

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
DEPARTAMENTO FORESTAL



Ajuste de Funciones Compatibles de Ahusamiento-volumen para Mangle Blanco  
(*Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn) en Cuatro Localidades de Colima.

Por:

**ALAYLA GUADALUPE IBARRA MANZANARES**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Ajuste de Funciones Compatibles de Ahusamiento-volumen para Mangle Blanco  
(*Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn) en Cuatro Localidades de Colima.

Por:

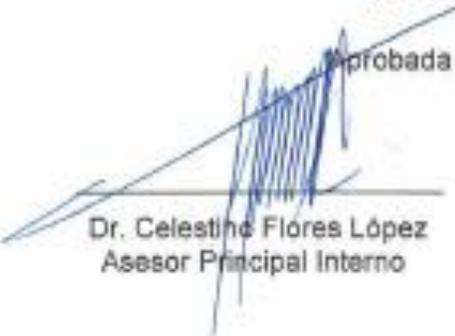
**ALAYLA GUADALUPE IBARRA MANZANARES**

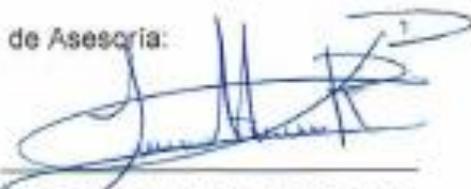
TESIS

Presentada como requisito para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Aprobada por el Comité de Asesoría:

  
Dr. Celestino Flores López  
Asesor Principal Interno

  
M.C. Adrián Hernández Ramos  
Asesor Principal Externo

  
M.C. Salvador Valencia Manzo  
Coasesor

  
Dr. Gabriel Gallegos Morales  
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México  
Junio 2019

Esta tesis ha sido apoyada por el Proyecto de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro con clave No. 30-38111-425103001-2175, Proyecto que pertenece al Departamento Forestal, a cargo del Profesor Investigador Dr. Celestino Flores López.

## DEDICATORIA

A mis padres:

Claudia E. Manzanares B. y Francisco G. Ibarra C. a quienes agradezco porque siempre están guiándome y orientándome, gracias por todo el esfuerzo que hacen día a día para ayudarme a salir adelante, por su empeño para darme siempre lo mejor, por confiar en mí, por no permitir que dejara de luchar por cumplir esta meta, ustedes siempre serán mi ejemplo a seguir. Nunca terminare de agradecerles las oportunidades que me brindan, por eso les dedico este logro porque sin su amor, apoyo, esfuerzo y dedicación como padres no lo lograría.

A mis hermanos:

Asís Gerardo T. Ibarra M. y Zaira G. Ibarra M. los cuales han estado conmigo a lo largo de mis estudios universitarios, gracias por su confianza, por todos esos momentos de alegría y felicidad, por brindarme su ayuda y paciencia en los momentos difíciles, por celebrar mis logros y éxitos a lo largo de mi vida, este logro también se los dedico a ustedes por su apoyo, amistad y amor incondicional.

## AGRADECIMIENTOS

A dios por permitirme terminar satisfactoriamente mi carrera universitaria y por darme la oportunidad de demostrarle a mi familia y seres queridos que a pesar de las adversidades puedo seguir cumpliendo mis metas y sueños en la vida.

A mi flaquita porque siempre estuvo a mi lado guiándome, por su bendición a lo largo de mis estudios y porque me ha demostrado que, teniendo fe, con esfuerzo y dedicación todo se puede lograr.

A mis asesores el Dr. Celestino Flores, el M. C. Adrián Hernández y al M. C. Salvador Valencia porque me brindaron su apoyo, tiempo, atención y conocimientos para el cumplimiento de este trabajo.

Al Ing. Gil Cabrera por darme su confianza, por sus bendiciones cada que salíamos a campo, por ese apoyo que me brindaba, nunca olvidare todo lo que hizo por ayudarme en los momentos difíciles, pero sobre todo gracias por su amistad y cariño

A todos los maestros del Departamento Forestal por sus enseñanzas, apoyo y orientación a lo largo de mis estudios.

A la Familia Vázquez Ramos gracias por abrirme las puertas de su hogar y haberme dado hospitalidad, por su cariño y confianza, por esos detalles que me hacían llegar a mí y a mi familia.

A mi amiga Brenda M. Vázquez porque a pesar de que había momentos difíciles, de estrés y preocupación siempre estuvimos apoyándonos, por su confianza, cariño y paciencia, sabes que siempre serás bienvenida en mi casa al igual que tu familia.

A mis compañeros y amigos Bárbara L. Sánchez, Edgar Guzmán, Francisco S. Macías, Jonatan Sánchez, Juan Zavala, Juan Ramírez por su amistad y apoyo.

A Don Cecilio por el apoyo y hospitalidad que me brindo durante el tiempo que lleve a cabo la recolección de datos para el presente estudio.

A Arley Gómez, Cesar Nájera, Fernando Arguello, Sergio González por su amistad, amabilidad y apoyo durante las actividades en campo, gracias por su esfuerzo para la obtención de la información para el cumplimiento de este trabajo.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|   | Página |
|---|--------|
| ÍNDICE DE CUADROS .....                               | ii     |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                               | iii    |
| RESUMEN.....  | iv     |
| ABSTRACT .....  | v      |
| 1 INTRODUCCIÓN .....                                  | 1      |
| 1.1 Objetivos e hipótesis .....                       | 5      |
| 2 MATERIALES Y MÉTODOS .....                          | 7      |
| 2.1 Descripción del área de estudio.....              | 7      |
| 2.1.1 Ubicación geográfica.....                       | 7      |
| 2.2 Muestreo y tamaño de muestra.....                 | 9      |
| 2.3 Medición de variables .....                       | 10     |
| 2.4 Captura y procesamiento de datos .....            | 10     |
| 2.5 Modelos matemáticos empleados.....                | 12     |
| 2.6 Análisis estadísticos.....                        | 12     |
| 2.7 Selección del modelo .....                        | 14     |
| 2.8 Validación para la ecuación de volumen .....      | 14     |
| 2.9 Similitud estadística del mejor modelo .....      | 15     |
| 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                         | 16     |
| 3.1 Ajuste de sistemas compatibles.....               | 16     |
| 3.2 Bondad de ajuste de los sistemas compatibles..... | 17     |
| 3.3 Validación de los sistemas compatibles.....       | 19     |
| 4 CONCLUSIONES.....                                   | 23     |
| 5 RECOMENDACIONES .....                               | 24     |
| 6 LITERATURA CITADA.....                              | 25     |

## ÍNDICE DE CUADROS

|   | Página |
|---|--------|
| Cuadro 1. Características geográficas, edafológicas y climáticas de las cuatro localidades de estudio para <i>Laguncularia racemosa</i> C. F. Gaertn en Colima. ....  | 7      |
| Cuadro 2. Frecuencia por categoría diamétrica y de altura para <i>Laguncularia racemosa</i> C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima. ....  | 9      |
| Cuadro 3. Estadísticos de las variables medidas en la muestra de árboles de <i>Laguncularia racemosa</i> C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima. ....   | 10     |
| Cuadro 4. Modelos compatibles de ahusamiento y volumen comercial .....  | 13     |
| Cuadro 5. Parámetros obtenidos en el ajuste de los modelos compatibles para <i>Laguncularia racemosa</i> C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima. ....   | 16     |
| Cuadro 6. Estadísticos de bondad de ajuste para modelos de volumen para <i>Laguncularia racemosa</i> C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima. ....   | 18     |
| Cuadro 7. Estadísticos de bondad de ajuste para modelos de ahusamiento para <i>Laguncularia racemosa</i> C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima. ....   | 19     |
| Cuadro 8. Estadísticos de validación para la predicción del diámetro (m) y volumen (m <sup>3</sup> ) de los tres mejores modelos para <i>Laguncularia racemosa</i> C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima. .... | 20     |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  | Página |
|--|--------|
| Figura 1. Mapa de ubicación de los manglares bajo estudio en el Estado de Colima. ....   | 8      |
| Figura 2. Perfil de cada árbol para diámetro (cm) con respecto a la altura (m) para <i>Laguncularia racemosa</i> C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima. ....  | 11     |
| Figura 3. Perfil de cada árbol para volumen (m <sup>3</sup> ) con respecto a la altura (m) para <i>Laguncularia racemosa</i> C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima. ....  | 11     |
| Figura 4. (a) Comportamiento del diámetro en metros y (b) volumen comercial m <sup>3</sup> estimado mediante el modelo de Cruz-Cobos <i>et al.</i> (2008) con relación al observado para <i>Laguncularia racemosa</i> C. F. Gaertn. ....                     | 20     |
| Figura 5. (a) Comportamiento del diámetro en metros y (b) volumen comercial m <sup>3</sup> estimado mediante el modelo de Fang y Bailey (1999) I-a con relación al observado para <i>Laguncularia racemosa</i> C. F. Gaertn.....                             | 21     |
| Figura 6. Diámetro en metros (a) y volumen comercial m <sup>3</sup> (b) observado y estimado mediante el modelo de Cruz-Cobos <i>et al.</i> (2008) con respecto a la altura a diferentes secciones (Hm) para <i>Laguncularia racemosa</i> C. F. Gaertn. .... | 22     |

## RESUMEN

Las ecuaciones de ahusamiento permiten realizar estimaciones del diámetro a distintas alturas del fuste de un árbol, así como su volumen individual, comercial y total. Estas sirven como herramientas en el aprovechamiento de especies forestales maderables, ya que dichas ecuaciones permiten generar tablas de distribución de productos. El objetivo fue ajustar un sistema compatible de ahusamiento-volumen que presente estimaciones de diámetro y volumen comercial adecuadas para *Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima. Se obtuvieron datos de altura total, diámetro normal y altura a diferentes secciones de 149 árboles, su volumen se calculó con la fórmula de Smalian para las secciones del fuste y para la punta del árbol se utilizó la fórmula del cono truncado. Se ajustaron cinco sistemas compatibles de ahusamiento y volumen en el programa estadístico SAS 9.0 por medio del procedimiento MODEL, obteniendo los resultados bajo la estimación simultánea a partir de la máxima verosimilitud con información completa. A través del sistema de calificación de los estadísticos de bondad de ajuste se obtuvo que el mejor modelo fue el de Cielito 1 modificado por Cruz-Cobos en 2008 por presentar el mayor coeficiente de determinación ajustado (0.9455 para volumen y 0.9551 en ahusamiento) y los valores menores en la raíz del cuadrado medio del error, este sistema resulta confiable para predecir diámetros, alturas y volúmenes a diferentes secciones del árbol.

Palabras clave: Colima, FIML, *Laguncularia racemosa*, sistema compatible de ahusamiento, volumen comercial.

## ABSTRACT

The taper equations allow to make estimations of the diameter at different heights of the stem of a tree, as well as its individual, commercial and total volume. These as tools in the exploitation of timber forest species, since these equations allow the generation of product distribution tables. The objective was to adjust a compatible taper-volume system that presents estimates of commercial diameter and volume suitable for *Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn in four locations of Colima. Data of total height, normal diameter and height were obtained at different sections of 149 trees, its volume was calculated with the Smalian formula for the sections of the shaft and for the tip of the tree the formula of the truncated cone was used. Five compatible systems of taper and volume were adjusted in the statistical program SAS 9.0 by means of the MODEL procedure, obtaining the results under the simultaneous estimation from the maximum likelihood with complete information. Through of the qualification system of the goodness of fit statistics it was obtained that the best model was the one of Cielito 1 modified by Cruz-Cobos in 2008 for presenting the highest adjusted determination coefficient (0.9455 for volume and 0.9551 in taper) and the lower values in the root of the mean square of the error, this system is reliable to predict diameters, heights and volumes to different sections of the tree

Keywords: Colima, FIML, *Laguncularia racemosa*, compatible taper system, commercial volume.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los manglares son un tipo de vegetación que se desarrolla en planicies costeras compuestas por especies adaptadas a condiciones como: inundaciones, suelos con poca circulación de aire y alta salinidad, esta última es posible porque pueden respirar mediante pequeñas aberturas ubicadas a lo largo de las raíces denominados neumatóforos (CONABIO, 2009).

A nivel mundial los bosques de manglares son raros y por ello cubren un área de sólo unos 152,000 km<sup>2</sup> en 123 naciones y territorios tropicales y subtropicales; esto es menos del 1% de todos los bosques tropicales del mundo y menos del 0.4% del total del patrimonio forestal mundial; México es un país que cuenta con una cobertura de manglar de 886,560.57 ha, representando el 0.64% del total de la superficie forestal nacional (CONAFOR, 2012; Van *et al.*, 2012). Se pueden encontrar manglares con distinta estructura y composición debido a que intervienen factores como el relieve, los gradientes altitudinales, el suelo, el nivel de anegación, así como alteraciones naturales y humanas (Lara-Lara *et al.*, 2008; Rodríguez-Zúñiga *et al.*, 2013).

En México se encuentran cuatro especies de mangles a lo largo de las vertientes del Pacífico y el Atlántico: mangle rojo (*Rhizophora mangle* L.), mangle negro (*Avicennia germinans* L.), mangle blanco (*Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn) y mangle botoncillo (*Conocarpus erectus* L.), esta última especie tiene una variedad *Conocarpus erectus var. sericeus*, pero a comparación de las cuatro especies anteriores esta tiene una distribución restringida en el país al igual que el mangle salado (*Avicennia bicolor* Standl) y mangle caballero o amarillo (*Rhizophora harrisonii* L.), las cuales sólo se pueden encontrar en algunas partes de Chiapas y Oaxaca (Rico-Gray, 1981; Agraz-Hernández *et al.*, 2006; Valderrama *et al.*, 2017).

La distribución de los mangles a lo largo de los ecosistemas costeros está en función de las aguas marinas o salobres, debido a que las especies han desarrollado mecanismos para la exclusión de la sal en raíces y la supresión excesiva a través de la secreción y la tolerancia a elevadas manifestaciones de salinidad en los tejidos vegetales (Rzedowski, 2006; Travieso-Bello, 2006). Su

hábitat se restringe a las orillas de bahías, canales de mareas, desembocaduras de ríos y lagunas costeras; Lugo y Snedaker (1974) establecieron una clasificación para los diferentes tipos de manglares considerando el área en donde crecen dentro del estuario, ya que implica desarrollarse en ambientes diferentes y que a la vez influye en la forma de crecimiento y dominancia, por lo que se identificaron: manglar de franja, manglar ribereño, manglar inundado, manglar de cuenca y manglar enano. El tipo de manglar que domine en un área, así como su estructura y funcionalidad dependerá de distintos factores como la cuenca hidrológica al que se asocia, temperatura y la extensión de la planicie costera (Rzedowski, 2006; Travieso-Bello, 2006; Moreno-Casasola e Infante, 2010; Díaz, 2011; Domínguez-Domínguez *et al.*, 2011).

Por otra parte, los mangles han desarrollado mecanismos de supervivencia, entre los cuales pueden destacar la viviparidad de sus frutos, lo cual permite que los embriones que resultan de la reproducción sexual tengan su crecimiento fuera de la cubierta de la semilla y del fruto, pudiendo germinar aun cuando no se ha desprendido de la planta, además como respuesta a las perturbaciones que sufren, las especies tienen la capacidad de rebrotar y repoblar áreas que han sido perturbadas (Travieso-Bello, 2006; Kauffman, 2013; Serra *et al.*, 2014).

Otras de las características de estas especies es que actúan como biofiltros naturales en sitios contaminados con metales pesados debido a que se fijan en la biomasa de las raíces y la madera (Foroughbakhch *et al.*, 2004; Olguín *et al.*, 2007; Ochoa *et al.*, 2016). Cabe señalar que existe una estrecha relación entre metales pesados y el volumen de la madera; en general los manglares funcionan como fuente de nutrientes para ecosistemas vecinos como a los arrecifes de coral, ayudan a mantener la red alimenticia de los organismos que habitan en ellos, captura de gases de efecto invernadero, depuración del aire y agua, agentes de remediación, control de clima, del ciclo de nutrientes o la producción del suelo (Foroughbakhch *et al.*, 2004; CONABIO, 2009, Serra *et al.*, 2014; Valderrama *et al.*, 2017). Además, mantienen en buen funcionamiento todos los procesos naturales como los cambios del nivel del mar, forman parte de refugio de flora y fauna silvestre y sobre todo

poseen un alto valor estético, recreativo y de investigación (Bravo *et al.*, 2006; Mejía *et al.*, 2014; Serra *et al.*, 2014; Valderrama *et al.*, 2017).

Su composición permite que la erosión ocasionada por las olas y corrientes marinas disminuya, permitiendo dar más estabilidad. También son fuente de protección contra cambios climáticos principalmente ante fenómenos naturales, este efecto es más significativo en manglares que no han sido dañados o destruidos; además proporcionan de manera indirecta recursos necesarios para la actividad pesquera, dando como resultado actividades económicas que beneficia a las comunidades cercanas a estos ecosistemas (Yáñez-Arancibia y Lara-Domínguez, 1999; Moreno-Casasola e Infante, 2016). Los manglares ofrecen bienes y servicios como el uso para combustible, celulosa, material para construcción, extracción de taninos, forraje y medicina tradicional, como ejemplo en Colima el uso maderable es para la construcción de casas o instalaciones rurales y para elaborar herramientas de pesca, así como, para combustible (Yáñez-Arancibia y Lara-Domínguez, 1999; Silva-Bátiz, 2009).

En los últimos años la pérdida continua de bosque de manglar está asociada a causas naturales y a los grandes impactos provocadas por las actividades humanas debido al aumento de la población (Moreno-Casasola e Infante, 2016). Éstas actividades son: la conversión, dada por la implementación de la acuicultura en la zona intermareal, el desarrollo urbano de infraestructura, turismo y agricultura; la degradación a consecuencia del pastoreo de animales, la contaminación (descarga de plaguicidas y sustancias químicas tóxicas, aguas residuales), alteraciones hidrológicas y modificaciones al flujo hidrológico, sobreexplotación, pesca excesiva y finalmente los impactos naturales (FAO, 1994; Villalobos *et al.*, 1999; Valdez, 2002; Silva-Bátiz *et al.*, 2009; Van *et al.*, 2012, Santamaría-Damián *et al.*, 2015).

Comúnmente las especies de mangle son utilizadas por las comunidades para la obtención de recursos maderables, por lo tanto, es importante estimar su volumen y generar información que permita posteriormente elaborar una tabla de distribución de productos (West, 2009).

Existen distintas herramientas para la cuantificación de volumen, actualmente las más utilizadas son las ecuaciones matemáticas las cuales emplean atributos fáciles de medir, estas ecuaciones sirven para generar tarifas volumétricas y tablas de distribución de productos, esta última se genera con ecuaciones de ahusamiento y volumen (Vargas-Larreta *et al.*, 2018).

Es común que se confundan los términos de ahusamiento y forma, no obstante, varios autores definen al ahusamiento como la tasa de estrechamiento del diámetro con relación al incremento de la altura. Gray (1956) describe que los árboles tienden a disminuir su diámetro conforme aumenta la altura, considerando un árbol alto y delgado o corto y robusto dependiendo de lo rápido que pueda ir disminuyendo a diferentes alturas, para ello toma en cuenta que los árboles adoptan tres formas: cono, paraboloides y paraboloides cúbicos. La forma de un árbol es algo compleja ya que no adquiere una forma constante, sino que va cambiando a lo largo del fuste, desde la base en forma de neiloide hasta la última sección en forma de cono. Las ecuaciones de ahusamiento proporcionan diferentes estimaciones como diámetro y alturas a distintas secciones del fuste, así como su volumen total, volumen comercial y altura comercial a diferente diámetro y desde cualquier altura del tocón y volumen individual considerando longitudes y alturas diferentes (Avery y Burkhart, 1994; Rentería-Anima y Ramírez-Maldonado, 1999; Kozak, 2004).

A fin de realizar este trabajo se pretende ajustar ecuaciones de ahusamiento-volumen para mangle blanco especie que se encuentra en estatus de Amenazada (A) en la NOM-059-SEMARNAT-2010, con la cual será posible estimar volumen comercial y diámetro a distintas secciones, esto es posible porque se definirá una ecuación de volumen y una de ahusamiento que se ajustaran de forma compatible, es decir, en las ecuaciones de ahusamiento deberá estar implícita la ecuación que pueda estimar el volumen total y para efecto de este trabajo se optará por trabajar con el volumen comercial (Cruz-Cobos *et al.*, 2008).

Por la necesidad de tener un control más eficiente en el aprovechamiento que se les da a los recursos forestales, se busca obtener una ecuación de volumen-ahusamiento que se ajuste para mangle blanco. Esta herramienta permite conocer cuánto puede aprovecharse de un árbol, también es posible realizar una tabla de

distribución de productos. Recientemente se ha incrementado el interés sobre el papel que desempeñan estos ecosistemas, porque se ha demostrado que tienen una alta productividad y biomasa subterránea, además almacenan y reducen gran cantidad de CO<sub>2</sub> (Lovelock, 2008; Alongi, 2009; Spalding *et al.*, 2010).

Incluso los manglares son fuente de estudio por el potencial que presentan en fitorremediadores, en la producción de follaje dentro del ciclo del nitrógeno, el cual está estrechamente relacionado con la dinámica de los nutrientes del suelo. Los bosques de manglar están proporcionando información esencial para realizar mayor inversión en la utilización sostenible, investigación, protección y restauración de éstos (Foroughbakhch *et al.*, 2004; Félix-Pico *et al.*, 2006; Van *et al.*, 2012; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2014).

En Colima no se cuenta con ecuaciones de ahusamiento-volumen para mangle blanco que permita tener la cuantificación del recurso para uso comercial. En este estudio estuvieron implícitas cuatro localidades: Boca de Pascuales, Cuyutlán, El Chupadero y Tecuanillo, las cuales se ubican en la región 28 Cuyutlán-Chupadero como regiones marinas prioritarias, además de ser sitio Ramsar debido a su alta biodiversidad, cabe mencionar que la Laguna de Cuyutlán es el segundo cuerpo de agua más extenso del Estado de Colima y el más importante de la vertiente del Océano Pacífico.

## 1.1 Objetivos e hipótesis

Ajustar un sistema compatible de ahusamiento-volumen que presente estimaciones de diámetro y volumen comercial adecuadas para *Laguncularia racemosa* en cuatro localidades de Colima.

### Objetivos específicos

- a) Ajustar cinco sistemas compatibles de ahusamiento-volumen para mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) en cuatro localidades de Colima.

- b) Comparar la bondad de ajuste de las funciones y seleccionar la ecuación que mejor estime el diámetro y volumen comercial a diferentes alturas para mangle blanco.
- c) Validar el mejor modelo que estime de manera confiable para mangle blanco el diámetro y volumen comercial.

Hipótesis nula ( $H_0$ ) y alternativa ( $H_1$ ) propuestas:

$H_0$ : Ninguno de los sistemas compatibles es estadísticamente confiable al 95% para estimar el perfil fustal y volumen comercial de mangle blanco en las cuatro localidades de Colima.

$H_1$ : Al menos uno de los sistemas compatibles es estadísticamente confiable al 95% para estimar el perfil fustal y volumen comercial de mangle blanco en las cuatro localidades de Colima.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Descripción del área de estudio.

#### 2.1.1 Ubicación geográfica

El área de estudio consta de cuatro localidades ubicadas en dos municipios del Estado de Colima. En el municipio de Tecomán se tienen las localidades Boca de Pascuales, El Chupadero y Tecuanillo y en el municipio de Armería la localidad de Cuyutlán (Cuadro 1 y Figura 1).

Cuadro 1. Características geográficas, edafológicas y climáticas de las cuatro localidades de estudio para *Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn en Colima.

| Localidad         | Coordenadas                     | Altitud (msnm) | Edafología  | Clima                           |
|-------------------|---------------------------------|----------------|---|---------------------------------|
| Boca de Pascuales | 18°51'58.65"N<br>103°58'21.64"O | 4              | Feozem háplico (Hh) y Fluvisol éutrico (Je) este último más abundante.                      | BS1(h´)w<br>Semiárido<br>cálido |
| El Chupadero      | 18°44'59.10"N<br>103°48'12.14"O | 1              | Vertisol pélico (Vp), Chernozem háplico (Ch), Gleysol vértico (Gv) y Solonchak gléyico (Zg) | Awo<br>Cálido<br>subhúmedo      |
| Tecuanillo        | 18°48'51.18"N<br>103°53'56.15"O | 3              | Castañozem háplico (Kh), Solonchak órtico (Zo) y Feozem calcárico (Hc).                     | BS1(h´)w<br>Semiárido<br>cálido |
| Cuyutlán          | 18°55'39.96"N<br>104° 3'52.55"O | 2              | Solonchak gléyico (Zg) y con menor presencia de Vertisol pélico (Vp).                       | BS1(h´)w<br>Semiárido<br>cálido |

Fuente: INIFAP-CONABIO, 1995; García-CONABIO, 1998.

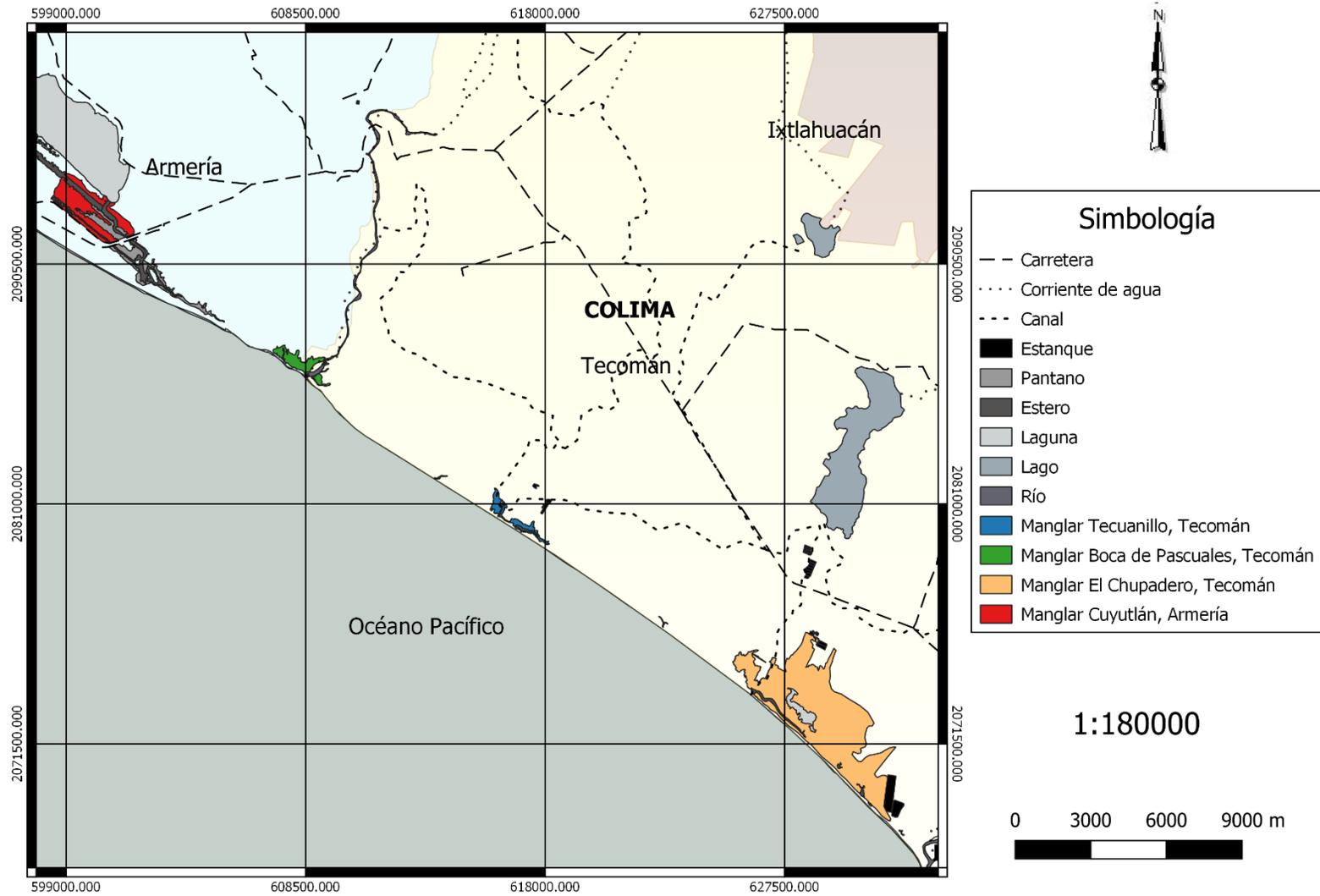


Figura 1. Mapa de ubicación de los manglares bajo estudio en el Estado de Colima.

## 2.2 Muestreo y tamaño de muestra

Para el presente estudio se realizó un muestreo selectivo, el cual consistió en la elección de árboles representativos de los sitios a evaluar, considerando algunos criterios como altura, sin daños en el fuste, sanos y con copas completas, que permitan tener una muestra representativa de la variabilidad de los sitios evaluados. Este tipo de muestreo permitió obtener características y variaciones en la población de forma más rápida.

El número de individuos fue representativo y se optó por evaluar 150 ejemplares de distintas categorías diamétricas porque permite tener una caracterización más amplia de la variable, además de que al ser una muestra grande se puede tener una mayor precisión y se cubre más parte de la población. Se consideraron individuos desde la categoría diamétrica cero, teniendo un mínimo de 10 individuos por cada categoría diamétrica, excepto en las categorías grandes donde se tienen menos de 10 árboles debido a que su presencia no fue frecuente en los sitios (Cuadro 2).

Cuadro 2. Frecuencia por categoría diamétrica y de altura para *Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima.

| Categoría<br>diamétrica (cm) | Categoría en altura (m) |        |        |       |    |    | Total |
|------------------------------|-------------------------|--------|--------|-------|----|----|-------|
|                              | 0                       | 5      | 10     | 15    | 20 | 25 |       |
| 0                            | 11 (3)                  | 17 (4) |        |       |    |    | 28    |
| 5                            | 2                       | 20 (7) | 1      | 1     |    |    | 24    |
| 10                           |                         | 1      | 24 (7) | 5 (2) |    |    | 30    |
| 15                           |                         | 1      | 17 (4) | 7 (2) |    |    | 25    |
| 20                           |                         |        | 9 (3)  | 5 (1) | 1  | 1  | 16    |
| 25                           |                         |        | 7 (3)  | 5 (1) | 2  |    | 14    |
| 30                           |                         |        | 2      | 4 (1) |    |    | 6     |
| 35                           |                         |        | 2      | 2     |    |    | 4     |
| 40                           |                         |        |        | 1     |    |    | 1     |
| 45                           |                         |        |        | 1     |    |    | 1     |
| Total                        | 13                      | 39     | 62     | 31    | 3  | 1  | 149   |

(n)= árboles seleccionados para la validación del mejor sistema compatible de ahusamiento-volumen.

Cuadro 3. Estadísticos de las variables medidas en la muestra de árboles de *Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima.

| Variable                                   | Máx.  | Medio | Mín. | D.E.  |
|--|-------|-------|------|-------|
| Diámetro a la base con corteza (cm)        | 64.80 | 17.40 | 1.70 | 12.65 |
| Diámetro a 0.30 m con corteza (cm)         | 54.30 | 15.23 | 0.80 | 11.44 |
| Diámetro normal (Dn) con corteza en cm     | 44.10 | 12.35 | 0.50 | 9.58  |
| Altura total (At) del árbol (m)            | 23.00 | 9.16  | 1.40 | 4.48  |
| Altura del árbol Hm a partir del tocón (m) | 22.70 | 8.86  | 1.10 | 4.48  |

D.E.= Desviación estándar

### 2.3 Medición de variables

La medición de variables continuas se realizó con los árboles en pie, es decir los individuos no se derribaron para obtener sus medidas. El diámetro del árbol se tomó con una cinta diamétrica, se dividió el fuste de cada árbol en secciones y se tomó la primer medida al nivel del suelo (base), después a 0.30 m y subsecuente a cada metro hasta completar la última sección de la altura total del árbol, no obstante, las últimas mediciones de diámetros en algunos árboles no pudieron efectuarse debido a que las mediciones estaban siendo realizadas directamente, es decir se escalaron los árboles para obtener los datos y en puntos estratégicos no se pudo seguir midiendo y considerando que la especie está en la NOM-059-SEMARNAT-2010 se optó por registrar la medida de la última sección a la que se tuvo acceso para evitar que el fuste se quebrar y posteriormente se registró la longitud restante. Para obtener las medidas de la variable de altura se empleó una cinta métrica midiendo desde la base hasta la punta del árbol o última rama.

### 2.4 Captura y procesamiento de datos

Una vez capturados los datos de campo en el programa Excel se calculó por individuo el volumen de fuste total (tocón y fuste). El procedimiento consistió en la sumatoria del volumen de la punta calculado con la fórmula del cono truncado (1) y el volumen de las secciones o trozas del fuste obtenido mediante la fórmula de Smalian (2) (Cailliez, 1980).

$$V_{\text{punta}} = \frac{\pi}{12} (D_1^2 + D_2^2 + D_1 D_2) L \quad (1)$$

$$V_{\text{troza}} = \frac{\pi}{40000} \left( \frac{D_1^2 + D_2^2}{2} \right) L \quad (2)$$

Dónde:  $V_{\text{punta}}$ = Volumen de la punta del árbol;  $V_{\text{troza}}$ = Volumen por sección;  $D_1$ = Diámetro inferior (cm);  $D_2$ = Diámetro superior (cm);  $L$ = Longitud de la sección.

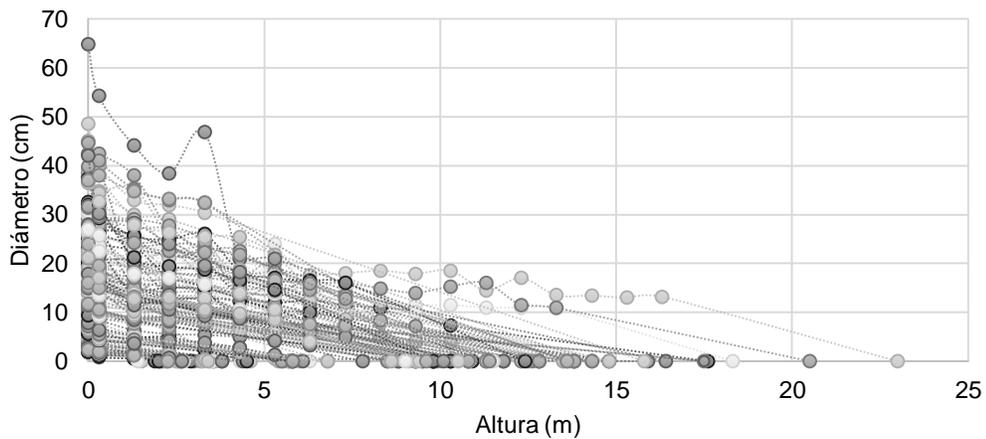


Figura 2. Perfil de cada árbol para diámetro (cm) con respecto a la altura (m) para *Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima.

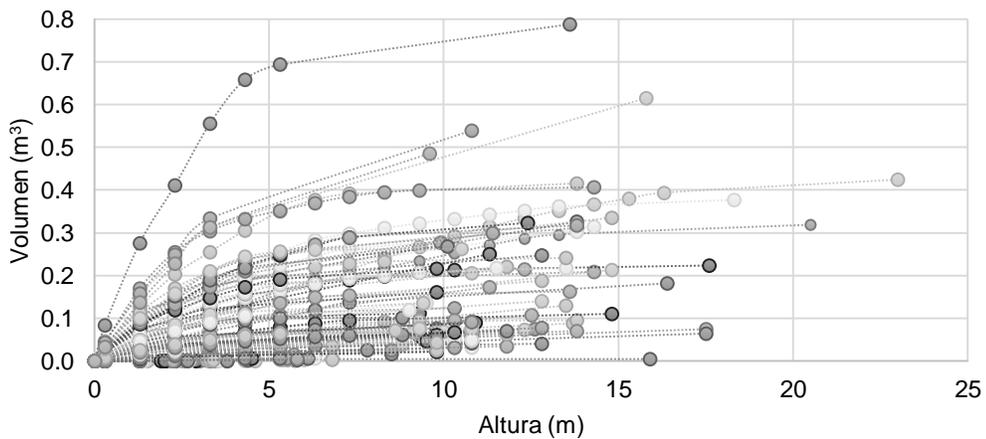


Figura 3. Perfil de cada árbol para volumen (m<sup>3</sup>) con respecto a la altura (m) para *Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima.

Se graficaron las alturas de cada árbol con respecto al diámetro (Figura 2) así como como las alturas contra el volumen (Figura 3), dichas graficas se emplearon para la revisión de datos y determinar si existían datos erróneos o atípicos que pudieran afectar el análisis estadístico, por lo cual se descartó la información proveniente de un árbol ya que se observó anormal, quedando información de 149 árboles. En cuanto al resto de los datos a pesar de no seguir una forma decreciente del diámetro con respecto a la altura se consideró que son respuestas lógicas debido al crecimiento de la especie.

## 2.5 Modelos matemáticos empleados

Se trabajó con cinco modelos de ahusamiento-volumen que han sido empleados y han proporcionado buenos resultados estadísticos para diferentes especies en la estimación de diámetro y volumen comercial (Cuadro 4) (Cruz-Cobos *et al.*, 2008; Pompa *et al.*, 2009; López *et al.*, 2015; Hernández-Ramos *et al.*, 2016; Tlaxcala-Méndez *et al.*, 2016; Hernández-Ramos *et al.*, 2017; Silva-González *et al.*, 2018).

## 2.6 Análisis estadísticos

El ajuste estadístico para los cinco sistemas compatibles de ahusamiento-volumen que se identificaron como apropiados para estimar el volumen comercial de mangle blanco se realizó mediante el procedimiento MODEL en el programa estadístico de regresión SAS versión 9.0.

Los resultados del ajuste estadístico se obtuvieron bajo la estimación simultánea a partir de la máxima verosimilitud con información completa (FIML) ya que de acuerdo a Silva-González *et al.* (2018) el tipo de ajuste simultaneo permite obtener datos más precisos y más eficaz debido a que de forma compatible se ajusta la ecuación de ahusamiento y la de volumen empleando los mismos parámetros de ajuste.

Cuadro 4. Modelos compatibles de ahusamiento y volumen comercial

Lenhart y Clutter (1971)

$$Dm = Dn \left( \frac{At-Hm}{At-1.3} \right)^{1/\beta_1-2}$$

$$Vc = (\theta_0 Dn^{\theta_1} At^{\theta_2}) - \left( \beta_0 \frac{Dm^{\beta_1}}{Dn^{\beta_1-2}} (At-1.3) \right)$$

Clutter (1980)

$$Dm = k \frac{At-Hm}{\beta_0 \left( \theta_0 Dn^{\theta_1 \beta_2} At^{\theta_2} (1-2/\beta_1) \right)^{1/\beta_1-2}}$$

$$Vc = (\theta_0 Dn^{\theta_1} At^{\theta_2}) - \left( 1 - \beta_0 \frac{Dm^{\beta_1}}{Dn^{\beta_2}} \right)$$

Fang y Bailey (1999) I-a

$$Dm = \sqrt{\frac{\theta_0}{\beta_0} Dn^{\theta_1} At^{(\theta_2-k/\beta_0)} (At-Hm)^{(k-\beta_0)/\beta_0}}$$

$$Vc = (\theta_0 Dn^{\theta_1} At^{\theta_2}) - (\beta_0 Dn^2 (At-Hm))$$

General de Fang y Bailey (1999)

$$Dm = \left[ \frac{(\beta_1-2)k}{(\beta_1-2\beta_2)\beta_0} \left[ (Hi)^{1-2\beta_2/\beta_1} - At^{1-2\beta_2/\beta_1} \right] + \left( \frac{\theta_0}{\beta_0} Dn^{\theta_1} At^{\theta_2} \right)^{1-2/\beta_1} \right]^{1/(\beta_1-2)} \times (Hi)^{-\beta_2/\beta_1}$$

$$Vc = (\theta_0 Dn^{\theta_1} At^{\theta_2}) - (\beta_0 Dn^{\beta_1} (At-Hm)^{\beta_2})$$

Cruz-Cobos *et al.* (2008)

$$Dm = \sqrt{Dn^{\theta_0} \left( \beta_0 \left( \frac{At-Hm}{At} \right) + \beta_1 \left( \frac{At-Hm}{At} \right)^2 + \beta_2 \left( \frac{At-Hm}{At} \right)^3 \right)}$$

$$Vc = k D^{\theta_0} At^{-1} \left[ \beta_0 \left( \left( AtHm - \frac{Hm^2}{2} \right) - \left( Atht - \frac{ht^2}{2} \right) \right) - \frac{\beta_1}{3At} (Hi^3 - (At-ht)^3) - \frac{\beta_2}{4At^2} (Hi^4 - (At-ht)^4) \right]$$

Dónde:

Dn= diámetro normal (m); Dm= diámetro (cm) a la altura Hm (m) desde el nivel del tocón; At= altura total del árbol (m); Hm= Altura a distintas secciones en el fuste (m); Vc= volumen comercial variable en (m<sup>3</sup>); k= π/40000; θ<sub>i</sub>, β<sub>i</sub>= coeficientes a determinar mediante el ajuste; ht= altura del tocón (m); Hi= At-Hm.

## 2.7 Selección del modelo

Para la evaluación y selección del mejor modelo ajustado se optó por aplicar un sistema de calificación similar al que trabajó Tamarit *et al.* (2014), utilizando la Suma del Cuadrado del Error (SCE), Cuadrado Medio del Error (CME), Raíz del CME (RCME), el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{aj}$ ), así como también los supuestos de regresión de Durbin-Watson (DW) para autocorrelación, Shapiro-Wilk (SW) para normalidad y la prueba de White para heterocedasticidad en donde se le asignaron valores del 1 al 5. Teniendo en cuenta que los estadísticos de SCE, CME, RCME, así como los supuestos de regresión deberían tener los valores más bajos para elegir el mejor modelo, se asignó valor de 5 a aquel que tuviera el valor más bajo y de forma descendiente hasta llegar al valor de 1 a aquellos con valores más altos; por el contrario para el  $R^2_{aj}$  el valor de 5 fue asignado al valor más alto (Pompa *et al.*, 2009; Tapia y Návar, 2011; Moras y Vallejos-Barra, 2013; Quiñonez-Barraza *et al.*, 2014; López *et al.*, 2015, Uranga-Valencia *et al.*, 2015; Hernández-Ramos *et al.*, 2016; Rodríguez-Toro *et al.*, 2016; Tlaxcala-Méndez *et al.*, 2016; Hernández-Ramos *et al.*, 2017).

## 2.8 Validación para la ecuación de volumen

Se designó una muestra aleatoria representativa del 25% de la población total, en donde se seleccionaron 38 individuos los cuales fueron divididos en las categorías diamétricas de la 0 a la 30 y las categorías de altura de la 0 a la 15 (Cuadro 2), dicha muestra se excluyó del análisis estadístico. Los individuos de categorías mayores no se contemplaron para la selección del 25% debido a que la frecuencia de árboles es muy baja.

Posteriormente se realizó la validación y comparación de los modelos con base en la Diferencia Agregada o sesgo (DA), Error Medio Absoluto (EMA) y Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME) utilizando las siguientes expresiones (Prodan *et al.*, 1997; Tapia y Návar, 1998; Pompa *et al.*, 2009; Quiñonez-Barraza *et al.*, 2014; Tlaxcala-Méndez *et al.*, 2016; Niño *et al.*, 2018):

a) Diferencia Agregada (DA)

$$DA = \frac{\sum(O_i - E_i)}{n}$$

b) Error Medio Absoluto (EMA)

$$EMA = \frac{\sum |O_i - E_i|}{n}$$

c) Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME)

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

Dónde:

$O_i$ = valor observado

$E_i$ = valor estimado

$n$ = número de observaciones

Para verificar los resultados de la validación, se graficó el diámetro y volumen observado contra el estimado del mejor sistema compatible, se obtuvo la línea de tendencia y el  $R^2$ , esto para corroborar el buen ajuste de los modelos para la estimación del diámetro y volumen.

## 2.9 Similitud estadística del mejor modelo

Una vez realizada la elección del mejor modelo conforme a los criterios anteriores referente a los estadísticos de ajuste, supuestos de regresión, así como la prueba de validación, se graficaron los valores observados contra los estimados de diámetro y volumen para determinar con ayuda de la línea de tendencia, el valor de  $R^2$  la semejanza de los valores obtenidos con el mejor modelo.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Ajuste de sistemas compatibles

En los perfiles de los árboles (Figura 2 y Figura 3) se puede observar que los árboles no siguen la forma normal del fuste como comúnmente sucede en otras especies como las del género *Pinus*. Como ejemplos está el realizado por Hernández *et al.* (2013) el cual en su estudio sobre funciones de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus patula* Schlttdl. *et* Cham. en observó que los datos provenientes de árboles de un bosque natural tienen una forma cilíndrica constante a lo largo del fuste o bien tienen una forma paraboloide tendiente a ser cilíndrica como lo describe Uranga-Valencia *et al.* (2015) para la misma especie, pero en el Estado de Oaxaca.

También es el caso para Cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) de diferentes procedencias en Tezonapa, Veracruz, en donde a pesar de las diferencias geográficas consideran que los árboles adquieren a lo largo del fuste una forma similar a un paraboloide y además cónica para algunos casos (Tlaxcala-Méndez *et al.*, 2016).

Cuadro 5. Parámetros obtenidos en el ajuste de los modelos compatibles para *Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima.

| Modelo                          | Parámetros de los modelos ajustados |                     |                     |                     |                     |                     |
|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                 | $\beta_0$                           | $\beta_1$           | $\beta_2$           | $\theta_0$          | $\theta_1$          | $\theta_2$          |
| Lenhart y Clutter (1971)        | -0.03611<br><0.0001                 | 0.363316<br><0.0001 |                     | 0.05947<br><0.0001  | 0.923788<br><0.0001 | 1.134908<br><0.0001 |
| Clutter (1980)                  | -0.0626<br>0.0303                   | 1.03752<br><0.0001  | 1.063738<br><0.0001 | 17.50207<br>0.0001  | 1.858365<br><0.0001 | -0.91213<br><0.0001 |
| Fang y Bailey (1999) I-a        | 0.206669<br><0.0001                 |                     |                     | 0.373667<br><0.0001 | 1.780835<br><0.0001 | 0.817715<br><0.0001 |
| Fang y Bailey (1999) II-b       | 2.413912<br><0.0000                 | 1.476513<br><0.0001 | -0.11718<br><0.0001 | 1.559409<br><0.0001 | 1.400376<br><0.0001 | 0.161501<br><0.0001 |
| Cruz-Cobos <i>et al.</i> (2008) | 1.546437<br><0.0001                 | -4.23648<br><0.0001 | 3.827547<br><0.0001 | 1.713033<br><0.0001 |                     |                     |

En el Cuadro 5 se observan los parámetros obtenidos para cada uno de los modelos ajustados simultáneamente y los cuales son altamente significativos para la mayoría de los casos, por lo tanto, se puede decir que la mayoría de las variables independientes como diámetro normal, altura del tocón, altura total del árbol y a distintas secciones influyen sobre la variable dependiente, excepto en el modelo de Clutter (1980) en donde dos de los parámetros no fueron significativos al 99% de confianza.

### 3.2 Bondad de ajuste de los sistemas compatibles

En la calificación de estadísticos y revisión de supuestos de regresión (Cuadro 6 y 7) se obtuvo como resultado que para volumen y ahusamiento el mejor modelo es el de Cruz-Cobos *et al.* (2008) seguido del modelo de Fang y Bailey (1999) I-a porque obtuvieron la calificación más alta, en cambio el modelo de Clutter (1980) fue el que obtuvo la menor calificación en la ecuación de volumen y no todos sus parámetros fueron significativos (Cuadro 5), mientras que para ahusamiento la menor calificación la obtuvo el modelo de Lenhart y Clutter (1971).

Considerando lo anterior el modelo de Fang y Bailey I-a (1999) resultó con un coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{aj}$ ) de 0.8199 y 0.9340 para predecir volumen y ahusamiento de mangle blanco respectivamente (Cuadro 6 y 7), comparado con López *et al.* (2015) en la predicción de volumen para *P. oocarpa* Shiede y *P. douglasiana* Martínez el análisis de regresión arrojó valores de  $R^2_{aj}$  de 0.96 y 0.97 para volumen y un  $R^2_{aj} = 0.97$  en ambas especies para ahusamiento. Hernández-Ramos *et al.* (2016) obtuvieron un  $R^2_{aj} = 0.9547$  y 0.9583 en volumen y ahusamiento para *P. greggii* Englem y Silva-González *et al.* (2018) que trabajó con *Pinus arizonica* Engelm, *P. durangensis* Ehren y *P. egelmannii* Carr. obtuvieron valores en los coeficientes de determinación de 0.88 y 0.93 para volumen mientras que en ahusamiento los valores fueron de  $R^2_{aj} = 0.90$  a 0.96.

En cuanto al modelo de Cielito 1 modificado por Cruz-Cobos *et al.* (2008) se obtuvieron valores de  $R^2_{aj} = 0.9455$  para volumen y  $R^2_{aj} = 0.9351$  en ahusamiento (Cuadro 6 y 7), López *et al.* (2015) determinaron un  $R^2_{aj}$  de 0.98 y 0.99 en *P. oocarpa* y *P. douglasiana* en volumen y un  $R^2_{aj}$  de 0.97 para ahusamiento y Silva-González *et al.* (2018) en la estimación de volumen y ahusamiento un  $R^2_{aj}$  de 0.97 y 0.96 para

*P. arizonica* y *P. egelmannii* y para *P. durangensis*  $R^2_{aj}=0.99$  y  $0.97$  respectivamente.

Por Hernández *et al.* (2013) de los 11 sistemas compatibles de ahusamiento-volumen analizados el que mejor se ajusto fue el segmentado de Fang *et al.* (2000) con un coeficiente de determinación ajustado de 0.9809 para volumen comercial y 0.9706 en ahusamiento para *Pinus patula*, de igual manera Quiñonez-Barraza *et al.* (2014) tuvieron como resultado el modelo de Fang *et al.* (2000) para las diferentes especies de *Pinus* en Durango con  $R^2_{aj}$  de 0.98 y 0.99 para volumen y ahusamiento. Por otra parte, hay estudios que trabajan el volumen y ahusamiento de forma independiente, tal es el caso de Maldonado-Ayala y Návar (2001) quienes analizaron siete modelos de ahusamiento y determinaron que los modelos de forma variable de Newnham (1992) y de Biging (1984) fueron mejores con  $R^2_{aj}$  de 0.95 y 0.98 respectivamente esto para cinco especies de pino en plantaciones en la región de El Salto, Durango, cabe mencionar que con estos modelos es posible estimar el volumen comercial.

Cuadro 6. Estadísticos de bondad de ajuste para modelos de volumen para *Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima.

| Modelo                          | Ecuación de volumen comercial |          |        |            | Calif.<br>Total |
|---------------------------------|-------------------------------|----------|--------|------------|-----------------|
|                                 | SCE                           | CME      | RCME   | $R^2_{aj}$ |                 |
| Lenhart y Clutter (1971)        | 2.46                          | 0.003420 | 0.0585 | 0.7369     | 18              |
| Clutter (1980)                  | 5.83                          | 0.008080 | 0.0899 | 0.3789     | 12              |
| Fang y Bailey (1999) I-a        | 1.69                          | 0.002340 | 0.0484 | 0.8199     | 26              |
| Fang y Bailey (1999) II-b       | 2.18                          | 0.003030 | 0.0550 | 0.7673     | 21              |
| Cruz-Cobos <i>et al.</i> (2008) | 0.51                          | 0.000709 | 0.0266 | 0.9455     | 27              |

SCE= Suma del Cuadrado del Error; CME= Cuadrado Medio del Error; RCME= Raíz del Cuadrado Medio del Error;  $R^2_{aj}$ = Coeficiente de determinación ajustado.

Contrastando lo anterior los diferentes estudios tanto de sistemas compatibles como de forma independiente adquieren valores por arriba de 0.9 para el coeficiente de determinación ajustado, similar al modelo de Cruz-Cobos *et al.* (2008) que tiene un  $R^2_{aj}=0.9455$  para volumen y  $R^2_{aj} =0.9351$  en ahusamiento, así

mismo este modelo tiene una aplicación significativa en distintas especies ya que arroja buenos estadísticos de ajuste, también por ser más simple de aplicar, tal es el caso de López *et al.* (2015) y Silva-González *et al.* (2018) que a pesar de resultar con mejores estadísticos el modelo de Fang *et al.* (2000) consideran que es más fácil y sencillo de ajustar el modelo de Cruz-Cobos *et al.* (2008).

Cuadro 7. Estadísticos de bondad de ajuste para modelos de ahusamiento para *Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima.

| Modelo                          | Ecuación de ahusamiento |          |        |                              | Calif.<br>Total |
|---------------------------------|-------------------------|----------|--------|------------------------------|-----------------|
|                                 | SCE                     | CME      | RCME   | R <sup>2</sup> <sub>aj</sub> |                 |
| Lenhart y Clutter (1971)        | 0.93                    | 0.001290 | 0.0359 | 0.8894                       | 14              |
| Clutter (1980)                  | 0.63                    | 0.000870 | 0.0295 | 0.9254                       | 20              |
| Fang y Bailey (1999) I-a        | 0.56                    | 0.000770 | 0.0277 | 0.9340                       | 23              |
| Fang y Bailey (1999) II-b       | 0.66                    | 0.000910 | 0.0302 | 0.9220                       | 17              |
| Cruz-Cobos <i>et al.</i> (2008) | 0.55                    | 0.000757 | 0.0275 | 0.9351                       | 31              |

SCE= Suma del Cuadrado del Error; CME= Cuadrado Medio del Error; RCME= Raíz del Cuadrado Medio del Error; R<sup>2</sup><sub>aj</sub>= Coeficiente de determinación ajustado.

### 3.3 Validación de los sistemas compatibles

Para la validación se ocuparon los tres modelos con mejores estadísticos de bondad de ajuste y a pesar de que el modelo de Cruz-Cobos *et al.* (2008) resultó ser el mejor, en la prueba de validación (Cuadro 8) se aprecia que para la estimación del diámetro sobreestima mayormente a comparación de los otros dos modelos mientras que el volumen comercial subestima un poco a diferencia del resto. En la predicción del diámetro el modelo que menos sobreestima es el de Fang y Bailey (1999) I-a y en volumen comercial es el único que sobreestima. Por otra parte, el General de Fang y Bailey (1999) subestima a mayor media que el de Cruz-Cobos *et al.* (2008). El menor error medio absoluto (EMA) lo obtuvo el modelo General de Fang y Bailey (1999) para la estimación del diámetro con un valor de 0.0402 y para la estimación del volumen comercial el modelo de Cruz-Cobos *et al.* (2008) con 0.0081, referente al error promedio (REMC) el modelo de Cruz-Cobos *et al.* (2008)

tuvo el mayor error con 0.0435 para diámetro, pero menor error para volumen comercial y por el contrario el mayor error promedio de 0.1322 para volumen comercial fue el General de Fang y Bailey (1999).

Cuadro 8. Estadísticos de validación para la predicción del diámetro (m) y volumen (m<sup>3</sup>) de los tres mejores modelos para *Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn en cuatro localidades de Colima.

| Modelo                          | Diámetro |         |        | Volumen comercial |         |        |
|---------------------------------|----------|---------|--------|-------------------|---------|--------|
|                                 | RECM     | DA      | EMA    | RECM              | DA      | EMA    |
| Fang y Bailey (1999) I-a        | 0.0159   | -0.0011 | 0.0457 | 0.0270            | -0.0018 | 0.0167 |
| Fang y Bailey (1999) II-b       | 0.0359   | -0.0024 | 0.0402 | 0.1322            | 0.0087  | 0.0332 |
| Cruz-Cobos <i>et al.</i> (2008) | 0.0435   | -0.0029 | 0.0470 | 0.0130            | 0.0009  | 0.0081 |

DA= Diferencia Agregada; EMA= Error Medio Absoluto; RCME= Raíz del Cuadrado Medio del Error.

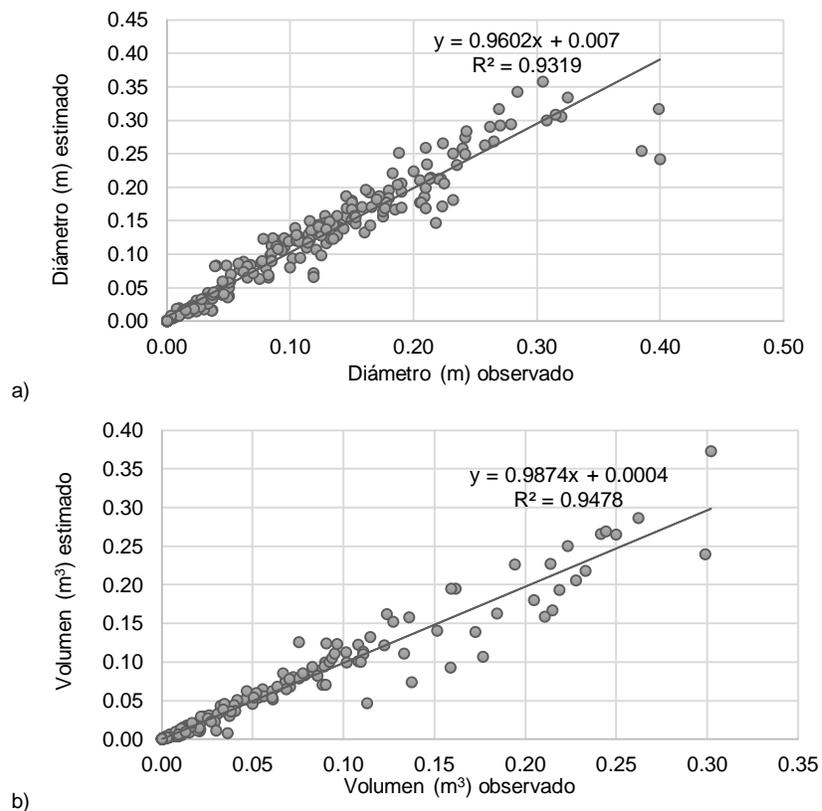


Figura 4. (a) Comportamiento del diámetro en metros y (b) volumen comercial m<sup>3</sup> estimado mediante el modelo de Cruz-Cobos *et al.* (2008) con relación al observado para *Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn.

La Figura 4 representa una comparación de los valores observados contra la estimación para diámetro y volumen para el modelo de Cruz-Cobos *et al.* (2008) mientras que la Figura 5 representa los resultados para el modelo de Fang y Bailey (1999) I-a. En las figuras se observa que las líneas son tendientes a ser rectas para ambos modelos ya que los valores de  $R^2$  están por arriba de 0.9 y a pesar de ser confiables para la estimación hay una pequeña diferencia entre ambos modelos; el modelo de Cruz-Cobos *et al.* (2008) tiene un  $R^2$  de 0.9319 para el perfil fustal mientras que en el modelo de Fang y Bailey (1999) I-a se obtiene un  $R^2$  de 0.9346, por otro lado, para la estimación del volumen comercial se tienen un  $R^2$  de 0.9478 y 0.9017 para Cruz-Cobos *et al.* (2008) y Fang y Bailey (1999) I-a.

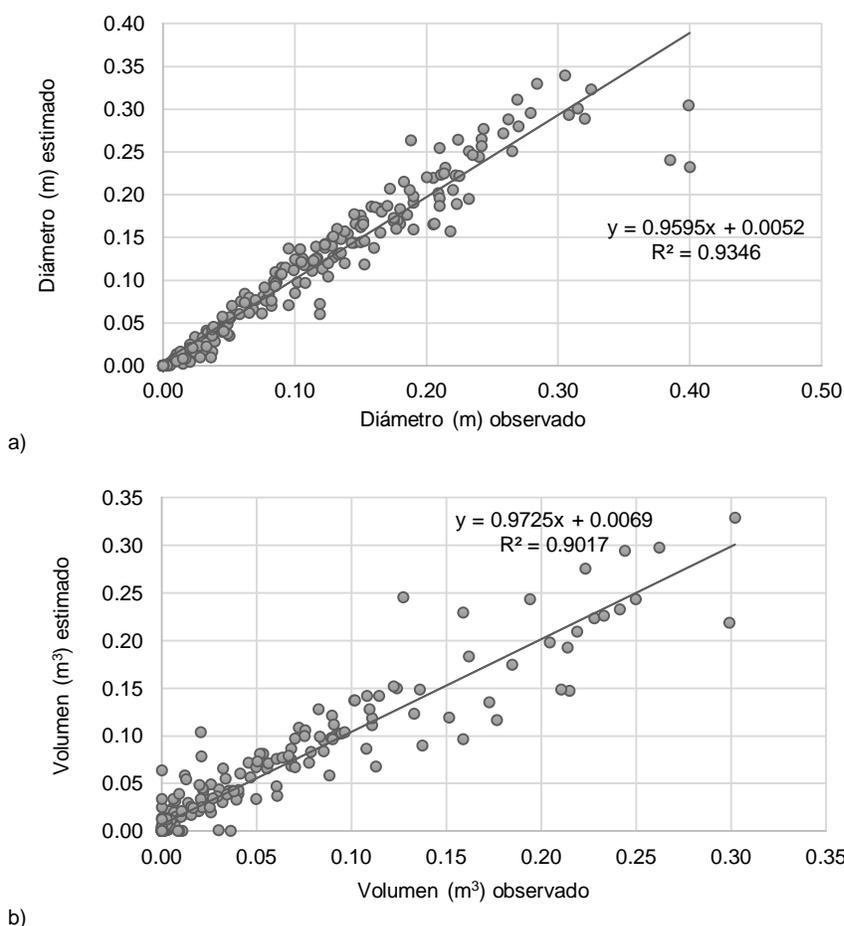


Figura 5. (a) Comportamiento del diámetro en metros y (b) volumen comercial  $m^3$  estimado mediante el modelo de Fang y Bailey (1999) I-a con relación al observado para *Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn.

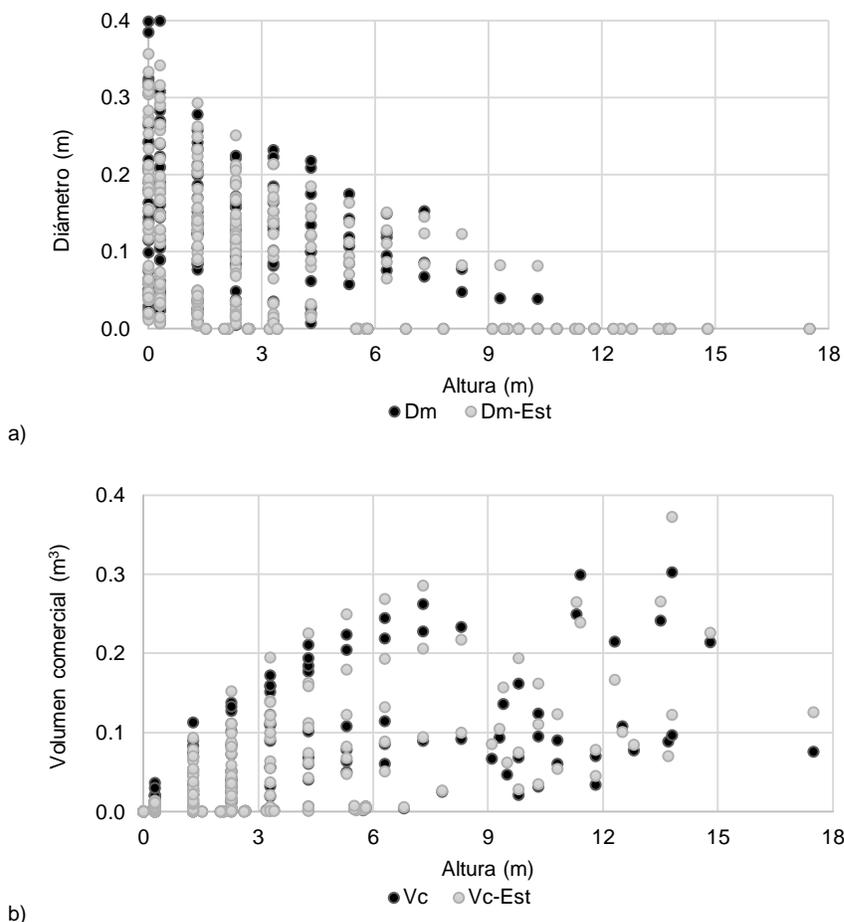


Figura 6. Diámetro en metros (a) y volumen comercial  $m^3$  (b) observado y estimado mediante el modelo de Cruz-Cobos *et al.* (2008) con respecto a la altura a diferentes secciones (Hm) para *Laguncularia racemosa* C. F. Gaertn.

Aunque en la Figura 5 (a) se observa que el modelo de Fang y Bailey (1999) I-a tiene un  $R^2$  poco más elevado para perfil fustal, el modelo de Cruz-Cobos *et al.* (2008) resulta más apropiado para estimar el diámetro y volumen comercial (Figura 6), éste modelo cumple con los supuestos de heterocedasticidad y normalidad, pero presenta ligeros problemas de colinealidad de residuales, sin embargo, con la prueba de validación se observa que las estimaciones en rangos de diámetros de categorías de 0 a 45 cm y categoría de altura de 0 a 25 metros son confiables.

#### 4 CONCLUSIONES

De los cinco sistemas compatibles de ahusamiento-volumen, los que resultaron con mejores estadísticos de bondad de ajuste para mangle blanco fueron el sistema de Cielito 1 modificado por Cruz-Cobos y el de Fang y Bailey I-a.

Conforme a los criterios de validación y adicionalmente a partir del análisis gráfico se observó que para el sistema de Cruz-Cobos no hay mucha variación entre los datos observados y estimados, por lo tanto, dicho modelo resulta factible para la estimación del perfil fustal y volumen comercial para mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) en las cuatro localidades de Colima.

El sistema compatible de Cielito 1 Cruz-Cobos es confiable al 95% para estimar diámetro y volumen comercial para mangle blanco, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula.

## 5 RECOMENDACIONES

Los sistemas compatibles de volumen-ahusamiento también son recomendables para las especies de mangles.

El sistema compatible de Cielito 1 modificado por Cruz-Cobos se limita a las condiciones dadas en las cuatro localidades de estudio, así como los rangos establecidos de diámetro y altura.

## 6 LITERATURA CITADA

- Agraz-Hernández, C. M., R. Noriega-Trejo, J. López-Portillo, F. J. Flores-Verdugo y J. J. Jiménez-Zacarías. 2006. Guía de Campo. Identificación de los Manglares en México. Medina H. C. A. Universidad Autónoma de Campeche. Campeche Camp., México. 45 p.
- Alongi, D. M. 2009. The Energetics of Mangrove Forests. Springer. New York. 216 p.
- Avery, T. E. y H. E. Burkhart. 1983. Forest Measurements. McGraw-Hill. New York.
- Bravo, J. R., M. J. Almanza e I. Sariego. 2006. El manglar, ecosistema de vida. Centro de Investigación de Ecosistemas Acuáticos (CIDEA). Managua, Nicaragua. 26 p.
- Cailliez, F. 1980. Estimación del Volumen Forestal y Predicción del Rendimiento con Referencia Especial a los Trópicos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Roma. 92 p.
- CONABIO. 2009. Manglares de México: Extensión y Distribución. 2ª ed. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México D.F. 99 p.
- CONAFOR. 2012. Inventario Nacional Forestal y de Suelos Informe 2004-2009. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. 212 p.
- Cruz-Cobos, F., H. M. De los Santos-Posadas y J. R. Valdez-Lazalde. 2008. Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* blanco en Durango, México. Agrociencia. 42: 473-485.
- Díaz G., J. M. 2011. Una revisión sobre los manglares: características, problemáticas y su marco jurídico. Importancia de los manglares, el daño de los efectos antropogénicos y su marco jurídico: caso sistema lagunar de Topolobampo. Ra Ximhai. 7: 355-369.
- Domínguez-Domínguez, M., J. Zavala-Cruz y P. Martínez-Zurimendi. 2011. Manejo Forestal Sustentable de los Manglares de Tabasco. Secretaria de Recursos Naturales y Protección Ambiental. Villahermosa, Tabasco, México. 137 p.

- Fang Z. y R. L. Bailey. 1999. Compatible volume and taper models with coefficients for tropical species on Hainan Island in Southern China. *Forest Science*. 45: 85-100.
- FAO. 1994. Directrices para la Ordenación de los Manglares. Estudio FAO Montes. Roma. 354 p.
- Félix-Pico, E. F., O. E. Holguín-Quiñones, A. Hernández-Herrera y F. Flores-Verdugo. 2006. Producción primaria de los manglares del Estero El Conchalito en Bahía de La Paz (Baja California Sur, México). *Ciencias Marinas*. 32: 53-63.
- Foroughbakhch P., R., A. E. Céspedes C., M. A. Alvarado V., A. Núñez G. y M. H. Badii. 2004. Aspectos ecológicos de los manglares y su potencial como fitorremediadores en el Golfo de México. *Ciencia UANL*. 7: 203-208.
- García, E.-CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 1998. Climas, escala 1:1000000. (Fecha de consulta 02 febrero 2019). Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- Gray, H. R. 1956. *The Form and Taper of Forest-Tree Stems*. Oxford Imperial Forestry Institute. 78 p.
- Hernández P., D., H. M. De los Santos P., G. Ángeles P., J. R. Valdez L. y V. H. Volke H. 2013. Funciones de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 4: 34-45.
- Hernández-Ramos, J., A. Hernández-Ramos, J. J. García-Magaña, X. García-Cuevas, G. G. García-Espinoza, H. J. Muñoz-Flores y E. H. Olvera-Delgadillo. 2016. Sistema compatible de ahusamiento-volumen comercial para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. en Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 8: 59-70.
- Hernández-Ramos, J., H. M. De los Santos-Posadas, J. R. Valdez-Lazalde, J. C. Tamarit-Urias, G. Ángeles-Pérez, A. Hernández-Ramos, A. Peduzzi y O. Carrero. 2017. Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Tabasco, México. *Acta Universitaria*. 26: 40-52.

- INIFAP (Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias) – CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 1995. Edafología, escala 1:1000000. (Fecha de consulta 09 febrero 2019). Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- Kauffman, J. B., D. C. Donato y M. F. Adame. 2013. Protocolo para la Medición, Monitoreo y Reporte de la Estructura, Biomasa y Reserva de Carbono de los Manglares. Center for International Forestry Research. Bogor, Indonesia. 117 p.
- Kozak, A. 2004. My last words on taper equations. *The Forestry Chronicle*. 80: 507-515.
- Lara-Lara, J. R., J. A. Arreola L., L. E. Calderón A., V. F. Camacho I., G. De la Lanza E., A. Escofet G., M. I. Espejel C., M. Guzmán A., L. B. Ladah, M. López H., E. A. Meling L., P. M. Casasola B., H. Reyes B., E. Ríos J. y J. A. Zertuche G. 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. *In: Capital Natural de México Vol. I Conocimiento actual de la biodiversidad*. Soberón J., G. Halffter y J. Llorente-Bousquets (eds). México D.F. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 109-134.
- López M., J. C., F. Cruz C., J. A. Nájera L. y F. J. Hernández. 2015. Modelos de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus oocarpa* y *Pinus douglasiana* en la región de Pueblo Nuevo, Durango. *Investigación y Ciencia*. 23: 47-53.
- Lovelock, C. E. 2008. Soil respiration and belowground carbon allocation in mangrove forests. *Ecosystems*. 11: 342-354.
- Lugo, A. E. y S. C. Snedaker. 1974. The ecology of mangroves. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*. 5: 39-64.
- Maldonado-Ayala, D. y J. Návar. 2001. Ajuste de funciones de ahusamiento de cinco especies de pino en plantaciones en la región del Salto, Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 6: 159-164.
- Mejía Q., L.M., M. P. Molina J., A. Sanjuan M., M. Grijalba B. y L. M. Niño M. 2014. Bosque de manglar, un ecosistema que debemos cuidar. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Instituto Colombiano de Desarrollo Rural. Cartagena de Indias. 27p.

- Moras, G. y O. S. Vallejos-Barra. 2013. Tablas de volumen para árboles individuales de *Eucalyptus globulus ssp. globulus* cultivados en la región sur de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. 17: 11-24.
- Moreno-Casasola, P. y D. Infante M. 2010. Veracruz. Tierra de Ciénagas y Pantanos. Universidad Veracruzana. México. pp: 141-174.
- Moreno-Casasola, P. y D. M. Infante M. 2016. Conociendo Los Manglares, Las Selvas Inundables y Los Humedales Herbáceos. Instituto de Ecología, A.C., Comisión Nacional Forestal y Organización Internacional de Maderas Tropicales. Veracruz, México. 128 p.
- Niño L., G. S., P. A. Ramos M., A. Barrios y A. M. López A. 2018. Modelos compatibles de ahusamiento-volumen para árboles de *Gmelina arborea* Roxb. en el Alto Magdalena, Colombia. *Colombia Forestal*. 21: 174-187.
- Ochoa J., C. F., J. L. González B. y J. M. Carrión J. 2016. Metales pesados (Cd, Cr, Pb y Hg) en *Rhizophora mangle* en Río y Bahía de Chetumal. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*. 3: 263-271.
- Olguín, E. J., M. E. Hernández y G. Sánchez-Galván. 2007. Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. *Revista internacional de contaminación ambiental*. 23: 139-154.
- Pompa G., M., J. J. Corral R., M. A. Díaz V. y M. Martínez S. 2009. Función de ahusamiento y volumen compatible para *Pinus arizonica* Engelm. en el Suroeste de Chihuahua. *Ciencia Forestal en México*. 34: 119-136.
- Prodan, M., R. Peters, F. Cox y P. Real. 1997. *Mensura Forestal*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica. 586 p.
- Quiñonez-Barraza G., H. M. De los Santos-Posadas, J. G. Álvarez-González y A. Velázquez-Martínez. 2014. Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para las principales especies de *Pinus* en Durango, México. *Agrociencia*. 48: 553-567.

- Rentería-Anima, J. B. y H. Ramírez-Maldonado. 1999. Sistema de cubicación para *Pinus cooperi* blanco mediante ecuaciones de ahusamiento en Durango. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 4: 315-321.
- Rico-Gray, V. 1981. *Rhizophora harrisoni* (Rhizophoraceae), un nuevo registro para las costas de México. Boletín de la Sociedad Botánica de México. 41: 163-165.
- Rodríguez-Toro, A., R. Rubilar-Pons, F. Muñoz-Sáez, E. Cártes-Rodríguez, E. Acuña-Carmona y J. Cancino-Cancino. 2016. Modelo de ahusamiento para *Eucalyptus nitens*, en suelos de cenizas volcánicas de la región de La Araucanía (Chile). Facultad de Ciencias Agrarias UNCUIYO. 48: 101-114.
- Rodríguez-Zúñiga, M. T., C. Tronche-Souza, A. D. Vázquez-Lule, J. D. Márquez-Mendoza, B. Vázquez-Balderas, L. Valderrama-Landeros, S. Velázquez-Salazar, M. I. Cruz-López, R. Ressler, A. Uribe-Martínez, S. Cerdeira-Estrada, J. Acosta-Velázquez, J. Díaz-Gallegos, R. Jiménez-Rosenberg, L. Fueyo-Mac Donald y C. Galindo-Leal. 2013. Manglares de México. Extensión, Distribución y Monitoreo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México D.F. 128 p.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. pp: 340-364.
- Santamaría-Damián, S., J. Acosta-Velázquez, E. I. Romero-Bermy y C. Tovilla-Hernández. 2015. Cambios en la cobertura de los manglares y modificación del terreno en el sistema lagunar Los Patos-Sólo Dios, en la costa de Chiapas, México. Lacandonia. 9: 21-30.
- Semarnat. 2010. Norma Oficial Mexicana-059-Semarnat. Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestre-categorías de riesgos y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio a lista de especies riesgo. Diario Oficial de la Federación. Fecha de publicación. 30 de diciembre 2010. México, pp: 1-77.
- Serra Pompei C., D. Vide Pifarre, M. Briansó Martínez, J. Carrasco Dominguez y J. Amorós Monrabá. 2014. Estudio multidisciplinario del ecosistema manglar en la comunidad tradicional de Curral Velho: Análisis de los servicios ecosistémicos producidos por los manglares a partir de la percepción de la

- comunidad de Curral Velho. Proyecto Final de Licenciatura Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Barcelona, Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals (icta). Ballaterra, España. 124 p.
- Silva-Bátiz, F. A., S. Hernández-Vázquez, A. J. Nené-Preciado y A. D. Vázquez-Lule. 2009. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. Caracterización del sitio de manglar Laguna de Cuyutlán. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. 18 p.
- Silva-González E., M. A. Nava-Moreno, F. J. Hernández y J. G. Colín. 2018. Funciones compatibles de ahusamiento-volumen para tres especies de *Pinus* de la Unidad de Manejo Forestal 0808 del Estado de Chihuahua. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes 26: 58-67.
- Spalding, M., M. Kainuma y L. Collins. 2010. World Atlas of Mangroves. Earthscan. United Kingdom and USA. pp: 1-53. (Fecha de consulta 16 enero 2019). Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=wzSCKulW9SQC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=true>.
- Tamarit U., J. C., H. M. De los Santos P., A. Aldrete, J. R. Valdez L., H. Ramírez M. y V. Guerra D. 2014. Sistema de cubicación para árboles individuales de *Tectona grandis* L. f. mediante funciones compatibles de ahusamiento-volumen. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 5: 58-75.
- Tapia J. y J. Návar. 1998. Ajuste de modelos de volumen y funciones de ahusamiento para *Pinus teocote* en bosques de pino de la Sierra Madre Oriental. Ciencia e Investigación Forestal. 12: 7.23.
- Tapia J. y J. Návar. 2011. Ajuste de modelos de volumen y funciones de ahusamiento para *Pinus pseudostrabus* Lindl. en bosques de pino de la Sierra Madre Oriental de Nuevo León, México. Foresta Veracruzana. 13: 19.28.
- Tlaxcala-Méndez R. M., H. M. De los Santos-Posadas, P. Hernández-De la Rosa y J. L. López-Ayala. 2016. Variación del factor de forma y el ahusamiento en procedencias de Cedro rojo (*Cedrela odorata* L.). Agrociencia. 50: 89-105.

- Travieso- Bello, A. C. 2006. Manglares. In: Estrategias para el manejo integral de la zona costera: un enfoque municipal. Moreno-Casasola, P., E, Peresbarbosa R. y A. C. Travieso-Bello (eds). Xalapa, Veracruz, México. 183-204.
- Uranga-Valencia L. P., H. M. De los Santos-Posadas, J. R. Valdez-Lazalde, J. López-Uptón y H. Navarro-Garza. 2015. Volumen total y ahusamiento para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en tres condiciones de bosque. *Agrociencia*. 49: 787-801.
- Valderrama L., L. H., M. T. Rodríguez Z., C. Troche S., S. Velázquez S., E. Villeda C., J. A. Alcántara M., B. Vázquez B., M. I. Cruz L. y R. Ressler. 2017. Manglares de México: actualización y exploración de los datos del sistema de monitoreo 1970/1980–2015. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México 128 p.
- Valdez H., J. I. 2002. Aprovechamiento forestal de manglares en el Estado de Nayarit, costa Pacífica de México. *Madera y Bosques*. 8: 129-145
- Van L., H., M. Spalding, D. M. Alongi, M. Kainuma, M. Clüsener-Godt y Z. Adeel. 2012. *Securing the Future of Mangroves. A Policy Brief*. Earthscan. London. 319 p.
- Vargas-Larreta, B., O. A. Aguirre-Calderón, C. G. Aguirre-Calderón, F. J. Zamudio-Sánchez, J. O. López-Martínez, J. J. Corral-Rivas, E. J. Treviño-Garza, H. M. De los Santos-Posadas y M. Martínez-Salvador. 2018. Manual del Sistema Biométrico Forestal (SiBiFor): Herramientas para el manejo de los bosques templados y tropicales de México. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 71 p.
- Villalobos Z., G. J., A. Yáñez-Arancibia, J. W. Day y A. L. Lara-Domínguez. 1999. Ecología y manejo de los manglares en la Laguna de Términos Campeche, México. *In: Ecosistemas de Manglar en América Tropical*. Yáñez-Arancibia, A. y A. L. Lara-Domínguez (eds). Xalapa, México. Instituto de Ecología, A.C. 263-274.
- West, P. W. 2009. *Tree and Forest Measurement*. 2ª ed. Springer. Australia. 190 p.
- Yáñez-Arancibia, A. y A. L. Lara-Domínguez. 1999. Los manglares en América Latina en la Encrucijada. *In: Ecosistemas de Manglar en América Tropical*.

Yáñez-Arancibia, A. y A. L. Lara-Domínguez (eds). Xalapa, México. Instituto de Ecología, A.C. 9-16.

Yáñez-Arancibia, A., J. W. Day, R. R. Twilley y R. H. Day. 2014. Manglares: ecosistema centinela frente al cambio climático, Golfo de México. *Madera y Bosques*. 20: 39-75.