2 y 4 presentaron los mejores valores estadísticos y entre estos dos se registraron diferencias mínimas, se calculó el porcentaje de sesgo para ambos. El modelo elegido fue una ecuación de tercer grado sin intercepto (modelo 4), que registró el menor valor de sesgo. Puede observarse que los cuatro modelos investigados, registraron una proporción sumamente alta de explicación de la variación en el volumen total del árbol.

Cuadro 9. Funciones generadas para estimación de volumen total en árboles de *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

Modelo	R ²	Sy.x	CV%	S%
1. $V_T = -0,07802 + 0,00289 \text{ dap} + 0,00059 \text{ dap}^2$	0,9691	0,0510	13,33	-
2. $V_T = -0,0040 \text{ dap} + 0,0007 \text{ dap}^2$	0,9884	0,0519	13,57	5,04
3. $V_T = 0,14006 - 0,03097 \text{ dap} + 0,00215 \text{ dap}^2 - 0,00002X^3$	0,9710	0,0496	12,97	-
4. $V_T = -0,01065 \text{ dap} + 0,00127 \text{ dap}^2 - 0,00001 \text{ dap}^3$	0,9893	0,0500	13,07	-0,15

En la figura 13 se muestra la distribución de residuos en cada una de las variables independientes que componen el modelo seleccionado, para la estimación de volumen total. Los residuos muestran una distribución muy homogénea en relación con el eje x, con valores inferiores a $\pm 0,2$ unidades. El patrón de dispersión aumenta en proporción al valor del dap, en todas las tres variables independientes. Los residuos se distribuyen equitativamente, de manera positiva y negativa, a lo largo del eje del dap.

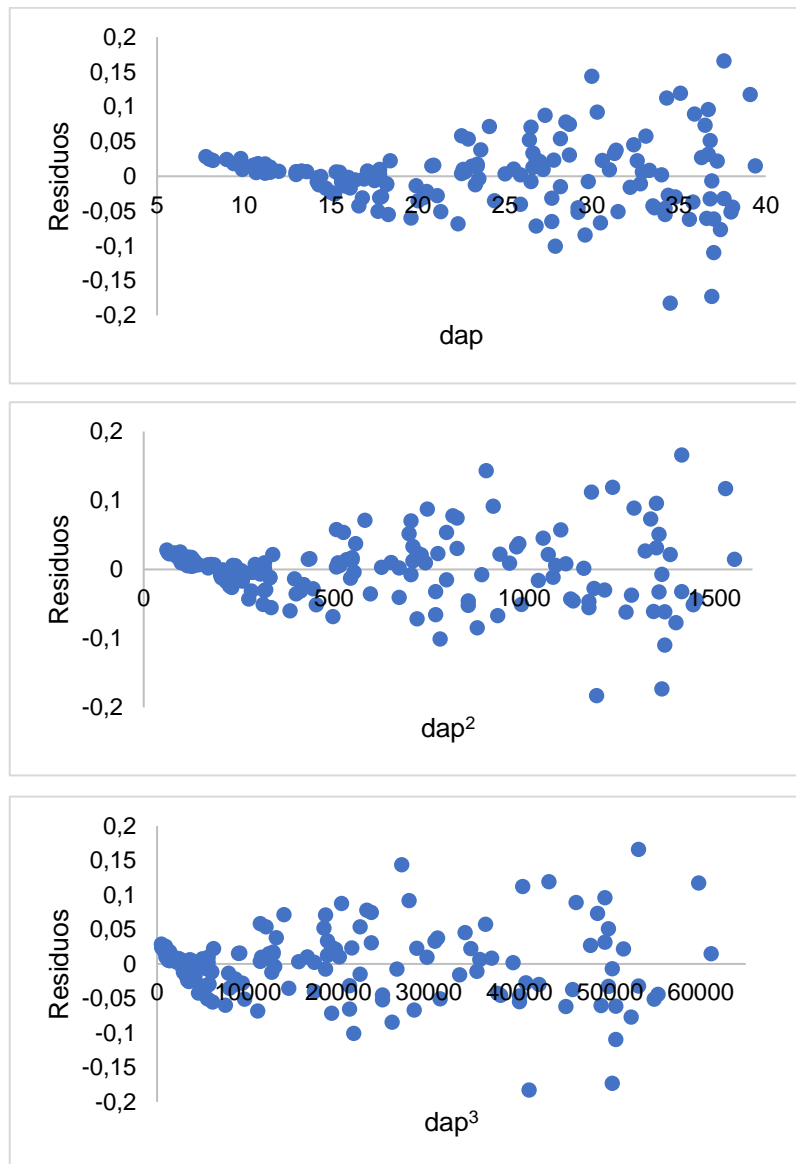


Figura 13. Distribución de residuos para cada una de las variables de modelo (tercer grado sin intercepto) para estimación del volumen total, en árboles de *V. guatemalensis* de plantaciones mixtas, zona norte de Costa Rica.

Para la validación del modelo el porcentaje de sesgo (S%) registró un valor de -0,15% o de ligera subestimación del volumen total. El Z calculado (Z_c) mostró un valor de 0,17 para una significancia del 0,05%. El valor de Z tabular (Z_t) correspondiente para el respectivo Z calculado (Z_c) fue de 0,86.

Discusión

Se puede observar en el cuadro 5 que la base de datos muestral representa una distribución homogénea de individuos, en todas las clases diamétricas de la población, lo que da un buen sustento al desarrollo de modelos de predicción del volumen.

Los árboles tumbados y cubicados en la muestra provienen de plantaciones mixtas con otras especies nativas, establecidas bajo un diseño espacial donde se espera que interactúen en un papel ecológico de acuerdo con su tasa de crecimiento. Sin embargo, la especie en estudio es la única de rápido crecimiento [9], lo que sugiere que para la muestra utilizada las condiciones para su desarrollo muy probablemente no fueron del todo o, fueron muy poco afectadas, por la interacción de las otras especies que conforman la mezcla. Por tanto, los valores de crecimiento registrados y utilizados en el ajuste de los modelos pueden considerarse de alta representatividad para árboles plantados de *V. guatemalensis* en la zona norte del país.

La elección de los modelos se fundamentó en su facilidad de uso e interpretación, el número de variables independientes y la facilidad de medición en campo. Modelos de índole matemática compleja, del tipo no lineales, con un gran número de parámetros y variables, resultan en una dificultad para su utilización en el ejercicio forestal operativo. La introducción de variables como la altura total en los modelos de volumen implican mayor tiempo/costo en el trabajo de inventario forestal, además de un sesgo natural asociado a su dificultad de estimación en campo. Un buen modelo de volumen ajustado basado en el dap y altura total podría resultar en un sesgo significativo de estimación final, cuando el valor de la altura total utilizado es de dudosa calidad, producto del bajo rigor de medición del personal de campo, como frecuentemente sucede [11]. Rodales en condiciones topográficas accidentadas, con alta densidad y sin raleos, son condiciones comunes que aumentan la dificultad y el error de estimación de la altura de los árboles. Aun cuando se logre una mejora en la precisión de su valor, la altura total no se mide, se estima, el mejor instrumento producirá una incertidumbre y un sesgo natural asociado de estimación [18]. Mientras que la variable

diámetro a 1,30 m, es de fácil medición directa, precisa y siempre guarda una correlación muy alta con la altura total, volumen total y tipos de volumen comercial.

La relación entre la variable independiente dap y el volumen combinado (figura 6), volumen para tarima (figura 8) o el volumen total (figura 10), exhiben una distribución homogénea de los datos que sigue una tendencia de función polinomial. En el caso de la relación dap/volumen para construcción (Figura 8), se puede observar la tendencia polinomial, no obstante, los datos reflejan un comportamiento escalonado. Debe recordarse que la estructura del volumen por árbol se compone de la suma de varias trozas individuales de 2,5m de longitud a lo largo del fuste. Cada vez que una troza cumple con las medidas mínimas (diámetro menor > 20 cm), su volumen se adiciona al volumen total comercial del árbol produciendo un aumento abrupto, no lineal, que se refleja en el efecto escalonado. Este comportamiento se magnificó en el comportamiento de los residuos (Figura 9), donde puede observarse claramente este efecto no lineal con el ingreso de cada nueva troza en el volumen del árbol.

La elección de la mejor función de volumen en cada caso se basó en los criterios estadísticos usuales y de mayor uso en la biometría forestal [8], tales como el coeficiente de determinación (r^2), el error estándar, el coeficiente de variación, tal y como se muestra en los cuadros 6,7,8 y 9. Otros criterios utilizados fueron el número de variables independientes y su facilidad de medición en campo [19]. A pesar de ello, ambos grupos de criterios no fueron suficientes para discriminar y facilitar la elección del mejor modelo, debido a que en todos los casos los modelos polinomio grado 2 sin intercepto y polinomio grado 3 sin intercepto fueron los mejores, sin mostrar diferencias significativas entre sus parámetros. Por estas razones se utilizó el valor de sesgo como criterio de elección final del mejor modelo.

En relación con el modelo de estimación del volumen combinado (construcción + tarima), se determinó que la función polinomial de segundo grado sin intercepto fue la mejor de todas las investigadas. Esta función registró los mejores estadísticos de prueba, menor desviación estándar de los datos, el menor sesgo y se basa solamente en la variable independiente dap. Su análisis de residuos (figura 7), mostró una

distribución homogénea a lo largo del eje horizontal, con una desviación menor a $\pm 0,2$ unidades en su eje x. Lo que le confiere al modelo una alta estabilidad a lo largo de toda la distribución diamétrica.

Las pruebas de validación mostraron un valor bajo de sesgo ($<2\%$), lo que sugiere que el estimado de volumen presenta un patrón de subestimación en comparación con el valor real. No obstante, el valor se considera como aceptable [11]. La prueba de signos de Wilcoxon determinó que el valor de Z calculado (Z_c) fue menor al Z tabular (Z_t) establecido con una significación del 0,05. Esto determina una aceptación de la hipótesis nula establecida, que establece como resultado que el modelo no se encuentra sesgado.

En el ajuste del modelo de volumen para construcción se determinó que la mejor función de las evaluadas (cuadro 7) fue la 4 (polinomial de tercer grado sin intercepto). Esta función registró los mejores estadísticos de prueba, menor desviación estándar de los datos, el menor sesgo y se basa solamente en la variable independiente dap.

El análisis de residuos del modelo elegido (figura 9), muestra un comportamiento de forma escalonada, no lineal, producto de la estructura de datos de estimación del volumen por árbol. No obstante, la distribución es homogénea en ambos lados del eje horizontal y en el eje vertical la desviación de los residuos en su mayoría fue menor a un valor de $\pm 0,2$ unidades con respecto al eje x. Lo que le confiere una alta estabilidad a lo largo de toda la distribución diamétrica.

Las pruebas de validación mostraron valores bajos de sesgo ($<2\%$), lo que sugiere que el estimado de volumen presenta un patrón de subestimación en comparación con el valor real. No obstante, el valor se considera como aceptable [11]. La prueba de Wilcoxon mostro que el valor de Z calculado (Z_c) es menor al Z tabular (Z_t) establecido con una significación del 0,05. Esto determina una aceptación de la hipótesis nula establecida, obteniendo como resultado que el modelo no se encuentra sesgado.

En la determinación del modelo para estimación del volumen para tarimas, resultó en que el modelo de mejor ajuste entre los investigados (cuadro 8) fue la función

polinomial de segundo grado sin intercepto. Al ser comparado con las demás funciones, registró valores altos en los estadísticos evaluados y presentó el valor más bajo de sesgo.

El análisis de residuos del modelo elegido (figura 11), mostró una distribución homogénea a lo largo del eje horizontal. Mientras que en el eje vertical, la distribución de los residuos se mantuvo con valores dentro de $\pm 0,2$ unidades, que le confieren una alta estabilidad en toda la distribución diamétrica.

Las pruebas de validación mostraron valores bajos de sesgo ($<2\%$), lo que sugiere que la estimación del volumen presenta un patrón de ligera subestimación en comparación con el valor real. No obstante, el valor se considera como aceptable [11]. La prueba de signos de Wilcoxon mostró que el valor de Z calculado (Z_c) fue menor al Z tabular (Z_t) establecido con una significación del 0,05. Por tanto, se determina una aceptación de la hipótesis nula, que establece que el modelo no se encuentra sesgado.

Para la estimación del volumen total se determinó que la mejor función de las investigadas (cuadro 9) fue el modelo polinomial de tercer grado sin intercepto. Al ser comparado con las demás funciones, registró valores altos en los estadísticos evaluados y presentó el valor más bajo de sesgo.

En el análisis de residuos (figura 13), se observa una ligera dispersión de valores positivos que luego disminuyen y se distribuyen de forma homogénea a lo largo del eje horizontal. Mientras que en el eje vertical, la distribución de los residuos se mantuvo con valores dentro de $\pm 0,2$ unidades, que le confieren una alta estabilidad en toda la distribución diamétrica.

Las pruebas de validación mostraron valores bajos de sesgo ($<2\%$), lo que sugiere que la estimación del volumen presenta un patrón de ligera subestimación en comparación con el valor real. No obstante, el valor se considera como aceptable [11]. La prueba de signos de Wilcoxon mostró que el valor de Z calculado (Z_c) fue menor al Z tabular (Z_t) establecido con una significación del 0,05. Por tanto, se determina una aceptación de la hipótesis nula, que establece que el modelo no se encuentra sesgado.

Conclusiones

Los modelos polinomiales ajustados para estimar el volumen en *V. guatemalensis* son confiables, de fácil utilización en campo, basados únicamente en la medición del dap. En su validación todos los modelos registraron un patrón de subestimación con un sesgo inferior al 1,5% en todos los casos

La función para estimar el volumen combinado (construcción + tarima) es la siguiente:

$$V_{c+t} = -0,00621 \text{ dap} + 0,00077 \text{ dap}^2, r^2 = 0,99$$

La función para la estimación de volumen para construcción es la siguiente:

$$V_c = -0,022327 \text{ dap} + 0,001348 \text{ dap}^2 - 0,000006 \text{ dap}^3, r^2 = 0,98$$

La función para la estimación de volumen para tarimas es la siguiente:

$$V_t = -0,00546 \text{ dap} + 0,00072 \text{ dap}^2, r^2 = 0,99$$

La función para la estimación de volumen total es la siguiente:

$$V_T = -0,01065 \text{ dap} + 0,00127 \text{ dap}^2 - 0,00001 \text{ dap}^3, r^2 = 0,99$$

Recomendaciones

Se recomienda para futuros trabajos aumentar la base de datos, incorporando individuos para todas las clases diamétricas y de preferencia para clases mayores a 40 cm de dap.

CAPÍTULO 3. RENDIMIENTO EN ASERRÍO PARA TROZAS DE CEBO (*Vochysia guatemalensis*) SEGÚN SU CALIDAD, SARAPIQUÍ, COSTA RICA.

Resumen

La presente investigación determinó el rendimiento en aserrío en trozas de cebo (*Vochysia guatemalensis*), según su calidad y diámetro, por medio de un aserradero portátil Wood Mizer It15. Se procesaron 64 trozas de 2,5 m de longitud, con diámetro en la cara menor desde los 10,6 cm hasta 34,9 cm. Se registró la cantidad de piezas resultantes, su largo, ancho y espesor, para finalmente obtener el volumen de madera aserrada. Los valores de rendimiento fueron clasificados por la calidad de la troza en 1, 2 y 3, que resultó en un 52,2%, 47% y 38,4% en producto aserrado respectivamente.

Palabras clave: productividad, calidad de troza, volumen aserrado, economía, especie nativa

Introducción

La industria de aserrío en Costa Rica tuvo auge en los años 40's, producto de la explotación del bosque nativo relacionada directamente al cambio de uso de la tierra que enfrentaba el país [20]. No obstante, las políticas ambientales creadas en los años 90's para la regulación de estas prácticas, dio un giro hacia el aserrío convencional iniciando con una línea de diámetros menores (10 a 35 cm). Esta línea de aserrío fue creada acorde con el procesamiento de madera proveniente de plantaciones forestales, con el fin de promover una actividad industrial de rendimiento óptimo [21].

Los estudios de rendimiento en la industria de aserrío son de vital importancia para promover la integración con las plantaciones. Así como para determinar su potencial real de productividad, e identificar los elementos clave que lo afectan para ser mejorados [22].

El balance económico en la industria de aserrío se ve reflejado en términos de productividad, es decir, una alta relación entre la cantidad de volumen de madera obtenida por unidad de tiempo de trabajo. La eficiencia de esta labor puede ser cuantificada mediante el rendimiento o factor de recuperación de la madera (FRM), el cual consiste en la cantidad de volumen de madera aserrada con respecto al volumen redondo de la troza [23].

El rendimiento del aserrío puede ser afectado por diversos factores durante el proceso como el diámetro de la troza, su calidad, forma, características y dimensiones del producto final, patrón de corta, capacidad del operador, características y estado del equipo, entre otros [20]. Estos factores deben ser investigados con el propósito de introducir mejoras productivas de impacto económico.

Esta investigación tuvo como objetivo determinar los valores de rendimiento del aserrío para diferentes calidades de trozas, con longitud de 2,5 m procesadas en aserradero portátil Wood Mizer It15.

Materiales y métodos

La información se obtuvo a partir de la cuantificación de volumen producido por aserradero portátil Wood Mizer It15 en trozas de cebo (*V. guatemalensis*) procedentes de plantaciones mixtas con especies nativas del proyecto La Virgen manejado por la empresa Puro Verde Paraíso Forestal S.A., ubicado en La Virgen, Sarapiquí, zona norte de Costa Rica. Para el estudio se utilizaron 64 trozas de 2,5 m de longitud, con diámetros en la cara menor desde los 10,6 cm hasta los 34,9 cm. Las trozas tenían previamente una clasificación de su calidad de fuste, de acuerdo con la metodología de calidad [24].

Para el estudio se diseñó un formulario que facilitó la toma de los datos de forma uniforme (cuadro 10). Para cada troza se especificó sus dimensiones, su calidad, las dimensiones y número de unidades del producto resultante.

Cuadro 10. Formulario de campo para toma de datos del estudio de rendimiento en aserrío en trozas de *V. guatemalensis*, Sarapiquí, zona norte, Costa Rica.

Datos de la troza					Número de unidades producidas		
ID	Calidad	D. mayor (cm)	D. menor (cm)	Largo (m)	1(in) X 2(in*)	1(in) X 3(in*)	½(in*) X (in*) ²

* 1 in (pulgada) = 2,54 cm

Las trozas fueron previamente clasificadas según su calidad acorde con la metodología de calidad utilizada en el país [24], tal y como se describe en el cuadro 11.

Cuadro 11. Clasificación de calidad de troza según las características visuales del fuste.

Calidad	Características
1	Recta y cilíndrica. Sin ramas o nudos prominentes. Sin daños mecánicos o problemas sanitarios.
2	Torceduras leves. Semicilíndrica Presencia o evidencia de pocos nudos Presencia de ramas gruesas Con daños mecánicos leves
3	Torceduras severas que permiten utilizar solamente un 50%. Presencia de ramas muertas Presencia de daños sanitarios severos que afectan el producto Al menos un 50% del fuste es aserrable.

La muestra total de trozas se dividió en tres categorías de acuerdo con su calidad de 1 a 3 (cuadro 11). El tamaño de muestra en número de trozas necesarias para el estudio se determinó mediante la ecuación de tamaño de muestra [25], para garantizar su validez estadística:

$$N = \frac{t^2 * CV^2}{E^2}$$

Dónde:

N= Número de trozas necesarias para el estudio de rendimiento.

t= Valor tabulado de t-Student a 95% de confiabilidad.

CV= Coeficiente de variación (%)

E= Error de muestreo deseado (%).

El rendimiento de aserrío se determinó mediante el cociente entre el volumen total producido (en piezas de madera aserrada) y el volumen redondo inicial multiplicado

por cien. En la industria de la madera el valor de rendimiento es también conocido como el factor de recuperación de madera (FRM), su ecuación es la siguiente:

$$FRM = \frac{\text{Volumen de madera aserrada (m}^3\text{)}}{\text{Volumen redondo de la troza (m}^3\text{)}} * 100$$

Para obtener el valor de rendimiento por calidad de troza se obtuvo el promedio de cada una de las tres categorías de calidad.

El cálculo del volumen redondo de cada troza se realizó mediante la fórmula Smalian:

$$V = \frac{\pi}{4} * \frac{d^2 + D^2}{2} * L$$

Dónde:

V= Volumen de la troza.

d= Diámetro de la cara menor.

D= Diámetro de la cara mayor.

L= Largo de la sección.

Las trozas fueron marcadas previamente con un código para la trazabilidad en la identificación de las piezas obtenidas, una vez que se completó el proceso de aserrío. Para el cálculo de volumen aserrado se clasificó cada pieza dentro de cada uno de los productos obtenidos (según sus dimensiones de largo, ancho y espesor). Posteriormente, se cuantificó el volumen de cada producto mediante la medición de cada una de sus piezas. Finalmente, se determinó el volumen total aserrado mediante la sumatoria del volumen de todos los productos.

Resultados

A través del pre-muestreo se obtuvo el número mínimo de trozas necesarias para que la muestra fuera estadísticamente representativa, tal y como se muestra en el cuadro 12.

Cuadro 12. Determinación del tamaño de muestra para el estudio de rendimiento en aserrío de trozas de *V. guatemalensis*, Sarapiquí, zona norte.

Variables	Calidad 1	Calidad 2	Calidad 3
Pre-muestra	18	24	22
Valor t-Student al 95%	2,11	2,07	2,08
Coefficiente de variación %	14,46	20,90	22,38
Error de muestreo	0,1	0,1	0,1
Número de trozas (n)	10	19	22

En la figura 14 se muestra la distribución diamétrica de las trozas utilizadas para el cálculo de rendimiento por calidad. Las trozas fueron organizadas en 5 clases diamétricas en relación con la cara menor con intervalos de 5 cm, desde los 10,6 cm hasta los 34,9 cm. El largo de troza utilizado fue de 2,5 m.

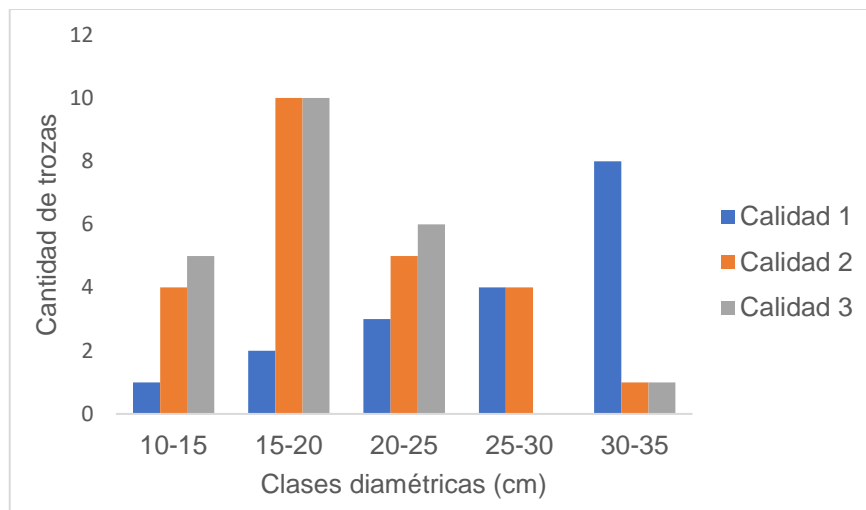


Figura 14. Distribución por clase diamétrica y categoría de calidad, de las trozas utilizadas en el estudio de rendimiento en aserrío para *V. guatemalensis*, zona norte, Costa Rica.

En el cuadro 13 se muestra el rendimiento del aserrío obtenido con respecto a la calidad de trozas. Debe recordarse que el rendimiento en aserrío realmente corresponde al del bloque máximo interno, sin considerar las orillas. Es decir, la relación debe basarse en el valor de $\pi/4$, que corresponde al 0,7854 del volumen redondo. Este valor teórico debe reducirse ligeramente por el grosor de corteza en toda la circunferencia, de estimarse en unos 2 cm, queda un valor de referencia para el bloque interno máximo de aproximadamente 74% del volumen redondo.

Cuadro 13. Valores de rendimiento de aserrío por calidad para *V. guatemalensis*, zona norte, Costa Rica.

Calidad	Tamaño máximo teórico bloque interno	Rendimiento con respecto al volumen redondo	Rendimiento con respecto al bloque interno
1	74%	52,2%	67,3
2	74%	47,0%	58,8
3	74%	38,4	50,5

Discusión

El pre-muestreo realizado determinó que el número de trozas utilizadas para la investigación consistió en una muestra estadísticamente válida y representativa de la población. El análisis de la variación en el rendimiento de cada troza por categoría de calidad mostró valores relativamente bajos en su coeficiente de variación. Lo que explica que una muestra relativamente pequeña fuera suficiente para realizar el estudio.

La distribución de la muestra de trozas de calidad 1 presentó alta representación para las clases diamétricas superiores. Que puede explicarse por ser la primera troza, la de mayor diámetro y de calidad 1 en la mayoría de los casos.

La distribución de la muestra en la calidad 2 y 3 presenta un comportamiento similar, con una alta representación en las clases diamétricas media y baja, pero con tendencia a menor representatividad en las clases de mayor diámetro. En términos generales, la posición de la troza en el árbol y su manejo explican su calidad. Conforme aumenta la altura del árbol, algunas actividades silviculturales como la poda de ramas se dificulta, lo que reduce su calidad.

Para una mejor comprensión del concepto de rendimiento en aserrío, debe recordarse que en un primer paso se debe obtener un bloque interno consolidado sin defectos. En este proceso, se pierde madera de las costillas producto de varios factores, conicidad, achatadura, defectos longitudinales del fuste, torceduras leves de la troza, daños en el fuste (enfermedades, golpes), entre otros. Una vez conformado este bloque interno, se inicia el verdadero proceso de aserrío para la obtención de piezas aserradas de distintas mediciones, según sea el patrón de corta utilizado. Por lo tanto, para una misma clase diamétrica, la calidad de la troza repercutirá directamente en el tamaño del bloque interno máximo que se pueda obtener.

El rendimiento en aserrío de las trozas de calidad 1 registró un valor de 52,2% con relación al volumen redondo inicial. Valor similar al reportado en otros estudios realizados para aserraderos, donde se realizó una transformación más intensa de la

madera (aserrío, re-aserrío y despunte) Ccahuana [26] reporta valores de 45,06% para trozas de caoba. Mientras que Roberts [27] obtuvo valores de 50,22% para trozas de eucalipto y 52,66% para trozas de laurel. De manera global se puede apreciar como los valores máximos de rendimiento se encuentran cercanos a un 50% del volumen redondo inicial para trozas de la mayor calidad. Es decir, a mayor calidad de la troza, menos defectos en el fuste, lo que implica una pérdida menor en costillas a la hora de obtener el bloque máximo interno, tal y como se registró en el cuadro 13. La posición de la troza en el árbol influye en este valor de rendimiento en aserrío. La primera troza del árbol es la de mayor conicidad, lo que implica que perderá proporcionalmente, mayor volumen de madera en las costillas, en comparación con el resto de las siguientes trozas en lo alto del fuste. Este nivel de detalle no formó parte de la investigación, por lo que el grupo de trozas de calidad 1 incluyó mayoritariamente la primera troza de los árboles y otro tanto de trozas de varias partes del árbol. Por tanto, la relación de rendimiento en aserrío según calidad de la troza debe tomarse como un valor promedio general, con algún nivel de variación interna.

Es ampliamente conocido que la categoría diamétrica influye en el rendimiento en aserrío [28]. A mayor diámetro, el volumen alrededor del bloque máximo interno y la corteza tiende a aumentar, lo que permite aprovechar algunas piezas aserradas con un patrón de corta adecuado. En esta investigación no se incluyó la clasificación de las trozas por su clase diamétrica, sino solo por su calidad. Esto pudo generar alguna confusión en los datos de rendimiento en aserrío para una misma categoría de calidad, con trozas desde 12 hasta 33 cm de diámetro, como se muestra en la figura 14.

Conclusión

Se concluye que el tamaño de muestra fue representativo y estadísticamente válido, para la estimación del rendimiento en aserrío de las trozas de *V. guatemalensis* según su calidad de fuste.

A mayor calidad de la troza aumenta el rendimiento en aserrío con respecto al volumen redondo. Para una misma clase diamétrica, el rendimiento de una troza de calidad 1 es de un 52%, de un 47% para la calidad 2 y de un 38% para la calidad 3-

Recomendaciones

En una futura investigación será importante clasificar las trozas, tanto por su calidad como por su clase diamétrica. Así también, se deberá registrar la posición de la troza dentro del árbol, para lograr una mejor explicación de la variación en rendimiento en aserrío por troza.

REFERENCIAS

- [1] ONF, “Estadísticas 2018 & precios 2019”, *Usos y aportes de la madera en Costa Rica*, 2019.
- [2] M. Prodan, R. Peters, F. Cox y P. Real, *Mensura Forestal*, San José: Instituto interamericano de cooperación para la agricultura (IICA)/BMZ/GTZ, 1997.
- [3] M. Coronel, *Determinación del turno forestal*, Cartago: Tecnológico de Costa Rica, 2017.
- [4] R. Kometter y E. Maravi, “Metodología para elaborar tablas nacionales de conversión volumétrica de madera rolliza en pie a madera aserrada calidad exportación”, *US. The World Bank, Comisión centroamericana de Ambiente y Desarrollo*, 2007.
- [5] S. Quirós Monge, “Modelos de volumen comercial, perfil de fuste y crecimiento para plantaciones clonales de *Gmelina arborea* Roxd. ex Sm. en costa Rica”, Tesis, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2015.
- [6] J. L. Fallas Zúñiga, “Funciones alométricas, de volumen y de crecimiento para clones de teca (*Tectona grandis* L.f) en Costa Rica”, Tesis, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2017.
- [7] T. Nilson, “Presenting different approaches of tree volume estimation for *Vochisia guatemalensis* on forest plantations of Puro Verde Paraíso Forestal S.A.”, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Eberswalde, 2018.
- [8] E. Ortiz, *Crecimiento y Rendimiento Forestal*, Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2011.
- [9] E. González, “Establecimiento y evaluación de una plantación con mezcla de especies considerando su gremio ecológico, en la Virgen de Sarapiquí, Costa Rica.”, Tesis, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2012.
- [10] M. Solís Corrales y R. Moya Roque, “*Vochisia guatemalensis* en Costa Rica”, *COSEFORMA-GTZ*, 2004.

- [11] M. Philip, "Measuring Trees and Forests", The Division of Forestry, University of Dar es Salaam, 1983.
- [12] O. Murillo, J. Vallejos, Y. Badilla, N. Guzmán, R. Luján y E. González, "Crecimiento efetivo mensual inicial em plantações de teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica", *Nativa*, vol. 4, nº 2, pp. 87-90, 2016.
- [13] F. Montagnini, "Plantaciones forestales con especies nativas Una alternativa para la producción de madera y la provisión de servicios ambientales", *Recursos Naturales y Ambiente*, 2004.
- [14] J. A. Vozzo, Manual de Semillas de Árboles Tropicales, Departamento de Agricultura de Los Estados Unidos-Servicio Forestal, 2010.
- [15] D. Arias, "Recopilación de información silvicultural sobre 21 especies maderables nativas de la Región Huetar Norte de Costa Rica", COSEFORMA, 1992.
- [16] P. Acuña, "Propuesta para la estimación de volumen comercial para *Hieronyma alchorneoides* allemano y *Vochysia guatemalensis* JD Smith en la zona norte de Costa Rica", San José, 2000.
- [17] B. Petit y F. Montagnini, "Growth equations and rotation ages of ten native tree species in mixed and pure plantations in the humid neotropics", *Forest Ecology and Management*, 2004.
- [18] D. Pérez y M. Kanninen, "Ecuaciones y tablas de volumen para árboles individuales en plantaciones de Teca *Tectona grandis* L.f en Costa Rica", 2003.
- [19] M. Segura y H. Andrede, "¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?", *Agroforesteria en las Américas*, nº 46, pp. 89-96, 2008.
- [20] J. Serrano y R. Moya, "Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 8, nº 21, pp. 1-12, 2012.

- [21] R. Serrano y R. Moya, "Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 8, nº 21, pp. 1-12, 2011.
- [22] G. Aldás , "Rendimiento en el proceso de transformación de madera rolliza a madera escuadrada de pino (*Pinus radiata* D. Don), con dos tipos de aserradero, en la ciudad de Riobamba", Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2014.
- [23] M. Coronel , F. Díaz, G. Cordona y A. Ruiz , "Tiempos, rendimientos y costos del aserrado de Algarrobo blanco (*Prosopis alba*) en Santiago del Estero, Argentina", *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*, vol. 20, nº 1-2, pp. 15-28, 2012.
- [24] O. Murillo y Y. Badilla , "Calidad y valoración de plantaciones forestales", Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2004.
- [25] F. Freese, *Métodos estadísticos elementales para técnicos forestales*, México: ADI, 1970.
- [26] W. Ccahuana, "Estudio de rendimiento y tiempos en el proceso de aserrío de trozas de *Swietenia macrophylla* king con un aserradero de cinta vertical, en la provincia de Tahuamanu", Tesis, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Facultad de Ciencias Forestales y Medio Ambiente, Cusco, 2007.
- [27] K. Roberts, "Análisis del rendimiento y eficiencia actual en la producción de madera aserrada, en el aserradero El Almendro SA, Cartago, Costa Rica", Tesis, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2017.
- [28] R. Serrano, "Tecnologías para el aserrío de trozas de diámetros menores", *Tecnología en marcha*, vol. 12, nº 1, pp. 89-98, 1993.
- [29] O. Murillo , J. Wright, O. Monteuis y F. Montenegro, "Capítulo 6: Mejoramiento genético de la teca en América Latina", de *Aspectos técnicos de las inversiones de teca en América Latina: Mitos y realidades*, Turrialba, CATIE, 2013, pp. 86-111.