

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL



Ecuaciones de Predicción de Volúmenes para *Conocarpus erectus* L.
en Soto La Marina, Tamaulipas

Por:

MARCO ANTONIO ARGUETA GARNICA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Mayo, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Ecuaciones de Predicción de Volúmenes para *Conocarpus erectus* L.
en Soto La Marina, Tamaulipas

Por:

MARCO ANTONIO ARGUETA GARNICA

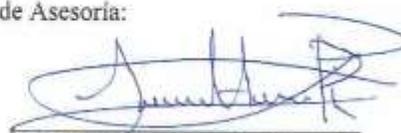
TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Celestino Flores López
Asesor Principal


M.C. Adrián Hernández Ramos
Asesor Principal Externo


Dr. Jorge Méndez González
Coasesor


M.C. Salvador Valencia Manzo
Coasesor


Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México
Mayo, 2025

El presente estudio de tesis fue financiado por el Proyecto de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro con clave 38111-425103001-2175 denominado Diversidad y Estructura de Bosques Tropicales en el Occidente y Sureste de México. Proyecto a cargo del Dr. Celestino Flores López, Profesor-Investigador del Departamento Forestal.

DEDICATORIA

A Dios, porque en cada paso, en cada decisión difícil y en cada momento de lucha, estuvo ahí conmigo. Esta meta te la ofrezco.

A mis padres, Valentino Argueta Bello y Lorenza Garnica Elizondo, gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por enseñarme con el ejemplo que el esfuerzo, humildad y respeto, son los pilares del verdadero éxito. Cada logro mío es también de ustedes, porque su apoyo ha sido la base de todo. Gracias por los sacrificios.

A mi novia, Dulce María Bello Paz, por caminar conmigo en los días buenos y malos, por tu paciencia. Gracias por la motivación, por quedarte, y por soñar conmigo, por creer en mí. Gracias por todo, te amo.

A mis abuelos paternos y abuelo materno que en paz descansen. Agradezco en especial a mi abuelita materna Elvira Elizondo, gracias por tu amor sabio y sereno, por ser un pilar en mi vida.

A mis hermanos, Marcela, Martín, Guadalupe, Javier, Susana, María de la Luz y María de la Cruz por su apoyo para este logro. A mis hermanos, Daniel, Carla, Flor y María del Sagrario por su apoyo moral y económico. En especial a mi hermano y Colega el Ing. José Francisco Argueta Garnica por su apoyo económico y académico.

A todos mis cuñados y cuñadas, por su apoyo y por creer en mí. Además de todos mis sobrinos. En muy en especial a mi sobrino José Yareth Argueta Guzmán por ser más que mi sobrino por ser el hermano menor que nunca tuve a quien le tengo grande un aprecio.

A mis suegros Alejandro Bello y Celia Paz y a mis cuñadas, por cuidar de mi novia y apoyarla en los momentos que no pude estar con ella.

Y a mí amigo, Juan Horacio Castro Silva, gracias por ser más que un amigo, ser un carnal con quien he estado desde niños.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por brindarme la oportunidad de formarme como profesional, “Por qué ser Ingeniero Forestal es una bendición”, “Alma Terra Mater” Buitre por siempre.

A mis asesores el M.C. Adrián Hernández Ramos, al Dr. Jorge Méndez González, al M.C. Salvador Valencia Manzo por su aportación a apoyo en este documento. Pero en especial al Dr. Celestino Flores López por todo el apoyo, por ser un gran profesor, y una inspiración.

A los profesores del Departamento Forestal, el Dr. Eladio H. Cornejo Oviedo, el M.C. José Armando Nájera Castro, el Dr. Francisco Cruz García, la Dra. Rosalinda Cervantes Martínez, el Dr. Eduardo Alberto Lara Reimers, el Ing. Sergio Braham Sabag, el Dr. Genaro Esteban García Mosqueda, el M.C. Héctor Darío González López, el M.C. Melchor García Valdez y Ing. José Antonio Ramírez Díaz por su aporte en mi formación como profesional. Pero muy en especial al Dr. Alejandro Zarate Lupercio, el M.C. José Aniseto Díaz Balderas por la gran admiración y respeto a sí ellos y ser unos grandes docentes.

A mis amigas de la universidad, Areli Avendaño González y Sofía de la Cruz Godoy, gracias por acompañarme en este viaje académico. Por una amistad que solo se forja entre quienes luchan por un mismo objetivo. Su amistad ha sido una motivación constante.

A todos mis compañeros de la carrera por haber formado parte de este logro y con quienes compartí toda mi estancia en esta universidad.

A mis compañeros de internado, Fabián González Linares, José Isaid Reséndiz Gómez y José Alberto de la Cruz Martín, gracias por haber compartido, y ser buenos compañeros.

A la consultoría “Servicios Técnicos Forestales del Bajío” donde realicé mis prácticas profesionales, al encargado el Ing. Federico Alejandro Castro Rosas, al Ing. Alejandro Guzmán Castro, el Ing. Brissia Daniela Pérez Mares y el Ing. José Francisco Argueta Garnica. Por su apoyo y amistad durante mis prácticas, por brindarme toda su experiencia.

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor, quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (autoplagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior, me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



Firma y Nombre

INDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE APÉNDICES.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos e hipótesis.....	2
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Taxonomía.....	3
2.2 Descripción	3
2.3 Ecología	3
2.4 Tipo de vegetación.....	4
2.5 Distribución de la especie en Tamaulipas.....	4
2.6 Estatus de conservación de la Laguna Madre	5
2.7 Estatus de la especie	5
2.8 Manejo e importancia en la economía rural.....	5
2.9 Ecuaciones de predicción de volumen.....	6
2.10 Los criterios de información	6
3 MATERIALES Y MÉTODOS	12
3.1 Descripción del área de estudio	12
3.2 Diseño de muestreo.....	13
3.3 Selección y tamaño de la muestra.....	13

3.4 Medición de variables	15
3.5 Cálculo del volumen individual del fuste por tipos dendrométricos	15
3.5.1 Volumen del tocón.....	16
3.5.2 Volumen del fuste.....	16
3.5.3 Volumen de las ramas	17
3.5.4 Volumen de la punta	17
3.6 Modelos de regresión utilizados.....	18
3.7 Análisis estadístico	18
3.8 Criterios de elección del modelo	19
3.9 Validación de las ecuaciones de predicción de volumen.....	20
3.10 Construcción de la tabla de predicción de volumen	22
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
4.1 Ajuste y selección de las ecuaciones	23
4.2 Ajuste de los modelos y selección de los cinco mejores	24
4.2.1 Ecuaciones volumen fuste total	24
4.2.2 Ecuaciones volumen total árbol.....	31
4.3 Validación de las ecuaciones de predicción de volumen.....	36
4.4 Tablas de predicción de volumen	38
4.4.1 Tabla de predicción de volumen fuste total.....	38
4.4.2 Tabla de estimación de volumen total árbol.....	39
5 CONCLUSIONES.....	41
6 RECOMENDACIONES.....	42
7 LITERATURA CITADA	43
8 APÉNDICE.....	55

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Ecuaciones de predicción de volumen encontradas en la literatura.....	8
Cuadro 2. Características fisiográficas, edáficas y biológicas de la localidad de La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	12
Cuadro 3. Número de individuos por categoría diamétrica y altura total de <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	15
Cuadro 4. Ecuaciones ajustadas para la predicción de volumen de <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	18
Cuadro 5. Parámetros de las ecuaciones de predicción de volumen fuste total en <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	23
Cuadro 6. Parámetros de las ecuaciones de predicción de volumen total árbol en <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	24
Cuadro 7. Comparación de estadísticos de ajuste de las ecuaciones de volumen fuste total, utilizadas para <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	28
Cuadro 8. Comparación de estadísticos de ajuste de las ecuaciones de volumen fuste total, utilizadas para <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	29
Cuadro 9. Comparación de estadísticos de ajuste de las ecuaciones de volumen total árbol, utilizadas para <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	33
Cuadro 10. Comparación de estadísticos de ajuste de las mejores ecuaciones de volumen total árbol, utilizadas para <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. ..	34
Cuadro 11. Comparación de estadísticos utilizados para determinar la exactitud y sesgo de los cinco mejores modelos para volumen fuste total utilizadas para <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	36
Cuadro 12. Sistema de calificación de modelos para volumen fuste total utilizadas para <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	37

Cuadro 13. Comparación de estadísticos utilizados para determinar la exactitud y sesgo de los cinco mejores modelos para volumen total árbol utilizadas para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. 37

Cuadro 14. Sistema de calificación de modelos para volumen total árbol utilizadas para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. 38

Cuadro 15. Tabla de estimación de volumen fuste total para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas con el modelo Takata $V = (D^2At) / (17558.53 + (835.0594 (D)))$ 39

Cuadro 16. Tabla de estimación de volumen total árbol para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. Schumacher y Hall $V = 0.000094 (D^{1.944672} At^{0.452888})$ 40

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Ubicación general del área de estudio para la medición de las variables dasométricas en <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	14
Figura 2. Comparación de gráfica de volumen observado contra volumen estimado de los cinco mejores modelos para volumen fuste total para <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	30
Figura 3. Comparación de gráfica de volumen observado contra volumen estimado de los cinco mejores modelos para volumen total árbol para <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	35

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Página
Apéndice 1. Cuadro de volumen observado contra volumen estimado del modelo 4 para volumen fuste total para <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	55
Apéndice 2. Comparación de gráfica de volumen observado contra volumen estimado del modelo 8 para volumen total árbol para <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	58
Apéndice 3. Cuadro de volumen observado contra volumen estimado del modelo 8 para volumen total árbol para <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	59
Apéndice 4. Comparación de gráfica de volumen observado contra volumen estimado del modelo 8 para volumen total árbol para <i>Conocarpus erectus</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	62

RESUMEN

Los manglares son ecosistemas costeros tropicales y subtropicales adaptados a suelos salinos e inundables. Se distribuyen en las costas del Pacífico, Golfo de México y el Caribe. Un manglar de gran importancia se localiza en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. El cual alberga, entre otras especies, a *Conocarpus erectus* L., con una condición de achaparramiento por su ubicación latitudinal y se encuentra en situación de riesgo. Por lo tanto, la estimación de su volumen es esencial para la conservación y aprovechamiento.

En este estudio se usó el diámetro a la base (D ; cm) y la altura total (At ; m), para estimar el volumen fustal total (VFT; m^3) y el volumen total árbol (VTA; m^3) de 135 individuos de *C. erectus*. Se compararon 12 modelos, y se seleccionó el de mayor coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}) y menor valor de la raíz del cuadrado medio del error (RCME), del criterio de información de Akaike (AIC) y bayesiano (BIC). Además, se evaluaron los supuestos de normalidad, homocedasticidad y autocorrelación de los residuales con las pruebas de Shapiro-Wilk, White y Durbin-Watson, respectivamente. Para el entrenamiento se empleó el 70 % de los datos y el 30 % restante se utilizó para la validación de los modelos, mediante los estadísticos RCME, EMA, E y DA%.

El modelo Takata fue el mejor para el VFT, con un $R^2_{aj} = 0.96$ y un $RCME = 0.00117$, tanto en el proceso de entrenamiento como en la validación, con subestimación baja (DA% = -0.79%). Y para VTA el modelo Honner fue superior al resto con un $R^2_{aj} = 0.89$ en el entrenamiento, pero en la validación el modelo Schumacher y Hall ($R^2_{aj} = 0.88$) fue el más adecuado, con una mínima subestimación de 0.09%, por lo que, se seleccionó este modelo. Sin embargo, estos presentaron problemas de heterocedasticidad ambos con un valor de White < 0.0001, aunque se consideró adecuado para su uso práctico. Con los modelos seleccionados, se crearon tablas de estimación de volumen para *C. erectus*.

Palabras clave: Ajuste, Modelos, Supuestos estadísticos, Validación, Volumen.

ABSTRACT

Mangroves are tropical and subtropical coastal ecosystems adapted to saline and flood-prone soils. They are distributed along the coasts of the Pacific Ocean, the Gulf of Mexico, and the Caribbean Sea. A mangrove of great importance is located in La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas, which harbors, among other species, *Conocarpus erectus* L. This species exhibits stunted growth due to its latitudinal position and is currently at risk. Therefore, estimating its volume is essential for conservation and sustainable use.

In this study, base diameter (D; cm) and total height (Ht; m) were used to estimate total stem volume (TSV; m³) and total tree volume (TTV; m³) of 135 individuals of *C. erectus*. Twelve models were compared, and the one with the highest adjusted coefficient of determination (R^2_{adj}) and the lowest root mean square error (RMSE), Akaike Information Criterion (AIC), and Bayesian Information Criterion (BIC) was selected. Additionally, the assumptions of normality, homoscedasticity, and residual autocorrelation were evaluated using the Shapiro-Wilk, White, and Durbin-Watson tests, respectively. Seventy percent of the data were used for model training and the remaining 30% for validation, through the calculation of RMSE, mean absolute error (MAE), bias (E), and aggregate percentage difference (APD).

The Takata model was the best for TSV, with an $R^2_{adj} = 0.96$ and $RMSE = 0.00117$ in both the training and validation phases, showing low underestimation ($APD = -0.79\%$). For TTV, the Honner model was superior during training with an $R^2_{adj} = 0.89$; however, in the validation phase, the Schumacher and Hall model ($R^2_{adj} = 0.88$) proved to be the most suitable, with minimal underestimation (0.09%), and was therefore selected. Nevertheless, both models showed heteroscedasticity issues, with White's test values < 0.0001 , although they were still considered suitable for practical application. Based on the selected models, volume estimation tables were developed for *C. erectus*.

Keywords: Fit, Models, Statistical assumptions, Validation, Volume.

1 INTRODUCCIÓN

Los manglares se encuentran entre los ecosistemas más importantes y productivos del planeta, desempeñando funciones ecológicas esenciales que benefician tanto al medio ambiente como a las comunidades humanas. Ubicados en zonas intermareales de regiones tropicales y subtropicales, brindan una protección natural contra fenómenos climáticos extremos y sostienen una alta diversidad biológica. Sin embargo, su existencia está amenazada por el cambio climático, la expansión urbana, la deforestación y otras actividades humanas (Sunkur *et al.*, 2023). Reconocer y valorar los servicios ecosistémicos que ofrecen los manglares es fundamental para fomentar su conservación y restauración. Entre estos servicios destacan especialmente la protección de las costas y el soporte a la biodiversidad marina y terrestre (Lovelock *et al.*, 2024; Cerri *et al.*, 2024). Estas funciones no solo aseguran el equilibrio ecológico, sino que también sostienen la economía de personas que dependen de los manglares para su subsistencia (Akram *et al.*, 2023).

Una de las funciones más destacadas de los manglares es su capacidad para actuar como barreras naturales frente a eventos extremos como tormentas, tsunamis y erosión costera. Su compleja estructura radicular, que incluye raíces aéreas como zancos, rodillas y neumatóforos, atenúa la energía de las olas y reduce el impacto de las marejadas ciclónicas (Van Hesperen *et al.*, 2022). Este efecto amortiguador no solo protege la infraestructura costera y los asentamientos humanos, sino que también estabiliza las líneas de costa al evitar la pérdida de sedimentos (Utomo *et al.*, 2024). Además, los manglares son sumideros altamente eficaces de carbono, con la capacidad de capturar y almacenar grandes cantidades de CO₂ atmosférico, lo que los convierte en aliados clave en la lucha contra el cambio climático (Lovelock *et al.*, 2024; Anu *et al.*, 2024). Estudios recientes han evidenciado que estos ecosistemas pueden almacenar hasta cuatro veces más carbono por hectárea que los bosques terrestres, reforzando su valor en estrategias de mitigación climática (Karpowicz *et al.*, 2024).

Asimismo, los manglares albergan una extraordinaria biodiversidad, sirviendo como hábitat, refugio y zona de cría para numerosas especies de peces, crustáceos, aves y mamíferos. Su intrincado entramado vegetal proporciona un entorno seguro para las etapas juveniles de muchas especies marinas, siendo esencial para la sostenibilidad de pesquerías costeras (Sievers *et al.*, 2023; Ermgassen *et al.*, 2024). La importancia ecológica de estos ecosistemas se traduce también en beneficios económicos y sociales, como la pesca artesanal, el ecoturismo y la recolección de productos forestales (Bindiya *et al.*, 2023; Mhatre, 2024). En conjunto, los manglares ofrecen servicios ecosistémicos vitales que justifican la implementación urgente de medidas de conservación, restauración ecológica y gestión comunitaria (Dabalà *et al.*, 2023; Alamsyah y Kurniawan, 2024). Protegerlos no solo significa preservar la biodiversidad, sino también garantizar la resiliencia de las comunidades costeras ante los crecientes desafíos ambientales del siglo XXI.

La determinación del volumen de *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas, sirve para la gestión forestal sostenible y la investigación de los flujos de energía y nutrientes en los ecosistemas. Tanto los responsables de la planificación estratégica, como los dueños de los ecosistemas, han destacado la importancia de contar con estimaciones del volumen, para guiar adecuadamente las acciones y decisiones en el manejo forestal, por lo que es necesario desarrollar ecuaciones de predicción de volumen para estas especies (Zianis *et al.*, 2005; Imaña-Encinas *et al.*, 2019).

En el presente estudio se pretende estimar el volumen de *C. erectus*, en el ecosistema costero de La Pesa, Soto La Marina, Tamaulipas, con el fin de contribuir a su conservación, manejo sostenible.

1.1 Objetivos e hipótesis

Objetivo general:

Ajustar un modelo matemático de predicción para estimar el volumen fustal total y total árbol de *Conocarpus erectus*, a partir de la altura total y el diámetro a la base, en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Objetivos específicos:

1. Determinar el modelo con mejor ajuste para estimar el volumen fustal total y total árbol de *Conocarpus erectus*, mediante la comparación de criterios estadísticos.
2. Validar los modelos de mejor ajuste utilizando una muestra independiente del 30% de los datos de *Conocarpus erectus*.
3. Seleccionar ecuaciones de predicción y generar tablas de volúmenes de dos entradas para el volumen total árbol y otra para el volumen fuste total de *Conocarpus erectus*.

Hipótesis:

Hipótesis nula (H_0):

A un nivel de confiabilidad del 95%, ningún modelo es adecuado para estimar los volúmenes totales de árbol y de fuste para *Conocarpus erectus*, en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Hipótesis alternativa (H_1):

Con un nivel de confiabilidad del 95%, al menos un modelo es adecuado para estimar los volúmenes totales de árbol y de fuste para *Conocarpus erectus*, en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Taxonomía

La especie pertenece al reino Plantae, dentro de la división Magnoliophyta. Se clasifica en la clase Magnoliopsida, correspondiente a las dicotiledóneas, y en el orden Myrtales. Esta especie forma parte de la familia Combretaceae, específicamente en la tribu Combreteae. El género al que pertenece es *Conocarpus*, y su nombre científico completo es *C. erectus*, de acuerdo con la descripción taxonómica de Tomlinson (1986).

2.2 Descripción

C. erectus, conocido comúnmente como botoncillo, es un arbusto o árbol de 2 a 5 metros de altura, con ramas superiores glabras y de crecimiento irregular. Sus hojas son alternas, lanceoladas, con base cuneiforme y ápice agudo, de textura algo carnosa y con glándulas en la base del limbo. Presentan domatios lentibuliformes en la superficie inferior y miden de 3 a 7 cm de largo por 2 a 3 cm de ancho. Los pecíolos son cortos (1–2 mm) y el raquis es pubescente (2–6 mm). La inflorescencia se desarrolla en capítulos globosos, axilares o terminales, con brácteas lanceoladas, tomentosas y caducas. Las flores son pequeñas (2–2.7 mm), sin pétalos, con hipantios pubescentes, cáliz de cinco lóbulos triangulares y cinco estambres. El fruto es un aquenio agrupado en capítulos globosos, suberoso-coriáceo, casi sésil, con alas laterales rígidas. La floración y fructificación se presentan principalmente en agosto. Esta especie muestra alta tolerancia a salinidad y su morfología la adapta a ambientes costeros salobres (Tomlinson, 1986; Von Linsingen y Cervi, 2007; Rivera-Monroy *et al.*, 2017; Suhardi *et al.*, 2024).

2.3 Ecología

Ecológicamente, se clasifica como una especie asociada a manglar, ya que tolera condiciones de alta salinidad, suelos anóxicos y periódicas inundaciones, pero también se desarrolla en suelos mejor drenados y menos salinos tierra adentro. Tiene resistencia a la salinidad, sequía y perturbaciones, y ofrecer hábitat para fauna local (Tomlinson, 1986; Perén, 2022,). Los manglares cumplen una función esencial en la protección las costeras, ya que estabilizan el litoral y a depurar el agua. Además, son clave para la conservación de la biodiversidad, al ofrecer refugio, áreas de reproducción y alimentación para múltiples especies marinas, lo que favorece el equilibrio ecológico y sustenta la productividad pesquera (Mhatre, 2024).

2.4 Tipo de vegetación

Los manglares se distinguen por una serie de adaptaciones únicas que les permiten prosperar en ambientes costeros y salinos. Entre estas adaptaciones se encuentra la dispersión de las semillas por el agua, aprovechando su flotabilidad, y la presencia de raíces con estructuras respiratorias que se encuentran por encima del nivel de la inundación, lo que les permite sobrevivir en ambientes anegados. También tienen la capacidad de excretar sal y su sistema reproductivo es vivíparo, es decir, el embrión comienza a germinar mientras aún se encuentra en la planta madre (Trejo-Torres, 2009). Aunque *C. erectus* no es considerada una especie de manglar según Tomlinson (1986); actualmente se sigue considerando especie asociada al manglar, ya que tiene semillas no vivíparas ni raíces aéreas especializadas como los manglares (Rivera-Monroy *et al.*, 2017).

2.5 Distribución de la especie en Tamaulipas

La distribución regional de los manglares está influenciada por las bajas temperaturas invernales, siendo el Trópico de Cáncer el límite norte para *R. mangle* L. y *L. racemosa* Gaertn, mientras que *A. germinans* Jacq y *C. erectus* pueden extenderse más allá de este paralelo (Rzedowski, 2006; Zamora-Tovar *et al.*, 2024). En las costas del Golfo de México, incluyendo Tamaulipas, se han registrado cuatro especies de mangles: *R. mangle*, *A. germinans*, *L. racemosa* y *C. erectus* (Zamora-Tovar *et al.* 2024). La Laguna Madre marca el límite norte de distribución de los manglares en México. En los alrededores de la laguna,

las temperaturas mínimas pueden descender por debajo de los 0 °C. Los manglares son influenciados por su distribución latitudinal, en zonas donde las temperaturas pueden bajar por debajo de los 0 °C, como el norte del Golfo de México. El manglar se ve afectado por cambios latitudinales en temperatura y precipitación, lo que genera manglares chaparros (Snedaker y Pool, 1973; López-Portillo y Ezcurra, 2002; Valderrama-Landeros *et al.*, 2024).

2.6 Estatus de conservación de la Laguna Madre

Laguna Madre es un Sitio Ramsar y humedal prioritario para las aves acuáticas migratorias. Además, es una Área de Importancia para la Conservación de las Aves, y una Región Terrestre Prioritaria (Arriaga *et al.*, 2000; Tova *et al.*, 2011). Es el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna Madre y Delta del Río Bravo, es el ecosistema hipersalino más grande de su tipo. Su biodiversidad es elevada debido a su ubicación entre las regiones biogeográficas Neártica y Neotropical (CONANP, 2005; SEMARNAT 2015).

2.7 Estatus de la especie

Esta especie se encuentra en la categoría de Amenazada, en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Sin embargo, no es una especie endémica de México, ya que se distribuye en diversas regiones tropicales y subtropicales alrededor del mundo (SEMARNAT, 2010).

2.8 Manejo e importancia en la economía rural

En el Estado de Nayarit se realizaba el aprovechamiento con beneficios a los ejidatarios. Debido a notificaciones realizadas con volúmenes muy elevados, así como la opinión de la delegación de SEMARNAP, a partir de 1994 no se autorizaron permisos en Nayarit (Valdez, 2004). El aprovechamiento sustentable de los manglares es regulado por la Norma Oficial Mexicana NOM-022-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2003). Los manglares tienen importancia no solo desde el punto de vista ecológico, sino que también social, ya que representan un para las comunidades, los ejidatarios tradicionalmente los han aprovechado.

Sin embargo, el valor de los manglares va más allá de su uso directo. También la conservación y restauración por sus funciones ecológicas y servicios ecosistémicos. En este sentido, la CONAFOR ha restaurado más de 7 mil hectáreas para recuperar manglares deteriorados (CONAFOR, 2018). Sin embargo, en lugar de preservar su capacidad natural de secuestro de carbono, están siendo alterados. Aproximadamente el 20% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero provienen de actividades como la deforestación y la quema de biomasa forestal. La eliminación del carbono de la atmósfera de manera biológica se hace por los organismos fotosintéticos con la capacidad para capturar CO₂ (Trumper *et al.*, 2009).

2.9 Ecuaciones de predicción de volumen

Los modelos más frecuentemente empleados para la estimación de volumen en especies de manglares, bosques tropicales y templados en diversos estudios, se muestran en el Cuadro 1. De estos los más utilizados se puede indicar para la estimación de volumen, corresponden a aquellos que utilizan dos variables predictoras de entrada, como el diámetro normal (D; 1.30 m) y la altura total (At), los cuales, permiten obtener estimaciones más precisas (Augusto y Guimarães, 2009; Telles *et al.*, 2018; Salas *et al.*, 2019). No obstante, también es posible encontrar modelos de una sola entrada, siendo el D la más utilizada (Monárrez-González *et al.*, 2024). Sin embargo, Hernández *et al.* (2023) en *P. oocarpa* Schiede ex Schltdl., y Hernández-Ramos *et al.* (2021) en *M. zapota* (L) P. Royen., emplearon modelos de 2 entradas con las variables D y At.

2.10 Los criterios de información

Los criterios de información de Akaike (AIC) y Bayesiano (BIC) sirven para la selección de modelos estadísticos, ya que permiten evaluar equilibrio entre el ajuste del modelo y su complejidad. Estos criterios penalizan la cantidad de parámetros, así se evita el sobreajuste y facilita la comparación entre los modelos (Burnham *et al.*, 2011).

El criterio de información de AIC usa la fórmula siguiente:

$$AIC = -2 \ln(L) + 2k$$

Donde:

L = Es la función de verosimilitud del modelo.

k = k es el número de parámetros estimados en el modelo.

In = Logaritmo natural.

Un menor valor de AIC indica un mejor ajuste del modelo, lo que permite una mejor estimación. Este criterio utilizado en estudios ecológicos, econométricos y de modelado ambiental, donde se busca optimizar la estimación sin sobreajuste (Aho y Peterson, 2014). Por su parte, el criterio de información BIC, propuesto por Schwarz (1978), se basa en una penalización por tamaño de la muestra, donde favorece los modelos más simples cuando la cantidad de datos es grande (Hernández, 2023).

El criterio de información de BIC usa la fórmula siguiente:

$$BIC = -2 \ln(L) + k \ln(n)$$

L = Es la función de verosimilitud del modelo.

k = k es el número de parámetros estimados en el modelo.

In = Logaritmo natural.

n = Es en número de observaciones.

Lo ideal es usar los dos criterios, para complementar el uno con el otro en los estudios. Aho y Peterson (2014) recomiendan que el AIC es mejor cuando la estimación es el objetivo principal, mientras que el BIC es conveniente cuando se busca seleccionar los modelos más sencillos. Asimismo, se ha demostrado que la diferencia entre ambos criterios puede ser significativa en tamaños de muestras pequeñas. En estos casos, el BIC tiende a seleccionar modelos más simples que el AIC, lo que resulta en una menor capacidad de estimación, pero una mejor interpretación del modelo (Vrieze, 2012).

Cuadro 1. Ecuaciones de predicción de volumen encontradas en la literatura.

No.	Nombre	Modelo	Autor (es)/Año/Especie/Lugar
1	Schumacher y Hall	$V = b_0(D^{b_1}At^{b_2})$	Ramos <i>et al.</i> (2014). Dos especies de <i>Pinus</i> de la Sierra Purhépecha, Michoacán.
			Gómez <i>et al.</i> (2018). <i>Hevea brasiliensis</i> Müell Arg. Tabasco México.
			Rueda-Sánchez <i>et al.</i> (2020). <i>Tectona grandis</i> L. f. en plantaciones del centro-occidente de México.
			Guzmán-Santiago <i>et al.</i> (2020). <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schlttdl. & Cham. en diferentes entidades federativas de México.
			Hernández-Ramos <i>et al.</i> (2021). <i>Manilkara zapota</i> (L.) P. Royen en Quintana Roo, México.
			Vargas-Larreta <i>et al.</i> (2021). Cinco especies de pino en el estado de Durango, México.
			Muñoz-Flores <i>et al.</i> (2021). <i>Cedrela odorata</i> L. en plantaciones forestales en Colima, Jalisco y Nayarit, México.
			Rueda-Sánchez <i>et al.</i> (2022). <i>Gmelina arborea</i> Roxb., en la costa de Jalisco, México.
			Silva <i>et al.</i> , (2023). <i>Alnus acuminata</i> Kunth en región Amazonas, en el norte de Perú.
			Westfall <i>et al.</i> (2024). Un sistema de modelado de volumen, biomasa y carbono de árboles a escala nacional para los Estados Unidos.
2	Spurr Variable Combinada 1	$V = b_0(D^2At)^{b_1}$	Ross <i>et al.</i> (2001). <i>Avicennia germinans</i> Laguncularia racemosa y <i>Rhizophora mangle</i> . Parque Nacional Biscayne, Florida, USA.
			Ramos-Uvilla <i>et al.</i> (2014). Dos especies de <i>Pinus</i> de la Sierra Purhépecha, Michoacán.
			Rueda-Sánchez <i>et al.</i> (2020). <i>Tectona grandis</i> L. f en plantaciones del centro-occidente de México.
			Muñoz-Flores <i>et al.</i> (2021). <i>Cedrela odorata</i> L. en plantaciones forestales en Colima, Jalisco y Nayarit, México.
			Hernández-Ramos <i>et al.</i> (2021). <i>Manilkara zapota</i> (L.) P. Royen en Quintana Roo, México.
			Rueda-Sánchez <i>et al.</i> (2022). <i>Gmelina arborea</i> Roxb., en la costa de Jalisco, México.
Silva <i>et al.</i> (2023). <i>Alnus acuminata</i> Kunth en región Amazonas, en el norte de Perú.			

Cuadro 1. Ecuaciones de predicción de volumen encontradas en la literatura, continuación.

No.	Nombre	Modelo	Autor (es)/Año/Especie/Lugar
3	Spurr Variable Combinada 2	$V = b_0 + b_1(D^2At)$	Moret <i>et al.</i> (1998). <i>Tectona grandis</i> L. f. Estado Barinas–Venezuela. Valdez (2004). <i>Laguncularia racemosa</i> Marismas Nacionales, Nayarit. Gómez <i>et al.</i> (2018). <i>Hevea brasiliensis</i> Müell Arg. Tabasco México. Guzmán-Santiago <i>et al.</i> (2020). <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. & Cham. en diferentes entidades federativas de México. Vargas-Larreta <i>et al.</i> (2021). Cinco especies de pino en el estado de Durango, México. Silva <i>et al.</i> (2023). <i>Alnus acuminata</i> Kunth en región Amazonas, en el norte de Perú.
4	Australiano	$V = b_0 + b_1(D^2) + b_2(At) + (b_3(D^2H))$	Moret <i>et al.</i> (1998). <i>Tectona grandis</i> L. f. Estado Barinas–Venezuela. Tapia y Návar. (1998). <i>Pinus teocote</i> en bosques de pino, Nuevo León México. De Oca Cano <i>et al.</i> (2008). <i>Pinus durangensis</i> en la comunidad Las Flechas, Durango, México. Vargas-Larreta <i>et al.</i> (2021). Cinco especies de pino en el estado de Durango, México.
5	Thornber	$V = b_0(At/D)^{b_1} (D^2At)$	Ramos-Uvilla <i>et al.</i> (2014). Dos especies de <i>Pinus</i> de la Sierra Purhépecha, Michoacán. Rueda-Sánchez <i>et al.</i> (2020). <i>Tectona grandis</i> L. f. plantaciones del centro-occidente de México. Muñoz-Flores <i>et al.</i> (2021). <i>Cedrela odorata</i> L. en plantaciones forestales en Colima, Jalisco y Nayarit, México. Rueda-Sánchez <i>et al.</i> (2022). <i>Gmelina arborea</i> Roxb., en la costa de Jalisco, México.
6	Korsun	$V = b_0(D+1)^{b_1}(At)^{b_2}$	Ramos-Uvilla <i>et al.</i> (2014). Dos especies de <i>Pinus</i> de la Sierra Purhépecha, Michoacán. Rueda-Sánchez <i>et al.</i> (2020). <i>Tectona grandis</i> L. f. plantaciones del centro-occidente de México. Muñoz-Flores <i>et al.</i> (2021). <i>Cedrela odorata</i> L. en plantaciones forestales en Colima, Jalisco y Nayarit, México. Rueda-Sánchez <i>et al.</i> (2022). <i>Gmelina arborea</i> Roxb., en la costa de Jalisco, México.
7	Meyer	$V = b_0(D)^{b_1} (D^2At)^{b_2}$	Moret <i>et al.</i> (1998). <i>Tectona grandis</i> L. f. Estado Barinas–Venezuela. Hernández-Ramos <i>et al.</i> (2018). <i>Swietenia macrophylla</i> King. Quintana Roo, México. Revilla <i>et al.</i> (2021). <i>Guazuma crinita</i> Aguaytía, región Ucayali, Perú.
8	Meyer Modificado	$V = b_0 + b_1(D^2) + b_2(D^2At)$	Moret <i>et al.</i> (1998). <i>Tectona grandis</i> L. f. Estado Barinas–Venezuela. De Oca Cano, E. <i>et al.</i> (2008). <i>Pinus durangensis</i> en la comunidad Las Flechas, Durango, México. Gómez <i>et al.</i> (2018). <i>Hevea brasiliensis</i> Müell Arg. Tabasco México.

Cuadro 1. Ecuaciones de predicción de volumen encontradas en la literatura, continuación.

No.	Nombre	Modelo	Autor (es)/Año/Especie/Lugar
9	Spurr Potencial	$V = b_0(DAt)^{b_1}$	Silva-García <i>et al.</i> (2018). <i>Prosopis articulata</i> S. Watson y <i>Lysiloma divaricata</i> (Jacq.) J. F. Macbr. en el noroeste de México. Guzmán-Santiago <i>et al.</i> , (2020). <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltldl. & Cham. en diferentes entidades federativas de México. Vargas-Larreta <i>et al.</i> (2021). Cinco especies de pino en el estado de Durango, México.
10	Berkhout	$V = b_0 + b_1(D)$	Moret <i>et al.</i> (1998). <i>Tectona grandis</i> L. f. Estado Barinas–Venezuela. Gómez <i>et al.</i> (2018). <i>Hevea brasiliensis</i> Müell Arg. En plantaciones, Tabasco. Revilla <i>et al.</i> (2021). <i>Guazuma crinita</i> en Aguaytía, región Ucayali, Perú.
11	Kopezky-Gehrhardt	$V = b_0 + b_1(D^2)$	Moret <i>et al.</i> (1998). <i>Tectona grandis</i> L. f. Estado Barinas–Venezuela. Gómez <i>et al.</i> (2018). <i>Hevea brasiliensis</i> Müell Arg. En plantaciones, Tabasco. Revilla <i>et al.</i> (2021). <i>Guazuma crinita</i> Aguaytía, región Ucayali, Perú.
12	Honner	$V = D^2 / (b_0 + b_1(1/At))$	Guzmán-Santiago <i>et al.</i> (2020). <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltldl. & Cham. en diferentes entidades federativas de México. Hernández-Ramos <i>et al.</i> (2021). <i>Manilkara zapota</i> (L.) P. Royen en Quintana Roo, México. Vargas-Larreta <i>et al.</i> (2021). Cinco especies de pino en el estado de Durango, México.
13	Husch (1963)	$V = b_0(D^{b_1})$	Gómez G <i>et al.</i> (2018). <i>Hevea brasiliensis</i> Müell Arg. Tabasco México. Revilla <i>et al.</i> (2021). <i>Guazuma crinita</i> Aguaytía, región Ucayali, Perú. Silva <i>et al.</i> (2023). <i>Alnus acuminata</i> Kunth en región Amazonas, en el norte de Perú.
14	Variable continua	$V = b_0 D^{b_1(1 - \exp^{-(b_2 D)})^{b_3}}$	Revilla <i>et al.</i> (2021). <i>Guazuma crinita</i> Aguaytía, región Ucayali, Perú. Westfall <i>et al.</i> (2024). Un sistema de modelado de volumen, biomasa y carbono de árboles a escala nacional para los Estados Unidos.
15	Stoate (1945)	$V = b_0 + b_1(D^2) + b_2(D^3) + b_3(DAt)$	Gómez <i>et al.</i> (2018). <i>Hevea brasiliensis</i> Müell Arg. Tabasco México. Revilla <i>et al.</i> (2021). <i>Guazuma crinita</i> Aguaytía, región Ucayali, Perú.

Cuadro 1. Ecuaciones de predicción de volumen encontradas en la literatura, continuación.

No.	Nombre	Modelo	Autor (es)/Año/Especie/Lugar
16	Spurr 1	$V = b_0(D^2) (At)$	Vargas-Larreta <i>et al.</i> (2021). Cinco especies de pino en el estado de Durango, México. Silva <i>et al.</i> (2023). <i>Alnus acuminata</i> Kunth en región Amazonas, en el norte de Perú.
17	Variable combinada generalizada incompleta	$V = b_0 + b_1(H) + b_2(D)^2(At)$	Guzmán-Santiago <i>et al.</i> (2020). <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. & Cham. en diferentes entidades federativas de México. Vargas-Larreta <i>et al.</i> (2021). Cinco especies de pino en el estado de Durango, México.
18	Naslund Slobada	$V = b_0 + b_1(At) + b_2(DAt) + b_3(D^2At)$	Tapia y Nívar. (1998). <i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltld. & Cham. en bosques de pino, Nuevo León México. De Oca Cano <i>et al.</i> (2008). <i>Pinus durangensis</i> M. en la comunidad Las Flechas, Durango, México.
19	Naslund Slobada Modificada	$V = b_0(D^2) + b_1(D^2At) + b_2(DAt^2) + b_3At^2$	De Oca Cano <i>et al.</i> (2008). <i>Pinus durangensis</i> M. en la comunidad Las Flechas, Durango, México.
20	Takata	$V = (D^2H) / (b_0 + (b_1(D)))$	De Oca Cano <i>et al.</i> (2008). <i>Pinus durangensis</i> M. en la comunidad Las Flechas, Durango, México.
21	Ramas	$V = b_0 (D^2)$	Guzmán-Santiago <i>et al.</i> (2020). <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. & Cham. en diferentes entidades federativas de México.
22	Newnham	$V = b_0 + b_1(D)^{b_2}(At)^{b_3}$	Vargas-Larreta <i>et al.</i> (2021). Cinco especies de pino en el estado de Durango, México.
23	Brenac	$\text{Log}(V) = b_0 + b_1 \text{Log}(D) + b_2(D^{-1})$	Silva <i>et al.</i> (2023). <i>Alnus acuminata</i> Kunth en región Amazonas, en el norte de Perú.
24	Wiley modificado	$V = b_0(D^{b_1})(At^{b_2}) \text{Exp}^{-(b_3(D))}$	Westfall <i>et al.</i> (2024). Un sistema de modelado de volumen, biomasa y carbono de árboles a escala nacional para los Estados Unidos.
25	Hohenadl-Krenn	$V = b_0 + b_1(D) + b_2(D^2)$	Gómez <i>et al.</i> (2018). <i>Hevea brasiliensis</i> Müell Arg. Tabasco México.

Donde: V: Volumen (m³); Log: logaritmo natural; b₀, b₁, b₂ b₃: coeficientes de regresión; Exp: exponencial; D: Diámetro normal (cm); At: Altura total (m).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área de estudio

La Pesca, municipio de Soto la Marina en el Estado de Tamaulipas, México (Figura 1). Ubicada en la costa central del Golfo de México (24° 28' 00" de latitud norte y 97° 53' 00" de longitud oeste), con una altitud media de 3 m (INEGI, 2010a). Esta región tiene un entorno caracterizado por playas, manglares y áreas de pesca marina, con acceso a través de carreteras costeras y posiblemente acceso marítimo (INEGI, 2010a). En el Cuadro 2 se muestran las características fisiográficas, edáficas y biológicas del área de estudio.

Cuadro 2. Características fisiográficas, edáficas y biológicas de la localidad de La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Categoría	Descripción
Hidrografía	- Subcuencas: RH25Af L y RH25Ba R.
	- Principales cuerpos de agua: Río Soto La Marina, Laguna Morales, Laguna La Pesca, Presa El Cuchillo y Presa Marte R. Gómez.
	- Importancia: Recursos hídricos clave para el desarrollo económico y social de la región; necesidad de conservación y protección.
Fisiografía	- Llanura costera con pendiente suave hacia el Golfo de México.
	- Sin elevaciones significativas.
Geología	- Sedimentos cuaternarios (arena, arcilla, limo).
	- Rocas sedimentarias más antiguas a mayor profundidad.
Suelos	- Tipos: Arenosos (Cambisoles) y arcillosos (Vertisoles).
	- Propiedades: Ricos en nutrientes, aptos para agricultura y ganadería.
Clima	- Fórmula climática: (A) C (w0).
	- Tipo: Cálido y húmedo.
	- Temperatura media anual: 24°C.
	- Precipitación media anual: 1,000 mm.
	- Patrón de lluvias: Verano lluvioso; inviernos secos y templados.

Cuadro 2. Características fisiográficas, edáficas y bilógicas de la localidad de Soto La Marina, Tamaulipas, continuación.

Categoría	Descripción
Vegetación	- Original: Manglar y vegetación halófila.
	- Actual: Manglar y vegetación halófila y matorrales. - Especies comunes: <i>Rizophora mangle</i> , <i>Avicennia germinans</i> , <i>Laguncularia racemosa</i> y <i>Conocarpus erectus</i> .
Fauna	- Aves: <i>Pelecanus occidentalis</i> , <i>Sterna máxima</i> , <i>Larus atricilla</i> , <i>Egretta thula</i> .
	- Reptiles: <i>Iguana</i> sp., del orden <i>Testudines</i> y del suborden <i>Serpentes</i> .
	- Mamíferos: <i>Odocoileus virginianus</i> , <i>Canis latrans</i> , <i>Dasyopus novemcinctus</i> .

Donde: RH25: Región Hidrológica 25; A y B: Subregión; f y a: Subcuenca; L y R: Indica el lado del margen del cauce principal. Fuente: (Miranda y Hernández, 1963; INEGI, 2001; INEGI, 2008; INEGI, 2010b; Ramírez y Flores, 2014; INEGI, 2018; INEGI, 2024a; INEGI, 2024b).

3.2 Diseño de muestreo

En este estudio, se aplicó un muestreo dirigido con el propósito de identificar y seleccionar los mejores individuos de la especie en estudio. Esto permitió incluir individuos de todas las categorías diamétricas presentes en la población y garantizar una representación adecuada de la variabilidad existente (Otzen y Manterola, 2017; Arrogante, 2021).

3.3 Selección y tamaño de la muestra

Para el estudio, se seleccionaron 135 árboles de distintos diámetros, con el fin de que representaran las categorías mínima y máxima encontradas en el área de estudio. Se verificó que los árboles presentaran un fuste y una copa en buen estado, sin plagas, enfermedades, malformaciones ni daños. La muestra se dividió en cinco categorías diamétricas (<5, 5, 10, 15 y 20 cm), estas secciones se usaron para calcular el volumen por tipos dendrométricos y así calcular el volumen por secciones, con un promedio mínimo de 37 árboles por categoría, cantidad considerada estadísticamente representativa (Cuadro 3) (Garrido *et al.*, 2018).

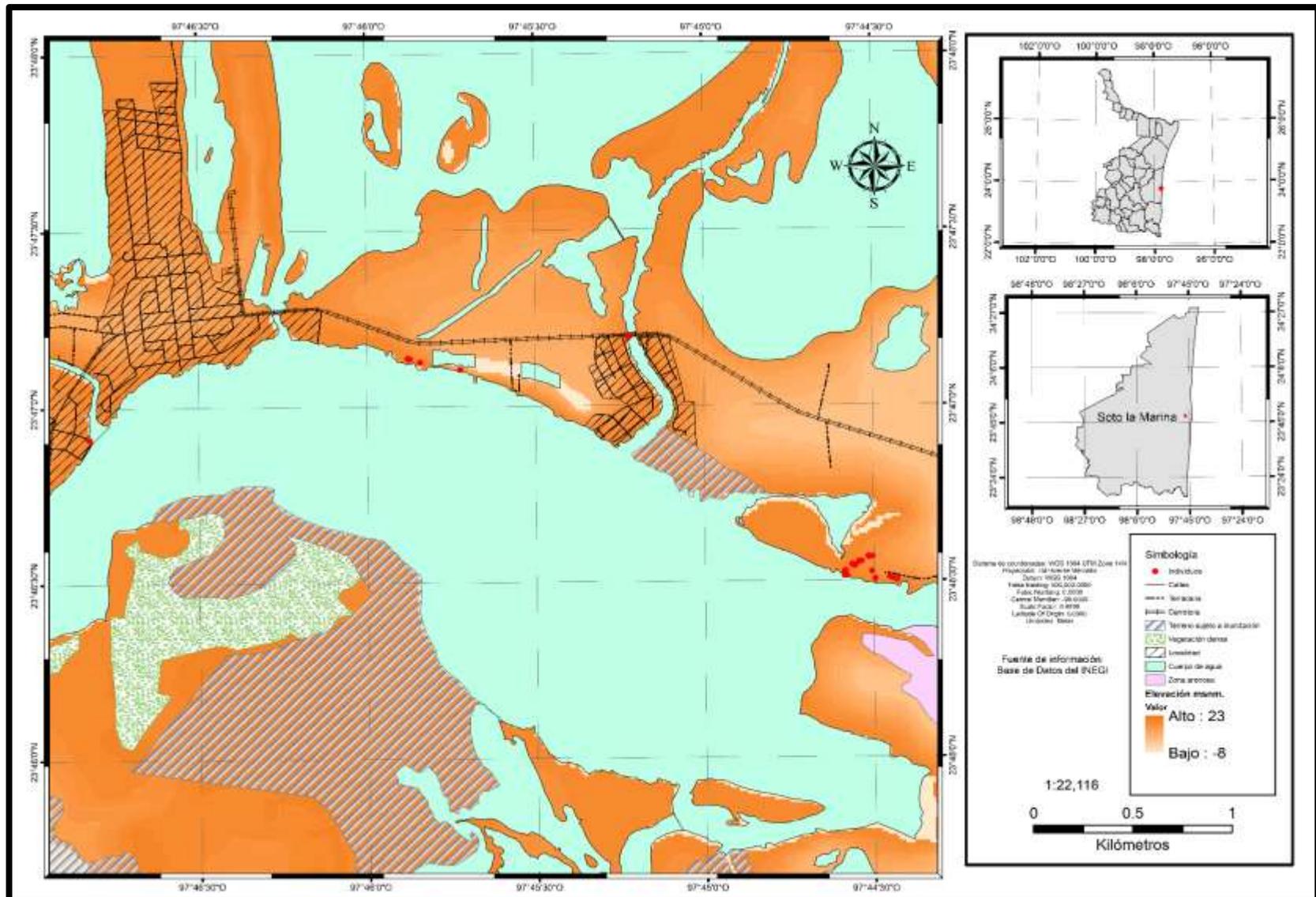


Figura 1. Ubicación general del área de estudio para la medición de las variables dasométricas en *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

3.4 Medición de variables

De cada árbol seleccionado se registró la siguiente información: número de árbol, coordenadas UTM (latitud y longitud), diámetro a la base (D; cm), diámetros por sección (tronco y ramas) y altura total (At; m). Las coordenadas fueron determinadas con un GPS Garmin. El árbol fue seccionado desde la base hasta los 0.30 m y posteriormente en intervalos de 0.5 m, registrando los diámetros hasta alcanzar un mínimo de 0.2 cm. En el caso de las ramas, se midieron todas aquellas con un diámetro igual o mayor a 0.5 cm. Estas se dividieron en segmentos de 0.5 m, registrando el diámetro en cada sección hasta alcanzar un diámetro mínimo de 0.2 cm. Para estas mediciones se utilizó un flexómetro, cinta diamétrica y cinta métrica.

La captura de datos se realizó en el programa de Excel 2013, donde cada individuo se organizó en su CD correspondiente, desde la categoría diamétrica <5 cm hasta la de 20 cm y con su altura correspondiente. Así mismo, cada una de las variables medidas se organiza por cada árbol. Las ramas se estructuraron de forma que permitirán procesar la información y obtener el volumen total del árbol (VTA; m³) y el volumen del fuste total (VFT; m³) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Número de individuos por categoría diamétrica y altura total de *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

		Categoría en altura (m)			Total
		<5	5	10	
Categoría diamétrica (cm)	<5	33 (10)	4 (1)	0	37
	5	33 (10)	15 (5)	0	48
	10	6 (2)	33 (10)	0	39
	15	0	10 (3)	1	11
	Total	72	62	1	135

*Los individuos entre paréntesis son los utilizados para la validación del modelo.

3.5 Cálculo del volumen individual del fuste por tipos dendrométricos

Los troncos de los árboles seleccionados presentan una forma regular o simétrica del fuste y presentan una notable similitud con los tipos dendrométricos, por lo que se aplicaron las fórmulas dendrométricas de neiloide truncado, el cono, cono truncado y Smalian (Aldana, 2008; Romahn y Ramírez, 2010).

3.5.1 Volumen del tocón

Para calcular el volumen del tocón, se utilizó la fórmula del tipo dendrométrico del neiloide truncado. Esta elección se fundamenta en que el tocón presenta una similitud al tipo dendrométrico del neiloide truncado (Monárrez-González *et al.*, 2024).

La fórmula utilizada es la siguiente:

$$V_{NT} = \frac{L}{4} * [S_0 + S_1 + \sqrt[3]{S_0 * S_1} * (\sqrt[3]{S_0} + \sqrt[3]{S_1})]$$

Donde:

V_{NT} = Volumen del neiloide truncado en (m³).

L = Longitud de la troza en (m).

S_0 = Área del diámetro de la base en (m²).

S_1 = Área del diámetro superior en (m²).

3.5.2 Volumen del fuste

Para las secciones de 0.5 metros del fuste se utilizó la fórmula de Smalian útil cuando se cuenta con los dos diámetros de la troza, siendo esta muy precisa, usada para calcular volumen de un paraboloides truncado, que es la forma de las trozas pequeñas generadas al seccionar el fuste, por eso se optó por utilizar la fórmula de Smalian, en estas secciones no se tomó en cuenta el tocón (Cruz-Cobos *et al.*, 2023; Monárrez-González *et al.*, 2024).

La fórmula es la siguiente:

$$V_T = \frac{\pi}{4} * \left[\frac{D_0^2 + D_1^2}{2} \right] * L$$

Donde:

V_T = Volumen de la Troza en (m^3).

$\pi = 3.1416$.

D_0 = Diámetro inferior de la troza en (m).

D_1 = Diámetro superior de la troza en (m).

L = Longitud de la troza en (m).

3.5.3 Volumen de las ramas

Las ramas tienen una forma irregular en la base de estas, por lo tanto, se modelaron con el uso de la fórmula del cono truncado. Sólo se calculó el volumen de las ramas desde la primera sección de la rama hasta la penúltima con esta fórmula (Monárrez-González, 2024).

La fórmula es la siguiente:

$$V_{CT} = \frac{\pi}{4} * L * \left[\frac{D_1^2 + (D_1 * D_2) + D_2^2}{3} \right]$$

Donde:

V_{CT} = Volumen del cono truncado en (m^3).

$\pi = 3.1416$.

D_1 = Diámetro inferior de la troza en (m).

D_2 = Diámetro superior de la troza en (m).

L = Longitud de la troza en (m).

3.5.4 Volumen de la punta

Para la punta del fuste y la punta de las ramas se calculó con la fórmula del cono, dado al parecido a este tipo dendrométrico. Esto es posible ya que se midió la longitud total de la punta del fuste y de las ramas (Monárrez-González, 2024).

La fórmula utilizada es:

$$V_C = \frac{S_0 * L}{3}$$

Donde:

V_C = Volumen del cono en (m³).

S_0 = Área del diámetro de la base en (m²).

L = Longitud de la troza en (m).

3.6 Modelos de regresión utilizados

Los 12 modelos de predicción de volumen ajustados fueron seleccionados de la literatura por su frecuencia de uso en especies arbóreas de manglares, tropicales y coníferas, y que involucren dos variables independientes: el diámetro a la base (D) en (cm) y la altura total (At) en (m). Emplear una gran diversidad ecuaciones permite evaluar su ajuste de acuerdo con las diferentes formas de crecimiento fustal de la especie (Cuadro 4).

Cuadro 4. Modelos ajustados para la predicción de volumen de *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

No.	Nombre	Modelo
1	Schumacher y Hall	$V = b_0(D^{b_1}At^{b_2})$
2	Spurr Variable Combinada 1	$V = b_0(D^2At)^{b_1}$
3	Spurr Variable Combinada 2	$V = b_0 + b_1(D^2At)$
4	Australiano	$V = b_0 + b_1(D^2) + b_2(At) + (b_3(D^2At))$
5	Thornber	$V = b_0(At/D)^{b_1}(D^2At)$
6	Korsun	$V = b_0(D+1)^{b_1}(At)^{b_2}$
7	Meyer	$V = b_0(D)^{b_1}(D^2At)^{b_2}$
8	Meyer Modificado	$V = b_0 + b_1(D^2) + b_2(D^2At)$
9	Spurr Potencial	$V = b_0(DAt)^{b_1}$
10	Honner	$V = D^2 / (b_0 + b_1(1/At))$
11	Naslund Slobada Modificada	$V = b_0(D^2) + b_1(D^2At) + b_2(DAt^2) + b_3At^2$
12	Takata	$V = (D^2At) / (b_0 + (b_1(D)))$

Donde: V: Volumen (m³); b_0 , b_1 , b_2 , b_3 : coeficientes de regresión; D: Diámetro a la base (cm); At: Altura Total (m).

3.7 Análisis estadístico

El análisis y ajuste estadístico de los modelos elegidos se realizó en el programa Statistical Analysis System (SAS) para analizar las variables del estudio de D, At, VFT y VTA. Para lo cual se usó PROC UNIVARIATE en SAS con la opción NORMAL PLOT.

3.8 Criterios de elección del modelo

En la selección de un modelo de predicción de volumen, se evaluaron diversos criterios. Estos incluyeron el coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}), donde valores más altos cercanos a uno indican un mejor ajuste del modelo. También se consideró la raíz del cuadrado medio del error (RCME), siendo preferible un valor menor, especialmente al comparar dos o más modelos con la misma unidad de medida en la variable dependiente. Además, se analizó el cuadrado medio del error (CME), buscando el modelo con el CME más bajo. Asimismo, el error estándar de la estimación (SEE), que cuantifica la precisión del modelo, siendo preferible un valor más bajo para indicar un ajuste más preciso, lo que indica una mejor capacidad de estimación del volumen (Draper y Smith ,1998; Montgomery *et al.*, 2021). El código usado para el ajuste de los modelos lineales y no lineales fue PROC MODEL en SAS para ajustar los modelos.

Para la elección del modelo de forma más completa, se tomaron en cuenta otros criterios, como el criterio de información de Akaike (AIC), que evalúa la calidad del modelo considerando tanto la bondad de ajuste como la complejidad del modelo, penalizando por el número de parámetros; un valor más bajo del AIC sugiere un modelo más eficiente (Akaike, 1974; Cruz-Cobos, 2023). De igual forma, el criterio de información bayesiano (BIC) penaliza de manera más severa el número de parámetros, siendo también preferible un valor bajo para indicar un modelo de alta calidad y menor complejidad (Schwarz, 1978; Garate-Quispe y Florez-Castillo, 2023).

Además, se realizaron gráficos de residuos para verificar la homogeneidad de varianzas y la normalidad de los residuos, lo cual es fundamental para asegurar que las suposiciones del modelo se mantienen, mejorando la validez de las estimaciones. Estos criterios se utilizan en conjunto para determinar el modelo más adecuado para la predicción del volumen de los

árboles. Para estos criterios se ajusta el modelo con el método de máxima verosimilitud completa (FIML).

Para justificar la calidad de la predicción de la ecuación seleccionada, se realizaron varias pruebas o test para verificar el cumplimiento de los supuestos:

- La prueba de White se usó para identificar heterocedasticidad en los modelos. Esto significa que la variabilidad del error no es constante a lo largo de los residuos. En esta prueba si el valor p es menor que 0.05 a un nivel de confiabilidad del 95% indica que no hay evidencia de homocedasticidad (White, 1980; Montgomery *et al.*, 2021). Para ejecutar esta prueba se usó el código de WHITE en SAS.
- La prueba de Durbin-Watson (DW) se utilizó detectar la autocorrelación en los residuos de un modelo, es decir, si los errores son dependientes entre sí. Un valor obtenido entre 1.5 y 2.5, indica que no hay evidencia de autocorrelación, si es menor a 1.5, indica autocorrelación positiva; y si es mayor a 2.5, sugiere autocorrelación negativa, a un nivel de confiabilidad del 95% (Durbin y Watson, 1992; Mardiatmoko, 2024). En este caso se utilizó en SAS en comando de DW.
- Con prueba de Shapiro-Wilk (W) se evaluó si los residuos siguen una distribución normal. Si el valor de p es menor que 0.05 se concluye que los datos no siguen una distribución normal, con una confiabilidad del 95% (Shapiro y Wilk, 1965; Tapia y Cevallos, 2021). Por su parte, NORMAL fue el código de SAS usado para la prueba de normalidad.

3.9 Validación de las ecuaciones de predicción de volumen

Para la validación de modelos se utilizó un 30% de árboles del tamaño de muestra total (Tapia y Návar, 2011; Cruz-Cobos *et al.*, 2023), lo que corresponde a 41 individuos. La selección de estos árboles se sacó de manera arbitraria para asegurarse de no dejar alguna categoría sin

individuos. Los individuos seleccionados no se incluirán para prueba estadística para la selección del modelo.

La selección y aplicación precisa de la ecuación, no sólo se debe considerar criterios de elección de un modelo, además de esto también se debe considerar su validación estadística mediante indicadores. Según Prodan *et al.* (1997), los estadísticos de validación como la raíz del error medio cuadrático (RCME), el error medio absoluto (EMA), el sesgo (E), y la diferencia agregada (DA) y (DA%), permiten evaluar el desempeño del modelo. Los modelos a elegidos para la elaboración de las tablas fueron los que tuvieron en estos estadísticos los valores menores o cercanos a cero en conjunto con los estadísticos obtenidos en el proceso de entrenamiento (Gómez *et al.*, 2018; Hernández-Ramos *et al.*, 2018; Hernández *et al.*, 2023).

Raíz cuadrada del error medio cuadrático (RCME).

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum(O_1 - E_i)^2}{n}}$$

Error medio absoluto (EMA).

$$EMA = \sum |O_1 - E_i| / n$$

Sesgo (E).

$$E = \sum (O_1 - E_i) / n$$

Diferencia agregada en porcentaje (DA%).

$$DA\% = \left(\frac{E}{\bar{O}_1}\right) * 100$$

Donde:

\sum = Sumatoria.

O_1 = Valor observado.

\bar{O}_1 = Media de la variable dependiente

E_i = Valor estimado.

n = Número total de observaciones.

Para esto se siguió una metodología de calificación donde se asigna valores del 1 al 5 a diversos estadísticos de validación (REMC, EMA, E, DA y DA%), donde 1 indica el mejor desempeño. Se suman las calificaciones de cada modelo, y el de menor puntuación total se consideró el más adecuado (Sakici *et al.*, 2008; Tamarit *et al.*, 2014).

3.10 Construcción de la tabla de predicción de volumen

Con los mejores modelos se elaboraron las tablas de predicción de VFT y VTA en función del diámetro a la base (D ; cm) y la altura total (At ; m). Con esta ecuación se podrá predecir el volumen de las dos formas para la especie *C. erectus*, en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Ajuste y selección de las ecuaciones

Los 12 modelos y sus respectivos parámetros de regresión, obtenidos al realizar los ajustes, se presentan en los Cuadros 5 y 6. Todas las ecuaciones obtenidas resultaron significativas a un nivel de confianza del 95%. Ramírez (2017), menciona que un modelo es altamente significativo cuando sus parámetros tienen valores de $p < 0.05$.

Cuadro 5. Parámetros de las ecuaciones de predicción de volumen fuste total en *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

No.	Ecuación de predicción de volumen fuste total	P> F
1	$V = 0.000092(D^{1.394292} At^{0.984069})$	<0.0001
2	$V = 0.000081(D^2 At)^{0.782133}$	<0.0001
3	$V = 0.00076 + 0.000017(D^2 At)$	<0.0001
4	$V = -0.00139 + 0.000018(D^2) + 0.000898(At) + (0.000011(D^2 At))$	<0.0001
5	$V = 0.000023(H/D)^{0.231053} (D^2 At)$	<0.0001
6	$V = 0.000056(D+1)^{1.53769} (At)^{1.53769}$	<0.0001
7	$V = 0.000092(D)^{-0.57385} (D^2 At)^{0.984069}$	<0.0001
8	$V = 0.000623 + 0.000009469(D^2) + 0.000016(D^2 At)$	<0.0001
9	$V = 0.000111(D At)^{1.191049}$	<0.0001
10	$V = D^2 / (2665.02 + 40819.93(1/At))$	<0.0001
11	$V = 0.000039 (D^2) + 0.000001642(D^2 At) + 0.000019(D At^2) + 0.00005 At^2$	<0.0001
12	$V = (D^2 At) / (17527.16 + (2664.897(D)))$	<0.0001

Donde: V: Volumen fuste total (m³); D: Diámetro a la base (cm); At: Altura total (m).

Cuadro 6. Parámetros de las ecuaciones de predicción de volumen total árbol en *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

No.	Ecuación de predicción de volumen total árbol	P> F
1	$V = 0.000094(D^{1.944672}At^{0.452888})$	<0.0001
2	$V = 0.000125(D^2At)^{0.810558}$	<0.0001
3	$V = 0.001005 + 0.000033(D^2At)$	<0.0001
4	$V = -0.00186 + 0.000099(D^2) + 0.000681(At) + (0.000012(D^2At))$	<0.0001
5	$V = 0.000023(At/D)^{-0.38077} (D^2At)$	<0.0001
6	$V = 0.000049(D+1)^{2.131191}(At)^{0.453022}$	<0.0001
7	$V = 0.000094(D)^{1.038895} (D^2At)^{0.452888}$	<0.0001
8	$V = -0.00033 + 0.000093(D^2) + 0.000015(D^2At)$	<0.0001
9	$V = 0.000204(DAt)^{1.18699}$	<0.0001
10	$V = D^2 / (3617.899 + 11506.71(1/At))$	<0.0001
11	$V = 0.000098 (D^2) + 0.000009535(D^2At) + 0.000008884(DAt^2) + 0.000021At^2$	<0.0001
12	$V = (D^2At) / (17558.53 + (835.0594(D)))$	<0.0001

Donde: V: volumen total árbol (m³); D: Diámetro a la base (cm); At: Altura total (m).

4.2 Ajuste de los modelos y selección de los cinco mejores

4.2.1 Ecuaciones volumen fuste total

Para estimar el volumen fuste total, el modelo de mejor ajuste fue el M12 (Takata) con sus dos parámetros significativos ($p < 0.0001$) y un R^2_{aj} de 0.9596, lo que indica que el 95.96% del volumen es explicado por las variables diámetro a la base y altura total. En este tipo de estudios, se busca que estos valores sean los más altos. Por otro lado, el modelo 12 también presentó los valores más bajos y cercanos a cero en los indicadores de error, en lo cual se busca los valores más bajos, con un SSE de 0.000127, CME de 0.00000137 y una RCME de 0.00117. Estos valores reflejan una menor variabilidad en los residuos y, por lo tanto, una mejor precisión en las estimaciones del VFT (Cuadro 8). Asimismo, M12 obtuvo valores más bajos en AIC de -1010.9898 y en BIC de -1005.882. Esto indica que el modelo de Takata es el menos complejo y más estable, debido a que cuenta con sólo dos parámetros. La menor penalización en los criterios de información sugiere eficiencia y confiabilidad para la predicción del VFT (Hernández-Ramos *et al.*, 2022) (Cuadro 7).

El modelo de Takata ha demostrado ser el más adecuado en estudios como el de Garate-Quispe y Florez-Castillo. (2023) para *A. leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr en dos tipos de bosque en la Amazonia peruana. No obstante, también ha sido aplicado por De Oca Cano *et al.* (2008) en *P. durangensis* en la comunidad Las Flechas, Durango, donde no resultó ser el de mejor ajuste, y por Netto *et al.* (2025) en *P. taeda* L. en el sur de Brasil. Estos resultados sugieren que el modelo de Takata se ajusta mejor a especies tropicales que presentan una forma más irregular en el fuste en comparación con los pinos de forma más regular en el fuste.

Los modelos se sometieron a pruebas de cumplimiento de supuestos de regresión. En la prueba de White de heterocedasticidad, el M12 presentó un valor de $p = <0.0001$, por lo que se rechaza la hipótesis nula de homocedasticidad, por lo tanto, el modelo presentó problemas de heterocedasticidad, ya que en esta prueba se espera que los valores de p sean mayores a 0.05 para confirmar la constancia de la varianza de los errores. Cabe destacar que ningún modelo pasó la prueba, lo cual puede atribuirse a la naturaleza de los datos utilizados en el análisis. En estudios de modelado de volumen, es común que los datos provengan de árboles con diferentes características estructurales, lo que genera variaciones en la dispersión de los errores. En este caso, los datos fueron obtenidos de distintas secciones del árbol, lo que implica que la varianza de los residuos no es uniforme en toda la muestra (Cuadros 7 y 8).

Para corregir la heterocedasticidad, existen métodos como el uso de modelos autorregresivos, propuestos por Quiñonez-Barraza *et al.* (2018). Sin embargo, Prodan *et al.* (1997) señalan que en las variables biológicas es común que la varianza no sea constante. Además, Ramírez-Martínez *et al.* (2018) indican que el incumplimiento de los supuestos del análisis de regresión no afecta significativamente la capacidad de predicción de los modelos. Por ello, al considerar su uso práctico como una herramienta sencilla para modelar el volumen, se puede optar por utilizar el ajuste original sin aplicar correcciones por heterocedasticidad.

En cuanto a la prueba de Durbin-Watson, el modelo 12 obtuvo un valor de $DW = 2.1501$, lo que indica que los residuos son independientes y no presentan autocorrelación, ya que este valor se encuentra entre lo aceptable de 1.5 y 2.5 y es cercano a 2. Por último, en la prueba

de normalidad de residuos de Shapiro-Wilk el valor fue de $W = 0.85$. Dada que este valor el cercano a 1, se concluye que los residuos del modelo siguen una distribución normal, lo que respalda la validez estadística del ajuste del modelo (Cuadro 7).

Después de M12, los modelos que tuvieron mejor ajuste fueron, en orden de ajuste, el M1 (Schumacher y Hall), M7 (Meyer), M6 (Korsun) y M11 (Naslund Slobada Modificada). Estos modelos presentaron valores de R^2_{aj} de 0.9574, 0.9574, 0.9565 y 0.9526, respectivamente. En contraste, el modelo de menor ajuste fue el M7 (Honner), en comparación con los demás modelos evaluados, esto de acuerdo con los criterios de selección usados (Cuadros 7 y 8).

Estos resultados son consistentes con los hallazgos en otros estudios. Por ejemplo, Ramos-Uvilla *et al.* (2014) evaluaron dos especies de *Pinus* en la Sierra Purépecha de Michoacán, y encontraron que la mejor ecuación fue la de Schumacher y Hall, con un $R^2_{aj} = 0.996$ tanto para *Pinus lawsonii* Roetzl ex Gordon como para *P. oocarpa* Schiede ex Schltdl. Este alto desempeño se debe, en gran parte, al uso de variables transformadas a su forma logarítmica, lo que mejora el ajuste del modelo. De manera similar, el modelo de Korsun obtuvo valores de $R^2_{aj} = 0.995$ para ambas especies, lo que refuerza su fiabilidad. Asimismo, otros estudios han reportado resultados similares. Por ejemplo, Gómez *et al.* (2018) en *H. brasiliensis* y Cruz-Cobos *et al.* (2016) en *Arbutus* spp, también identificaron a Schumacher y Hall como el mejor modelo, lo que confirma su robustez y aplicabilidad en diversas especies forestales. En conjunto, estos hallazgos refuerzan la idea de que dicho modelo es una opción confiable y ampliamente utilizada en el modelado de volumen forestal.

Por su parte, Telles *et al.* (2018) en *T. grandis* en Nuevo Urecho, Michoacán, encontraron que el modelo de Meyer presentó el mejor ajuste, con un $R^2_{aj} = 0.8246$, inferior a lo obtenido en el presente estudio, lo que indica el buen desempeño de los modelos usados en este estudio. Así mismo, Hernández-Ramos *et al.* (2018) encontraron que Meyer fue el de mejor ajuste en *S. macrophylla* con una $R^2_{aj} = 0.9666$. Esto sugiere que, aunque el modelo de Meyer no fue el mejor en este estudio, su desempeño puede ser competitivo en otros contextos, dependiendo de las características de la especie y las variables utilizadas.

Se realizó un análisis gráfico de los cinco mejores modelos para la estimación del volumen fuste total, evaluando la relación entre los valores estimados y observados. En la Figura 2, se presentan los gráficos de estas variables, donde se observa que el M12 exhibe una R^2 de 0.9537. Pero el presentó la R^2 más alta fue el M1 con una R^2 de 0.959.

Aunque el M12 no presenta la R^2 más alta entre valores observados y estimados, se encuentra entre los mejores. El modelo que tiene la R^2 entre observados y estimados más baja de los cinco mejores es el M6 (R^2 de 0.9181). Además, se observa que todos los modelos analizados presentan valores de R^2 superiores a 0.9, lo que indica que en general, los modelos utilizados poseen una alta capacidad predictiva y son adecuados para estimar el volumen fuste total con un buen nivel de precisión. No obstante, el M4 en sus estimados en valores bajos de diámetro a la base y altura total, sus estimados son negativos, es algo que se debe tomar en cuenta por su imprecisión al estimar (Apéndices 1 y 2).

Cuadro 7. Comparación de estadísticos de ajuste de las ecuaciones de volumen fuste total, utilizadas para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Modelo	Parámetros	Estimación	P > t	SSE	CME	RCME	R ²	R ² _{aj}	Akaike (AIC)	Bayesiano (BIC)	White (X ²)		Durbin-Watson (DW)	Shapiro-Wilk	
											Estadístico	Probabilidad		Estadístico	Probabilidad
1	b ₀	0.000092	<.0001												
	b ₁	1.394292	<.0001	0.000133	0.000001447	0.0012	0.9583	0.9574	-1004.8158	-997.154	32.31	0.0002	2.099	0.84	<.0001
	b ₂	0.984069	<.0001												
2	b ₀	0.000081	<.0001												
	b ₁	0.782133	<.0001	0.000153	0.000001642	0.00128	0.9521	0.9516	-993.7788	-988.671	35.58	<.0001	2.0088	0.8	<.0001
3	b ₀	0.00076	0.0056												
	b ₁	0.000017	<.0001	0.000236	0.000002539	0.00159	0.926	0.9252	-952.392	-947.284	29.42	<.0001	1.3757	0.83	<.0001
4	b ₀	-0.00139	0.0327												
	b ₁	0.000018	0.0035												
	b ₂	0.000898	<.0001	0.00016	0.000001753	0.00132	0.95	0.9483	-985.6224	-975.407	31.33	0.0001	1.9963	0.89	<.0001
5	b ₃	0.000011	<.0001												
	b ₀	0.000023	<.0001												
6	b ₁	0.231053	<.0001	0.000252	0.000002715	0.00165	0.9209	0.9200	-946.0286	-940.921	46.66	<.0001	1.2366	0.83	<.0001
	b ₀	0.000056	<.0001												
6	b ₁	1.53769	<.0001	0.000139	0.000001508	0.00123	0.9565	0.9556	-1000.9126	-993.251	32.13	0.0002	2.0384	0.83	<.0001
	b ₂	1.53769	<.0001												

Donde: P<|t|: Probabilidad estadística; SSE: Error estándar; CME: Cuadrado medio del error; RCME: Raíz del cuadrado medio del error; R²: Coeficiente de determinación; R²_{aj}: Coeficiente de determinación ajustado.

Cuadro 8. Comparación de estadísticos de ajuste de las ecuaciones de volumen fuste total, utilizadas para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Modelo	Parámetros	Estimación	P > t	SSE	CME	RCME	R ²	R ² _{aj}	Akaike (AIC)	Bayesiano (BIC)	White (X ²)		Durbin-Watson (DW)	Shapiro-Wilk	
											Estadístico	Probabilidad		Estadístico	Probabilidad
7	b ₀	0.000092	<.0001												
	b ₁	-0.57385	<.0001	0.000133	0.000001447	0.0012	0.9583	0.9574	-1004.8158	-997.154	32.31	0.0002	2.099	0.84	<.0001
	b ₂	0.984069	<.0001												
8	b ₀	0.000623	0.0391												
	b ₁	0.000009469	0.0674	0.000231	0.000002515	0.00159	0.9275	0.9259	-952.3078	-944.646	37.94	<.0001	1.4673	0.82	<.0001
	b ₂	0.000016	<.0001												
9	b ₀	0.000111	<.0001												
	b ₁	1.191049	<.0001	0.000157	0.000001684	0.0013	0.9509	0.9504	-991.3758	-986.268	23.67	0.0003	1.8408	0.84	<.0001
10	b ₀	2665.02	0.0016												
	b ₁	40819.93	<.0001	0.000251	0.000002703	0.00164	0.9212	0.9203	-946.4176	-941.310	48.18	<.0001	1.4106	0.81	<.0001
11	b ₀	0.000039	0.0001												
	b ₁	0.000001642	0.7063	0.000146	0.000001607	0.00127	0.9541	0.9526	-993.8708	-983.655	32.44	0.0035	2.2179	0.81	<.0001
	b ₂	0.000019	0.0459												
12	b ₃	0.00005	0.3136												
	b ₀	17527.16	<.0001												
	b ₁	2664.897	<.0001	0.000127	0.00000137	0.00117	0.9601	0.9596	-1010.9898	-1005.882	30.42	<.0001	2.1501	0.85	<.0001

Donde: P<|t|: Probabilidad estadística; SSE: Error estándar; CME: Cuadrado medio del error; RCME: Raíz del cuadrado medio del error; R²: Coeficiente de determinación; R²_{aj}: Coeficiente de determinación ajustado.

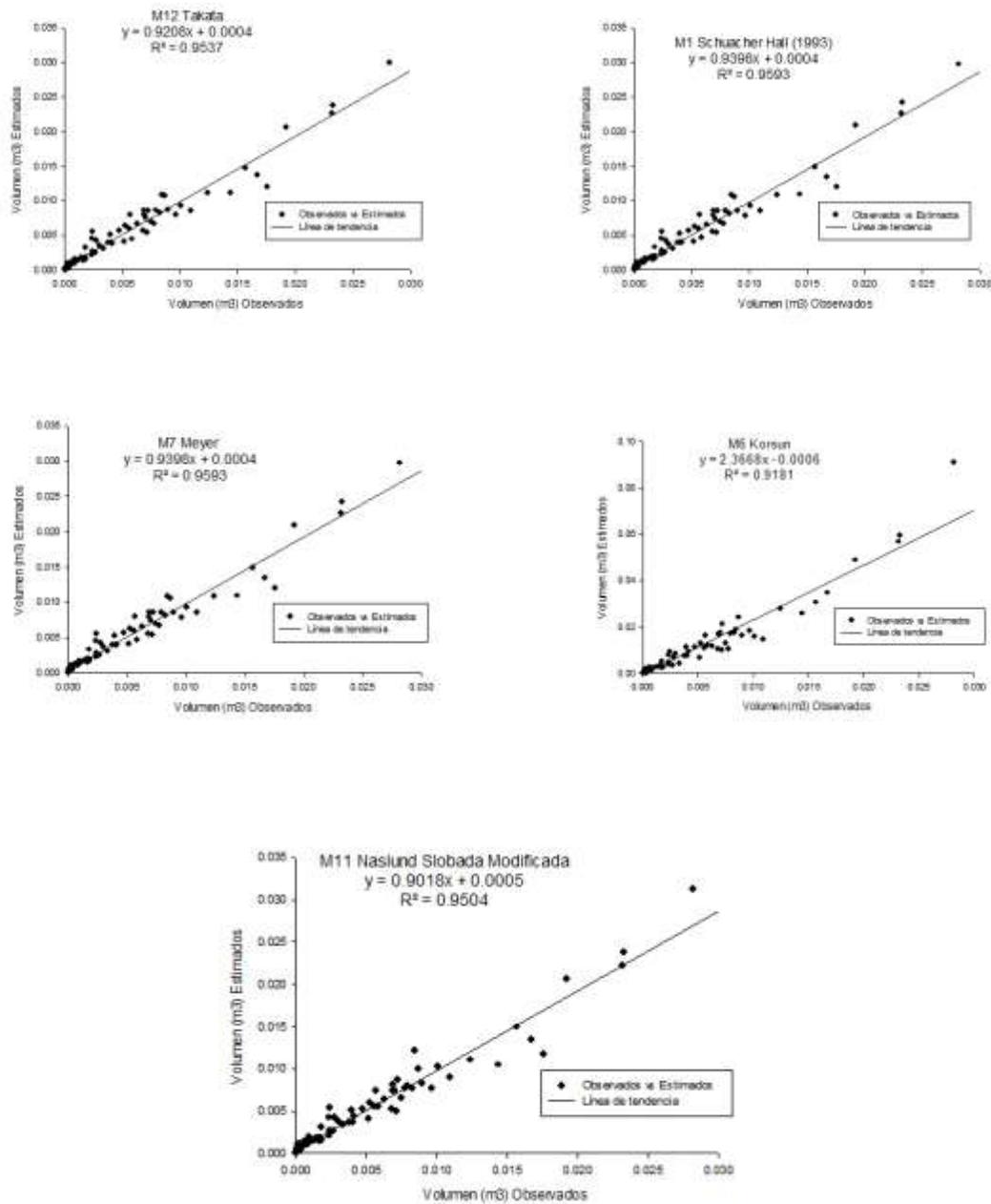


Figura 2. Comparación de gráfica de volumen observado contra volumen estimado de los cinco mejores modelos para volumen fuste total para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

4.2.2 Ecuaciones volumen total árbol

Para VTA el modelo que presentó la mejor R^2_{aj} con 0.8871, fue el M4 (australiano), pero este tuvo problemas en dos de sus cuatro parámetros al no ser estadísticamente significativos. Seguido de éste el segundo mejor modelo por su R^2_{aj} con 0.8850 fue M11 (Naslund Slobada Modificada), al igual que el anterior éste presentó problemas en sus parámetros, ya que tres de sus cuatro parámetros no son estadísticamente significativos, lo que nos sugiere que los modelos con más número de parámetros presentan problemas en la estimación para VTA de *C. erectus* en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas (Cuadro 10). Los resultados coinciden con los de Telles *et al.* (2018), quienes utilizaron los modelos Australiano y de Naslund para *T. grandis* en Nuevo Urecho, Michoacán, donde encontraron parámetros que no resultaron significativos.

Los modelos 8 y 10 presentaron una R^2_{aj} de 0.8850 pero el 8 tuvo mejor R^2 de 0.8874 contra la R^2 de 0.8863 del 10. El 8 tuvo problemas en uno de sus parámetros, por lo que se dio como mejor el 10 (Honner) por no presentar ningún problema en sus parámetros al ser estadísticamente significativos. Los indicadores de error que presentó el modelo 10, estos fueron de los más bajos: SSE = 0.00141, CME = 0.000015 y RCME = 0.00289 (Cuadro 11). En seguida, los siguientes en ajuste son M1 ($R^2_{aj} = 0.8848$), M7 ($R^2_{aj} = 0.8848$), M6 ($R^2_{aj} = 0.8836$) y M2 ($R^2_{aj} = 0.8793$), estos tuvieron valores muy similares (Cuadro 9 y 10).

Los resultados difieren de los encontrados por Hernández-Ramos *et al.* (2017) para *S. macrophylla*, donde el modelo de Honner presentó el menor ajuste con un R^2_{aj} de 0.8249, valor inferior al obtenido en el presente estudio. En contraste, Hernández-Ramos *et al.* (2021) encontraron que, aunque el modelo no fue el mejor para *M. zapota*, sí fue el segundo mejor, con un R^2_{aj} de 0.9353. La diferencia en las R^2_{aj} de este modelo depende en gran parte a las características morfológicas y de crecimiento de las especies (Picard *et al.*, 2012).

Por su parte en el AIC de -782.633 y BIC de -777.526, en ambos siendo el más bajo con respecto a los demás modelos. Por lo tanto, el modelo de Honner es el menos complejo en

con relación a sus parámetros (Cuadro 9). Por su parte Hernández-Ramos *et al.* (2021) en encontraron valores de (AIC = -177.2516) y (BIC = -161.3644) para Honner en *M. zapota*.

En las pruebas de cumplimiento de supuestos de regresión, el M10 presentó un valor de $p = <0.0001$ en la prueba de White de heterocedasticidad, presenta una varianza de los residuos heterocedastica y se rechaza la hipótesis nula de homocedasticidad. El M9 se destaca por ser el único que cumple este supuesto, pero no se eligió por ser el más bajo en el criterio de R^2_{aj} (0.8115) (Cuadro 9). El M10 obtuvo 2.2896 en la prueba de Durbin-Watson, por lo que no presentan autocorrelación en los residuos al ser independientes. Finalmente, en Shapiro-Wilk ($W = 0.71$) siguen una distribución normal de los residuos (Cuadro 10).

En el análisis gráfico de los valores estimados y observados para los cinco mejores modelos de estimación del volumen total árbol. Donde se afirma la elección del M10 (Honner) como mejor en la predicción del volumen total, ya que presenta la segunda mejor $R^2 = 0.8864$ (Figura 3). El modelo que presenta la R^2 más baja entre observados y estimados es el M2 con una R^2 de 0.8729. Si bien estos modelos no tienen una R^2 superior a 0.9 si están cercanos a esto, lo que quiere decir que son buenos para la predicción del volumen total árbol. Por otra parte, M4 y M8 presentan problemas al arrojar valores negativos en los estimados en valores bajos de diámetro a la base (D) y altura total, por lo que el M8 para VFT y el M4 tanto para VFT y VTA son imprecisos al estimar, para *C. erectus* en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas (Apéndices 3 y 4).

Cuadro 9. Comparación de estadísticos de ajuste de las ecuaciones de volumen total árbol, utilizadas para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Modelo	Parámetros	Estimación	P > t	SSE	CME	RCME	R ²	R ² _{aj}	Akaike (AIC)	Bayesiano (BIC)	White (X ²)		Durbin-Watson (DW)	Shapiro-Wilk		
											Estadístico	Probabilidad		Estadístico	Probabilidad	
1	b ₀	0.000094	0.0015													
	b ₁	1.944672	<.0001	0.00140	0.000015	0.0039	0.8873	0.8848	-781.467	-773.806	62.23	<.0001	2.3096	0.72	<.0001	
	b ₂	0.452888	<.0001													
2	b ₀	0.000125	<.0001													
	b ₁	0.810558	<.0001	0.00159	0.000017	0.00414	0.8717	0.8703	-771.157	-766.049	16.08	0.0066	2.2051	0.66	<.0001	
3	b ₀	0.001005	0.1938													
	b ₁	0.000033	<.0001	0.00185	0.00002	0.00446	0.8507	0.8491	-756.814	-751.706	10.07	0.0065	1.9759	0.63	<.0001	
4	b ₀	-0.00186	0.5207													
	b ₁	0.000099	<.0001													
	b ₂	0.000681	0.3492	0.00135	0.000015	0.00386	0.8907	0.8871	-782.444	-772.229	63.46	<.0001	2.3674	0.77	<.0001	
5	b ₃	0.000012	0.0271													
	b ₀	0.000023	<.0001													
	b ₁	-0.38077	<.0001	0.00173	0.000019	0.00431	0.8607	0.8592	-763.384	-758.276	45.21	<.0001	1.9375	0.71	<.0001	
6	b ₀	0.000049	0.0046													
	b ₁	2.131191	<.0001	0.00141	0.000015	0.00392	0.8861	0.8836	-780.498	-772.836	61.51	<.0001	2.2905	0.71	<.0001	
	b ₂	0.453022	<.0001													

Donde: P<|t|: Probabilidad estadística; SSE: Error estándar; CME: Cuadrado medio del error; RCME: Raíz del cuadrado medio del error; R²: Coeficiente de determinación; R²_{aj}: Coeficiente de determinación ajustado.

Cuadro 10. Comparación de estadísticos de ajuste de las mejores ecuaciones de volumen total árbol, utilizadas para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Modelo	Parámetros	Estimación	P > t	SSE	CME	RCME	R ²	R ² _{aj}	Akaike (AIC)	Bayesiano (BIC)	White (X ²)		Durbin-Watson (DW)	Shapiro-Wilk	
											Estadístico	Probabilidad		Estadístico	Probabilidad
7	b ₀	0.000094	0.0015												
	b ₁	1.038895	<.0001	0.0014	0.000015	0.0039	0.8873	0.8848	-781.467	-773.806	62.23	<.0001	2.3096	0.72	<.0001
	b ₂	0.452888	<.0001												
8	b ₀	-0.00033	0.7508												
	b ₁	0.000093	<.0001	0.0014	0.000015	0.00389	0.8874	0.885	-781.588	-773.926	62.96	<.0001	2.3117	0.75	<.0001
	b ₂	0.000015	<.0001												
9	b ₀	0.000204	<.0001												
	b ₁	1.18699	<.0001	0.00231	0.000025	0.00498	0.8136	0.8115	-735.679	-730.571	10.36	0.0656	1.8156	0.65	<.0001
10	b ₀	3617.899	<.0001												
	b ₁	11506.71	<.0001	0.00141	0.000015	0.00389	0.8863	0.885	-782.633	-777.526	58.98	<.0001	2.2896	0.71	<.0001
	b ₂	0.000098	<.0001												
11	b ₁	0.00009535	0.4057												
	b ₂	0.00008884	0.7640	0.00138	0.000015	0.00389	0.8887	0.885	-780.689	-770.473	70.96	<.0001	2.3489	0.74	<.0001
	b ₃	0.000021	0.9041												
12	b ₀	17558.53	0.0001												
	b ₁	835.0594	0.0081	0.00178	0.000019	0.00437	0.8566	0.8551	-760.613	-755.505	20.69	0.0009	2.1027	0.63	<.0001

Donde: P<|t|: Probabilidad estadística; SSE: Error estándar; CME: Cuadrado medio del error; RCME: Raíz del cuadrado medio del error; R²: Coeficiente de determinación; R²_{aj}: Coeficiente de determinación ajustado.

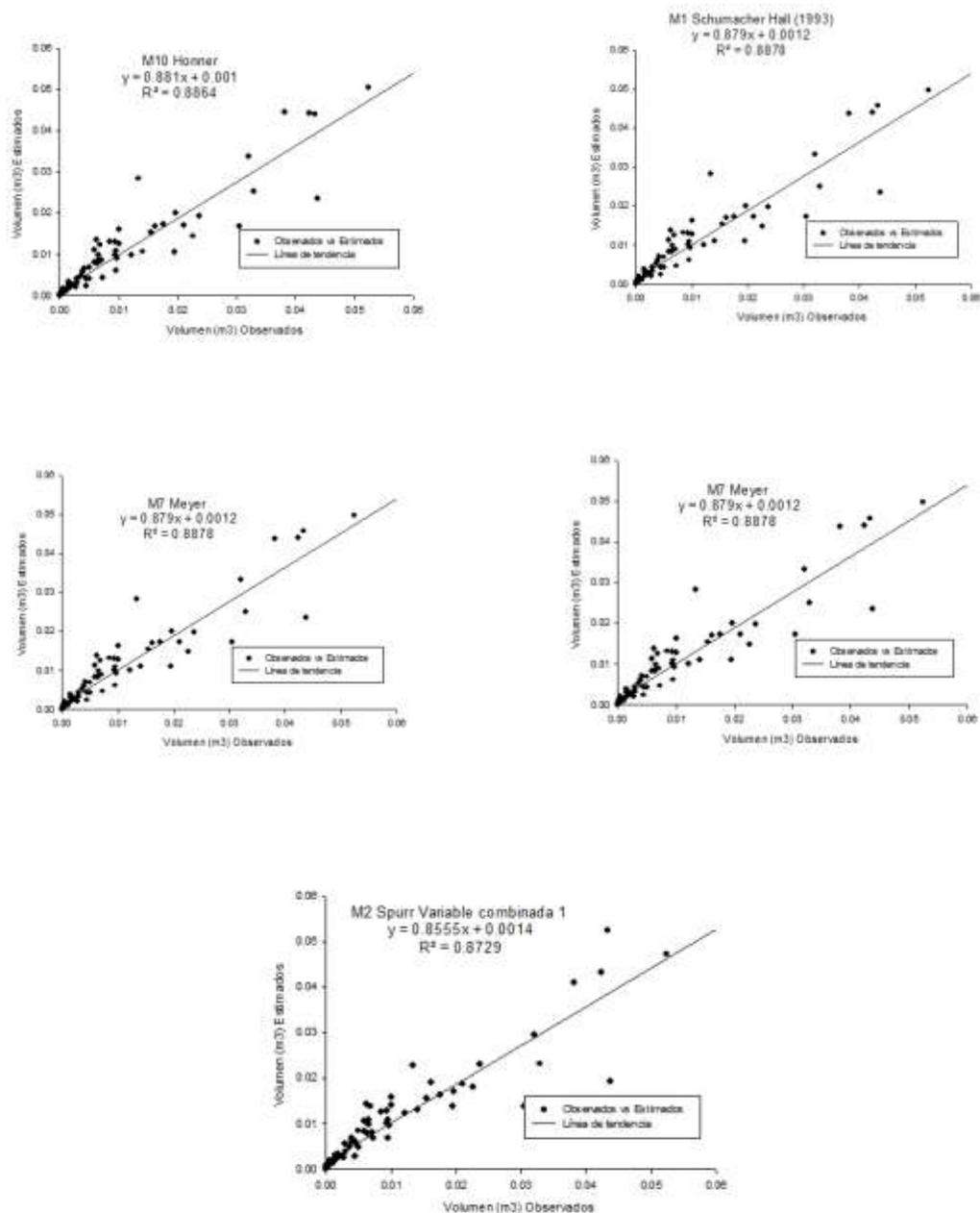


Figura 3. Comparación de gráfica de volumen observado contra volumen estimado de los cinco mejores modelos para volumen total árbol para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

4.3 Validación de las ecuaciones de predicción de volumen

Para la estimación del VFT, el M7 (Meyer) presentó el valor más cercano a cero en el estadístico de validación RCME, con un valor de 0.00116. En cuanto al EMA y E, el M11 obtuvo el mejor resultado de 0.000489 y -0.0000135 respectivamente, además de registrar la menor DA = -0.00309, lo que indica una sobrestimación del volumen en solo un 0.31% (Cuadro 11). Sin embargo, dado que este modelo mostró el menor ajuste en las pruebas previas y obtuvo una baja valoración en los criterios de selección, no se consideró como el modelo definitivo. Adicionalmente, presentó una alta complejidad en términos del número de parámetros, reflejada en los valores de AIC y BIC. Siguiendo las recomendaciones de Cruz-Cobos *et al.* (2023), se priorizan el uso de ecuaciones con menos parámetros por su simplicidad y facilidad de aplicación.

Cuadro 11. Comparación de estadísticos utilizados para determinar la exactitud y sesgo de los cinco mejores modelos para volumen fuste total utilizadas para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Tipo de estimación	Modelo	Muestra	RCME	EMA	E	DA	DA %
VFT	Schumacher y Hall, 1993 (M1)	40	0.0011572	0.0004611	-0.0000498	-0.0114208	-1.1420833489
	Korsun (M6)		0.0055786	0.0020499	-0.0020341	-0.4669067	-46.6906695257
	Meyer (M7)		0.0011572	0.0004611	-0.0000497	-0.0114169	-1.1416876606
	Naslund Slobada Modificada (M11)		0.0011890	0.0004893	-0.0000135	-0.0030930	-0.3093044685
	Takata (12)		0.0046039	0.0004469	-0.0000344	-0.0079060	-0.7905998959

Donde: VFT: Volumen fuste total (m³); RCME: Raíz cuadrada del error medio cuadrático; EMA: Error medio absoluto; E: Sesgo; DA: Diferencia agregada.

El sistema de calificación para la selección de modelos se presenta en el Cuadro 13, donde el modelo con la menor puntuación fue considerado el más adecuado. Si bien el M11 obtuvo la mejor evaluación, no fue seleccionado debido a las razones previamente expuestas. En su lugar, el modelo de Takata, con una puntuación de 9, fue el mejor posicionado. Por lo tanto, la decisión final favoreció al modelo de Takata, ya que presentó el mejor ajuste y desempeño en la validación. Además, este modelo mostró una sobrestimación mínima del 0.79%, lo que se considera un margen de error aceptable.

Cuadro 12. Sistema de calificación de modelos para volumen fuste total utilizadas para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Tipo de estimación	Modelo	Muestra	RCME	EMA	E	DA	Promedio	Total
VFT	Schumacher y Hall, 1993 (M1)		2	3	3	4	3	12
	Korsun (M6)		5	5	5	5	5	20
	Meyer (M7)	40	1	2	4	3	3	10
	Naslund Slobada Modificada (M11)		3	4	1	1	2	9
	Takata (12)		4	1	2	2	2	9

Donde: VFT: Volumen fuste total (m³); RCME: Raíz cuadrada del error medio cuadrático; EMA: Error medio absoluto; E: Sesgo; DA: Diferencia agregada.

En la validación del modelo óptimo para la estimación del VFT, el M10 presentó el menor valor en el estadístico RCME, con un resultado de 0.00211. No obstante, la ecuación de Schumacher y Hall mostró el mejor desempeño en los estadísticos de validación EMA, E y DA, con valores de 0.000651, 0.0000075 y 0.00091, respectivamente. Si bien el modelo de Honner había sido previamente identificado como el más adecuado, en este caso se optó por el modelo 1 debido a su amplio uso en diversas especies forestales y su facilidad de aplicación. Además, este modelo presentó una subestimación mínima del 0.09%, lo que le da un buen desempeño en la estimación volumen total árbol para la especie (Cuadro 13).

Cuadro 13. Comparación de estadísticos utilizados para determinar la exactitud y sesgo de los cinco mejores modelos para volumen total árbol utilizadas para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Tipo de estimación	Modelo	Muestra	RCME	EMA	E	DA	DA %
VTA	Schumacher y Hall, 1993 (M1)		0.0021106	0.0006513	0.0000075	0.0009051	0.09051014
	Spurr Variable Combinada 1 (M2)		0.0022596	0.0007826	0.0000360	0.0043469	0.43468505
	Korsun (M6)	40	0.0021180	0.0006686	0.0000110	0.0013228	0.13227761
	Meyer (M7)		0.0021106	0.0006513	0.0000075	0.0009061	0.09060823
	Honner (M10)		0.0021055	0.0006220	0.0000705	0.0085173	0.85172761

Donde: VTA: Volumen total árbol (m³); RCME: Raíz cuadrada del error medio cuadrático; EMA: Error medio absoluto; E: Sesgo; DA: Diferencia agregada.

De igual forma que al análisis realizado en VFT para VTA se aplicó el mismo sistema de calificación, con el objetivo de respaldar la selección del mejor modelo. En el Cuadro 14 se presentan las calificaciones obtenidas para cada ecuación, donde el M1 resultó ser el más adecuado al obtener la puntuación más baja, con un valor de 5. Este resultado reafirma su idoneidad en el desempeño para la estimación del volumen total del árbol.

Cuadro 14. Sistema de calificación de modelos para volumen total árbol utilizadas para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Tipo de estimación	Modelo	Muestra	RCME	EMA	E	DA	Promedio	Total
VTA	Schumacher y Hall, 1993 (M1)		2	1	1	1	1	5
	Spurr Variable Combinada 1 (M2)		5	5	4	4	5	18
	Korsun (M6)	40	4	4	3	3	4	14
	Meyer (M7)		3	2	2	2	2	9
	Honner (M10)		1	3	5	5	4	14

Donde: VFT: Volumen total árbol (m³); RCME: Raíz cuadrada del error medio cuadrático; EMA: Error medio absoluto; E: Sesgo; DA: Diferencia agregada.

4.4 Tablas de predicción de volumen

4.4.1 Tabla de predicción de volumen fuste total

Para la estimación del VFT, se utilizó la ecuación de Takata, la cual considera como variables el diámetro a la base (cm) y la altura total del fuste (m), generando una tabla de dos entradas. Para la elaboración de la tabla de volumen, se incluyeron dos categorías adicionales de altura total y diámetro, además de las observadas en campo, con el objetivo de ampliar su aplicabilidad. Asimismo, se proporciona la ecuación generada (Cuadro 15).

Cuadro 15. Tabla de estimación de volumen fuste total para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas con el modelo Takata $V = (D^2At) / (17558.53 + (835.0594 (D)))$.

Diámetro a la base (cm)	Altura total (m)			
	5	10	15	20
5	0.0041	0.0081	0.0122	0.0162
10	0.0113	0.0226	0.0340	0.0453
15	0.0196	0.0391	0.0587	0.0783
20	0.0282	0.0565	0.0847	0.1130
25	0.0371	0.0743	0.1114	0.1485
30	0.0462	0.0923	0.1385	0.1847

Donde: V: Volumen fuste total (m³); D: Diámetro a la base (cm); At: Altura total del fuste (m). El sombreado de las categorías indica las que fueron encontradas en campo.

4.4.2 Tabla de estimación de volumen total árbol

Para la elaboración de la tabla de VTA de dos entradas, se utilizó la ecuación de Schumacher y Hall, que estima el volumen en función del diámetro a la base (cm) y la altura total (m). Además, se incluyeron dos categorías adicionales a las encontradas, y se presenta la ecuación obtenida en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Tabla de estimación de volumen total árbol para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. Schumacher y Hall $V = 0.000094 (D^{1.944672} At^{0.452888})$.

Diámetro a la base (cm)	Altura total (m)			
	5	10	15	20
5	0.0042	0.0084	0.0125	0.0165
10	0.0111	0.0220	0.0328	0.0435
15	0.0196	0.0387	0.0577	0.0765
20	0.0292	0.0578	0.0861	0.1143
25	0.0399	0.0789	0.1176	0.1560
30	0.0514	0.1017	0.1516	0.2012

Donde V: Volumen fuste total (m³); D: Diámetro a la base (cm); At: Altura total del fuste (m). El sombreado de las categorías indica las que fueron encontradas en campo.

En el centro y sur, los manglares son más diversos, con las cuatro especies principales, mayor altura y cobertura, coexistiendo con vegetación tropical acuática y de selva baja. En contraste, los manglares de Tamaulipas tienen una distribución discontinua. Donde, predominan los matorrales de *A. germinans*, asociados a halófitas de marismas, así como arbustos rastreros de *C. erectus* en dunas y barreras. En contraste, en el centro y sur, los manglares son más diversos, con las cuatro especies principales, mayor altura y cobertura, coexistiendo con vegetación tropical acuática y de selva baja. En estas latitudes más frías, los manglares presentan un achaparramiento por la influencia de la temperatura, que puede descender por debajo de 0°C, junto con las condiciones de precipitación, lo que explica los volúmenes más pequeños en este estudio (Snedaker y Pool, 1973; López-Portillo y Ezcurra, 2002; Zamora-Tovar *et al.*, 2024).

5 CONCLUSIONES

Se logró el objetivo de ajustar un modelo para estimar el VFT y VTA para *C. erectus*, en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. En general el ajuste de los modelos presento ajustes adecuados tanto para VFT como VTA. El mejor modelo para VFT fue el de Takata (1993) $V = (D^2 * H) / (17558.53 + (835.0594 (D)))$. Por su parte Schumacher y Hall $V = 0.000094 (D^{1.944672} H^{0.452888})$ fue el mejor para estimar volumen total árbol.

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula de que a un nivel de confiabilidad del 95%, ningún modelo es adecuado para estimar los volúmenes totales de árbol y fuste para *C. erectus*, en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

6 RECOMENDACIONES

Es recomendable utilizar modelos de dos entradas y de variables combinadas, por su buen ajuste en trabajos en especies forestales, ya que son más estables y prácticos de utilizar, además, de que te aseguras de que las variables se combinen y así sea más preciso.

Para dar cumplimiento a los supuestos de regresión, como lo es la heterocedasticidad, una solución es el uso de variables transformadas o modificar el modelo, pero si se busca que el modelo sea practico y que las variables se mantengan, se puede optar por no corregir ésta.

Se recomienda el uso del modelo de Takata en el ajuste de modelos, en estudios de este tipo en especies tropicales y de manglares, por su adecuado ajuste en este estudio para estimación del volumen.

Para poder hacer un aprovechamiento maderable de manera sustentable en manglares, es necesario contar con modelos de estimación de volumen, por eso se recomienda seguir desarrollando este tipo de modelos.

7 LITERATURA CITADA

- Aho, K., Derryberry, D. y Peterson, T. (2014). Model selection for ecologists: the worldviews of AIC and BIC. *Ecology*, 95(3), 631-636.
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, 19(6), 716-723.
- Akram, H., Hussain, S., Mazumdar, P., Chua, K. O., Butt, T. E. y Harikrishna, J. A. (2023). Mangrove health: A review of functions, threats, and challenges associated with mangrove management practices. *Forests*, 14(9), 1698.
- Alamsyah, A. y Kurniawan, D. C. (2024). Hastag SAVETHECOAST Tagger dalam Rangka Mangrove Sedunia di Kelurahan Maridan. *ANDIL Mulawarman Journal of Community Engagement*, 1(1), 11-16.
- Aldana, P. C. E. (2008). Medición forestal: Texto para la carrera Ingeniería Forestal. Cap. 5. *Editorial Universitaria*, Pinar del Río. 119–120 pp.
- Anu, K., Sneha, V. K., Busheera, P., Muhammed, J. y Augustine, A. (2024). Mangroves in environmental engineering Harnessing the multifunctional potential of Nature's coastal architects for sustainable ecosystem management. *Results in Engineering*, 21, 101765.
- Arriaga, L., Espinoza, J. M., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L. y Loa, E. (Coords.). (2000). Regiones terrestres prioritarias de México. *CONABIO*, 5–609). ISBN 970-9000-16-0. 609 p.

- Arrogante, M. Ó. (2021). Técnicas de muestreo y cálculo del tamaño muestral: Cómo y cuántos participantes debo seleccionar para mi investigación. *Elsevier*, 33. 44-47. <https://doi.org/10.1016/j.enfi.2021.03.004>.
- Augusto, D. T. y Guimarães, F. C. A. (2009). Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de *Pinus taeda* L. en el sur de Brasil. Kurú: *Revista Forestal*, Costa Rica 6 (16), 1-15.
- Bindiya, E. S., Sreekanth, P. M. y Bhat, S. G. (2023). Conservation and management of mangrove ecosystem in diverse perspectives. In Conservation and sustainable utilization of bioresources (pp. 323-352). Singapore: *Springer Nature Singapore*.
- Burnham, K. P., Anderson, D. R. y Huyvaert, K. P. (2011). AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons. *Behavioral ecology and sociobiology*, 65, 23-35. DOI 10.1007/s00265-010-1029-6.
- Cerri, F., Louis, Y. D., Fallati, L., Siena, F., Mazumdar, A., Nicolai, R., Zitouni, M. S., Shehenaz, A. A., Mohamed, S., Lavorano, S. y Galli, P. (2024). Mangroves of the Maldives A review of their distribution, diversity, ecological importance and biodiversity of associated flora and fauna. *Aquatic Sciences*, 86(2), 44.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2005). Área de Protección de Flora y Fauna Laguna Madre y Delta del Río Bravo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Ejército Nacional No. 223, Col. Anáhuac, Delegación Miguel Hidalgo. C.P. 11320, México, D. F. Consultado el 06 de Febrero del 2025 en: https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/122_libro_pm.pdf.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2018). Manglar, riqueza de especies. Comisión Nacional Forestal. 25 de julio de 2018. Consultado el 06 de Febrero del 2025 en: <https://www.gob.mx/conafor/es/articulos/manglar-riqueza-de-especies?idiom=es>.
- Cruz-Cobos, F., Mendía-Santana, R., Jiménez-Flores, A. A., Nájera-Luna, J. A. y Cruz-García, F. (2016). Ecuaciones de volumen para *Arbutus* spp. (Madroño) en la región de Pueblo Nuevo, Durango. *Investigación y Ciencia*, 24(68), 41-47.

- Cruz-Cobos, F., Quiñonez-Barraza, G., Hernández-Merino, V., Corral-Rivas, S. y Nava-Nava, A. (2023). Sistemas compatibles de ahusamiento y volumen comercial para dos especies de *Pinus* en Durango, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 14(77), 76-102.
- Dabalà, A., Dahdouh-Guebas, F., Dunn, D. C., Everett, J. D., Lovelock, C. E., Hanson, J. O., Buenafe, K. C. V., Neubert, S. y Richardson, A. J. (2023). Priority areas to protect mangroves and maximise ecosystem services. *Nature communications*, 14(1), 5863.
- De Oca Cano, M. E., Corral Rivas, S. y Nájera Luna, J. A. (2008). Ajuste de ecuaciones de volumen en *Pinus durangensis* en la comunidad Las Flechas, Durango, México. *InterSedes: Revista de las Sedes Regionales*, IX (17), 173-180.
- Draper, N. R. y Smith, H. (1998). Applied regression analysis (Vol. 326). *John Wiley & Sons*. ISBN 0-471-17082-8, 697 p.
- Durbin, J. y Watson, G. S. (1992). Testing for serial correlation in least squares regression. I. In S. Kotz. y N. L. Johnson (Eds.), *Breakthroughs in statistics: Methodology and distribution*. Springer. pp. 237–259.
- Ermgassen, P. Z., Worthington, T. A., Gair, J. R., Garnett, E. E., Mukherjee, N., Longley-Wood, K., Nagelkerken, I., Abrantes, K., Aburto-Oropeza, O., Acosta, A., Araujo, A. R. D., Baker, R., Barnett, A., Beitel, C. M., Benzeev, R., Brookes, J., Castellanos-Galindo, G. A., Chong, V. C., Connolly, R. M.,... Spalding, M. D. (2024). The global fish and invertebrate abundance value of mangroves. *bioRxiv*, 2024-05.
- Garate-Quispe, J. S. y Florez-Castillo, L. (2023). Coeficiente mórfico de *Apuleia leiocarpa* (Vogel) JF Macbr. por tipo de bosque, Amazonía peruana. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 14(78), 4-33.
- Garrido, *et al.* (2018). Metodología para el muestreo de árboles en bosques tropicales. *Revista Forestal Mexicana*, 44(2), 105-120.
- Gómez, G. J. P., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P. y Ramírez V. G. (2018). Ecuaciones de volumen para estimar la producción maderable de *Hevea brasiliensis* Müell Arg. En plantaciones de etapas adulta y vejez. *Madera y Bosques*, 24(2), e2421867. doi: 10.21829/myb.2018.2421867.

- Guzmán-Santiago, J. C., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J. y Vargas-Larreta, B. (2020). Estimación de volumen de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham. en diferentes entidades federativas de México. *Colombia forestal*, 23(2), 99-113.
- Hernández, F. J., Simental Serrano, L. A., Hernández Díaz, J. C., Wehenkel, C. A., Prieto Ruíz, J. Á. y Nájera Luna, J. A. (2023). Ecuaciones de razón de volumen para *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltld. del estado de Nayarit, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 14(78), 117-140.
- Hernández-Ramos, J., García-Cuevas, X., Hernández-Ramos, A., Tamarit-Urias, J. C. y Buendía-Rodríguez, E. (2021). Modelos para estimar volumen fustal y ahusamiento para *Manilkara zapota* (L.) P. Royen en Quintana Roo, México. *Acta Universitaria* 31, e3067. doi. <http://doi.org/10.15174.au.2021.3067>.
- Hernández-Ramos, J., Hernández-Ramos, A., García-Cuevas X., Tamarit-Urias, J. C., Martínez-Ángel, L. y García-Magaña, J. (2018). Ecuaciones de volumen total y de razón para estimar el volumen comercial de *Swietenia macrophylla* King. *Colombia Forestal*, 21:34-46.
- Imaña-Encinas, J., Antunes-Santana, O. y Riesco-Muñoz, G. (2019). Selección de una ecuación volumétrica para *Eucalyptus urophylla* ST Blake en la región central del estado de Goiás, Brasil. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 16(39), 2-9.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2001). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Sistema topoformas. Consultado el 06 de febrero 2025 en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267582>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2008). Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas. Consultado el 06 de febrero 2025 en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010a). Compendio de información geográfica municipal 2010. Soto la Marina, Tamaulipas. Consultado el 06 de febrero 2025 en:

https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/28/28037.pdf.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010b). Red hidrográfica edición 2.0. Cuenca Laguna Madre. Región H. San Fernando - Soto la Marina. Consultado el 06 de febrero 2025 en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825006924>.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional. Consultado el 06 de febrero 2025 en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024a). Inventario nacional de fenómenos geológicos. Tercera edición. Consultado el 06 de febrero 2025 en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551118276>.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024b). Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo nacional. Consultado el 06 de febrero 2025 en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551131916>.

Karpowicz, D. A., Mohan, M., Watt, M. S., Montenegro, J. F., King, S. A., Selvam, P. P., Nithyanandan, M., Robyn, B., Ali, T., Abdullah, M. G., Doaemo, W. y Ewane, E. B. (2024). Mangrove-based carbon market projects: 15 considerations for engaging and supporting local communities. *Diversity*, 16(9), 574.

López-Portillo, J. y Ezcurra, E. (2002). Los manglares de México. *Madera y Bosques*. Número especial, 8 (Es1), 27-51.

Lovelock, C. E., Bennion, V., de Oliveira, M., Hagger, V., Hill, J. W., Kwan, V., Pearse, A. L. Rossini, R. A. y Twomey, A. J. (2024). Mangrove ecology guiding the use of mangroves as nature-based solutions. *Journal of Ecology*, 112(11), 2510-2521.

Mardiatmoko, G. (2024). The application of the classical assumption test in multiple linear regression analysis (a case study of the preparation of the Allometric Equations of Young Makila). *JTAM (Jurnal Teori dan Aplikasi Matematika)*, 8(3), 724-739.

- Mhatre, M. A. (2024). Role of Mangroves as Fishery Resource: A Systematic Review. *Uttar Pradesh Journal Of Zoology*, 45(16), 35-41.
- Miranda, F. y Hernández, X. E. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Botanical Sciences*, (28), 29-179.
- Monárrez-González, J. C., Márquez-Linares, M. A., López Hernández, J. A., Pérez Verdín, G., Quiñonez Barraza, G. y García Cuevas, X. (2024). Ecuaciones de volumen fustal-total y ahusamiento para especies maderables del ecosistema templado en Puebla, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 15(84), 4-28.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A. y Vining, G. G. (2021). Introduction to linear regression analysis. *John Wiley & Sons*. 2, 84 p.
- Moret, A. Y., Jerez, M., y Mora, A. (1998). Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis* Lf.) en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal Caparo, Estado Barinas–Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 42(1), 41-50.
- Muñoz-Flores, H. J., Castillo-Quiroz, D., Sáenz-Reyes, J. T., Rueda-Sánchez, A., Castillo-Reyes, F. y García-García, D. A. (2021). Tablas de volumen de *Cedrela odorata* L. en plantaciones forestales en Colima, Jalisco y Nayarit, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 17(2), 40-48.
- Netto, S. P., Stefanello, F. R., Nhaduco, O. P. E., Madi, J. P. S., Morales, J. J. O. y Behling, A. (2025). Modeling tree form in forest stands of *Pinus taeda* L. in Southern of Brazil. *Caderno Pedagógico*, 22(1), e13286-e13286.
- Otzen, T. y Manterola, C. (2017). Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. *International Journal of Morphology*, 35(1), 227-232.
- Perén, F. A. D. C. (2022). Manglares en Panamá: Importancia, biodiversidad y medidas para su conservación. *Biocenosis*, 33(2), 17-27.
- Picard, N., Saint-Andre, L., y Henry, M. (2012). Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, and *Centre de Coopération*

Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, 215 pp.

Prodan, M., R. Peters, F. y Cox, P. Real. 1997. Mensura forestal. *Instituto Internacional de Cooperación para la Agricultura (IICA)*, *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH*. San José, Costa Rica. 586 p.

Quiñonez-Barraza, G., García-Espinoza, G. G. y Aguirre-Calderón, O. A. (2018). ¿Cómo corregir la heterocedasticidad y autocorrelación de residuales en modelos de ahusamiento y crecimiento en altura? *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(49), 28-59.

Ramírez, M. O., y Flores, L. C. (2014). Evaluación de la riqueza de avifauna en los manglares de La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. *Ciencias agropecuarias y biotecnología*. Saltillo, Coahuila, México. Págs. 29-142.

Ramírez, R. G., Dupuy, R. J. M., Ramírez, A. L. y Solorio Sánchez, F. J. (2017). Evaluación de ecuaciones alométricas de biomasa epigea en una selva mediana subcaducifolia de Yucatán. *Madera y bosques*, 23(2), 163-179.

Ramírez-Martínez, A., Santiago-García, W., Quiñonez-Barraza, G., Ruiz-Aquino, F. y Antúnez, P. (2018). Modelación del perfil fustal y volumen total para *Pinus ayacahuite* Ehren. *Madera y bosques*, 24(2).

Ramos-Uvilla, J. A., García-Magaña, J. J., Hernández-Ramos, J., García-Cuevas, X., Velarde-Ramírez, J. C., Muñoz-Flores, H. J. y García Espinoza, G. G. (2014). Ecuaciones y tablas de volumen para dos especies de *Pinus* de la Sierra Purhépecha, Michoacán. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(23), 92-109.

Revilla, J., Abanto-Rodríguez, C., Guerra, W., García, D., Guerra, H., Domínguez, G. y Carmo, I.L.G. (2021). Modelos alométricos para estimar el volumen de madera de *Guazuma crinita* en plantaciones forestales. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 25-31.

Rivera-Monroy, V. H., Lee, S. Y., Kristensen, E., y Twilley, R. R. (2017). Mangrove ecosystems: a global biogeographic perspective (pp. 347-380). *Springer Science+ Business Media*.

- Romahn, D. C. F. y Ramírez, M. H. (2010). Dendrometría. 3 Cubicación de Árboles y de Productos. Primarios. 3.1 Tipos Dendrométricos. *Universidad Autónoma Chapingo. División de ciencias Forestales*.
- Ross, M. S., Ruiz, P. L., Telesnicki, G. J. y Meeder, J. F. (2001). Estimating above-ground biomass and production in mangrove communities of Biscayne National Park, Florida (USA). *Wetlands Ecology and Management*, 9, 27-37.
- Rueda-Sánchez, A., de Dios Benavides-Solorio, J., García-García, D. A., Sáenz-Reyes, J. T., Castillo-Quiroz, D. y García-Mosqueda, G. E. (2020). Tablas de volumen para *Tectona grandis* Lf. en plantaciones del centro-occidente de México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 16(3). 12.
- Rueda-Sánchez, Agustín., Benavides-Solorio, J. D. D., García-García, D. A., Sáenz-Reyes, J. T., Muñoz-Flores, H. J. y García-Mosqueda, G. E. (2022). Tablas de volumen fustal en plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb., en la costa de Jalisco, México. *Foresta Veracruzana*, 23(1), 9–14.
- Rzedowski, J. (2006). 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. Capítulo 20. Otros tipos de vegetación. *CONABIO*, Página 346.
- Sakici, O. E., Misir, N., Yavuz, H., y Misir, M. (2008). Stem taper functions for *Abies nordmanniana* subsp. *bornmulleriana* in Turkey. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23(6), 522-533.
- Salas, E. S. C., Navarro, C. C., Cayul, T. C. y Riquelme, A. J. (2019). Modelos de volumen y de crecimiento para algunas especies del tipo forestal siempreverde en el sur de Chile. *Fondo de Investigación del Bosque Nativo*. 1-69.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The annals of statistics*, 461-464.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-022-SEMARNAT-2003, Que establece las especificaciones para la preservación, conservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros en zonas de manglar. Diario Oficial de la Federación. Consultado

el 06 de febrero en: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3281/1/nom-022-semarnat-2003.pdf>.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación. Consultado el 06 de febrero en: <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4254/semarnat/semarnat.htm>.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015). Acuerdo por el que se da a conocer el Resumen del Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Laguna Madre y Delta del Río Bravo. Diario Oficial de la Federación. Consultado el 06 de febrero en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5399986.

Shapiro, S. S. y Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3-4), 591-611.

Sievers, M., Brown, C. J., McGowan, J., Turschwell, M. P., Buelow, C. A., Holgate, B., Pearson, R. M., Adame, M. F., Andradi-Brown, D. A., Arnell, A., Mackey, B. G., Zu Ermgassen, P. S. E., Goslif, J., McOwen, C. J., Worthington, T. A. y Connolly, R. M. (2023). Co-occurrence of biodiversity, carbon storage, coastal protection, and fish and invertebrate production to inform global mangrove conservation planning. *Science of the Total Environment*, 904, 166357.

Silva, E. A., Gonzales, D. G. E., Campos, J. V. V. y Acosta, M. Y. G. (2023). Estimación del volumen individual de árboles de *Alnus acuminata* Kunth en plantaciones forestales. *Revista Ciencia Nor@ndina*, 6(2), 145-159.

Silva-García, J. E., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E. y González-Tagle, M. A. (2018). Ecuaciones de volumen para *Prosopis articulata* S. Watson y *Lysiloma divaricata* (Jacq.) J. F. Macbr. en el noroeste de México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(50), 415-438. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.261>.

- Snedaker, S. C. y Pool, D. J. (1973). Mangrove forest types and biomass. Resource Management Systems Program, University of Florida. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 5 (1974), pp. 39-64.
- Suhardi, R. M., Rahardi, W., Shih, H. C., Mantiquilla, J. A., Wu, Y. H., Shiao, M. S. y Chiang, Y. C. (2024). A review of the mangrove ecosystem in Indonesia: Biodiversity, conservation, and challenges in sustainable management. *Ecological Genetics and Genomics*, 100282.
- Sunkur, R., Kantamaneni, K., Bokhoree, C. y Ravan, S. (2023). Mangroves' role in supporting ecosystem-based techniques to reduce disaster risk and adapt to climate change a review. *Journal of Sea Research*, 196, 102449.
- Tamarit, U. J. C., De los Santos, P. H. M., Aldrete, A., Valdez, L. J. R., Ramírez, M. H., y Guerra, D. V. (2014). Sistema de cubicación para árboles individuales de *Tectona grandis* L. f. mediante funciones compatibles de ahusamiento-volumen. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(21), 58-74.
- Tapia, C. E. F. y Cevallos, K. L. F. (2021). Pruebas para comprobar la normalidad de datos en procesos productivos: Anderson-darling, ryan-joiner, shapiro-wilk y kolmogórov-smirnov. *Societas*, 23(2), 83-106.
- Tapia, J. y Návar, J. (1998). Ajuste de modelos de volumen y funciones ahusamiento para *Pinus teocote* en bosques de pino de la Sierra Madre Oriental. *Facultad de Ciencias Forestales, UANL*, Volumen 12. Número 1, 7-23pp.
- Tapia, J. y Návar, J. (2011). Ajuste de modelos de volumen y funciones de ahusamiento para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en bosques de pino de la Sierra Madre Oriental de Nuevo León, México. *Foresta Veracruzana*, 13(2), 19-28.
- Telles, A. R., Gómez, C. M., Alanís, R. E., Aguirre, C. O. A. y Jiménez, P. J. (2018). Ajuste y selección de modelos matemáticos para predecir el volumen fustal de *Tectona grandis* L. f. en Nuevo Urecho, Michoacán, México. *Madera y bosques*, 24(3) 1-11.
- Tomlinson, P. B. (1986). The botany of mangroves. Cambridge University Press, *Cambridge*. 413 pages. ISBN 0-521-25567-8.

- Tova, C. Z., Jiménez-Pérez, J. L., Cardona-Estrada, A., González-Romo, C. E., Garza-Torres, H. A., Patiño, G. H. y Ramos, G. S. (2011). Participación comunitaria en la restauración ecológica de la laguna Madre, Tamaulipas. *CienciaUAT*, 6(1), 38-47.
- Trejo-Torres, J. C. (2009). Un mangle de plata: El botoncillo (*Conocarpus erectus*). *Desde el Herbario CICY*, 1, 21-22.
- Trumper, K., Bertzky, M., Dickson, B., Van der Heijden, G., Jenkins, M. y Manning, P. (2009). The Natural Fix? The role of ecosystems in climate mitigation. A UNEP rapid response assessment. United Nations Environment Programme, *UNEPWCMC, Cambridge, UK*. ISBN: 978-82-7701-057-1. Printed by Birkeland Trykkeri AS, Norway.
- Utomo, A. P., Haerani, J. O., Ferdian, R. N., Paradise, R. y Radianto, D. O. (2024). Pemaksimalan Fungsi Penanaman Mangrove di Daerah Rawan Abrasi Jakarta. *Jurnal Ilmiah Nusantara*, 1(3), 12-22.
- Valderrama-Landeros, L., Troche-Souza, C., Alcántara-Maya, J. A., Velázquez-Salazar, S., Vázquez-Balderas, B., Villeda-Chávez, E., Cruz-López, M. I., Ressler, R., Flores-Verdugo, F. y Flores-de-Santiago, F. (2024). An assessment of mangrove forest in northwestern Mexico using the Google Earth Engine cloud computing platform. *PLoS one*, 19(12), e0315181.
- Valdez, H. J. I. (2004). Aprovechamiento forestal de manglares en el estado de Nayarit, costa Pacífica de México. *Madera y Bosques*, 8(Es1), 129-145.
- Van Hespén, R., Hu, Z., Borsje, B., De Dominicis, M., Friess, D. A., Jevrejeva, S., Kleinhans, M.G., Maza, M., Bijsterveldt, C. E. J., Van der Stocken, T., Van Wesenbeeck, B., Xie, D. y Bouma, T. J. (2023). Mangrove forests as a nature-based solution for coastal flood protection Biophysical and ecological considerations. *Water Science and Engineering*, 16(1), 1-13.
- Vargas-Larreta, B., Aguirre-Calderón, C. E., Aguirre-Calderón, C. G. y Hernández, F. J. (2021). Factores de forma y ecuaciones de volumen comercial para cinco especies de pino en el estado de Durango, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad*

- Von Linsingen, L. y Cervi, A. C. (2007). *Conocarpus erectus*. Adumbrationes ad summæ editionem 26: 1-6 *Madrid*, 12-v-2007.
- Vrieze, S. I. (2012). Model selection and psychological theory: a discussion of the differences between the Akaike information criterion (AIC) and the Bayesian information criterion (BIC). *Psychol Methods*. 2012 june; 17(2): 228–243. doi:10.1037/a0027127.
- Westfall, J. A., Coulston, J. W., Gray, A. N., Shaw, J. D., Radtke, P. J., Walker, D. M., Weiskittel, A.R., MacFarlane, D. W., Affleck, D. L. R., Zhao, D., Temesgen, H., Poudel, K. P., Frank, J. M., Prisley, S. P., Wang, Y., Sánchez. M, A. J., Auty, D. y Domke, G. M. (2024). A national-scale tree volume, biomass, and carbon modeling system for the United States. Gen. Tech. Rep. WO-104. Washington, DC: US Department of Agriculture. Washington, DC: U.S. *Department of Agriculture, Forest Service*. 37 p. <https://doi.org/10.2737/WO-GTR-104>.
- White, H. (1980). A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica*, 48(4), 817–838. <https://doi.org/10.2307/1912934>.
- Zamora-Tovar, C., Fierro-Cabo, A. y Requena-Lara, G. N. (2024). Agenda de investigación para el manejo sustentable del manglar en Tamaulipas, México. *Madera y bosques*, 30(SPE) 1-18.
- Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R. y Mencuccini, M. (2005). Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs 4, Finnish Society of Forest Science*. 63 p.

8 APÉNDICE

Apéndice 1. Cuadro de volumen observado contra volumen estimado del modelo 4 para volumen fuste total para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

No.	NA	Observados	Estimados M4
1	84	0.00003	-0.00103
2	88	0.00002	-0.00093
3	36	0.00010	-0.00068
4	82	0.00004	-0.00070
5	86	0.00006	-0.00066
6	38	0.00031	-0.00046
7	85	0.00006	-0.00044
8	87	0.00013	-0.00038
9	65	0.00011	0.00010
10	64	0.00008	0.00011
11	20	0.00007	0.00017
12	113	0.00011	0.00027
13	66	0.00007	0.00027
14	9	0.00040	0.00044
15	68	0.00019	0.00044
16	28	0.00036	0.00051
17	14	0.00029	0.00047
18	60	0.00025	0.00056
19	57	0.00010	0.00042
20	112	0.00017	0.00052
21	61	0.00036	0.00062
22	4	0.00032	0.00068
23	59	0.00012	0.00059
24	105	0.00018	0.00154
25	74	0.00014	0.00163

Donde: No.: Número de observación; NA: número de árbol.

Apéndice 1. Cuadro de volumen observado contra volumen estimado del modelo 4 para volumen fuste total para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas, continuación.

No.	NA	Observados	Estimados M4
26	73	0.00014	0.00168
27	111	0.00029	0.00170
28	17	0.00010	-0.00073
29	120	0.00028	-0.00016
30	40	0.00011	-0.00023
31	39	0.00030	0.00002
32	125	0.00034	0.00011
33	30	0.00038	0.00043
34	37	0.00018	0.00011
35	121	0.00091	0.00113
36	25	0.00075	0.00090
37	27	0.00084	0.00112
38	119	0.00076	0.00076
39	15	0.00267	0.00211
40	7	0.00041	0.00079
41	89	0.00086	0.00100
42	12	0.00148	0.00158
43	35	0.00024	0.00111
44	11	0.00092	0.00124
45	90	0.00071	0.00121
46	3	0.00182	0.00155
47	26	0.00163	0.00153
48	107	0.00176	0.00295
49	128	0.00181	0.00177
50	2	0.00126	0.00164
51	115	0.00236	0.00214
52	136	0.00239	0.00263
53	126	0.00161	0.00211
54	8	0.00060	0.00176
55	34	0.00402	0.00380
56	116	0.00379	0.00380
57	132	0.00392	0.00513
58	21	0.00298	0.00410
59	42	0.00416	0.00455
60	44	0.00586	0.00548

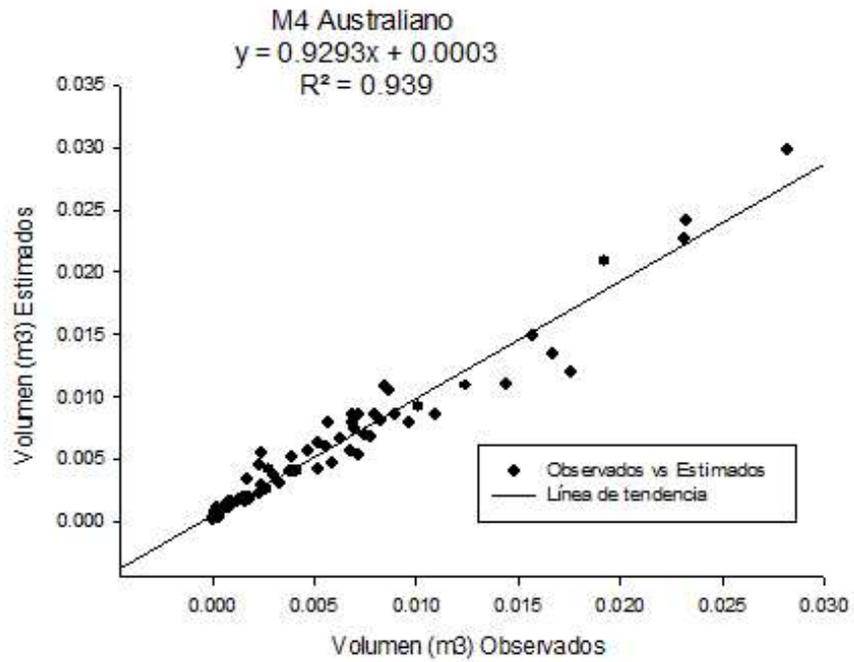
Donde: No.: Número de observación; NA: número de árbol.

Apéndice 1. Cuadro de volumen observado contra volumen estimado del modelo 4 para volumen fuste total para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas, continuación.

No.	NA	Observados	Estimados M4
61	22	0.00333	0.00273
62	93	0.00777	0.00691
63	110	0.00277	0.00389
64	102	0.00516	0.00377
65	31	0.00242	0.00516
66	75	0.00236	0.00414
67	117	0.01092	0.00863
68	135	0.00626	0.00624
69	122	0.00557	0.00552
70	114	0.00680	0.00519
71	43	0.00749	0.00648
72	49	0.00715	0.00497
73	55	0.00895	0.00826
74	101	0.00691	0.00809
75	92	0.00469	0.00532
76	118	0.00795	0.00802
77	56	0.00567	0.00742
78	94	0.00521	0.00593
79	5	0.00685	0.00741
80	33	0.00830	0.00757
81	78	0.00867	0.00988
82	95	0.00968	0.00745
83	79	0.00702	0.00716
84	97	0.01442	0.01020
85	77	0.00719	0.00817
86	133	0.01244	0.01023
87	50	0.01670	0.01256
88	130	0.01011	0.00980
89	19	0.00847	0.01181
90	51	0.01762	0.01185
91	134	0.01568	0.01538
92	54	0.01925	0.02158
93	70	0.02324	0.02511
94	96	0.02320	0.02290
95	71	0.02819	0.02846

Donde: No.: Número de observación; NA: número de árbol.

Apéndice 2. Comparación de gráfica de volumen observado contra volumen estimado del modelo 8 para volumen total árbol para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.



Apéndice 3. Cuadro de volumen observado contra volumen estimado de los modelos M4 y M8 para volumen total árbol para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

No.	NA	Observados	Estimados M4	Estimados M8
1	84	0.0000	-0.0014	-0.0001
2	88	0.0000	-0.0014	-0.0002
3	36	0.0002	-0.0009	0.0002
4	82	0.0000	-0.0011	-0.0001
5	86	0.0001	-0.0010	0.0001
6	38	0.0004	-0.0006	0.0003
7	85	0.0001	-0.0010	-0.0001
8	87	0.0001	-0.0007	0.0001
9	65	0.0001	-0.0004	0.0001
10	64	0.0001	-0.0006	-0.0001
11	20	0.0001	-0.0005	-0.0001
12	113	0.0001	-0.0003	0.0001
13	66	0.0001	-0.0004	-0.0001
14	9	0.0004	0.0001	0.0004
15	68	0.0004	0.0001	0.0004
16	28	0.0004	0.0002	0.0004
17	14	0.0003	-0.0001	0.0002
18	60	0.0003	0.0002	0.0004
19	57	0.0001	-0.0004	-0.0002
20	112	0.0002	-0.0001	0.0001
21	61	0.0004	0.0002	0.0003
22	4	0.0003	0.0002	0.0004
23	59	0.0001	-0.0002	0.0000
24	105	0.0002	0.0006	0.0001
25	74	0.0001	0.0008	0.0002
26	73	0.0002	0.0008	0.0002
27	111	0.0003	0.0009	0.0002
28	17	0.0002	-0.0006	0.0006
29	120	0.0003	0.0004	0.0013
30	40	0.0002	-0.0002	0.0006
31	39	0.0006	0.0003	0.0010

Donde: No.: Número de observación; NA: número de árbol.

Apéndice 3. Cuadro de volumen observado contra volumen estimado de los modelos M4 y M8 para volumen total árbol para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas, continuación.

No.	NA	Observados	Estimados M4	Estimados M8
32	125	0.0006	0.0006	0.0013
33	30	0.0004	0.0013	0.0019
34	37	0.0004	0.0002	0.0008
35	121	0.0016	0.0036	0.0042
36	25	0.0015	0.0026	0.0031
37	27	0.0022	0.0023	0.0027
38	119	0.0014	0.0011	0.0014
39	15	0.0037	0.0051	0.0053
40	7	0.0011	0.0006	0.0008
41	89	0.0011	0.0011	0.0012
42	12	0.0018	0.0027	0.0028
43	35	0.0009	0.0010	0.0010
44	11	0.0012	0.0013	0.0013
45	90	0.0007	0.0013	0.0012
46	3	0.0045	0.0021	0.0020
47	26	0.0028	0.0019	0.0017
48	107	0.0039	0.0059	0.0058
49	128	0.0020	0.0025	0.0024
50	2	0.0018	0.0020	0.0019
51	115	0.0030	0.0032	0.0030
52	136	0.0050	0.0042	0.0039
53	126	0.0017	0.0023	0.0019
54	8	0.0008	0.0014	0.0009
55	34	0.0096	0.0062	0.0057
56	116	0.0040	0.0062	0.0057
57	132	0.0050	0.0073	0.0063
58	21	0.0030	0.0048	0.0036
59	42	0.0046	0.0052	0.0038
60	44	0.0073	0.0060	0.0040
61	22	0.0042	0.0072	0.0074
62	93	0.0305	0.0179	0.0180
63	110	0.0071	0.0089	0.0089
64	102	0.0064	0.0081	0.0080
65	31	0.0059	0.0113	0.0112

Donde: No.: Número de observación; NA: número de árbol.

Apéndice 3. Cuadro de volumen observado contra volumen estimado de los modelos M4 y M8 para volumen total árbol para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas, continuación.

No.	NA	Observados	Estimados M4	Estimados M8
66	75	0.0059	0.0083	0.0081
67	117	0.0197	0.0204	0.0204
68	135	0.0085	0.0132	0.0130
69	122	0.0095	0.0109	0.0105
70	114	0.0094	0.0100	0.0096
71	43	0.0093	0.0131	0.0127
72	49	0.0097	0.0092	0.0087
73	55	0.0177	0.0173	0.0170
74	101	0.0100	0.0162	0.0158
75	92	0.0066	0.0089	0.0082
76	118	0.0154	0.0154	0.0149
77	56	0.0062	0.0138	0.0132
78	94	0.0066	0.0101	0.0093
79	5	0.0069	0.0126	0.0118
80	33	0.0101	0.0129	0.0121
81	78	0.0210	0.0173	0.0165
82	95	0.0141	0.0114	0.0102
83	79	0.0122	0.0106	0.0093
84	97	0.0163	0.0173	0.0163
85	77	0.0195	0.0118	0.0103
86	133	0.0226	0.0155	0.0141
87	50	0.0236	0.0202	0.0191
88	130	0.0438	0.0242	0.0243
89	19	0.0133	0.0291	0.0292
90	51	0.0330	0.0249	0.0248
91	134	0.0321	0.0332	0.0333
92	54	0.0383	0.0431	0.0436
93	70	0.0524	0.0490	0.0498
94	96	0.0424	0.0434	0.0438
95	71	0.0433	0.0463	0.0464

Donde: No.: Número de observación; NA: número de árbol.

Apéndice 4. Comparación de gráfica de volumen observado contra volumen estimado de los modelos M4 y M8 para volumen total árbol para *Conocarpus erectus* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

