

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**Modelación de ahusamiento para la gestión natural de
Pinus ayacahuite Ehren. en la Región Sur del estado
de Nuevo León.**

PRESENTA:

ING. CIPRIANO GUERRERO CABRERA

Como requisito parcial para obtener el grado de:

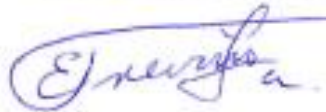
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

Linares, Nuevo León, México.

Septiembre 2022

**Modelación de ahusamiento para la gestión natural de
Pinus ayacahuite Ehren. en la Región Sur del estado
de Nuevo León.**

Aprobación de Tesis



Dr. Eduardo Javier Treviño Garza

Director



Dr. Eduardo Alanís Rodríguez

Codirector.



Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón

Asesor



Mc. Angelina Bautista Cruz

Codirector externo

Linares Nuevo León, México.

Septiembre 2022

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por ayudarme a lograr mis metas que me he propuesto, por mostrarme el camino que debo seguir en la vida.

A la Facultad de Ciencias Forestales (FCF) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por aceptarme como estudiante de Maestría.

A los profesores investigadores de la Facultad de Ciencias Forestales (FCF) por transmitirme sus conocimientos y ampliar mi mentalidad en lo que a la carrera de ingeniero forestal se refiere

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de Maestría.

Al Dr. Eduardo Javier Treviño Garza por aceptar ser mi director de tesis y orientarme en la dirección que debería llevar mi investigación de tesis y a sus consejos otorgados y disponibilidad para que esta se llevara a cabo.

Al Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón y Dr. Eduardo Alanís Rodríguez por formar parte del comité de tesis y ayudarme la revisión y unificación de mi documento de tesis además de sus consejos otorgados.

A compañeros y amigos que supimos hacer además de un grupo estudiantil un grupo de amigos para que nuestra estancia en la facultad fuera más grata.

Y a todo el personal administrativo que forman parte de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Dedicatoria

A mis padres el Sr. Benicio Guerrero Ávila† y la Sra. Silvana Cabrera Sarabia† que, aunque ya no están entre nosotros siempre dieron lo mejor para que a mí y a mi familia no nos faltara nada, siempre me alentaron para que siempre diera lo mejor y no rendirme en el camino y así lograr mis metas que me propusiera

A mis hermanos: Primitivo, Guillermo, Leonides, Ana María, Gabino, Miguel, Guadalupe que siempre puedo contar con ellos en cada momento de mi vida, que me apoyan incondicionalmente y me ayudan y me alientan a siempre seguir adelante

A familiares y amigos que me han apoyado moralmente en todo el transcurso de mi carrera

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1. Medición de diámetros	3
2.2. Medición de alturas	3
2.3. Medición de diámetros y alturas	4
2.4. Tablas y tarifas	4
3. JUSTIFICACIÓN	7
4. HIPOTESIS	9
5. OBJETIVO GENERAL	10
5.1. Objetivos específicos	10
6. MATERIALES Y MÉTODOS	11
6.1. Ubicación y descripción del área de estudio	11
6.1.1. Localización	11
6.1.2. Geología	11
6.1.3. Edafología	12
6.1.4. Hidrología	14
6.1.5. Fisiografía y orografía	14
6.1.6. Clima	15
6.1.7. Vegetación	15
6.2. Descripción de la especie	16
6.3. Toma de la muestra y medición de las variables	16
6.3.1. Toma de la muestra	16
6.3.2. Análisis troncales	17
6.4. Procesamiento de la información	17
6.5. Análisis de la información	18
6.6. Detección de datos no deseados	20
6.7. Modelos de ahusamiento ajustados	20
6.8. Estadísticos para el ajuste y comparación de modelos	22
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23

7.1. Parámetros Estimados.....	23
7.2. Estadísticos de ajuste y validación	24
7.2.1. Fase de ajuste.....	24
7.2.2. Fase de validación	27
8. CONCLUSIONES	29
9. LITERATURA CITADA.....	31

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.- Estadísticos descriptivos de las muestras utilizadas en el ajuste de las ecuaciones de ahusamiento.	18
Cuadro 2.- Sistemas compatibles con el ahusamiento	21
Cuadro 3.- Estadísticos evaluados para la selección y comparación del modelo con mejor ajuste	22
Cuadro 4.- Valor de cada uno de los parámetros de los modelos utilizados para describir el perfil del árbol	24
Cuadro 5.- Estadísticas de bondad de ajuste de los modelos compatibles evaluados para describir el perfil fustal de árboles de Pinus ayacahuite Ehren.	25
Cuadro 6.- Estadísticas de bondad de ajuste de los modelos compatibles evaluados para describir el perfil dimétrico de los árboles de Pinus ayacahuite	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Localización del área de estudio.....	11
Figura 2.- a) Dispersión de las observaciones del diámetro normal con respecto a la altura y: b) Dispersión de volumen acumulado con corteza con respecto a la altura de 108 árboles incorporados al ajuste de ecuaciones de ahusamiento.....	19
Figura 3.- Gráfica de residuales contra los valores predichos de diámetro del fuste para los modelos a) McClure y Czaplewski (1986) y b) Fang et al. (2000)	26

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar el modelo de cubicación para estimar el perfil del árbol *Pinus ayacahuite* Ehren. en la Región Sur del estado de Nuevo León. Se utilizó información de 108 árboles en pie, las cuales se tomaron con dendrómetro electrónico Criterion™ RD 1000, las variables registradas fueron el diámetro normal, altura comercial, altura total y diámetros del fuste a diferentes alturas, para realizar análisis troncales se obtuvieron rodajas de 11 árboles que fueron utilizados para el ajuste de los modelos. Para estimar el volumen total de los ejemplares se utilizó la fórmula de Smalian y la del cono. Se realizó un análisis de regresión y correlación para la obtención de los parámetros estadísticos de seis modelos, de forma simultánea mediante el método de máxima verosimilitud con información completa (FIML) con el procedimiento MODEL, en el paquete estadístico SAS® v9.0. De este análisis se obtuvo como resultado que de los seis sistemas compatibles con el ahusamiento, el modelo propuesto por McClure y Czapplewski (1986) fue el que mejor se ajustó a los datos, al mostrar los valores más bajos para la Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME), el sesgo promedio (\bar{E}) y el Criterio de información de Akaike (AIC), así como un Coeficiente de Determinación (R^2_{adj}) más alto, en comparación con los demás modelos.

Palabras clave: modelos, análisis, ahusamiento, diámetro, altura.

ABSTRACT

The objective of this work was to determine the cubing model to estimate the profile of the *Pinus ayacahuite* Ehren tree. in the southern region of the state of Nuevo León. Information from 108 standing trees was used, which was taken with the Criterion™ RD 1000 electronic dendrometer, the variables recorded were the normal diameter, commercial height, total height and stem diameters at different heights. To perform trunk analysis, slices of 11 trees were obtained and used to fit the models. To estimate the total volume of the specimens, the Smalian formula and the cone formula were used. A regression and correlation analysis was performed to obtain the statistical parameters of six models, simultaneously using the full information maximum likelihood method (FIML) with the MODEL procedure, in the SAS® v9.0 statistical package. From this analysis it was obtained as a result that of the six systems compatible with taper, the model proposed by McClure and Czaplewski (1986) was the one that best fit the data by showing the lowest values for the Root Mean Square Error (RCME), the average bias (\bar{E}) and the Akaike Information Criterion (AIC), as well as a higher Coefficient of Determination (R^2_{adj}), compared to the other models

Keywords: models, analysis, taper, diameter, height.

1. INTRODUCCIÓN

En la necesidad de lograr el desarrollo de los recursos forestales, un administrador forestal debe contar con herramientas cualitativas y confiables que ayuden en la toma de decisiones silvícolas para estimar el volumen a extraer, la distribución de los productos forestales basado en las diferentes dimensiones y longitudes de las trozas (Valdez y Lynch, 2000). Los modelos alométricos juegan una parte importante en la toma de decisiones ya que están basados en la integración de ecuaciones estadístico-matemáticas, por lo que resulta ser una herramienta útil para el manejo racional y sostenible de los bosques (Silva et al., 2018). Además de ser las herramientas analíticas básicas más utilizadas en la actualidad para generar conocimiento sobre producción y crecimiento de masas arboladas (Weiskittel et al., 2011; Vargas-Larreta et al., 2017).

Los modelos que describen el perfil de un árbol son una opción viable que, mediante variables como diámetro y altura, nos ayudan a estimar las dimensiones y volúmenes maderables a cualquier sección del árbol (Návar et al., 1997; Acosta-Mireles y Carrillo-Anzures, 2008; Cruz-Cobos et al., 2016). Estos modelos sirven para predecir el volumen total con o sin corteza y son utilizados tanto para fuste total como para fuste comercial, además de servir para crear tablas o tarifas volumétricas (Schumacher y Hall, 1933). Las tablas volumétricas se describen como la expresión tabular de los valores predichos por la ecuación o modelo, dicha tabla debe ser elaborada por área de aplicación o por especie, ya que el crecimiento es diferente entre taxa y de un lugar a otro (Fucaraccio y Staffieri, 1999). De acuerdo con las variables utilizadas, las tablas volumétricas se han clasificado en locales, que solo usan el diámetro normal estándar, que usan el diámetro normal y la altura, y las de forma las cuales se calculan a partir del diámetro, altura y un indicador de forma del fuste (Carrillo et al., 2004; Rondeux, 2010; Muñoz, 2012).

Las ecuaciones de volumen y sus expresiones tabuladas son una de las formas confiables para conocer las existencias reales de volumen y realizar un mejor manejo de este, también son útiles para la gestión forestal y

comercialización de productos leñosos (Muñoz-Flores et al., 2003; Velasco et al., 2006).

Tener la capacidad de conocer y describir el fuste de los árboles es de gran relevancia por razones prácticas y teóricas, los silvicultores requieren modelos basados en el perfil del árbol para estimar el volumen y el valor del árbol o parte de este (Muñoz-Flores et al., 2012). Dichas estimaciones son necesarias para la planeación y manejo forestal como por ejemplo evaluar la economía en los diferentes regímenes de gestión, (De-Miguel et al., 2012).

En los últimos años se han desarrollado funciones de ahusamiento para diversas especies de pino en el noreste de México, Navar y colaboradores (1997) por ejemplo desarrollaron modelos para *Pinus Hartwegii* donde el modelo de Clutter (1980) fue el que presentó mayor bondad de ajuste para 109 árboles muestra de esta especie, así mismo Tapia y Návar (2011) probaron cinco funciones de ahusamiento para *Pinus psuedostrobus* obteniendo buenos resultados con el modelo de Kosak (1988), también en la región de El Salto, Durango, Corral y colaboradores (1999) obtuvieron los mejores resultados usando el modelo de Biging (1984) para cinco especies de pinos (*Pinus cooperi*, *P. durangensis*, *P. engelmannii*, *P. leiophylla* y *P. herrerae*) (Corral et al., 2007).

El objetivo de este trabajo es contribuir en la creación de herramientas que ayuden a los silvicultores y encargados de los bosques del sur de Nuevo León, en la gestión y desarrollo sustentable de estos.

2. ANTECEDENTES

2.1. Medición de diámetros

Esta variable se puede medir de forma directa o indirectamente, para la medición directa existen diferentes aparatos como la cintas métricas, cintas diamétricas y forcípulas, la primera se usa midiendo la circunferencia del árbol por lo cual el dato obtenido se divide por el valor de π (3. 14161592) para obtener el diámetro, mientras que los otros dos se obtiene la medición del diámetro de forma directa (Diéguez et al., 2003). Por otro lado existen aparatos que no necesariamente se requiere tocar la sección a medir, que por lo general no están hechos exclusivamente para medir diámetros, sino que también permite tomarlas mediciones de distancias, alturas, e incluso algunos aparatos permiten obtener variables dasométricas como área basal y altura dominante, etc., por lo que son denominados dendrómetros de uso múltiple entre los que se encuentran Pentaprisma de Wheeler, Relascopio de Bitterlich, Tele-relascopio de Bitterlich y Dendrómetro láser, entre otros (Diéguez et al., 2003)

2.2. Medición de alturas

Dentro de las mediciones directas e indirectas también entra las mediciones de alturas, para esto se emplean escaleras de 2 a 3 metros de longitud fijadas al fuste, además de espuelas y arneses, los cuales hacen más fácil el escalamiento en árboles, con esto se pueden medir alturas totales, fuste limpio y diámetros a diferentes alturas (Luna y Álvarez, 2014; Diéguez et al., 2003). Para el caso de las mediciones indirectas se utilizan aparatos llamados hipsómetros que se basan en principios geométricos para realizar el cálculo de alturas, apoyándose en la relación que existen entre triángulos semejantes, como trigonométricos, que se basan en la medida de ángulos, algunos de estos aparatos son: cruz del hachero, reglas hipsométricas de Christen, Deelder, Jal, Lada y Workampff-Laue, Hipsómetros Haga, Sunnto, Blume-Leiss y Relascopio de Bitterlich (Diéguez et al., 2003). Los dendrómetros electrónicos y de uso múltiple (Pentaprisma de Wheeler, Relascopio de

Bitterlich, Tele-relascopio de Bitterlich y Dendrómetro láser, etc.) también juegan un papel importante en la medición de alturas, ya que con ellos se pueden hacer mediciones sin tener que escalar el árbol a medir, estos cuentan con láser de diodo, así como un sensor electrónico de inclinación vertical y una brújula para mediciones más precisas y los cuales operan con principios trigonométricos para calcular las alturas (Rondeux, 2010) . En cuanto a medir arboles apeados o trozas, se utilizan cintas métricas metálicas o reforzadas con soporte metálico con el fin de evitar los inconvenientes de una mala reproducibilidad de las mediciones (Rondeux, 2010).

2.3. Medición de diámetros y alturas

Para mediciones simultáneas y rápidas donde se ahorre tiempo y esfuerzo, y donde se requieren hacer mediciones a masas completas de arbolado o arboles seleccionados, se emplean aparatos que permitan cumplir más rápido con ese objetivo, algunos de los aparatos digitales más empleados que permiten la medición de diámetros y alturas son: Hipsómetros Vértex, HLP I y Forest Pro, los Dendrómetros Lem 300-Geo, Criterion RD®1000 (Diéguez et al., 2003).

2.4. Tablas y tarifas

El uso de las primeras ecuaciones de volumen, representadas en forma de tablas volumétricas, se remontan a la segunda mitad del siglo XVIII (Husch, 1963). El uso de dichas tablas de forma como se conocen actualmente fue registrado por primera vez en el año 1804, en Alemania para la cubicación de Haya (*Fagus sylvatica* L.) dicho crédito en la utilización y elaboración de estas tablas le fue dado a Henrich Cotta (Spurr, 1952).

En México los primeros casos fueron reportados por Martínez en 1948, quien elaboró tablas de volumen y coeficientes para la especie *Pinus teocote* Schl. et Cham. con y sin corteza elaboradas para categorías diamétricas de cinco en cinco cm y alturas de dos en dos m. En los últimos años se han desarrollado ecuaciones para describir el perfil del fuste de los árboles, los cuales se basan

en proporciones, estructuras trigonométricas y modelos polinomiales segmentados (Pompa et al., 2009) que ayudan en la elaboración más precisa de dichas tablas.

2.5. Modelos de ahusamiento

El ahusamiento se define como el decremento gradual que se da desde la base hasta la punta del fuste de un árbol, también se entiende como la relación que existe entre el estrechamiento del diámetro a medida que incrementa la altura de un árbol (Gray, 1956) por lo cual precisamente para su estudio se utilizan los modelos de ahusamiento, los cuales se basan en el supuesto de que la forma del árbol varía continuamente a lo largo de la longitud (Lee et al., 2003). La variación que se tiene a lo largo del fuste hace que sea difícil formular reglas generales que se apliquen a una sola especie en grandes áreas e inclusive a todos los tallos de un solo rodal, ya que esta variación se debe a las condiciones ambientales, topográficas y al tipo de manejo que se le aplique al rodal (Larson 1963). Estas funciones son muy utilizadas cuando especies de árboles son de interés comercial y ecológico, que de ellos se obtiene una gran variedad de productos. Desde principios del siglo pasado diferentes investigadores han buscado la manera de expresar el perfil y el ahusamiento del árbol a partir de variables fáciles de medir como diámetro y altura (Pérez et al., 1990). En los últimos años se han creado y aplicado una amplia variedad de métodos que van desde simples ecuaciones cónicas (como son Kozak et al., 1969; Ormerod 1973; Amidon, 1984; Reed y Byrne, 1985) hasta modelos segmentados más complejos (como son Max y Burkhardt, 1976; Demaerschalk y Kozak, 1977; Cao et al., 1980) que describen con mayor exactitud el perfil del arbolado en diferentes alturas. Estas ecuaciones son más conocidas por proveer estimaciones como: I) diámetro con y sin corteza a diferentes alturas del fuste; II) volumen total del fuste del árbol; III) volumen y altura comercial de cualquier diámetro superior y altura del tocón; y IV) volúmenes seccionados.

Diferentes autores han reportado resultados en cuanto al uso de estas ecuaciones tal es el ejemplo de Niño-López et al. (2018), quienes usaron

cuatro diferentes modelos en árboles de la especie *Gmelina arborea* Roxb. en El Alto Magdalena, Colombia, quienes obtuvieron que el modelo que más se ajustó fue el de Fang et al., (2000) en cuanto a la predicción de diámetros fustales; así mismo Ramírez-Martínez et al. (2018), en la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca en árboles de *Pinus ayacahuite* Ehren. donde reportan que, de cinco modelos utilizados, el modelo que mejor se adaptó para esta especie fue el de Cielito 2 y el de Biging (1984). Para Nuevo León autores como Tapia y Návar (2011) ajustaron modelos de volumen y funciones ahusamiento para *Pinus pseudostrobus* Lindl. donde de cinco modelos utilizados el modelo de Kosak (1977), fue el que mejor se adaptó al perfil fustal de la especie.

3. JUSTIFICACIÓN

El principio básico del manejo de bosques es realizarlo de forma sostenible, ya que de esto depende el desarrollo y sustento de la mayoría de las comunidades rurales en nuestro país, de estos se obtienen bienes y servicios que ayudan a las economías locales, la alimentación y la salud, además que se obtienen materiales que ayudan en la creación de infraestructura para educación, salud y vías de comunicación. El dilema que existe entre aprovechar y conservar ha llevado a la creación de criterios e indicadores que ayuden a que el aprovechamiento de nuestros bosques se realice de forma sostenible. Un ejemplo de ello sería aprovechar un árbol al máximo con el menor daño posible, ya que de este no solo se podría utilizar el fuste, materia prima que sirve para la obtención de madera acerrada, triplay, postes y pilotes, sino que también se pueden utilizar las ramas para la obtención de productos secundarios como leña, carbón y celulosa.

Desde hace décadas en varias partes del mundo, se han venido utilizando modelos de volumen para calcular la cantidad de materia prima que se va a extraer de un área o simplemente para medir la cantidad que se tiene en un bosque, sin embargo, en los últimos años y con el avance de las técnicas biométricas y la tecnología informática se han ido desarrollando modelos que permiten simular el perfil fustal de los árboles que van desde simples modelos de ahusamiento hasta los polinomiales segmentados, además de los geométricos y trigonométricos, muchos de ellos reportados en la literatura.

Las variaciones que se tienen a lo largo de un fuste de un árbol, a causa de las condiciones ambientales, topográficas y al tipo de manejo aplicado para su aprovechamiento, hace difícil crear modelos que se apliquen a una especie en general y en grandes áreas, e inclusive, resulta difícil aplicar un solo modelo a todos los tallos de un rodal, es por eso que, autores como Larson (1963) sugieren elaborar estos modelos para especies en específico y para pequeñas áreas, ya que el crecimiento es diferente entre especies y de un lugar a otro.

Para la especie *Pinus ayacahuite* Ehren, que se desarrolla desde Centroamérica hasta el norte de México, existen ecuaciones que describen el perfil fustal de esta especie, como la creada por Ramírez-Martínez et al. (2018) para la región Sierra Norte de Oaxaca, sin embargo, para la región que comprende a la UMAFOR 1901 en el sur del estado de Nuevo León, México, en la actualidad no hay modelos que describan con precisión el perfil fustal y estime el volumen de árboles individuales para esta especie. Con el fin de contribuir al manejo sostenible de los recursos forestales en esta región, se debe trabajar en la construcción y elaboración de herramientas silvícolas confiables, en este caso la de modelos alométricos que permitan realizar estimaciones confiables de volúmenes, con el propósito de evaluar existencias y producto a extraer, todo esto a partir de variables fáciles de medir en campo como diámetros y alturas.

4. HIPOTESIS

Los modelos de ahusamiento de tipo segmentado ajustados, bajo criterios de selección como valores bajos en RCME, \bar{E} , y AIC, y R^2_{adj} más alto, pueden ser utilizados para describir el perfil fustal de la especie *Pinus ayacahuite* Ehren. con un alto grado de confiabilidad.

5. OBJETIVO GENERAL

Encontrar el modelo matemático de cubicación que mejor se adapte al perfil fustal del árbol de la especie *Pinus ayacahuite* Ehren. en la región sur del estado de Nuevo León.

5.1. Objetivos específicos

Desarrollar el modelo compatible de ahusamiento que mejor describa el perfil fustal de *Pinus ayacahuite* Ehren.

Ajustar ecuaciones alométricas para la estimación de volumen total y comercial de la especie en estudio.

Validar el modelo que mejor se ajuste mediante una segunda entrada de datos con información ajena a la utilizada para el ajuste.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Ubicación y descripción del área de estudio

6.1.1. Localización

Los datos utilizados para este estudio fueron obtenidos en el Ejido “La Encantada” y Cerro “El Potosí” que se localiza dentro de la UMAFOR 1901. Dicha unidad de manejo cuenta con una superficie de 1,688,125 ha y se localiza al sur del estado de Nuevo León, en el sistema de coordenadas UTM 14R 2795841 14Q 2562321 Longitud Oeste y 14R 331653 14Q 361817 Latitud Norte.

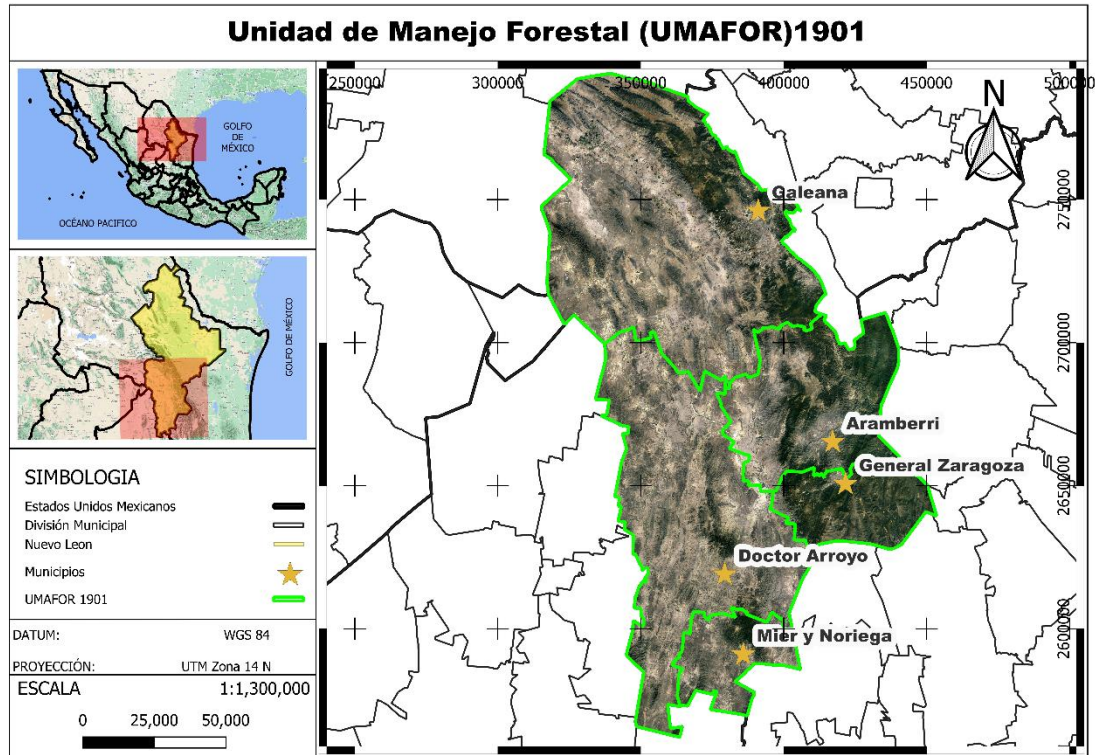


Figura 1.- Localización del área de estudio

6.1.2. Geología

La mayor parte de la UMAFOR se encuentran rocas sedimentarias pertenecientes a áreas con materiales del Cretácico Medio y Pleistoceno, las cuales también pueden encontrarse en zonas del Cretácico Superior, además

de lutitas, limonitas, areniscas y calizas limo arcillosas de permeabilidad de baja a media en zonas del Jurásico (CONAFOR, 2011)

6.1.3. Edafología

Según el INEGI (2008) (mencionado por CONAFOR, 2011) los suelos que se distribuyen dentro de la UMAFOR son de textura media a fina los cuales son de 8 tipos, sin embargo, los que ocupan mayor extensión son Feozems, Litosoles y Xerosoles. Dichos suelos se describen a continuación:

Castañossem (K). - se localiza en llanuras, lomeríos y valles montañosos, aunque también se les ubica en terrenos escarpados de la Sierra Madre Oriental principalmente asociados a suelos como rendzinas, fluvisoles y litosoles, con buen contenido orgánico, profundos y de textura media, presentes en pendientes que va desde 4 a 24%. Son suelos poco susceptibles a la erosión con excepción del tipo castañozem luvico el cual es altamente susceptible a esta.

Feozem (H). - se ubica principalmente en terrenos ondulados llanuras y lomeríos, aunque también se pueden encontrar en terrenos quebrados, se presentan en asociaciones con litosoles, fluvisoles, luvisoles vertisoles, castañozems y regosoles, por lo general son de textura media y se distribuyen en pendientes que van desde 3 a 18 % aunque existen casos que se han encontrado en pendientes que alcanzan hasta un 30%. La susceptibilidad a la erosión es variable y depende de las condiciones del sitio.

Litosol (I). - se distribuye en altitudes que van desde los 700 hasta los 2800 msnm, en terrenos que van desde quebrados a escarpados, la unidad fisiográfica en la que principalmente se distribuye es la Sierra Madre Oriental, se encuentra asociado a otros suelos como la rendzina, regosoles calcáricos, feozems y castañozems cálcicos. Son suelos con características variables dependientes de los materiales que los componen, estos son someros de textura media. Se localizan en pendientes de entre 12 y 65% y son de moderada a altamente susceptibles a la erosión.

Regosol (R). - connotativo de la capa de material suelto que cubre las rocas, formado por materiales acumulados no consolidados, excluyendo los depósitos aluviales recientes. Este tipo de suelos se encuentra ente los 300 y 600 msnm, en terrenos con topografía plana u ondulada, sin embargo, en terrenos altos como la sierra se distribuyen entre los 2300 y 2700 msnm, forman asociaciones con otros como las renzina, cambisol, feozems háplico, vertisol pélico y luvisol órtico, presentan textura de mediana a fina y se encuentran en pendientes de 4 a 12% sin embargo en terrenos muy escarpados se encuentran hasta en pendientes de 45%. Presentan fases líticas, gravosas, petrocalcicas y pedregosas lo cual aumenta su susceptibilidad a la erosión y no son aptas para uso agrícola.

Rendzina (E). - son suelos poco profundos y pegajosos que se encuentran sobre roca caliza, se encuentran en los flancos de la sierra formado principalmente por rocas calcáreas, calizas y lutitas, al igual que se localizan en terrenos escarpados, se asocian a otros suelos como los litosoles principalmente, así como a feozems háplicos y luvisoles cálcicos. Este tipo de suelos son característicos por poseer una capa superficial rica en humus, muy fértil, que descansa sobre roca caliza o material rico en cal, son medianamente profundos de textura media, se presentan en pendientes que oscilan entre 16 y 32% y son poco susceptibles a la erosión. Son suelos aptos para uso forestal y pecuario.

Solonchak (Z). - suelos con alto contenido de sales solubles, sólo pueden tener: mólico, ócrico, hístico, taquírico, yérmico, cámbico, cálcico, gypico, dúrico, o vértico. Perfil A-C, A-B-C con "z" y/o "y" en cualquier horizonte (como un regosol pero con sales)

Xerosol (X). son suelos secos que se localizan en relieves de ondulado a plano, aunque también se pueden encontrar en terrenos quebrados, se asocian a otros suelos como castañozem, feozem cálcico, regosol, fluvisol, vertisol y redzina, es característico por ser una capa superficial clara muy pobre en humus, son de profundidad y textura media, su rango de pendiente

en que se presenta va desde 2 hasta 15%, presenta fases petrocalcica, lítica, gravosa y pedregosa, son poco susceptibles a la erosión al menos que se presente sobre una capa limitante.

Yermosol (Y). - se caracteriza por tener una capa superficial con tonalidades claras y subsuelo rico en arcilla, en ocasiones presentan acumulaciones de cal o yeso en el subsuelo y algunas veces son salinos. Cuando tienen vegetación de pastizal o matorral, es posible el desarrollo de la actividad ganadera, aunque con rendimientos bajos además en estos suelos es común la explotación de plantas de matorral como la candelilla.

Como la estabilidad edafológica se define según el grado de desarrollo que esté presente y su relación con el grado de intemperización edafológica, en referencia a la desintegración y descomposición físico-química de las rocas y minerales contenidos en ella. La principal zona de estudio en la zona es el Litosol, en asociación con las Rendzinas que solo presenta un solo horizonte el denominado "A" cuyo espesor es de 15 cm, por lo cual es considerado como un suelo con grado de desarrollo reciente y cuyas características físicas más importantes son que la estructura que la conforman es granular y de textura que va de franco a franco-arcilloso, por lo que dado el tipo de arcilla que contiene no presenta el fenómeno de oxidación-reducción.

6.1.4. Hidrología

La UMAFOR 1901 se encuentra comprendida en las Regiones Hidrológicas San Fernando-Soto La Marina, El Salado, Pánuco y Bravo-Conchos (RH25, RH37, RH26 y RH24 respectivamente) (CONAFOR, 2011).

6.1.5. Fisiografía y orografía

La Unidad de Manejo Forestal 1901 se encuentra representada por las regiones fisiográficas: Gran Sierra Plegada, las Sierras y Llanuras Occidentales y sierras Transversales. La Sierra Madre Oriental atraviesa el estado de Nuevo León de noreste a sureste de las cuales las montañas más

sobresalientes que se encuentran dentro de la UMAFOR son: Cerro El Potosí, Cerro El Viejo, Cerro Grande de La Ascensión, Sierra Del Toro y Sierra Peña Nevada con alturas sobre el nivel del mar de entre 3540 y 3700 m (CONAFOR, 2011).

6.1.6. Clima

Los climas presentes dentro de la UMAFOR 1901 son: Muy cálido Semiseco (BS1hx), Muy cálido semiseco (BS1(hw)), Semicálido semiseco (BS(hx)), Semicálido seco (BSo(hx)), Semicálido subhúmedo con lluvias en verano (AC(w)), Semicálido subhúmedo con lluvias en verano (ACw0) y Templado subhúmedo con lluvias en verano (C(w1)). La temperatura promedio anual ronda entre los 16 y 18 grados centígrados esto en la mayor parte de la UMAFOR y la temperatura media mensual ronda entre los 10 a 22 grados centígrados. La precipitación promedio anual ronda entre los 280 y los 1200 mm en zonas altas, siendo en mayor proporción las regiones semidesérticas que presentan entre los 300 y 550 mm por año, mientras que la unidad relativa tiene un promedio de 60% (CONAFOR, 2011).

6.1.7. Vegetación

La vegetación que más predomina en la UMAFOR corresponde a bosque templados, la cual presenta heterogeneidad en su estructura. Dentro de este predominan los bosques de pino, encino, abeto y sus respectivas asociaciones. Dentro del componente arbóreo destacan especies como *Pinus michoacana*, *P. montezumae*, *P. douglasiana*, *P. leiophylla*, *P. pseudostrobus*, *Quercus laurina*, *Q. castanea*, *Q. rugosa*, *Abies religiosa*, *Arbutus xalapensis*, *Cornus disciflora*, *Garrya sp.*, *Ternstroemia pringlei*, *Tilia mexicana*, *Nectandra sp.*, *Alnus acuminata sbsp. glabrata* y *Alnus jorullensis* (Aguilar, op. cit.). Los arbustos y hierbas abundan en zonas sin cobertura arbórea y en menor grado se presenta en los bosques de pino-encino, entre otros se encuentran *Lupinus sp.*, *Senecio salignus*, *Baccaris conferta*, *Pteridium aquilinum*, *Adiantum sp.*, *Salvia sp.*, *Heteroteca sp.*, *Vitis sp.*, *Gnaphallium sp.* y *Agave sp.* Los pastos

están representados por las especies *Aristida sp.*, *Andropogon sp.*, *Muhlenbergia sp.* y *Stipa sp* (CONAFOR, 2011).

6.2. Descripción de la especie

El *Pinus ayacahuite* Ehren. es nativo del centro de México hasta Centroamérica y algunas partes de Nortede México. Es un árbol que alcanza de 35 - 40 m de altura y DN de hasta 2 m (Perry, 1991). Se caracteriza por sus escamas delgadas, frágiles, largas y angostas, gradualmente atenuadas hacia la base; y por el ala de sus semillas también larga y estrecha (Eguiluz, 1978).

Típica del Sureste de México, aunque se extiende hasta el centro del país desde los 2000- 3200 msnm, más frecuente entre los 2700; asociado a bosques de Coníferas y Quercus. La madera es de buena calidad, suave y manejable, útil en la artesanía, aserrío, triplay, celulosa, papel, puntales para minas, construcciones y ebanistería. Se recomienda para parques y jardines o campos deportivos, por su bella apariencia (Eguiluz, 1978).

6.3. Toma de la muestra y medición de las variables

6.3.1. Toma de la muestra

La información obtenida de árboles medidos para la elaboración de la base de datos utilizada en esta investigación, fueron obtenidos dentro de la UMAFOR 1901 correspondiente a la región sur del estado de Nuevo León, la muestra consistió de 108 árboles medidos de forma indirecta por método no destructivo, con la ayuda del dendrómetro electrónico Criterion™ RD 1000, las variables que se consideraron fueron el diámetro normal, altura total y diámetros a diferentes alturas del fuste, cuya información fue utilizada para el ajuste de 6 modelos de ahusamiento. También se obtuvieron muestras de fuste (rodajas) por método destructivo (derribo de arbolado) de 11 árboles a las que se les realizaron análisis troncales, dicha información fue utilizada para validar los modelos ajustados.

6.3.2. Análisis troncales

Los análisis troncales de los 11 árboles obtenidos mediante método destructivo se llevaron a cabo en gabinete, se midieron los diámetros con la ayuda de escalímetros, estos se midieron por categorías diamétricas de cada 10 años a cada una de las rodajas, la información de las alturas totales, DAP, y longitudes de las trosas se realizaron en campo.

6.4. Procesamiento de la información

El cálculo se realizó en el programa Microsoft Excel®, para el volumen de las trozas se realizó mediante las fórmulas de Smalian, para el cálculo de la punta se utilizó la fórmula del cono. Posteriormente estas se sumaron para obtener el volumen total del fuste.

Fórmula de Smalian:

$$V_{sección} = \frac{(Ab_1 + Ab_2)}{2} * Long$$

Dónde:

$V_{sección}$ = Volumen de la sección (m³)

Ab_1 = Área basal mayor (m²)

Ab_2 = Área basal menor (m²)

$Long$ = Longitud de la sección (m)

Fórmula del cono:

$$V_{cono} = \frac{(Ab * LP)}{3}$$

Donde:

V_{cono} = Volumen del cono (m³)

Ab = Área basal del cono (m²)

LP = Longitud de la punta (m)

6.5. Análisis de la información

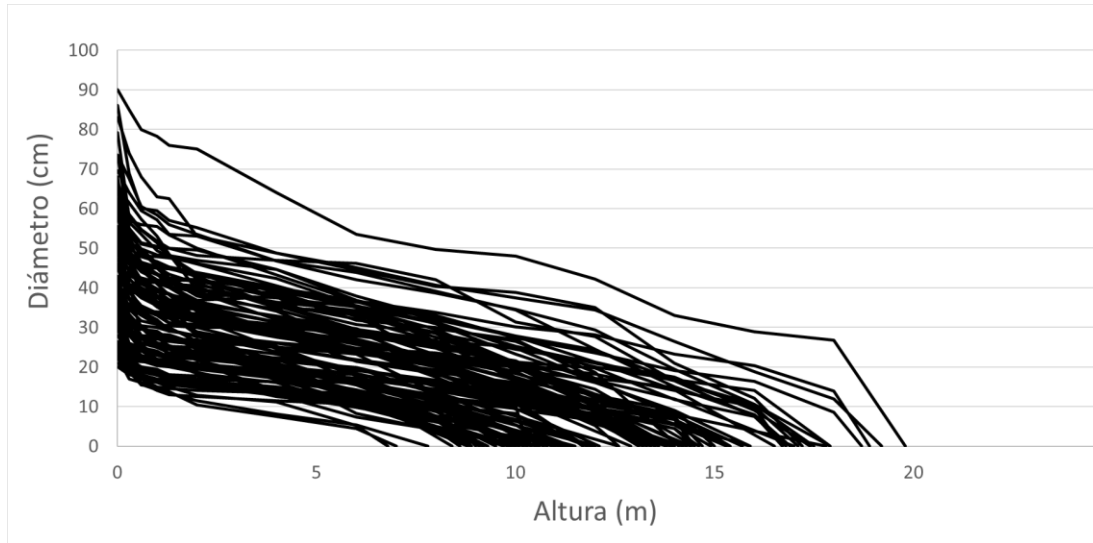
La información de las variables de ahusamiento y el volumen fue interpretada de forma gráfica para cada árbol (Figura 2), también se muestran los estadísticos descriptivos de las muestras utilizadas para el ajuste (Cuadro 1), lo que permitió corregir y depurar la base de datos hasta obtener comportamientos o tendencias lógicas.

Cuadro 1.- Estadísticos descriptivos de las muestras utilizadas en el ajuste de las ecuaciones de ahusamiento.

Variables	Media	Mínimo	Máximo	SD
DMPCC	25.9758	0	90	16.1422
HM	4.7327	0	19.8	4.8533
DNCC	32.8918	13	71.5	12.5846
H	13.2452	6.8	19.8	3.0083

Donde DMPCC: Diámetro de fuste a la altura HM (cm); HM: Altura al diámetro DMPCC (m); DNCC: Diámetro normal con corteza (cm); H: Altura total (m).

a)



b)

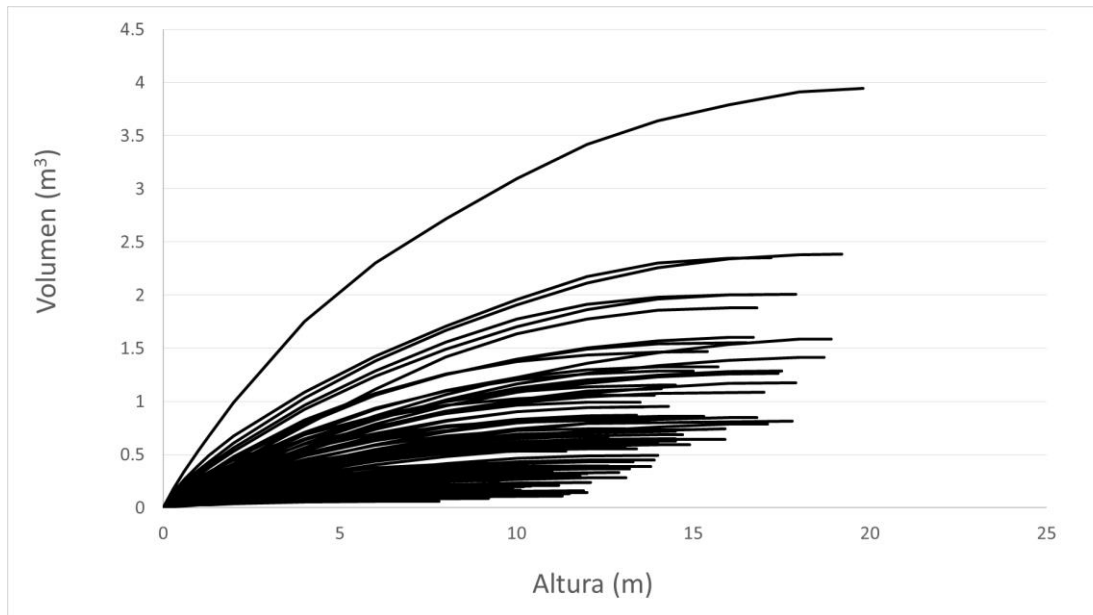


Figura 2.- a) Dispersión de las observaciones del diámetro normal con respecto a la altura y: b) Dispersión de volumen acumulado con corteza con respecto a la altura de 108 árboles incorporados al ajuste de ecuaciones de ahusamiento.

6.6. Detección de datos no deseados

Para detectar datos no deseados en la base de datos final, se examinaron minuciosamente las gráficas de dispersión de diámetro-altura, volumen acumulado-altura, y diámetro relativo-altura relativa, al momento de observar un dato atípico se auditó la información original para obtener los comportamientos y tendencias requeridas.

6.7. Modelos de ahusamiento ajustados

La muestra obtenida en campo fue de 108 árboles para el ajuste y 11 para análisis troncales y validación de los modelos, a los cuales se les aplicó un análisis de regresión y correlación para la obtención de los parámetros estadísticos de cada modelo, la cual se realizó de forma simultánea mediante el método de máxima verosimilitud con información completa (FIML por sus siglas en inglés) que es apropiada para este tipo de ajuste (SAS Institute, 2004) utilizando el procedimiento MODEL, en el paquete estadístico SAS® v9.0. Los modelos utilizados son de tipo polinómico segmentado los cuales incluyen la función $d = f(h)$ la cual se obtiene por la unión de varias funciones polinómicas a lo largo de un perfil imponiendo condiciones de continuidades de la curva y sus dos primeras variables (mencionado por Castedo y Álvarez, 2000), los modelos utilizados fueron: (1) Fang et al. (2000), (2) Max y Burkhart (1976), (3) Parresol (1987), (4) Zhang et al. (2002), (5) Cao et al. (1980) y (6) McClure y Czuplewski (1986), que son funciones segmentadas de ahusamiento compatibles con el perfil del árbol (Cuadro 2).

Cuadro 2.- Sistemas compatibles con el ahusamiento

Función de ahusamiento

1) Fang et al. (2000)

$$d = c_1 \left[H^{\frac{K-\beta_1}{\beta_1}} (1-q)^{\frac{k-\beta}{\beta}} \alpha_1^{I_1+I_2} \alpha_2^{I_2} \right]^{1/2}$$

$$\text{donde } \begin{cases} I_1 = 1 \text{ si } p_1 \leq q \leq p_2; \text{ de lo contrario } 0 \\ I_2 = 1 \text{ si } p_2 \leq q \leq 1; \text{ de lo contrario } 0 \end{cases}$$

$$R_0 = (1 - H_B/H)^{K/\beta_1} R_1 = (1 - P_1)^{K/\beta_1}$$

$$R_2 = (1 - P_2)^{K/\beta_2} \beta = \beta_1^{1-(I_1+I_2)} \beta_2^{I_1} \beta_3^{I_2}$$

2) Max y Burkhardt (1976)

$$d = D \left[\frac{\beta_1(q-1) + \beta_2(q^2-1) + \beta_3(P_1-q)^2 I_1 + \beta_4(P_2-q)^2 I_2}{\beta_4(P_2-q)^2 I_2} \right]^{1/2}$$

$$\text{donde } \begin{cases} I_1 = 1 \text{ si } q \leq p_1; \text{ de lo contrario } 0 \\ I_2 = 1 \text{ si } q \leq p_2; \text{ de lo contrario } 0 \end{cases}$$

$$q = HM/H$$

3) Parresol (1987)

$$d = D \sqrt{X^2(\beta_1 + \beta_2 X) + (X - p_1)^2 [\beta_3 + \beta_4(X + 2p_1)I_1]}$$

$$\text{donde } I_1 = 1 \text{ si } z \geq p_1; \text{ de lo contrario } 0$$

4) Zhang et al. (2002)

$$d = DH^{(k_1-B_1)/2b_1} \left[a^{I_1} (1-q)^{(k_1-B_1-1-I_1 B_2^{I_1})/(B_1^{1-I_1} B_2^{I_1})} \right]^{1/2}$$

$$\text{donde } I_1 = 1 \text{ si } q > p_1 \text{ y } 0 \text{ si } q \leq p_1$$

5) Cao et al. (1980)

$$d = D \frac{C_0}{k} [2z + \beta_1(3z^2 - 2z)^2 + \beta_2(z - p_1)^2 I_1 + \beta_3(z - p_2)^2 I_1]^{1/2}$$

$$\text{donde } \begin{cases} I_1 = 1 \text{ si } z \geq p_1; \text{ de lo contrario } 0 \\ I_2 = 1 \text{ si } z \geq p_2; \text{ de lo contrario } 0 \end{cases}$$

6) McClure y Czaplewski (1986)

$$d = \{ ((\alpha_0 D)^{\alpha_1 H^{\alpha_2}} / K/h) [2(1 - \beta_1)z + 3\beta_1 z^2 + I_1 \beta_2 (z - c_1)^2 + I_2 \beta_3 (z + c_2)^2] \}^{1/2}$$

$$\text{donde } \begin{cases} I_1 = 1 \text{ si } z > c_1; \text{ de lo contrario } 0 \\ I_2 = 1 \text{ si } z > c_2; \text{ de lo contrario } 0 \end{cases}$$

Donde; D = diámetro normal (m); d = diámetro (cm) a la altura HM (m) desde el nivel del tocón; H = altura total de los árboles (m); HB= altura del tocón (m); k = $\pi/40000$; α_0 , α_1 , α_2 , β_0 , β_1 , β_3 , β_4 , P_1 , P_2 , C_1 , C_2 . son parámetros ser estimados por el sistema.

6.8. Estadísticos para el ajuste y comparación de modelos

En el análisis y comparación de los modelos de ahusamiento, se utilizaron 1240 pares de datos para el ajuste y 939 obtenidos de análisis troncales para la validación, de los cuales se estimaron los parámetros estadísticos de 6 modelos de ahusamiento, los criterios que se tomaron en cuenta para comparar y seleccionar los modelos son: Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME), coeficiente de determinación ajustado (R^2 adj), sesgo promedio absoluto (\bar{E}) y criterio de información de Akaike (AIC).

Cuadro 3.- Estadísticos evaluados para la selección y comparación del modelo con mejor ajuste

Estadístico	Ecuación
Coeficiente de determinación ajustado (R^2 adj)	$R^2_{adj} = 1 - \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$
Raíz del Cuadrado Medio del Error (REMC)	$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}}$
Sesgo promedio (\bar{E})	$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n}$
Criterio de información Akaike (AIC)	$AIC = 2p + n \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \right)$
Donde; Y_i, \hat{Y}_i, \bar{Y} son los valores observados, estimados y promedio del ahusamiento (d) y volumen comercial (V_c) respectivamente, n es el número total de observaciones para el ajuste de los sistemas, p es el número de parámetros del sistema.	

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Parámetros Estimados

De los seis modelos utilizados en el ajuste para describir el perfil fustal de *Pinus ayacahuite* Ehren. en el Cuadro 4 se presenta el valor de cada uno de los parámetros estimados para cada modelo. Los modelos 1, 2, 3 y 4 tienen la particularidad de presentar puntos de inflexión (p1 y p2) sobre la altura relativa del fuste. El modelo 1 presenta su primer punto de inflexión (p1) donde ocurre el cambio de neiloide a paraboloides al 5% de la altura total del fuste mientras que su segundo punto de inflexión (p2) donde ocurre el cambio de paraboloides a cono lo estima al 68% de la altura total del fuste. El modelo 2 estima p1 al 5% y p2 al 50% de la altura total del fuste. Los modelos 3 y 4 solo presentan un punto de inflexión de convergencia, donde el p1 se estima a 84% para el modelo 3 y 17% para el modelo 4.

Cuadro 4.- Valor de cada uno de los parámetros de los modelos utilizados para describir el perfil del árbol

Parámetros estimados de los modelos						
Modelo		0	1	2	3	4
(1) Fang et al. (2000)	α	0.000059	1.881643	0.979173	-	-
	β	-	7.369E-06	0.000033	0.000036	-
	p	-	0.052606	0.681341	-	-
	c	-	-	-	-	-
(2) Max y Burkhart (1976)	α	-	-	-	-	-
	β	-	-2.83288	1.39208	204.8986	-1.02744
	p	-	0.056064	0.505107	-	-
	c	-	-	-	-	-
(3) Parresol (1987)	α	-	-	-	-	-
	β	-	1.942	-0.7758	-45.35	23.91
	p	-	0.8442	-	-	-
	c	-	-	-	-	-
(4) Zhang et al. (2002)	α	-	-	-	-	-
	β	-	0.125991	0.151454	-	-
	p	-	0.17724	-	-	-
	c	-	-	-	-	-
(5) Cao et al. (1980)	α	-	0.018175	0.94483	-	-
	β	-	0.951356	-2.62197	74.03463	-
	p	-	-	-	-	-
	c	0.000218	-	-	-	-
(6) McClure y Czaplowski (1986)	α	0.000182	0.941741	0.955937	-	-
	β	-	0.951356	-2.62973	65.70676	-
	p	-	-	-	-	-
	c	-	0.019338	0.941017	-	-

7.2. Estadísticos de ajuste y validación

7.2.1. Fase de ajuste

En el proceso de estimación de los parámetros se obtuvieron simultáneamente los estadísticos de bondad de ajuste para cada modelo sometido al análisis, en el Cuadro 5 se presentan los resultados obtenidos, los cuales nos ayudan a determinar cuál es el mejor modelo en base a los valores más bajos en la Raíz del Cuadrado Medio del Error (REMC), Sesgo promedio (\bar{E}), Criterio de información Akaike (AIC) y el valor más alto en el Coeficiente

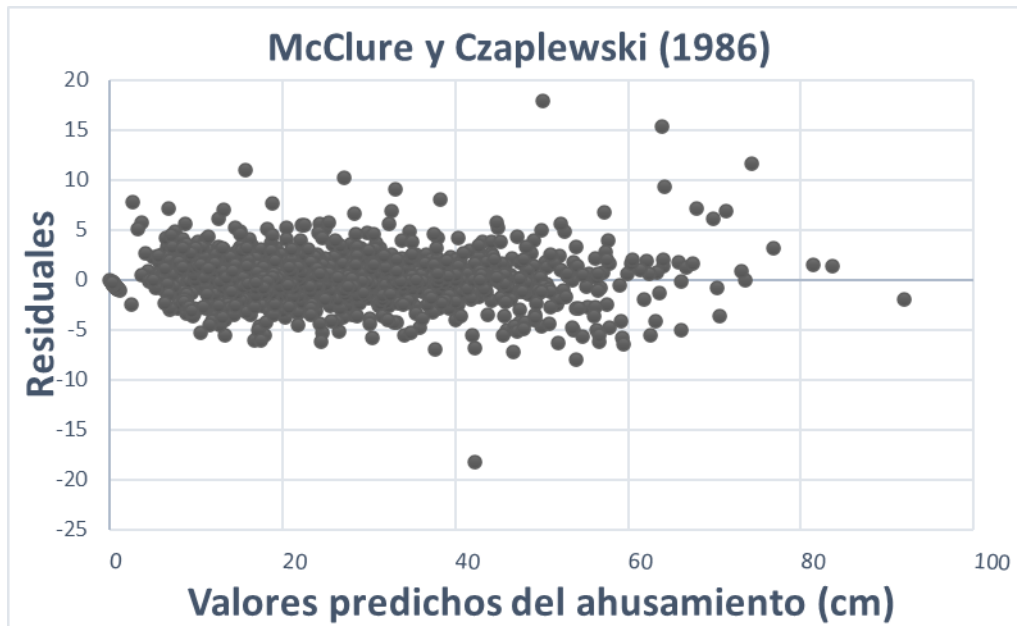
de determinación ajustado (R^2 adj), además de un sistema de calificación implementado donde 1 sería el mejor valor y 6 el valor más pobre en cuanto al tipo de criterio. Dicho lo anterior el modelo 6 correspondiente a McClure y Czaplewski (1986) es el que mejor se ajustó y cumple con los criterios anteriores, en comparación con los demás modelos, lo cual es un indicativo que este modelo explica en mayor grado la variabilidad total en la variable dependiente, el segundo modelo que mejor se ajustó es el modelo 1 correspondiente a Fang *et al.* (2000) el cual obtuvo valores similares al modelo 6 el cual no presenta diferencia significativa en el coeficiente de determinación, pero si lo presenta en los demás criterios estadísticos a los del modelos 6. Los modelos que menos se ajustaron al perfil fustal fueron Parresol (1987) y Zhang *et al.* (2002) modelos 3 y 4 respectivamente ya que presentaron un valor muy alto en cuanto al Criterio de Información de Akaike (AIC), Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME) y calificación implementada, además de valores del Coeficiente de determinación ajustado (R^2 adj) muy bajos.

Cuadro 5.- Estadísticas de bondad de ajuste de los modelos compatibles evaluados para describir el perfil fustal de árboles de *Pinus ayacahuite* Ehren.

Modelo	SSE	CME	R²adj	RCME	SESGO	AIC	Calif. Total
Fang <i>et al.</i> (2000)	7350.9 (2)	5.9715 (2)	0.9771 (2)	5.9329546 (2)	0.046459 (2)	2222.842 (2)	12
Max y Burkhart (1976)	11452.6 (4)	9.2809 (4)	0.9644 (4)	9.235991 (4)	1.103353 (6)	2768.651 (4)	26
Parresol (1987)	12738.6 (5)	10.3147 (5)	0.9604 (5)	10.273074 (5)	0.533048 (5)	2898.611 (5)	30
Zhang <i>et al.</i> (2002)	14907.2 (6)	12.0609 (6)	0.9537 (6)	12.031672 (6)	0.182995 (3)	3089.549 (6)	33
Cao <i>et al.</i> (1980)	8027 (3)	6.5048 (3)	0.9750 (3)	6.4733594 (3)	0.251433 (4)	2327.947 (3)	19
McClure y Czaplewski (1986)	7189 (1)	5.8353 (1)	0.9776 (1)	5.7976076 (1)	-0.004209 (1)	2195.226 (1)	6

Se graficaron los valores predichos del ahusamiento para los modelos 6 y 1 (Figura 3) que fueron los modelos más sobresalientes, donde se observa que el modelo 6 presenta mejor distribución aleatoria en los residuales, además de presentar una distribución menor a la del modelo 1 lo que sugiere un menor sesgo en las estimaciones.

a)



b)

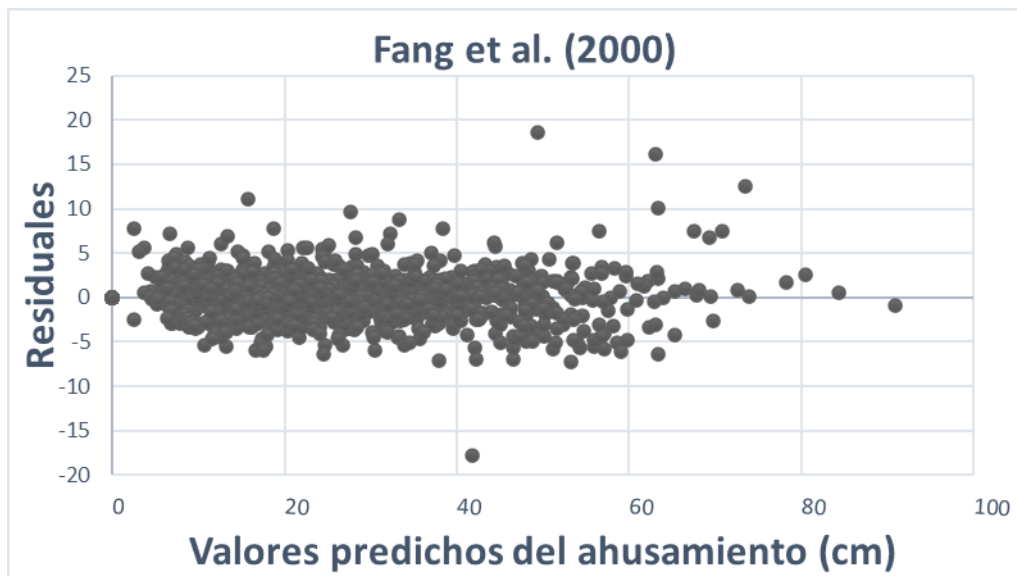


Figura 3.- Gráfica de residuales contra los valores predichos de diámetro del fuste para los modelos a) McClure y Czaplewski (1986) y b) Fang *et al.* (2000)

La teoría econométrica hace posible la resolución a problemas de este tipo, ya que representa de forma simplificada la relación que existe entre dos o más variables, dando lugar a que se puedan realizar estimaciones empíricas, a

través del ajuste de forma conjunta de sistemas compatibles con el ahusamiento, mediante técnicas de máxima verosimilitud con información completa (FIML) donde los estimadores son consistentes, ya que se ajustan de forma simultánea el diámetro y altura , lo cual presenta una ventaja (Borders, 1989; Fang et al., 2000; Cruz et al., 2008). Los valores obtenidos para los seis modelos utilizados fueron mediante este método (FIML), dado que la aplicación se hace evidente, ya que varios autores han optado por utilizarlo en sus investigaciones, tal es el caso de Hernández et al. (2011) quienes lograron ajustar 11 modelos de ahusamiento para *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo, obteniendo buenos resultados para el modelo de Fang et al. (2000) bajo esta técnica. Niño-López et al. (2018) por su parte reportan que utilizando esta técnica de ajuste obtuvieron que de cuatro modelos sometidos al ajuste para la especie *Gmelina arborea* Roxb. en El Alto Magdalena, Colombia, el sistema propuesto por Fang et al. (2000) presentó mejor comportamiento en la predicción de diámetros fustales y el sistema propuesto por Parresol et al. (1987) en volúmenes comerciales (acumulados a lo largo del fuste).

En lo que se refiere a la especie de *Pinus ayacahuite* Ehren. un estudio realizado por Ramírez - Martínez et al. (2018) en la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, reporta que se utilizaron 5 modelos de ahusamiento, el modelo que mejor se adaptó para esta especie fue el de Cielito 2 (segundo modelo que utilizó) propuesto por Rentería et al., 2006 y el modelo de Biging (1984), (quinto modelo que utilizó), fueron los que presentaron mejor bondad de ajuste con un coeficiente de determinación del (R^2_{adj}) de 0.97, valor similar a lo que se obtuvo con el modelo de McClure y Czaplewski (1986) en esta investigación.

7.2.2. Fase de validación

De la información obtenida de los análisis troncales de 11 árboles, se obtuvo una nueva base de datos la cual se usó para la validación de los seis modelos sometidos al análisis, se usó el mismo proceso que para el ajuste, arrojando

datos para la selección del mejor modelo, en el Cuadro 6 se muestran los estadísticos para la nueva base, que consistió en 929 pares de datos de diámetro y altura. Todos los modelos presentan comportamientos lógicos a los resultados estadísticos del ajuste, comprobando que es el modelo 6 el que mejor se ajustó al perfil fustal del árbol obteniendo el valor más bajo en cuanto al Criterio de Información de Akaike y Raíz del Cuadrado Medio del Error, además de un valor del coeficiente de determinación más alto. Los estadísticos obtenidos para el modelo 6 al igual que en el ajuste son similares a los del modelo 1.

Cuadro 6.- Estadísticas de bondad de ajuste de los modelos compatibles evaluados para describir el perfil dimétrico de los árboles de *Pinus ayacahuite* Ehren.

Modelo	SSE	CME	R²adj	RCME	SESGO	AIC	Calif. Total
Fang <i>et al.</i> (2000)	2940.3 (2)	3.1925 (2)	0.9769 (3)	3.165007 (2)	0.047285 (3)	1086.616 (2)	14
Max y Burkhart (1976)	3423.2 (4)	3.7088 (4)	0.9747 (4)	3.684823 (4)	0.138575 (5)	1271.176 (4)	25
Parresol (1987)	4548.9 (6)	4.9231 (6)	0.9665 (5)	4.896558 (6)	0.788955 (6)	1621.72 (6)	35
Zhang <i>et al.</i> (2002)	3060.8 (3)	3.3055 (3)	0.9775 (2)	3.294776 (3)	-0.11141 (1)	1126.421 (3)	15
Cao <i>et al.</i> (1980)	3429.1 (5)	3.7151 (5)	0.9747 (4)	3.691151 (5)	0.125427 (4)	1273.311 (5)	28
McClure y Czaplewski (1986)	2939.8 (1)	3.1919 (1)	0.9783 (1)	3.164451 (1)	-0.009139 (2)	1086.405 (1)	7

8. CONCLUSIONES

Se ajustaron seis modelos de ahusamiento a 108 árboles de la especie *Pinus ayacahuite*, de los cuales el modelo 6 propuesto por McClure y Czaplewski (1986) presenta mejor calidad de ajuste, menor sesgo y calidad en sus estadísticos, por lo que se puede decir que es la función que presenta mejor solides para la predicción de volumen total o parcial del fuste para la especie.

El ajuste simultaneo de modelos de ahusamiento permite tener predicciones consistentes, ya que estas ecuaciones comparten parámetros en sus expresiones asegurando su compatibilidad. En el presente estudio de los modelos basados en expresiones segmentadas, los modelos que presentaron mejores resultados en cuanto a bondad de ajuste fueron el modelo (6) McClure y Czaplewski (1986) y el modelo (1) Fang et al., (2000) con Coeficiente de determinación (R^2_{adj}) de 0.97 y con una diferencia de 26.62 entre valores del Criterio de Información de Akaike (AIC), siendo estos los de menor valor, sin embargo, en el sesgo promedio (\bar{E}) el modelo 6 es el que presenta el valor menor dando lugar a que este sistema sea el que mejor se adapte en comparación con los demás modelos.

Para el ajuste y la validación de los seis modelos utilizados, se compararon los estadísticos de bondad de ajuste obteniendo que el modelo propuesto por McClure y Czaplewski (1986) el que mejor sobresale por encima de los demás modelos, ya que este presenta los mejores valores tanto en los estadísticos del ajuste como en los estadísticos de validación, por lo que se puede decir que este modelo predice el volumen a cualquier altura del árbol con corteza y sin corteza, ya que los datos utilizados para validarlos provienen de diámetros sin corteza (DSC) obtenidos de análisis troncales de 11 árboles de la misma especie.

De acuerdo con lo anterior y debido a la importancia de la predicción de volumen fustal para el aprovechamiento y clasificación de productos forestales, se recomienda el modelo 6 propuesto por McClure y Czaplewski

(1986) debido a los mejores resultados obtenidos para este modelo. Sin embargo, el modelo 1 propuesto por Fang *et al.*, (2000) podría servir como alternativa debido a la similitud en sus estadísticos con el modelo 6, los hace viable para dicho objetivo.

9. LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles, M. y F. Carrillo-Anzures. 2008. Cuadro de volumen total con y sin corteza para *Pinus montezumae* Lamb. en el estado de Hidalgo. Folleto Técnico Núm. 7. INIFAP. Campo Experimental Pachuca. Pachuca, Hgo., México 20 p.
- Amidon, E. L. 1984. A general taper functional form to predict bole volume for five mixed-conifer species in California. *For. Sci.* 30:166-171
- Biging, G. S. (1984). A compatible volume- taper function for Alberta trees. *Forest Science*, 14, 339-350.
- Borders, B. E. 1989. Systems of equations in forest stand modeling. *For. Sci.* 35: 548-556.
- Cao, Q. V., H. E. Burkhart, and T. A. Max. 1980. Evaluation of two methods for cubic volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. *For. Sci.* 26:71-80.
- Carrillo A., F., M. Acosta M., G. Tenorio G. y F. Becerra L. 2004. Tablas de volúmenes para *Pinus patula* Schl. et Cham. en el estado de Hidalgo. INIFAP. Pachuca, Hgo. México. 15 p.
- Castedo D. F. y Álvarez G. J. G. 2000. Construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus radiata* D. Don en Galicia basada en una función de perfil del tronco. Dpto. de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela. Campus Universitario. 27002. Lugo, España. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.* Vol. 9 (2)
- Clutter, J.L. 1980. Development of taper functions from variable-top merchantable volume equations. *For. Sci.* 26: 117-120.
- CONAFOR. 2011. Estudio Regional Forestal, Unidad de Manejo Forestal, UMAFOR 1901.

- Corral R., J. J., U. Diéguez A., S. Corral R. and F. Castedo D. 2007. A merchantable volume system for major pine species in El Salto, Durango (México). *Forest Ecology and Management* 238: 118-129.
- Corral R., S., J. J. Nívar Ch. y F. Fernández S. 1999. Ajuste de funciones de ahusamiento a los perfiles fustales de cinco pináceas de la región de El Salto, Durango. *Madera y Bosques* 5: 53-65.
- Cruz-Cobos, F., R. Mendía-Santana., A. Jiménez-Flores., J. Nájera-Luna y F. Cruz García. 2016. Ecuaciones de volumen para *Arbutus* spp. (madroño) en la región de Pueblo Nuevo, Durango. *Investigación y Ciencia* 24(68): 41-47.
- Demaerschalk, J.P., and A. Kozak. 1977. The whole bole system: A conditioned dual equation system for precise prediction of tree profiles. *Can. J. For. Res.* 7:488-497.
- De-Miguel S., Mehtatalo L., Shater Z., 2012. Evaluating Marginal and Conditional Predictions of Taper Models in the Absence of Calibration Data. *Canadian Journal of Forest Research.* 42(7):1383–1394.
- Diéguez U., Castedo F., Álvarez J.G and Rojo A. 2006. Compatible taper function for plantations in northwestern Spain. *Can. J. For. Res.* 36: 1190-1205.
- Eguiluz, T. 1978. Ensayo de Integración de Conocimientos sobre el Género *Pinus* en México. Tesis profesional. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 10.
- Fang, Z., B. E. Borders and R. L. Bailey. 2000. Compatible volume-taper models for loblolly and slash pine based on a system with segmented-stem form factors. *For. Sci.* 46: 1-12.
- Fucaraccio, F. y G. M. Sttafieri. 1999. Desarrollo y uso de ecuaciones de volumen y tablas de volumen en la República de Argentina. Facultad de

Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. La Plata, Buenos Aires. Argentina. Informe Técnico UNLP. 26 p.

Gray, H. R. 1956. The form and taper of forest tree stems. Imperial Forest Institute, Oxford. Pap.32.

Husch, B. 1963. Forest mensuration and statistics. Ronald Press Company. New York. USA. 474 p.

Kozak, A., D. D. Munro, and J. H. G. Smit. 1969. Taper functions and their application in forest inventory. For. Chron. 45:278-283.

Larson, P. R. 1963. Stem Form Development of Forest Trees, Forest Science , Volumen 9, Edición suppl_2, junio, 1963, pp. 01–42, <https://doi.org/10.1093/forestscience/9.s2.a0001>

Lee, W. K., Seo H. J., Son M. Y., Lee H. K., Gadow V. K. 2003. Modeling stem profiles for *Pinus densiflora* in Korea. For Ecol. Manage. 172(1): 69-77

Luna E.O., y Álvarez D.O. 2014. Validación del hipsómetro LaserAce® 3D y el dendrómetro Criterion RD1000® en el desarrollo de funciones de perfil: un ejemplo con *Pinus cooperi*. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de El Salto .48 p.

Max, T. A., and H. E. Burkhart. 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. For. Sci. 22:283-289.

Max, T. y Burkhart, H. (1976). Segmented polynomial regression applied to taper equations. Forest Science, 22(3), 283-289

McClure, J. P. y Czaplewski, R. L. 1986. Compatible taper equation for loblolly pine. USDA Forest Service. Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, N. C., U.S.A. 28804. CAN. J. FOR. RES. VOL. 16.

- Muñoz F., H. J., J. C. Velarde R., J. J. García M., J. T. Sáenz R., E. H. Olvera D. y J. Hernández R. 2012. Predicción de volúmenes de fuste total para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. *Rev. Mex. Cien. For.* 3(14):11-22.
- Muñoz-Flores, H., S. Madrigal H., M. Aguilar R., J. García M. y M. Lara R. 2003. Tablas de volumen para *Pinus lawsonii* Roetzl y *P. pringlei* Shaw. en el Oriente de Michoacán. *Ciencia Forestal en México* 28(94):81-104.
- Návar C. J., Domínguez C. P., Contreras A. J., y Estrada M. C. 1997. Ajuste de siete modelos de ahusamientos a los perfiles de *P. harteguii* Lindl. del Noreste de México. *Agrociencia, Colegio de Posgrados. Volumen* 31, No. 1
- Navar, J. y Tapia, 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.
- Niño-López, G. S., Ramos-Molina, P. A., Barrios, A. y López-Aguirre, A.M. (2018). Modelos compatibles de ahusamiento-volumen para árboles de *Gmelina arborea* Roxb. en el Alto Magdalena, Colombia. *Colombia Forestal*, 21(2), 174-187.
- Ormerod, D. W. 1973. A simple bole model. *For. Chron.* 49:136-138
- Perez, D. N., H. E. Burkhart, and C. T. Stiff. 1990. A Variable -Form taper function for *Pinus ocarpa* Scheiede in Central Honduras. *Forest Science*, Vol. 36, NO. 1 , pp. 186-191
- Perry, J. P. 1991. *The Pines of Mexico and Central América*. Timber Press. Portland, Oregon.

- 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. *Rev. Cien. For. en Méx.* 34: 119-136.
- Ramirez-Martinez, A.; Santiago-Garcia, W.; Quiñonez-Barraza, G.; Ruiz-Aquino, F.; Antúnez pP. 2018. Modelación del perfil fustal y volumen total para *Pinus ayacahuite* Ehren. Universidad de la Sierra Juárez. Ingeniería Forestal. Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. 15 p.
- Reed, D. D., and J. C. Byrne. 1985. A simple, variable form volume estimation system. *For. Chron.* 61:87-90.
- Rondeux, J. 2010. Medición de árboles y masas forestales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 521 p.
- Rondeux, J. 2010. Medición de árboles y masas forestales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 521 p.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/C Online DocTM, Release 7.50. Cary, NC. USA s/p.
- Torres R., J. M. y O. S. Magaña T. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Ed. Limusa. México, D. F. México. 472 p.
- Schumacher, F. X. and F. D. S. Hall. 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research* 47:719-734.
- Silva G. J., Aguirre C. O. Alanís R. E. y Tagle G, M, 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* vol. 9 (50). DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.261>.
- Spurr, S. H. 1952. *Forest Inventory*. The Ronald Press company. USA. 40 p.
- Valdez, L., R. y Lynch T. 2000. Ecuaciones para estimar volumen comercial y total en rodales aclareados de *Pinus patula* en Puebla, Mexico. *Agrociencia* 34: 747-759.

- Vargas-Larreta, B., J. Corral-Rivas., O. Aguirre-Calderón., J. López-Martínez., H. De los Santos-Posadas., F. Zamudio-Sánchez., E. Treviño-Garza., M. Martínez-Salvador y C. Aguirre-Calderón. 2017. SiBiFor: Forest Biometric System for forest management in Mexico. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 23(3): 437-455.
- Velasco B., E., S. Madrigal H., I. Vázquez C., A. González H. y F. Moreno S. 2006. Manual para la elaboración de tablas de volumen fustal en pino. Libro Técnico Núm. 1. INIFAP-Conacyt-Conafor. México, D.F. México. 34 p.
- Weiskittel, A. R., Hann, D. W., Kershaw, J. A. and Vanclay J. K. 2011. Forest growth and yield modeling. Wiley-Blackwell Press. West Sussex, UK. 416 p.