

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



TESIS

**ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE VARIABLES
DASOMÉTRICAS Y CÁLCULO DE VOLUMEN EN *Pinus pseudostrobus*
EN EL SUR DE NUEVO LEÓN**

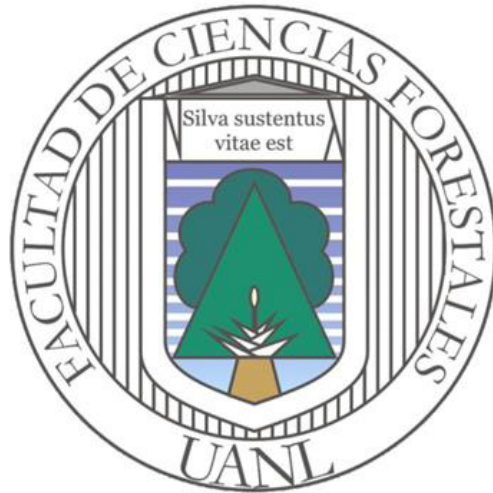
POR

ING. EDGAR ALAN FLORES MORALES

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

DICIEMBRE, 2016

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



TESIS

**ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE VARIABLES
DASOMÉTRICAS Y CÁLCULO DE VOLUMEN EN *Pinus pseudostrobus*
EN EL SUR DE NUEVO LEÓN**

POR

ING. EDGAR ALAN FLORES MORALES

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO.

DICIEMBRE, 2016

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**

**ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE VARIABLES
DASOMÉTRICAS Y CÁLCULO DE VOLUMEN EN *Pinus pseudostrobus* EN EL
SUR DE NUEVO LEÓN**


Realizada por:

ING. EDGAR ALÁN FLORES MORALES

Como requisito parcial para obtener el Grado de:

Maestro en Ciencias Forestales

COMITÉ DE TESIS



Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón

DIRECTOR



Dr. Javier Jiménez Pérez

ASESOR



Dr. Marco Aurelio González Tagle

ASESOR



Dr. Gerónimo Quiñonez Barraza

ASESOR EXTERNO

Diciembre, 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme el apoyo económico para la realización de mis estudios de maestría.

Al personal docente y administrativo de Facultad de Ciencias Forestales de Universidad Autónoma de Nuevo León por todas sus atenciones y por la oportunidad brindada para realizar mis estudios de maestría.

Agradezco al Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón por su dirección en mi trabajo de tesis, por sus consejos, asesorías, motivación, por la paciencia que tuvo conmigo y sobre todo por la amistad que siempre me brindó.

Al Dr. Marco Aurelio González Tagle por su disponibilidad, comentarios y asesorías brindadas para enriquecer el presente trabajo de tesis,

Al Dr. Javier Jiménez Pérez por sus comentarios y sugerencias que enriquecieron en gran medida en presente trabajo,

Al Dr. Gerónimo Quiñones Barraza por sus enseñanzas, amables comentarios y sugerencias para la realización del presente trabajo,

Al ejido Corona del Rosal por darme la oportunidad de haber realizado los estudios correspondientes del presente trabajo.

DEDICATORIAS

A Dios, gracias por darme la vida y darme la dicha de seguir adelante y estar cumpliendo cada uno de mis sueños y propósitos que tengo en mi vida y la dicha de tener darme una familia hermosa con que compartir mis logros, gracias por estar conmigo en cada momento de mi vida y sobre todo por estar a cada instante conmigo y no soltarme de la mano.

A mis padres Sr. Efraín Flores Quiñones y Sra. María de Jesús Morales Rodríguez por ser mi más grandes maestros de la vida y guiarme por este camino lleno de logros y que aún siguen muchos por conseguir juntos, gracias por su dedicación, por su amor, por su confianza y sobre todo por el gran ejemplo que han sido para mí en el transcurso de la vida, LOS AMO.

A mis hermanos y sobrinos Efraín de Jesús y Marcia Carolina por ser los mejores hermanos del mundo y siempre estar en las buenas y en las malas conmigo y ser también mis mejores amigos y mis consejeros, a mis sobrinos vivis, bebote, la mena y la fany por ser también mi motivación para seguir adelante y ser un ejemplo para ellos para que en el transcurso de su formación sigan echándole ganas.

Familiares, Amigos y Compañeros Gracias por que de alguna forma me ayudaron a salir adelante DIOS LOS BENDIGA, Abuelita Emma, tío Mario, tío Agustín, tía lucha, tía Dora, cuñada Perla y cuñado Guillermo. A mis amigos y compañeros Fátima, Lily, chuy, Eduardo, Rubén, Pedro, Sebastián, Diana Y sobre todo a mi mejor amiga, más que eso, Analí porque todo el tiempo está al pendiente de mí y también es parte importante de mi vida y de es te gran trabajo y que le deseo mejor en la vida.

Contenido

RESUMEN	VII
ABSTRACT.....	VIII
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1. Generalidades	2
1.1.1. El dendrómetro Criterion RD1000®.....	2
1.1.2. Relaciones alométricas	3
1.1.3. Relación diámetro, altura y volumen a partir del tocón.....	3
1.1.4. Funciones de volumen	4
1.1.5. Modelos ahusamiento-volumen.....	5
1.2. Método de ajuste de modelos.....	5
1.2.1. Mínimos cuadrados ordinarios (MCO).....	5
1.2.2. Regresiones aparentemente no relacionadas (SUR)	6
1.2.3. <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. Var. <i>Pseudostrobus</i>	6
1.3. Descripción del área de estudio.....	8
1.3.1. Antecedentes de Manejo forestal en el área de estudio.....	8
1.3.2. Fisiografía.....	8
1.3.3. Topografía	9
1.3.4. Clima	9
1.3.5. Suelos	9
1.3.6. Vegetación	10
1.3.7. Aprovechamiento forestal.....	10
2. HIPÓTESIS.....	10
3. OBJETIVOS	11
3.1. Objetivo general.....	11
3.1.1. Objetivos específicos.....	11
4. BIBLIOGRAFÍA	12
CAPITULO II.....	14

5. ESTIMACIÓN DEL DIÁMETRO, ALTURA Y VOLUMEN A PARTIR DEL TOCÓN PARA <i>Pinus pseudostrabus</i> EN EL SUR DE NUEVO LEÓN.....	14
5.1. RESUMEN.....	14
5.2. ABSTRACT.....	15
6. INTRODUCCIÓN.....	16
6.1. Materiales y métodos	17
6.1.1. Área de estudio	17
6.1.2. Colecta de datos.....	18
6.1.3. Modelos utilizados	19
7. RESULTADOS	21
7.1. Relación diámetro normal – diámetro del tocón.....	22
7.2. Relación altura total – diámetro del tocón.....	23
7.3. Relación volumen de fuste –diámetro del tocón	24
8. DISCUSIÓN.....	27
9. CONCLUSIONES	29
10. BIBLIOGRAFÍA	30
CAPITULO III.....	32
11. MODELOS DE AHUSAMIENTO-VOLUMEN PARA <i>Pinus pseudostrabus</i> EN EL SUR DE NUEVO LEÓN.....	32
11.1. RESUMEN	32
11.2. ABSTRACT	33
12. INTRODUCCIÓN.....	34
12.1. Materiales y métodos	35
12.1.1. Descripción del área de estudio	35
12.1.2. Variables utilizadas para el ajuste en los modelos	36
12.1.3. Caracterización de la base de datos	37
12.1.4. Modelos utilizados	39
12.1.5. Método de ajuste	40
12.1.6. Estadísticos para medir el ajuste de los modelos.....	40

12.1.7. Autocorrelación y heterocedasticidad.....	41
13. RESULTADOS	42
14. DISCUSIÓN	45
15. CONCLUSIONES	47
16. BIBLIOGRAFÍA	48
17. CONCLUSIONES GENERALES	51

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Modelos utilizados para predecir el diámetro normal, altura total y volumen total a partir del tocón	19
Cuadro 2 Estadísticos descriptivos de la base de datos	21
Cuadro 3. Parámetros y estadísticos de los modelos ajustados para la relación diámetro normal-diámetro del tocón	22
Cuadro 4. Parámetros y estadísticos de los modelos ajustados para la relación altura total-diámetro del tocón	23
Cuadro 5. Parámetros y estadísticos de los modelos ajustados para la relación altura total-diámetro del tocón	24
Cuadro 6. Modelos del sistema para el efecto multiplicativo	26
Cuadro 7. Parámetros y Estadísticos del sistema conformado por el método SUR26	
Cuadro 8. Valores de los estadísticos descriptivos de la base de datos utilizada de <i>Pinus pseudostrobus</i>	38
Cuadro 9. Sistemas de ahusamiento y volumen ajustados para <i>Pinus pseudostrobus</i>	39
Cuadro 10. Estadísticos evaluados para la selección de la ecuación de mejor ajuste	40

Cuadro 11. Valores de los parámetros y estadísticos de las ecuaciones compatibles de ahusamiento-volumen ajustadas para <i>Pinus pseudostrabus</i>	43
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio.	17
Figura 2. Categorías diamétricas de diámetro normal y diámetro del tocón	21
Figura 3. Gráfica de ajuste del modelo seleccionado y gráfica de valores residuales contra predichos	23
Figura 4. Gráfica de ajuste del modelo seleccionado y gráfica de valores residuales contra predichos	24
Figura 5. Gráfica de ajuste del modelo seleccionado y gráfica de valores residuales contra predichos	25
Figura 6. Gráficos de heterocedasticidad sin corregir y corregido del sistema de ecuaciones para predecir el volumen fustal.....	27
Figura 7. Ubicación del área de estudio.	36
Figura 8. Diámetro relativo (d/D) contra altura relativa (h/H) y volumen acumulado respecto a la altura del fuste de la especie en estudio.	38
Figura 9. Gráfica de residuales de ahusamiento contra los valores predichos de diámetro y volumen comercial del sistema Fang <i>et al.</i> (2000) sin corrección y con corrección por heterocedasticidad en <i>Pinus pseudostrabus</i>	44
Figura 10. Gráficos de diámetro observado contra diámetro predicho y volumen observado contra volumen predicho.....	45

RESUMEN

En el presente trabajo se generaron ecuaciones alométricas para predecir diámetro, altura, y volumen a partir de las dimensiones del tocón para *Pinus pseudostrobus* la especie de mayor importancia económica en Nuevo León, los resultados indican que para predecir el diámetro normal basta con una regresión lineal simple, para modelar la altura total se generó una ecuación polinomial la cual explica satisfactoriamente la relación con las dimensiones del tocón; para la estimación del volumen fustal se generó un sistema de ecuaciones con efecto multiplicativo el cual fue el que explicó la relación diámetro del tocón- volumen fustal, el ajuste simultáneo sirvió para corregir la heterocedasticidad.

Para el sistema de ahusamiento-volumen se generaron 3 ecuaciones segmentadas con la técnica de regresión aparentemente no relacionada (SUR), los problemas de autocorrelación y heterocedasticidad se corrigieron, la ecuación que presentó los mejores valores estadísticos fue la de Fang *et al.* (2000). La información servirá para el cálculo de volúmenes comerciales a alturas y diámetros dados, y se podrá generar una tabla de distribución de productos de la materia prima forestal.

Las ecuaciones alométricas podrán utilizarse para el desarrollo de las actividades en el manejo forestal sobre la especie en estudio en el ejido Corona del Rosal.

Palabras Clave: Ahusamiento, Heterocedasticidad, Diámetro del tocón, Volumen.

ABSTRACT

In the present work, allometric equations were generated to predict diameter, height, and volume from the stump dimensions for *Pinus pseudostrobus*, the most important economic species in Nuevo Leon. The results indicate that a linear regression is sufficient to predict normal diameter. Simple, to model the total height a polynomial equation was generated which explains satisfactorily the relation with the dimensions of the stump; For the estimation of the fustal volume a system of equations with multiplicative effect was generated which was the one that explained the diameter of the stump-fustal volume, the simultaneous adjustment served to correct the heteroskedasticity.

For the volume-tapering system, 3 segmented equations were generated with the apparently unrelated regression technique (SUR), the autocorrelation and heteroscedasticity problems were corrected, the equation that presented the best statistical values was that of Fang et al. (2000). The information will be used to calculate commercial volumes at given heights and diameters, and a table of distribution of products of the forest raw material may be generated. The allometric equations can be used for the development of activities in the forest management of the species under study in the ejido Corona del Rosal.

Keywords: Taper, Heteroscedasticity, stump diameter, volume.

CAPÍTULO I

1. Introducción General

Las ecuaciones alométricas son de gran importancia en el ámbito forestal, ya que en el manejo forestal representan una ventaja para que las acciones de aprovechamiento y conservación de las masas forestales se lleven de manera adecuada y con ello garantizar la sustentabilidad para no afectar a las generaciones futuras.

El volumen de los árboles a nivel individual y de masas forestales es de gran importancia para el manejo, ya que es la variable más importante de acuerdo a la gestión de los recursos forestales. La estimación y el cálculo del volumen, así como de las variables dasométricas representan gran interés para que los manejadores forestales logren el manejo forestal sustentable, es por ello que las ecuaciones alométricas son de gran importancia para describir las variables mencionadas ya que tienen una amplia aplicación para la toma de decisiones en las actividades forestales.

El presente trabajo se estructura en 3 capítulos; una parte introductoria y dos artículos científicos denominados: Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del tocón para *Pinus pseudostrabus* en el sur de Nuevo León y Ecuaciones de Ahusamiento- Volumen para *Pinus pseudostrabus* en el sur de Nuevo León.

1.1. Generalidades

1.1.1. El dendrómetro Criterion RD1000®

El Criterion RD1000® es un dendrómetro de tecnología láser que se utiliza para medir diámetros de los árboles, así como las alturas a las se presentan diámetros específicos, además determina el porcentaje de pendiente y calcula el Factor de Área Basal (FAB). Los valores de las mediciones se pueden dar en unidades que se fijan en metros o centímetros; este aparato se puede conectar a un distanciómetro y leer la distancia del árbol al punto de colocación del dendrómetro y hacer más eficiente el trabajo (García, 2015).

Las mediciones que se pueden obtener son las siguientes:

- Cálculo de pendiente porcentual: El sensor de inclinación del Criterion RD 1000® permite ver valores de inclinación. Los valores se muestran en la mira LED y aparece como unidades enteras de porcentaje de pendiente.
- BAF: Se especifica un valor de factor de área basal y visualmente estima si los árboles caen “dentro” o “fuera” de una parcela.
- In/Out: Se utilizan los factores de radio de parcela almacenados para determinar el estatus de árbol “límite”.
- Diámetro/Altura: Realiza una medición de la altura y del diámetro en cualquier punto (o múltiples puntos) a lo largo del tronco.

1.1.2. Relaciones alométricas

La palabra Alometría tiene dos definiciones: es el estudio del crecimiento de una parte de la planta en relación al crecimiento de la planta completa o alguna parte de la misma, y también es el estudio de las consecuencias en tamaño, formas y procesos de la planta (Nikklas, 1994).

La Alometría posibilita relacionar características físicas o fisiológicas de las especies forestales para predecir el comportamiento de las plantas en un futuro, ya que permite obtener estimadores que se adecuan a la especie en estudio lo que es de gran utilidad para manejadores forestales que con ello pueden realizar la planeación de aprovechamientos forestales (Lopez *et al.*, 2003).

1.1.3. Relación diámetro, altura y volumen a partir del tocón

Existen expresiones matemáticas que permiten estimar el volumen con base a mediciones simples, estos modelos matemáticos deben tener una muestra objetivamente seleccionada y cuidadosamente medida para generar estimadores adecuados a la especie en estudio (Prodan *et al.*, 1997)

Diversos autores estimaron el diámetro y el volumen a partir del tocón, tal es el caso de Diéguez *et al.* (2003) que lo realizaron para 6 especies forestales de suma importancia económica en Galicia España. Para este trabajo diversos autores ajustaron 5 modelos para estimar el diámetro y 3 para estimar el volumen a partir de las dimensiones del tocón; la selección del mejor modelo se basó en el análisis de los estadísticos para su capacidad predictiva y un análisis gráfico, por lo cual concluyeron que la relación diámetro normal-diámetro del tocón se explica satisfactoriamente con modelos lineales sin necesidad de utilizar modelos más complejos.

Pompa *et al.* (2011) ajustaron modelos para predicción de diámetro normal-diámetro del tocón utilizando como variable dependiente la altura del tocón, ya que mejora los

estadísticos para una mejor predicción. Los autores también indican que no siempre es bueno utilizar esta variable en los bosques mexicanos debido a que las técnicas de corta son diferentes en cada región dependiendo de las condiciones topográficas del terreno.

Quiñones (2009) desarrolló ecuaciones alométricas para el manejo forestal del ejido San Diego de Tezains ubicado en el municipio de Santiago Papasquiario, Durango, México. Se estimaron ecuaciones para predecir el diámetro normal, la altura total y el volumen total a partir de las dimensiones del tocón para seis especies de *Pinus* utilizando 11 modelos lineales y uno no lineal. Concluye que un modelo lineal simple explica la relación diámetro normal (DN) – diámetro del tocón (Dt) al igual que la relación altura total-diámetro del tocón, mientras que la función logarítmica explicó la relación volumen total-diámetro del tocón.

1.1.4. Funciones de volumen

La estimación del volumen es un procedimiento relevante en la dendrometría y los inventarios forestales. La dificultad en la determinación directa del volumen mediante la cubicación de secciones, hace conveniente contar con expresiones matemáticas basadas en una muestra representativa del área donde se hace el estudio, ya que permitirán estimar el volumen sobre la base de mediciones simples (Prodan *et al.*, 1997).

Dentro de la biometría forestal una de las actividades es la estimación del volumen, las ecuaciones de volumen que predicen el mismo en árboles individuales con base en algunas variables de fácil medición en el campo, por ejemplo el diámetro normal y la altura total, son fundamentales en la prácticas forestales para la estimación de las existencias volumétricas de los bosques, y esto se convierte en el punto más relevante en la toma de decisiones en gestión forestal, debido a que las masas forestales son más valoradas desde el punto de vista económico en función de la productividad volumétrica (Robinson y Wood, 1994).

1.1.5. Modelos ahusamiento-volumen

El concepto de compatibilidad de funciones de ahusamiento-volumen fue desarrollado por Demaeschalk (1972), en el cual la función de ahusamiento incorpora el volumen total calculado por una función de volumen como una variable independiente. La función de ahusamiento compatible tiene la propiedad de que el volumen total por la integración de la misma debe generar el mismo volumen total estimado por la misma función de volumen.

Clutter (1980) menciona que la exactitud y precisión de las ecuaciones depende de la exactitud y precisión de las funciones de volumen de la cual son derivadas. Funciones de ahusamiento han sido utilizadas para la estimación de volúmenes comerciales a distintas alturas y han resultado eficientes para determinar volúmenes (Cao *et al.*, 1980).

El ajuste de un sistema compatible de volumen-ahusamiento puede darse mediante mínimos cuadrados ordinarios (MCO) o como un sistema de ecuaciones simultáneas. Al ajustar el sistema con métodos como el de ecuaciones aparentemente no relacionadas y máxima verosimilitud con información completa (SUR Y FIML, por sus siglas en inglés) los parámetros son consistentes, ya que ajustan simultáneamente el ahusamiento y el volumen acumulado (Fang *et al.*, 2000).

1.2. Método de ajuste de modelos

1.2.1. Mínimos cuadrados ordinarios (MCO)

De acuerdo con Hanke y Wichern (2006) el procedimiento consiste en minimizar la suma de los cuadrados de las distancias verticales entre los valores de los datos y los de la regresión estimada, es decir, minimizar la suma de los residuos al cuadrado,

teniendo como residuo la diferencia entre los datos observados y los valores del modelo lineal.

Este método se rige bajo los siguientes supuestos principales; la variable dependiente aleatoria cuya distribución probabilística depende la variable independiente, homogeneidad de varianzas, independencias de los errores y normalidad de los errores (Said y Zarate, 1990).

1.2.2. Regresiones aparentemente no relacionadas (SUR)

Regresiones aparentemente no relacionadas (SUR), también llamados conjuntos mínimos cuadrados generalizados (JGLS) o estimación Zellner, es una generalización de MCO para sistemas multiecuacionales. Como MCO, el método SUR asume que todos los regresores son variables independientes, pero SUR utiliza las correlaciones entre los errores en las diferentes ecuaciones para mejorar las estimaciones de regresión. El método SUR requiere una regresión inicial MCO para calcular los residuos. Los residuos MCO se utilizan para estimar la matriz de covarianza cruzada de la ecuación. Ante determinadas situaciones el investigador puede verse en la necesidad de modelar y estimar conjuntamente varias ecuaciones que en apariencia no representen simultaneidad entre las mismas; sin embargo, los errores aleatorios pueden presentar algún grado de correlación negativa en la medida que involucren a factores comunes no medibles y/o no observables y será esta correlación no percibida la que haga que resulte más eficiente estimar todas las ecuaciones simultáneamente y no una por una por Mínimos Cuadrados Ordinarios (Hausman, 1975).

1.2.3. *Pinus pseudostrobus* Lindl. Var. *pseudostrobus*

Sinónimos: *Pinus estevezii* (Martínez) J. P. Perry; *Pinus nubicola* J. P. Perry; *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *coatepecensis* Martínez; *Pinus pseudostrobus* Lindl. var.

estevezii Martínez; *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *laubenfelsii* Silba; *Pinus yecorensis* Debreczy & Rácz

Nombre Común: Pino blanco, Pino mechudo.

Árbol, tronco monopódico, recto, 10-25 m altura; corteza café-grisácea a café-rojiza oscura, lisa por mucho tiempo, pero partiéndose en escamas alargadas o placas anchas separadas por surcos anchos con la edad; copa cilíndrica o redondeada, densa o abierta, con numerosas ramas, delgadas, anguladas o esparcidas, con abundante follaje extendido o en ocasiones flácido y penduloso en las puntas, a manera de “mechas” (pelo colgante); ramillas delgadas, lisas, con las bases de las hojas decurrentes, café-rojizas, evidentemente azul cerosas al inicio, glabras; hojas en grupos de 5, raramente en 4, 6 u 8, 18-35 cm largo, 0.8-1.3 mm ancho, rectas, flexibles, rara vez rígidas, variadamente colgantes, amarillo-verdoso oscuro a verde brillante, en ocasiones azul-verde ceroso; vaina 20-35 mm largo, persistente y cayendo con el fascículo; conos femeninos 7-18 cm largo, 6-13 cm ancho, solitarios o en pares, raras veces en verticilos de 3-4, corto pedunculados, el pedúnculo robusto hasta 1 cm largo, generalmente anchos o angostamente ovoides a cilíndricos, usualmente simétricos y ligeramente curvados; escamas 100-200, gruesas y rígidas, leñosas, verdes antes de madurar, tornándose café-amarillento brillante u opaco a café rojizo con la edad, apófisis ligera o medianamente levantada, café opaca, grisácea con la edad, umbo obtuso, con una espina pequeña y frágil, algunas escamas se quedan adheridas a la rama cuando el cono se desprende del pedúnculo; semillas 5-7 mm largo, 3-4.5 mm ancho, aladas; ala 20-25 mm largo, 7-10 mm ancho, adherida y cubriendo un lado de la semilla. *Pinus pseudostrobus* var. *pseudostrobus* es el pino más frecuente en las zonas frescas y templadas de Nuevo León, especialmente en el centro y en el sur, donde hay climas húmedos, forma grandes extensiones de bosques asociados con otras especies de coníferas y encinos, entre los 1,300-2,600 m de altura. Frecuente en los Municipios de Santiago, Montemorelos, Allende, Iturbide, Rayones, Aramberri y Zaragoza. *Pinus pseudostrobus* es morfológicamente similar a *Pinus montezumae*, con el que frecuentemente se le confunde, pues habitan en condiciones ecológicas similares.

Las características distintivas para diferenciarlos es con base en sus conos, los de *P. pseudostrobus* son más anchos, 1.5 veces más largos que anchos o en ocasiones casi tan largos como anchos, con las apófisis ligera o fuertemente levantadas, en especial, de un lado del cono, mientras que los conos de *P. montezumae* son delgados y oblongos, dos o más veces más largos que anchos, asimétricos en la base, oblicuos, con las apófisis ligeramente levantadas. La palabra *pseudostrobus* alude del latín a “falso strobilus” debido a sus acículas flexibles en grupos de 5, conos grandes con escamas flexibles y delgadas que evocan un ligero parecido a *Pinus strobus* (Estrada *et al.*, 2014).

1.3. Descripción del área de estudio

El Ejido Corona del Rosal se ubica en el municipio de Galeana, al sureste del estado de Nuevo León, ocupando una superficie de 6,646.42 ha. Administrativamente se encuentra dentro del área de influencia del Distrito de Desarrollo Rural Galeana y pertenece a la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) 1901. Geográficamente se localiza entre los 24° 27' 23" y los 24° 32' 51" de latitud norte y entre los 99° 53' 54" y los 100° 01' 34" de longitud oeste.

1.3.1. Antecedentes de Manejo forestal en el área de estudio

En el año de 1991, para el ejido Corona del Rosal se autorizó un permiso para el aprovechamiento de árboles derribados por un fenómeno meteorológico según Oficio número 7195101- 1324 (91), de fecha 22 de octubre de 1991, con un volumen de 360 m³ rta, de las especies de *Pinus pseudostrobus* y según revisión hecha más a fondo, este predio no ha tenido aprovechamiento en los últimos 25 años por lo menos antes de que entrara en vigor el Programa de Manejo Forestal en 1995.

1.3.2. Fisiografía

El Ejido Corona del Rosal se localiza en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, la cual corre desde sus límites con la del Eje Neovolcánico en sentido

paralelo a la costa del Golfo de México.

La subprovincia dentro de la cual se localiza el ejido, es la Gran Sierra Plegada, en ella dominan las capas plegadas de calizas con ejes estructurales predominantes de anticlinales y sinclinales, una gran falla inversa corre sobre los bordes orientales de la sierra en tanto se extienden más o menos paralelas a aquellas y a los ejes estructurales. También hay afloramientos yesíferos paralelos en el mismo sentido particularmente del lado occidental de la sierra y fosforitas.

1.3.3. Topografía

La topografía del terreno es muy irregular, presentándose áreas planas con pendiente de 2 % hasta zonas abruptas que llegan a alcanzar hasta 100%.

El gradiente altitudinal es de 1620 m. siendo la menor altitud a 1540 msnm y los puntos con mayor altitud se encuentran en parajes conocidos como "El Infiernillo", "Las Bancas" y "La Zacatosa", que alcanzan hasta 3160 msnm.

1.3.4. Clima

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por García (1973), para la región el clima se define como el grupo de climas secos, del tipo semiseco, subtipo semiseco templado con verano cálido, con temperatura media anual entre 12°C y 18° C. Con temperatura del mes más frío entre -3°C y 18° C y la temperatura del mes más cálido mayor a 18° C. El régimen lluvias es de lluvias escasas todo el año y un porcentaje lluvias invernales menor del 18 % con respecto al total anual.

1.3.5. Suelos

En el área predominan los suelos someros, mismos que se encuentran en diversos grados de asociación, entre los que se distinguen los grupos Litosol, Rendzina y

Regosol con una clase de textura media.

1.3.6. Vegetación

Los tipos de vegetación que se encuentran en el área son muy variados, predominando los chaparrales en distintos grados de asociación con bosques de clima templado y algunos matorrales. Se encuentran, además, bosques puros de pino, cuyas especies dominantes son *Pinus pseudostrobus*, en las partes altas y *Pinus cembroides*, en las partes bajas: bosques mezclados de pino-encino en diversos grados de asociación y por último áreas en donde se practica la agricultura de temporal y la inducción de pastizales para el pastoreo de ganado.

1.3.7. Aprovechamiento forestal

Las áreas arboladas dentro del ejido Corona del Rosal corresponden a 1,722 ha, y se encuentran sometidas al aprovechamiento forestal comercial. La posibilidad anual aproximadamente es de 6,000 m³. Las especies con valor comercial son *Pinus pseudostrobus*, *Pinus teocote*, *Pinus cembroides* y *Quercus spp* (U.C.D.F.No.1 1996).

2. HIPÓTESIS

Las ecuaciones alométricas predicen con alto grado de confiabilidad las variables dasométricas, diámetro normal y altura total, así como el volumen del fuste y volumen comercial de árboles individuales.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Generar ecuaciones alométricas para estimar diámetro, altura y calcular volumen del fuste y comercial para *Pinus pseudostrobus*.

3.1.1. Objetivos específicos

- Ajustar modelos de regresión para predecir la relación diámetro del tocón – diámetro normal para *Pinus pseudostrobus*
- Ajustar modelos de regresión para predecir la relación diámetro del tocón – altura total de la especie en estudio
- Ajustar modelos de regresión para predecir la relación diámetro del tocón – volumen fustal para la especie evaluada
- Ajustar ecuaciones compatibles de ahusamiento-volumen comercial

4. BIBLIOGRAFÍA

- Diéguez A., U., M. Barrio A., F. Castedo D. y M. Balboa M. (2003). Estimación del diámetro normal y del volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón para seis especies forestales comerciales de Galicia. Invest. Agrar. Sist. Recur. For.12 (2): 131-139
- Estrada Castellón, A, E., Villareal Quintanilla, J, A., Salinas Rodríguez, M, M., Cantú Ayala, C, M., González Rodríguez, H y Jiménez Pérez, J. (2014). Coníferas de Nuevo León, México. Primera Edición. 145(1). 126-128.
- García Espinoza, G, G. (2015). Ecuaciones de Ahusamiento para Estimar el Volumen de Dos Especies de Pino en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. 72p.
- García, E. 1973. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. UNAM. México. 252p.
- López, M. D., L, Soto. P. 2003. Relaciones Alométricas para la Predicción de Biomasa Forrajera y leña de *Acacia pennatula* y *Guazuma ulmifolia* en dos comunidades del Norte de Chiapas, México. INCI, Jun. 2003, Vol.28, no.6, p.334-339. ISSN 0378-1844. Nikkias, K.J. plant Allometry. The university of Chicago Press. Chicago. P-vi-vii.
- Pompa-García, M., H.M. De los Santos P., M.E. Zepeda-Bautista y J.J. Corral-Rivas. 2011. Un modelo dendrométrico para estimación del diámetro normal a partir de las dimensiones del tocón. Agrociencia 45:379-387.
- Prodan, M., Peters R., Cox F., Real P., (1997). Medida Forestal. Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura (IICA), Costa Rica. 561p.

- Quiñonez, B.G. 2009. Estimación de Relaciones Alométricas para el Manejo Forestal del Ejido san Diego de Tezains, Durango, México. Tesis de Maestría en ciencias forestales. Instituto Tecnológico de El Salto. 51p.
- Robinson, A. P. and G. B. Wood. 1994. Individual tree volume estimation: A new look at new systems. *Journal of Forestry* 92 (12): 25-29.
- Demaerschalk, J. P. (1972). Conversions of taper and volume equations from the English to the metric system. *Canadian Journal of Forest Research*, 2(3), 372-374.
- Cao Q, V., BurKhart, H; Max, T. 1980. Evaluation of two methods for cubic volumen Prediction for Loblolly pine to hay merchantable limit. *Forest Science* 25(1) 71-80.
- Fang Z, Borders BE and Bailey RL. 2000. Compatible volume taper models for Loblolly and Slash pine based on system with segmented-stem form factors. *For.Sci.*46(1):1-12.
- Clutter, J. L. 1980. Development of taper function from variable top merchanttable volume equations. *For. Sci.* 26: 117-120.
- Hanke, J. E., & Wichern, D. W. (2006). *Pronósticos en los negocios*. Pearson Educación. 531p.
- Said, I. G. (1990). Zárate de LGP. Métodos estadísticos. Un enfoque interdisciplinario. 2da. ed. México: Editorial Trillas. Segunda Edición. México, D.F. 643p.
- Hausman, J. A. (1975), "An Instrumental Variable Approach to Full Information Estimators for Linear and Certain Nonlinear Econometric Models," *Econometrica*, 43, 727–738.

CAPITULO II

5. Estimación del Diámetro, Altura y Volumen a partir del Tocón para *Pinus pseudostrabus* en el Sur de Nuevo León.

5.1. RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue generar ecuaciones para predecir el diámetro normal, la altura total y el volumen total a partir de las dimensiones del tocón para *Pinus pseudostrabus* en el sur de Nuevo León, México. Empleando una muestra de 83 árboles, fueron medidos con dendrómetro. Para obtener la ecuación más confiable a la relación funcional: (a) diámetro normal–diámetro del tocón, (b) altura total- diámetro del tocón y (c) volumen total- diámetro del tocón, se ajustaron modelos lineales y no lineales a la base de datos. Se utilizaron diferentes criterios para elegir el mejor modelo; estos fueron el coeficiente de determinación, el sesgo promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Con una ecuación lineal simple se puede predecir la relación diámetro normal-diámetro del tocón y la relación altura total-diámetro del tocón con una ecuación polinomial se predice satisfactoriamente. Para la relación volumen-diámetro del tocón se generó un sistema de ecuaciones con efecto multiplicativo con el fin de corregir la heterocedasticidad. Las ecuaciones generadas posibilitan la estimación precisa de los valores de las variables dependientes; así como evaluar los volúmenes en áreas afectadas por fenómenos naturales o antropogénicos.

Palabras Clave: Heterocedasticidad, Diámetro del tocón, Modelos lineales, Modelos no lineales.

5.2. ABSTRACT

The objective of this work was to generate equations to predict normal diameter, total height and total volume from the stump dimensions for *Pinus pseudostrobus* in southern Nuevo Leon, Mexico. Using a sample of 83 trees, they were measured with a dendrometer. To obtain the most reliable equation for the functional relationship: (a) normal diameter-stump diameter, (b) total height-stump diameter and (c) total volume-stump diameter, linear and no linear models were fitted database. Different criteria were used to choose the best model; These were the coefficient of determination, the mean bias, the standard deviation and the coefficient of variation. With a simple linear equation, it is possible to predict the relation normal diameter-diameter of the stump and the relation total height-diameter of the stump with a polinomial equation is predicted satisfactorily. For the volume-diameter relation of the stump a system of equations with multiplicative effect was generated to correct the heteroscedasticity. The equations generated allow the precise estimation of the values of the dependent variables; As well as assess the volumes in areas affected by natural or anthropogenic phenomena.

Keywords: Heteroscedasticity, stump diameter, linear models, no linear models.

6. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento maderable ha tenido gran relevancia para la sociedad debido a sus diversos beneficios, por lo que interesa tener una estimación precisa de las existencias volumétricas que permita la planificación del aprovechamiento sustentable (Diéguez *et al.*, 2003), dado que los bosques son valorados desde un punto de vista económico en función de la proporción de volumen que producen (Robinson y Wood, 1994). Sin embargo, los bosques se pueden ver afectados por diversos factores como el manejo, ya que al aplicar el mismo puede tener una sobreestimación de los recursos forestales por haber un desconocimiento de las estimaciones volumétricas para las especies, también existen otros fenómenos que llevan a la pérdida de bosques como lo son los incendios, plagas y las talas clandestinas. Es por ello que se debe tener el dato de cuánto volumen existente hay y cuánto se extrae (Baes y Gra, 1990). Luego de la tala de un bosque queda como evidencia el tocón que permite la reconstrucción del tamaño de los árboles removidos a través modelos matemáticos que sirven para predecir el diámetro, la altura y el volumen, lo que resulta de utilidad para revisar volúmenes de cosecha (Corral-Rivas *et al.*, 2007). Conocer el diámetro normal, la altura total y el volumen del árbol a partir del diámetro del tocón tiene, entre otras, las siguientes aplicaciones: (1) estimar el volumen de madera extraído en una corta final o en una corta de mejora (aclareo o clara) ya realizada, (2) comprobar los resultados de las operaciones de aprovechamiento tras la extracción de los árboles, (3) evaluar las prácticas silvícolas realizadas reconstruyendo la composición previa de la masa cuando esta no se ha medido antes (Bylin, 1982; Parresol, 1998).

En México existen pocos trabajos de investigación sobre la predicción de las variables dasométricas y el volumen, y la gran mayoría de estos trabajos están realizados en el estado de Durango principalmente para especies del género.

El objetivo del presente trabajo es ajustar modelos matemáticos para la predicción del diámetro, altura y volumen a partir del tocón para *Pinus pseudostrobus* en el sur de Nuevo León.

6.1. Materiales y métodos

6.1.1. Área de estudio

El Ejido Corona del Rosal se ubica en el municipio de Galeana, al sureste del estado de Nuevo León, ocupando una superficie de 6,646.42 ha. Administrativamente se encuentra dentro del área de influencia del Distrito de Desarrollo Rural Galeana y pertenece a la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) 1901. Geográficamente se localiza entre los 24° 27' 23" y los 24° 32' 51" de latitud norte y entre los 99° 53' 54" y los 100° 01' 34" de longitud oeste (Figura 1).

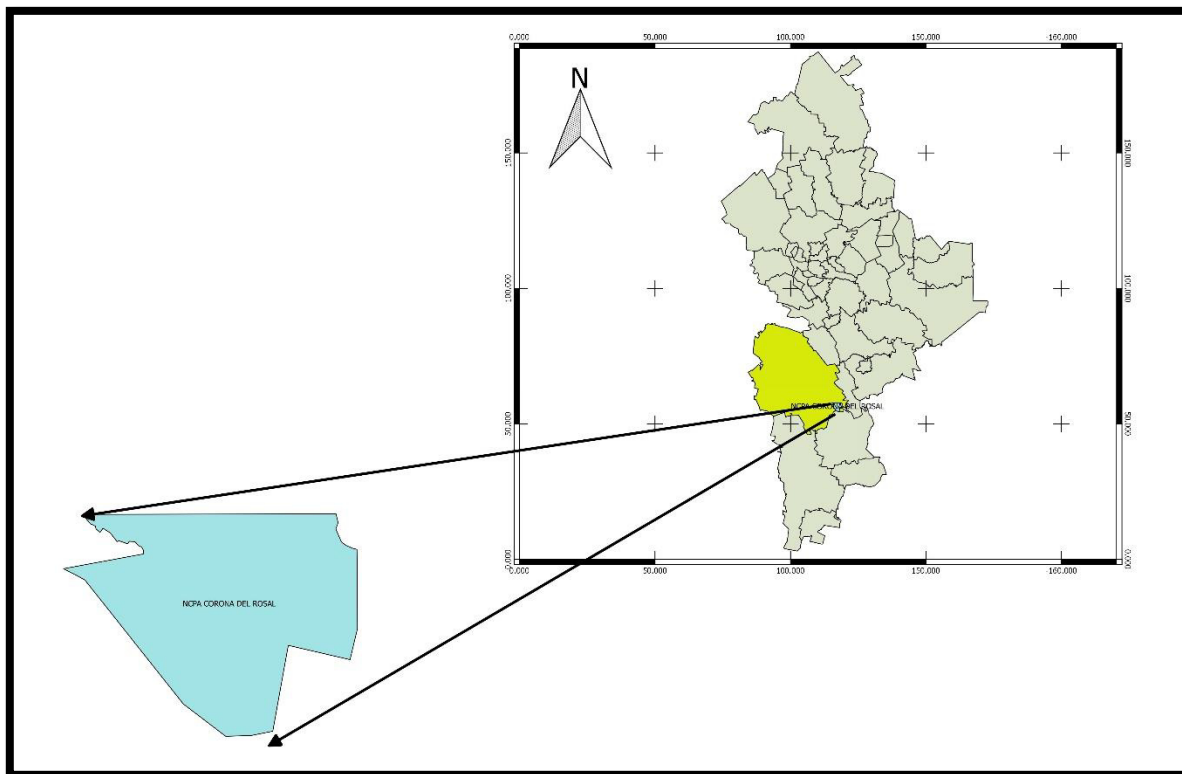


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

6.1.2. Colecta de datos

La base de datos del presente estudio se obtuvo de la medición de individuos que fueron seleccionados con base en un diseño de muestreo dirigido utilizando el dendrómetro **Criterion RD100®**. Se seleccionaron árboles con diferente diámetro y altura, que cumplieran con las características siguientes: copa completa, no despuntados, no rayados, sin evidencia de plagas y enfermedades, no podridos ni huecos y de porte saludable; se seleccionaron árboles de un solo fuste para evitar la sobreestimación de la población e integrar una base de datos completa cubriendo todas las categorías de diámetros y alturas existentes.

Para la toma de datos se midió cada ejemplar con el dendrómetro para obtener sus diámetros a diferentes alturas. La primera fue a la altura mínima posible de corte del tocón; se tomaron tres secciones hasta llegar al diámetro normal (1.30 m), las dos primeras de 30 cm de altura y la tercera de 0.70 cm. Posteriormente, se obtuvieron secciones de 2 m de longitud de manera subsecuente hasta la punta del árbol; por individuo se midió el diámetro normal, la longitud total del fuste y de cada sección los diámetros y longitudes. Los volúmenes de las trozas se calcularon con la fórmula de Smalian [1] y la parte final con la del cono [2]

$$V = \frac{S_1 + S_2}{2} * h \quad (1)$$

$$V = \frac{S_b * h}{3} \quad (2)$$

Donde:

S_1 = Superficie menor (m^2)

S_2 = Superficie mayor (m^2)

S_b = Superficie de la base (m^2)

h = Longitud (m)

V = Volumen (m^3)

Se sumaron los volúmenes individuales de cada sección para determinar el volumen total del fuste limpio.

6.1.3. Modelos utilizados

Una vez obtenido el volumen fustal se procedió a ajustar inicialmente los modelos recomendados por Diéguez *et al.* (2003), Benítez *et al.* (2004), Corral-Rivas *et al.* (2007) y Quiñones *et al.* (2012) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Modelos utilizados para predecir el diámetro normal, altura total y volumen fustal a partir del diámetro del tocón

MODELO	ECUACIÓN
$dn = a + b (dtoc)$	1
$dn = a + b (dtoc)^2$	2
$dn = a + b (dtoc) + c (dtoc)^2$	3
$\ln (dn) = a + b \ln (dtoc)$	4
$ht = a + b (dtoc)$	5
$ht = a + b (dtoc)^2$	6
$ht = a + b (dtoc) + c (dtoc)^2$	7
$\ln (ht) = a + b \ln (dtoc)$	8
$vf = a + b (dtoc)$	9
$vf = a + b (dtoc)^2$	10
$vf = a (dtoc)^b$	11
$\ln (vf) = a + b \ln (dtoc)$	12

Dónde: dn= diámetro normal, ht=altura total, vf= volumen fustal y a,b y c =parámetros a estimar

Los modelos utilizados excepto el 11 son lineales en sus parámetros por lo que su ajuste se realizó con el método de mínimos cuadrados, mediante el procedimiento REG del programa estadístico SAS (SAS Institute INC, 2013). Para el modelo 11 se empleó el procedimiento no lineal MODEL, del mismo programa.

Hair *et al.* (1999) señalan que no siempre las ecuaciones que mejor se ajustan a la muestra producen las estimaciones más precisas de los valores reales, por lo que el objetivo de un análisis de regresión no es determinar el mejor ajuste solo para la muestra, sino desarrollar el modelo que describa con mayor certidumbre a la población en su conjunto.

La capacidad de ajuste se analizó a partir de los residuos y de 4 estadísticos utilizados con frecuencia durante la generación de modelos forestales (Prodan *et al.*, 1997; Gadow y Hui, 1999; Castedo y Álvarez, 2000; Diéguez *et al.*, 2003; Corral-Rivas *et al.*, 2007): Raíz del Error Medio Cuadrático (3), Coeficiente de Determinación Ajustado (4) Coeficiente de Variación (5) y Sesgo promedio absoluto (6).

$$REMC = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}} \quad (3)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

$$CV = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{\bar{y}} \quad (5)$$

$$\bar{E} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)}{n} \right] \quad (6)$$

La raíz del error cuadrático medio indica la precisión de las estimaciones, el coeficiente de determinación ajustado reflejó la variabilidad total explicada por el modelo, con base en el número total de parámetros a estimar, el coeficiente de variación explicó la variabilidad relativa con respecto a la media y el sesgo promedio indica la desviación del modelo con respecto a los valores observados, lo cual sirve para la rápida comparación de los modelos propuestos (Diéguez *et al.*, 2003).

De igual forma se analizaron gráficamente los valores residuales contra los valores predichos para identificar si hay valores atípicos o alguna tendencia sistemática; este análisis es muy práctico para el análisis de los ajustes de los modelos antes mencionados.

7. RESULTADOS

En el Cuadro 2 se presentan los estadísticos de diámetro del tocón (dtoc), diámetro normal (dn), altura total (ht) y volumen del fuste (vf) de la base de datos utilizada.

Cuadro 2. Estadísticos descriptivos de la base de datos

Variable	Media	Dev std	Mínimo	Máximo	CV
dn(cm)	45.43	15.82	14	66.6	40.67
dtoc(cm)	38.89	17.31	17	78.8	38.09
ht (m)	19.08	4.88	8.4	30.7	25.61
vf (m³)	1.65	1.30	0.0790	6.16	83.96

Dónde: dn= diámetro normal (cm), dtoc= diámetro del tocón (cm), ht= altura (m), vf= volumen fustal (m³), dev std= desviación estándar, CV= coeficiente de variación.

En la Figura 2 se muestra la distribución por categorías diamétricas del diámetro normal y diámetro del tocón para la especie en estudio. Se puede apreciar que se cubren todas las categorías, entre las de mayor frecuencia se encuentran las de 15, 20, 35 y 55 cm

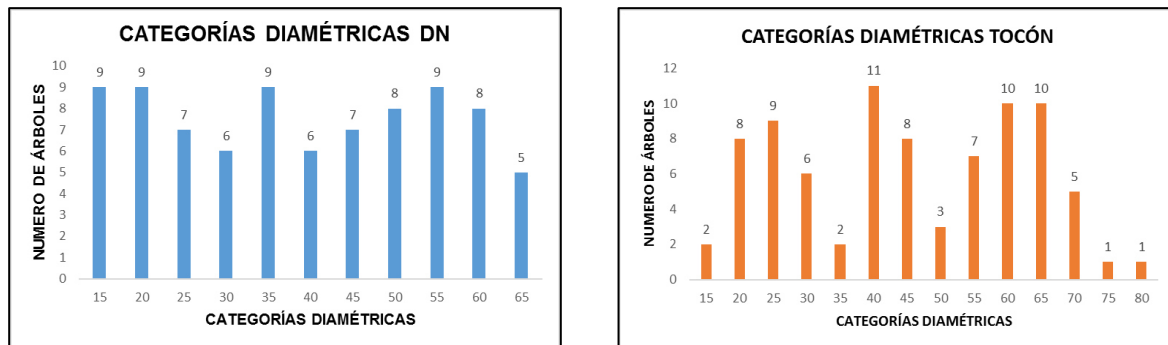


Figura 2. Categorías diamétricas de diámetro normal y diámetro del tocón.

7.1. Relación diámetro normal – diámetro del tocón

Los valores de los estimadores de los modelos para el caso de la relación del diámetro normal, en función del diámetro del tocón se muestran en el Cuadro 3. Se observa que el modelo con mejor ajuste para la especie de *Pinus pseudostrobus* fue el Modelo 1.

Cuadro 3. Parámetros y estadísticos de los modelos ajustados para la relación diámetro Normal-diámetro del tocón

MODELO	A	B	C	\bar{E}	REMC	R ² adj	CV
1	-2.21829	0.90499		9.40E-06	2.2325	0.98	5.70
2	15.98826	0.009707		0.00043145	3.4092	0.95	8.71
3	-2.1022	0.899012	0.000066	0.00025437	2.2464	0.97	5.70
4	-0.41696	1.06666		9.7907E-05	0.06559	0.97	1.83

Donde: A,B Y C= Parámetros a estimar, \bar{E} = Sesgo Promedio, REMC= Raíz del Error Medio Cuadrático, R² adj= Coeficiente de Determinación Ajustado, CV= Coeficiente de Variación.

En la Figura 3 se muestra la tendencia del ajuste del Modelo 1 el cual tuvo los mejores estadísticos y se muestran los valores predichos contra los residuos obtenidos con el Modelo 1. La distribución de los errores no sigue un patrón definido, por lo que se asume que el modelo no presenta problemas de heterocedasticidad; el intervalo de los valores residuales es pequeño en todos los casos.

ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE VARIABLES DASOMÉTRICAS Y CÁLCULO DE VOLUMEN EN *Pinus pseudostrabus* EN EL SUR DE NUEVO LEÓN

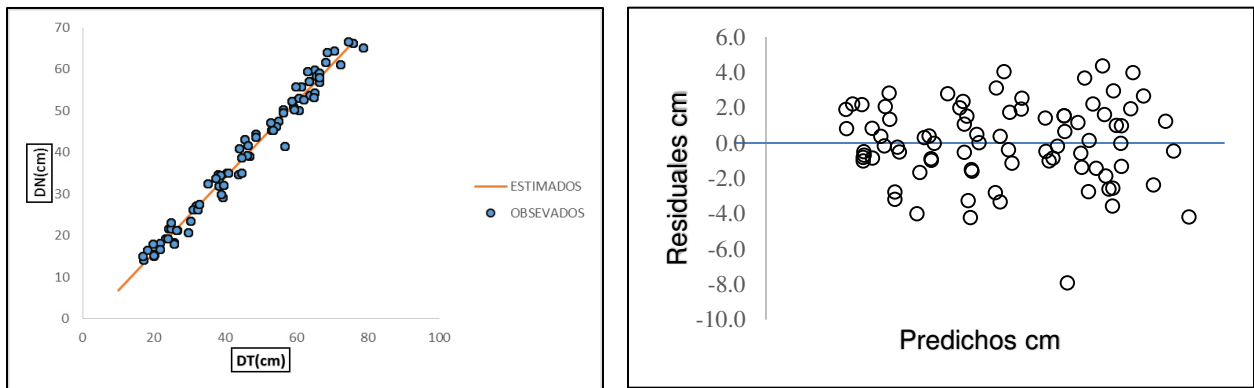


Figura 3. Gráfica de ajuste del modelo seleccionado y gráfica de valores residuales contra predichos

7.2. Relación altura total – diámetro del tocón

Los valores de los estimadores y los estadísticos de ajuste para la relación altura total en función del diámetro del tocón se presentan en el Cuadro 4. El modelo con mejor bondad de ajuste para la especie fue el 7.

Cuadro 4. Parámetros y estadísticos de los modelos ajustados para la relación altura total-diámetro del tocón

MODELO	A	B	C	\bar{E}	REMC	R^2 ADJ	CV
5	8.797896	0.226432		5.30E-06	2.9411	0.63	15.31
6	13.42368	0.002399		0.00038249	3.0717	0.61	15.99
7	6.885309	0.324927	-0.00109	8.13E-16	2.9454	0.63	15.24
8	0.91506	0.53487		-1.1225E-10	0.17214	0.63	5.91

En la figura 4 se muestra la tendencia del ajuste del modelo 7, el cual presentó los mejores estadísticos, se muestran también los valores predichos contra los residuos obtenidos con este modelo. La distribución de los errores no sigue un patrón definido, por lo que se asume que el modelo no presenta problemas de heterocedasticidad, al igual que el Modelo 1 para la relación diámetro normal-diámetro del tocón.

ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE VARIABLES DASOMÉTRICAS Y CÁLCULO DE VOLUMEN EN *Pinus pseudostrabus* EN EL SUR DE NUEVO LEÓN

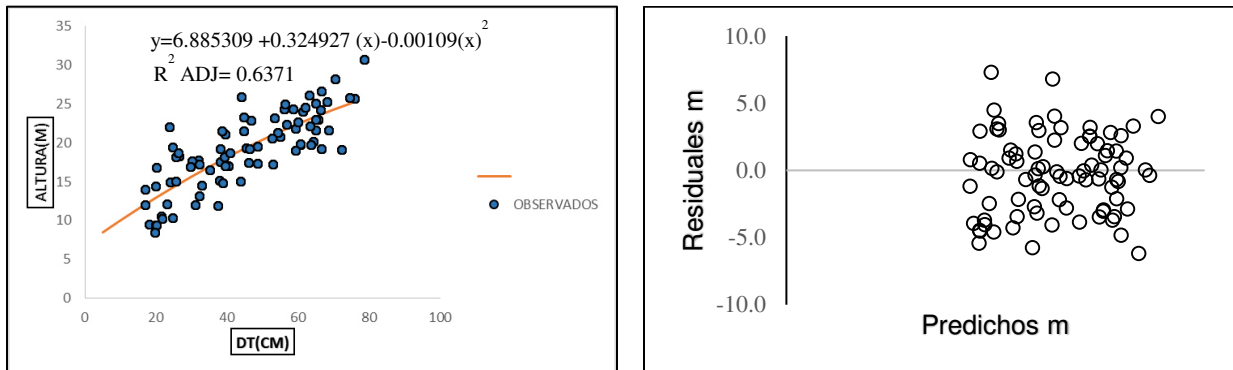


Figura 4. Gráfica de ajuste del modelo seleccionado y gráfica de valores residuales contra predichos

7.3. Relación volumen de fuste –diámetro del tocón

Los valores de los estimadores de los modelos y los estadísticos de ajuste del volumen del fuste en función del diámetro del tocón se resumen en el Cuadro 5. El modelo 12 tuvo una mejor R^2 y una baja REMC, pero con un CV muy alto para la especie de *Pinus pseudostrabus*, mientras el Modelo 11 presenta estadísticos más confiables y una mejor línea de tendencia y se puede constatar que es el modelo a elegir para estimar el volumen (Figura 5).

Cuadro 5. Parámetros y estadísticos de los modelos ajustados para la relación volumen del fuste-diámetro del tocón

MODELO	A	B	\bar{E}	REMC	R^2_{ADJ}	CV
9	-1.76885	0.07525	1.03E-05	0.4749	0.88	28.6061567
10	-0.33315	0.00084	1.54E-17	0.3625	0.93	21.8366118
11	0.000073	2.562103	0.00196436	0.3465	0.93	20.8736768
12	-9.78605	2.62225	-9.4837E-16	0.21612	0.96	7587.7461

De acuerdo a los valores de volumen predichos con el Modelo 11 (Figura 5), se observa que en volúmenes bajos predice con una confiabilidad muy alta, en cambio para los volúmenes más altos el modelo sobreestima los valores predichos, gráficamente se observa una tendencia sistemática de los valores residuales contra

los predichos por lo que el modelo presenta heterocedasticidad. Es común que la mayor parte de los modelos de volumen sufran problemas de heterocedasticidad dado que a mayores valores de diámetros y altura la variación en los volúmenes de los árboles se hace más grande (Torres y Magaña 2001).

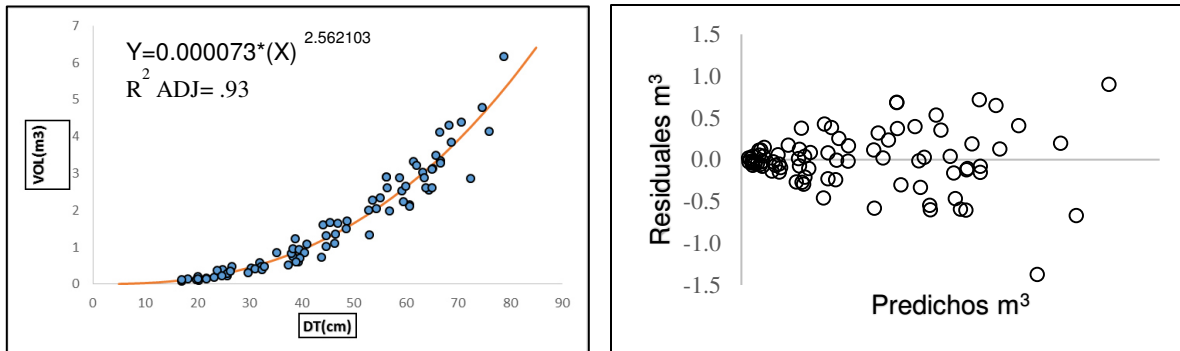


Figura 5. Gráfica de ajuste del modelo seleccionado y gráfica de valores residuales contra predichos

Con base en los estadísticos obtenidos en la ecuación del volumen, para obtener buenos resultados al estimar el mismo se generó un sistema de ecuaciones con aditivos en dos etapas, estos fueron ajustados con el método de regresión aparentemente no relacionada (SUR), ya que se obtienen estimadores consistentes para las ecuaciones que conforman el sistema lo que representa una ventaja sobre (MCO) mínimos cuadrados ordinarios, (Cruz *et al.*, 2008). Para crear el sistema se seleccionó el modelo de volumen de coeficiente de la forma constante (15), mismo al que se le realizaron aditivos, en este caso los modelo 13 y 14. Los modelos fueron ajustados bajo el procedimiento model SAS/ETS por la técnica SUR del paquete SAS. Los modelos empleados se presentan en el Cuadro 6.

El problema de heterocedasticidad asociada al volumen fustal se corrigió con una función de potencia de la varianza del residual $\sigma_i^2 = (D^2H)^\phi$. Los estimadores del sistema son significativos $Pr > |t|$ calculados con una confiabilidad del 95%, los parámetros fueron estimados y programados en el procedimiento MODEL de SAS/ETSTM (SAS Institute Inc., 2013) especificando $resid.Vf = resid.Vf / [(D^2H)^{0.5}]$.

ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE VARIABLES DASOMÉTRICAS Y CÁLCULO DE VOLUMEN EN *Pinus pseudostrabus* EN EL SUR DE NUEVO LEÓN

Cuadro 6. Modelos del sistema para el efecto multiplicativo

MODELO	ECUACIÓN
$dn = a1 (dtoc)^{a2}$	13
$ht = a3 (dtoc)^{a4}$	14
$v_f = \beta_0 D^2 H + \varepsilon$	15

Siendo el modelo con efecto multiplicativo:

$$V_f = \beta_0 (a1 (dtoc)^{a2})^2 (a3 (dtoc)^{a4} + \varepsilon) \quad 16$$

A continuación, se muestran los estadísticos y estimadores del sistema, el cual se realizó en dos etapas integrando 3 ecuaciones para la predicción del volumen (Cuadro 7).

Cuadro 7. Parámetros y estadísticos del sistema conformado por el método SUR

Ecuación	P	Estimador	Err std aprox	Raíz MSE	R-Sq adj	Valor t	Pr > t
13	a1	0.664366	0.0495	2.2210	0.9803	13.43	<.0001
	a2	1.065056	0.0186			57.36	<.0001
14	a3	2.700923	0.4625	2.9025	0.6476	5.84	<.0001
	a4	0.516857	0.0438			11.80	<.0001
16	β_0	0.000042	5.699E-7	0.3508	0.9359	74.51	<.0001

A continuación, se muestran los gráficos de heterocedasticidad sin corregir y corregida (Figura 6).

ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE VARIABLES DASOMÉTRICAS Y CÁLCULO DE VOLUMEN EN *Pinus pseudostrobus* EN EL SUR DE NUEVO LEÓN

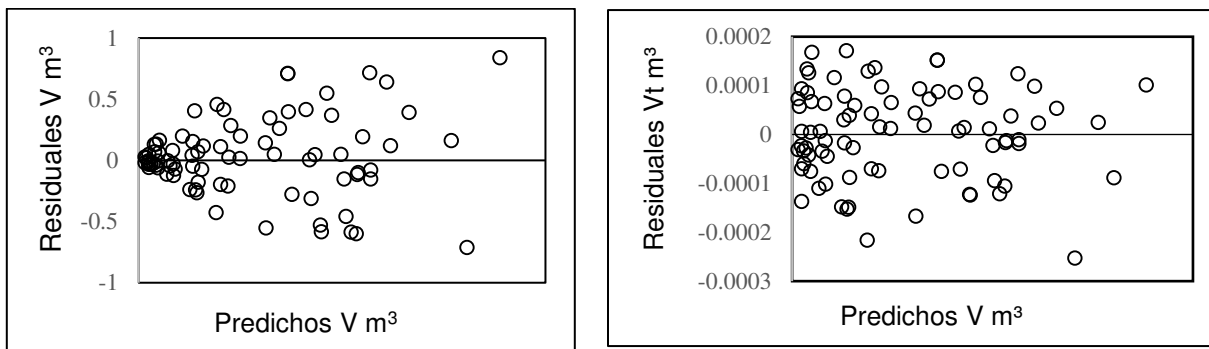


Figura 6. Gráficos de heterocedasticidad sin corregir y corregida del sistema de ecuaciones para predecir el volumen fustal.

Después de la corrección heterocedasticidad, se observó que los residuos son mucho más homogéneos. Se puede constatar que la R^2 se mantuvo, pero se minimizó el error estándar de los parámetros, sin embargo, el sistema este hecho para poder predecir con confiabilidad la relación que existe entre diámetro del tocón y el volumen total.

8. DISCUSIÓN

Debido a la simplicidad del modelo lineal, considerando los estadísticos de ajuste el modelo 1 es el más adecuado para estimar el diámetro normal a partir del diámetro del tocón para *Pinus pseudostrobus*, hecho que concuerda con Quiñones *et al.* (2012) quienes encontraron que el modelo lineal 4 explicó la relación diámetro normal y el diámetro del tocón con un ajuste superior a 0.9 al igual que Diéguez *et al.* (2003) y Corral-Rivas *et al.* (2007). El Modelo 4 tiene buen ajuste ya que presenta la menor REMC y un menor CV.

La ecuación seleccionada (1) para representar la relación de diámetro normal – diámetro del tocón concuerda con la que desarrollaron López y Ramos (2014) para *Quercus laurina* en ixtla, Oaxaca, México.

Con respecto a la relación diámetro del tocón – altura total hay poca investigación Quiñones *et al.* (2012) encontraron que el Modelo 5, modelo lineal simple, tuvo los

mejores estadísticos para 6 especies de pino estudiadas, mientras que en el presente trabajo el mejor ajuste lo obtuvo el modelo 7 con una R^2 de 0.63; estos valores están muy por debajo a los encontrados por López y Ramos (2014) quienes obtuvieron el mejor ajuste con un modelo potencial alométrico con una R^2 de 0.97. Con respecto a la relación altura-diámetro del tocón, Diéguez *et al.* (2003) encontraron que la altura del tocón no aporta un incremento significativo sobre la variabilidad explicada por los modelos, solo recomiendan considerar la altura del tocón en el caso de especies con particularidades en la base del tronco. Por otra parte, Martínez (2001) y Ruiz (2011) relacionaron la altura de árboles dominantes y codominantes respecto a su diámetro normal para *Pinus patula* Schl. *et Cham.*, en la Sierra Norte de Oaxaca y encontraron que esta relación funcional puede ser estimada a través del Modelo de Schumacher (modelo sigmoidal).

Para la relación volumen total- diámetro del tocón el modelo potencial es el que mejor explica la relación de volumen del fuste – diámetro del tocón, hecho que concuerda con lo propuesto López y Ramos (2014) para *Quercus laurina* en Ixtla, Oaxaca, México y Corral-Rivas *et al.* (2007) para *Pinus cooperi*, en la región de El Salto, Durango, mientras que Quiñones *et al.* (2012) para *Pinus arizonica*, *P. ayacahuite*, *P. durangensis*, *P. leiophylla*, *P. teocote* y *Quercus sideroxila* en el ejido San Diego de Tezains, municipio Santiago Papasquiario, Durango, y Diéguez *et al.* (2003) para *Pinus pinaster* Aiton, *P. radiata* D. Don y *P. sylvestris* L. en Galicia, España, encontraron un modelo logarítmico explica satisfactoriamente la relación entre estas dos variables. Para el sistema de ecuaciones con el fin de corregir los errores que arrojan las ecuaciones de volumen se han empezado a utilizar en modelos de ahusamiento y volumen comercial.

9. CONCLUSIONES

La estimación del diámetro normal a partir del diámetro del tocón puede realizarse de forma confiable por medio de una regresión lineal simple (1), ya que alcanza estadísticos confiables con R^2 por arriba de 0.9 y REMC muy bajas. La altura se puede estimar de forma precisa con base en el diámetro del tocón por medio del modelo polinomial (6). Para estimar el volumen se creó un modelo polinomial (16), a partir de un sistema de ecuaciones, esto redujo el error de heterocedasticidad con lo cual se puede estimar con mayor precisión el volumen total.

Las relaciones funcionales generadas son de utilidad para reconstruir escenarios en las áreas afectadas por condiciones naturales o efectos adversos dentro del área de estudio. Esta información es de utilidad para determinar las dimensiones individuales y el volumen total de *Pinus pseudostrabus*.

Los modelos seleccionados predicen satisfactoriamente el comportamiento de las variables diámetro normal, altura total y volumen, respectivamente, en función del diámetro del tocón, por lo que se puede concluir que estos modelan las variables estudiadas, los parámetros de los modelos fueron todos significativos con una $p \leq 0.05$.

1. BIBLIOGRAFÍA

- Báes, R. y H. Gra 1990. Estudios dasométricos en *Casuarina equisetifolia*. Determinación del diámetro normal a partir del diámetro del tocón. Revista Forestal Baracoa 20(2): 63-68.
- Benítez N., J. Y., M. Rivero V., A. Vidal C., J. Rodríguez R. y R. C. Álvarez R. 2004. Estimación del diámetro normal a partir del diámetro del tocón en plantaciones de *Casuarina equisetifolia* Forst. de La Provincia Camagüey, Cuba. Revista Chapingo. Serie: Ciencias Forestales y del Ambiente 10 (1): 25 - 30.
- Bylin, C. V. 1982. Volume prediction from stump diameter and stump height of select species in Louisiana. USDA For. Ser. Note SO-182. New Orleans, LA. USA. 11 p.
- Castedo, F. y J. G. Álvarez 2000. Construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus radiata* D. Don en Galicia basado en una función de perfil del tronco. Invest. Agrar. Recur. For. 9 (2): 253-268.
- Corral-Rivas, J. J., M. Barrio-Anta, O. A. Aguirre-Calderón and U. Diéguez-Aranda. 2007. Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volumen for major pine species in El Salto, Durango (México). Forestry 80 (1): 29 - 40.
- Cruz, C, F, De los Santos,P, HM y Valdez. L, JR.2008. Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. Agrociencia 42(4):473-485.
- Diéguez A., U., M. Barrio A., F. Castedo D. y M. Balboa M. 2003. Estimación del diámetro normal y del volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón para seis especies forestales comerciales de Galicia. Invest. Agrar. Sist. Recur. For.12 (2): 131-139
- Gadow, K. V. and G. Hui. 1999. Modelling forest development. Kluwer Academic Publishers. AH. Dordrecht. The Netherlands. 205 p.

- García, E., G. 2015. Ecuaciones de Ahusamiento para Estimar el Volumen de dos Especies de Pino en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. 72 p.
- Hair, J. F., R. E. Anderson, R. L. Tatham y W. C. Blach 1999. Análisis multivariante. Quinta edición. Prentice Hall Iberia. Madrid, España. 832 p.
- López, J. M., & Ramos, A. A. 2014. Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del diámetro del tocón para *Quercus laurina*, en Ixtlán, Oaxaca, México. Madera y Bosques, 20(1), 59-70.
- Martínez L., J. 2001. Índice de sitio y comportamiento diamétrico para *Pinus patula Schl. et Cham.*, en San Juan Evangelista Analco, Ixtlán, Oaxaca. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico Agropecuario de Oaxaca núm. 23. Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca. México. 163 p.
- Parresol, B. R. 1998. Prediction and error of baldcypress stem volume from stump diameter. South. J. Appl. For. 22 (2): 69 – 73.
- Quiñónez Barraza, G., Cruz Cobos, F., Vargas Larreta, B., & Hernández, F. J. 2012. Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del tocón para especies forestales de Durango. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 3(9), 23-39.
- Robinson, A. P. and G. B. Wood. 1994. Individual tree volume estimation: A new look at new systems. Journal of Forestry 92 (12): 25-29.
- Ruiz A., P. 2011. Índice de sitio y predicción de la altura en base al diámetro para *Pinus patula Schl. et Cham.*, en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Tesis profesional. Universidad de la Sierra Juárez. Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. 64 p.
- Statistical Analysis System Institute Inc. (SAS). 2013. User's Guide. Version 9.4 for Windows. Cary, N.C. 556 p.
- Torres, R., J.M Y Magaña, T., O.S. 2001. Evaluación de Plantaciones Forestales. Limusa Editores. México. 472 p.

CAPITULO III

2. MODELOS DE AHUSAMIENTO-VOLUMEN PARA *Pinus pseudostrobus* EN EL SUR DE NUEVO LEÓN

2.1. RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue ajustar modelos de ahusamiento-volumen para *Pinus pseudostrobus* en el ejido Corona del Rosal en el sur de Nuevo León. Se emplearon datos provenientes de métodos no destructivos; se utilizaron 968 pares de datos. El modelo segmentado de Fang *et al.* (2000) resultó ser el más preciso para la especie en estudio, obteniendo un coeficiente de determinación ajustado de 0.98 para el diámetro y 0.97 para el volumen comercial, en los estadísticos como la raíz de error medio cuadrático y coeficiente de variación, el sistema superó a los demás modelos seguido del de Max y Burkhardt, (1976). Los modelos fueron corregidos por autocorrelación y heterocedasticidad para disminuir el error estándar de los parámetros. Los resultados muestran que el sistema Fang *et al.* (2000) es el más preciso para predecir diámetros a cualquier altura y volumen a cualquier diámetro lo que constituye un apoyo para el mejor desarrollo de las actividades forestales.

Palabras Clave: autocorrelación, coeficiente de determinación ajustado, error estándar.

2.2. ABSTRACT

The objective of the present work was to adjust taper-volume models for *Pinus pseudostrobus* in the ejido Corona del Rosal in the south of Nuevo León. Data from non-destructive methods were used; 968 pairs of data were used. The segmented model of Fang et al. (2000) proved to be the most accurate for the species under study, obtaining an adjusted coefficient of determination of 0.98 for the diameter and 0.97 for the commercial volume, in the statistic as root mean square error and coefficient of variation, the system exceeded to the other models followed by Max and Burkhart, (1976). The models were corrected by autocorrelation and heteroscedasticity to reduce the standard error of the parameters. The results show that the Fang et al. (2000) is the most accurate to predict diameters at any height and volume at any diameter, which is a support for the better development of forestry activities.

Keywords: autocorrelation, adjusted coefficient of determination, standard error.

3. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial uno de los elementos más importantes en la evaluación de recursos forestales es la determinación del volumen existente dentro de un rodal. Debido a la dificultad que existe en su medición directa, el volumen se estima en forma indirecta tomando solo una muestra representativa de árboles empleados por métodos destructivos. Utilizando expresiones matemáticas como las funciones de ahusamiento y volumen comercial, este parámetro se puede estimar de forma confiable (Prodan *et al.*, 1997).

En la actualidad se está optando por utilizar métodos no destructivos en ámbito forestal debido a la facilidad y ventajas que se tienen al emplear estas sin tener un impacto que afecte a los bosques. Esto sirve tanto para la evaluación de las propiedades de los productos como para su cuantificación (García, 2015). El ahusamiento de un árbol es el coeficiente de estrechamiento del diámetro a lo largo del fuste, por lo que es posible estimar el diámetro a cualquier altura y la altura a cualquier diámetro a través de una ecuación (Clutter *et al.*, 1983; Torres *et al.*, 1993). Una vez definida la ecuación de ahusamiento, es posible, mediante integración matemática, obtener estimaciones del volumen total o parcial del fuste a cualquier límite de longitud o diámetro mínimo deseado (Lynch *et al.*, 1992).

Las ecuaciones de ahusamiento y volumen son compatibles cuando las primeras son integrables o las segundas son diferenciables. Las ecuaciones de volumen y de ahusamiento se derivan siguiendo tres rutas principales; a) el cálculo de las funciones de ahusamiento de las ecuaciones volumétricas existentes (Clutter, 1980; Bailey, 1994), b) la estimación de ecuaciones volumétricas a partir de la integración de las funciones de ahusamiento (Almidón; 1984) y c) la estimación simultánea de volumen y la función de ahusamiento (Navar *et al.*, 1997).

El ajuste de un sistema compatible volumen-ahusamiento puede darse mediante Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) o como un sistema de ecuaciones simultáneas. Al ajustar el sistema ahusamiento-volumen con ecuaciones

aparentemente no relacionadas y máxima verosimilitud con información completa (SUR y FIML, por sus siglas en inglés), los estimadores de los parámetros se homogenizan, ya que simultáneamente se ajusta el ahusamiento y el volumen acumulado, lo cual representa una ventaja. Contrariamente, bajo MCO el modelador debe decidir si se minimiza el error en la ecuación de ahusamiento o en la de volumen comercial, pero no en ambas (Borders, 1989; Fang *et al*, 2000).

El objetivo del presente trabajo fue ajustar modelos compatibles de ahusamiento-volumen para *Pinus pseudostrobus* en el sur de Nuevo León, México.

3.1. Materiales y métodos

3.1.1. Descripción del área de estudio

El ejido Corona del Rosal se ubica en el municipio de Galeana, al sureste del estado de Nuevo León, ocupando una superficie de 6,646.42 ha. Administrativamente se encuentra dentro del área de influencia del Distrito de Desarrollo Rural Galeana y pertenece a la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) 1901. Geográficamente se localiza entre 24° 27' 23" y los 24° 32' 51" de latitud norte y entre 99° 53' 54" y los 100° 01' 34" de longitud oeste. Para la región, el clima se define como el grupo de climas secos, del tipo semiseco, subtipo semiseco templado con verano cálido, con temperatura media anual entre 12°C y 18°C. temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y la temperatura del mes más cálido mayor de 18° C.

ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE VARIABLES DASOMÉTRICAS Y CÁLCULO DE VOLUMEN EN *Pinus pseudostrabus* EN EL SUR DE NUEVO LEÓN

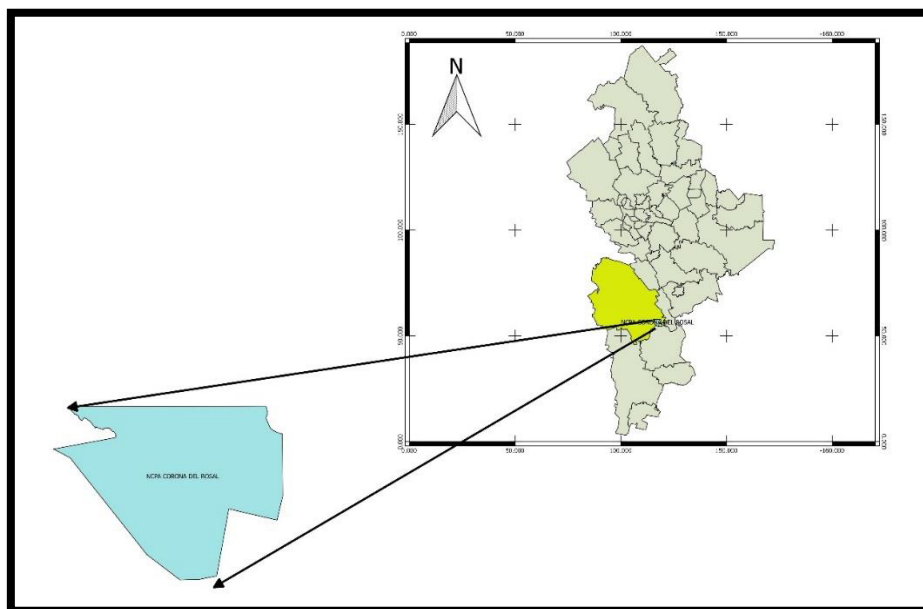


Figura 7. Ubicación del área de estudio.

3.1.2. Variables utilizadas para el ajuste en los modelos

Las variables utilizadas se presentan a continuación.

d = Diámetro a una altura determinada (cm).

d_n = Diámetro normal (cm).

h = Altura (m), desde la base del árbol hasta el punto donde se alcanza el diámetro.

H = Altura total del árbol (m).

V_t = Volumen total del árbol (m^3).

V_c = Volumen comercial (m^3), a un diámetro dado

3.1.3. Caracterización de la base de datos

La base de datos utilizada fue de 968 mediciones de diámetro a diferentes alturas obtenida de 82 árboles de la especie. Estos datos provienen de mediciones hechas con el dendrómetro RD1000®, los árboles fueron seleccionados de acuerdo a la caracterización diamétrica del área de estudio, considerando cubrir todas las categorías diamétricas existentes.

Para la toma de datos se midió cada ejemplar con el dendrómetro para obtener sus diámetros a diferentes alturas. La primera a la altura mínima posible de corte del tocón; se tomaran tres secciones hasta llegar al diámetro normal (1.30 m), las dos primeras de 30 cm de altura y la tercera de 0.70 cm. Posteriormente, se obtuvieron secciones de 2 m de longitud de manera subsecuente hasta la punta del árbol. Por individuo se midió el diámetro normal, la longitud total y de cada sección los diámetros y longitudes. Los volúmenes de las trozas se calcularon con la fórmula de Smalian [1] y la parte final con la del cono [2]

$$V = \frac{S_1 + S_2}{2} * h \quad (1)$$

$$V = \frac{S b * h}{3} \quad (2)$$

En el Cuadro 8 se presenta el resumen general de las variables de la base de datos usada en el ajuste de los sistemas compatibles de ahusamiento y volumen comercial.

ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE VARIABLES DASOMÉTRICAS Y CÁLCULO DE VOLUMEN EN *Pinus pseudostrabus* EN EL SUR DE NUEVO LEÓN

Cuadro 8. Valores de los estadísticos descriptivos de la base de datos utilizada de *Pinus pseudostrabus*.

	H	d	h	dn	V _c	V _t
N	968	968	968	968	968	82
MIN	8.4	0	0.3	14.9	0.0068	0.0945
MAX	30.7	78.8	28.2	66.6	6.1693	6.1693
MEAN	20.026	30.283	8.991	41.56	1.1065	1.6691
STD	4.638	17.626	7.075	15.27	1.1639	1.3828

Dónde: N= número de datos a utilizar por cada variable, MIN= mínimos, MAX=Máximos, MEAN=media, STD= desviación estándar.

Se examinaron los gráficos de dispersión entre diámetro relativo y altura relativa así como el de volumen acumulado para la detección de datos atípicos, ya que puede haber errores en la toma de información. A continuación se muestra el comportamiento entre diámetro relativo (d/D_n) contra altura relativa (h/H) y del volumen acumulado respecto a la altura del fuste sin información errónea y tendencia lógica (Figura 8).

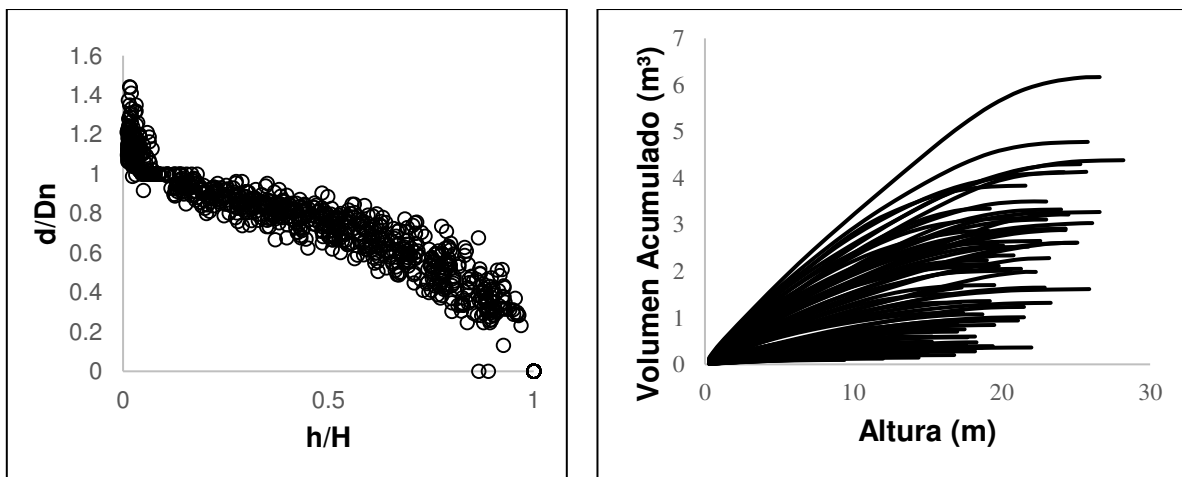


Figura 8. Volumen acumulado respecto a la altura del fuste de la especie en estudio y Diámetro relativo (d/D_n) contra altura relativa (h/H).

3.1.4. Modelos utilizados

Los modelos segmentados de ahusamiento (d) y volumen comercial (v_c) ajustados como sistema compatible fueron los desarrollados por Fang *et al.* (2000), Max y Burkhart (1976) y Parresol (1987) y se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Sistemas de ahusamiento y volumen ajustados para *Pinus pseudostrobus*

Ecuación de ahusamiento	Ecuación de volumen comercial
<p>1) Fang <i>et al.</i> (2000)</p> $d = c_1 \left[H^{\frac{K-\beta_1}{\beta_1}} (1-q)^{\frac{k-\beta}{\beta}} \alpha_1^{I_1+I_2} \alpha_2^{I_2} \right]^{1/2}$ <p>donde $\begin{cases} I_1 = 1 \text{ si } p_1 \leq q \leq p_2; \text{ de lo contrario } 0 \\ I_2 = 1 \text{ si } p_2 \leq q \leq 1; \text{ de lo contrario } 0 \end{cases}$</p> $R_0 = (1 - H_B/H)^{K/\beta_1} R_1 = (1 - P_1)^{K/\beta_1}$ $R_2 = (1 - P_2)^{K/\beta_2} \beta = \beta_1^{1-(I_1+I_2)} \beta_2^{I_1} \beta_3^{I_2}$	$C_1 = \left(\frac{\alpha^0 D^{\alpha_1} H^{\alpha_2 - \frac{k}{\beta_1}}}{\beta_1(R_0 - R_1) + \beta_2(R_1 - \alpha_1 R_2) + \beta_3 \alpha_1 R_2} \right)^{1/2}$ $\alpha_1 = (1 - p_1) \frac{K(\beta_2 - \beta_1)}{\beta_1 \beta_2} \quad \alpha_2 = (1 - p_2) \frac{K(\beta_3 - \beta_2)}{\beta_2 \beta_3}$ $V_c = C_1^2 H^{\frac{k}{\beta_1}} \left[\beta_1 R_0 + (I_1 + I_2) + (\beta_2 - \beta_1) R_1 + I_2 (\beta_3 - \beta_2) \alpha_1 R_2 - \beta (1 - q)^{\frac{k}{\beta}} \alpha_1^{I_1+I_2} \alpha_2^{I_2} \right]$
<p>2) Max y Burkhart (1976)</p> $d = D \left[\beta_1(q - 1) + \beta_2(q^2 - 1) + \beta_3(P_1 - q)^2 I_1 + \beta_4(P_2 - q)^2 I_2 \right]^{1/2}$ <p>donde $\begin{cases} I_1 = 1 \text{ si } q \leq p_1; \text{ de lo contrario } 0 \\ I_2 = 1 \text{ si } q \leq p_2; \text{ de lo contrario } 0 \end{cases}$</p> $q = HM/H$	$V_c = kD^2 H \left\{ \frac{\beta_2}{3} (q^3 - z_1^3) + \frac{\beta_1}{2} (q^2 - z_1^2) - (\beta_1 + \beta_2)(q - z_1) - \frac{\beta_3}{3} [(p_1 - q)^3 J_1 - (p_1 - z_1)^3 K_1] - \frac{\beta_4}{3} [(p_2 - q)^3 J_2 - (p_2 - z_1)^3 K_2] \right\}$ <p>donde $\begin{cases} J_1 = 1 \text{ si } q \leq p_1; J_2 = 0 \text{ si } q > p_2 \\ K_1 = 1 \text{ si } z_1 \leq p_1; K_2 = 0 \text{ si } z_1 > p_1 \end{cases}$</p>
<p>3) Parresol (1987)</p> $d = D \sqrt{X^2(\beta_1 + \beta_2 X) + (X - p_1)^2 [\beta_3 + \beta_4(X + 2p_1)I_1]}$ <p>donde $I_1 = 1 \text{ si } z \geq p_1; \text{ de lo contrario } 0$</p>	$V_c = kD^2 H \left\{ \left[\left(\frac{\beta_2 + \beta_4 I_1}{4(X^4 - z_b^4)} \right) + \left(\frac{\beta_1 + \beta_3 I_1}{3(X^3 - z_b^3)} \right) + \left(\frac{2\beta_1(p_1 I_1) + (2p_1 \beta_4)}{2(X^2 - z_b^2)} \right) + (p_1^2 I_1 \beta_3) + (2p_1 - \beta_4)(X - z_b) \right] \right\}$

Donde; D = diámetro normal (m); d = diámetro (cm) a la altura HM (m) desde el nivel del tocón; H = altura total de los arboles (m); H_B= altura del tocón (m); V_c= Volumen comercial (m³) k = π/40000; z_b = (H-h_b) /H; z₁ = h_b /H; α₀, α₁, α₂, β₁, β₂, β₃, β₄, P₁, P₂ son parámetros a ser estimados por el sistema; I variable indicadora.

3.1.5. Método de ajuste

El ajuste estadístico se realizó con la técnica de regresión aparentemente no relacionada (SUR) con el procedimiento MODEL SAS del paquete estadístico SAS/ETS® (Statistical Analysis Sistem Institute Inc., 2013), ya que proporciona una mejor estimación y reduce el error estándar de los parámetros para un sistema de ecuaciones; además permite la compatibilidad total dentro del sistema (García, 2015).

3.1.6. Estadísticos para medir el ajuste de los modelos

Los estadísticos y criterios que se emplearon para la selección y comparación de los modelos son los siguientes: raíz del error medio cuadrático (REMC), coeficiente de variación (CV %), coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), sesgo promedio absoluto (\bar{E}), criterio de información Akaike (AIC) y análisis gráfico de residuales. Las expresiones de los estadísticos se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Estadísticos evaluados para la selección de la ecuación de mejor ajuste

Estadístico	Expresión matemática
Raíz del error cuadrado medio (REMC)	$REMC = \sqrt{\frac{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2\right]}{n - p}}$
Coeficiente de variación (CV)	$CV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{n - 1}\right)^2}{\bar{Y}}} \times 100$
Coeficiente de determinación Ajustado (R^2_{Adj})	$R^2_{adj} = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2\right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2\right]} \left(\frac{n - 1}{n - p}\right)$
Sesgo promedio absoluto (\bar{E})	$\bar{E} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)}{n}\right]$
Criterio de información de Akaike (AIC)	$AIC = n \ln \left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / n \right] + 2p$

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.

3.1.7. Autocorrelación y heterocedasticidad

La autocorrelación se define como la correlación entre miembros de series de observaciones ordenadas en el tiempo (información de series de tiempo) o en el espacio (información de corte de transversal). Una causa común es la existencia de tendencias y ciclos en los datos. Se aplicó un modelo autorregresivo continuo (CAR (X)) en el componente de ahusamiento, fue programado con el procedimiento MODEL de SAS/ETS® (Statistical Analysis System Institute Inc., 2013) que considera la distancia entre mediciones de la altura comercial en cada árbol (García, 2015 y Bautista, 2016), la expresión es:

$$e_{ij} = d_1 y_1^{h_{ij}-h_{ij-1}} e_{ij-1} + d_2 y_2^{h_{ij}-h_{ij-2}} e_{ij-2} + E_{ij}$$

Donde e_{ij} es el j residual ordinario en el árbol i , $d_i = 1$ para $j > 1$ y $d_i = 0$ para $j = 1$, $y_1 =$ parámetro autorregresivo de orden i y $h_{ij} - h_{ij-1}$ es la distancia de separación de la j a la $j - 1$ observación dentro de cada árbol.

Para corroborar la corrección de autocorrelación se examinaron los resultados de la prueba de Durbin-Watson (DW); valores pequeños indican alta correlación positiva (cerca de cero), próximos a 4 los residuos son correlacionados negativamente y cuando los valores son cercanos a 2 son deseables, es decir que los residuos son independientes (García, 2015; Quiñones, 2014; Pérez, 2003; Linnell, 1996; Draper y Smith, 1998).

Uno de los supuestos del modelo de regresión es que la varianza de la variable dependiente Y sea constante para cualquier nivel de las variables independientes. Este supuesto es conocido como homocedasticidad u homogeneidad de la varianza.

Es común, en relaciones que involucran variables biológicas, encontrar varianzas heterogéneas (Prodan *et al.*, 1997).

El problema de heterocedasticidad del ahusamiento y volumen comercial fue corregido con una función de potencia de la varianza del residual $\sigma_i^2(D^2H)^\emptyset$ con el D y la H como variables independientes (Crecente *et al.*, 2009). El valor \emptyset se obtuvo por el método sugerido por Harvey (1975), consiste en el uso del error estimado de modelo sin pesos \hat{e}_i como la variable dependiente en la varianza del error del modelo $\hat{e}_i^2 = \emptyset_0(D^2H)^{\emptyset_1}$. Los parámetros fueron obtenidos mediante el procedimiento MODEL de SAS/ ETS®.

El ajuste de los modelos de ahusamiento y volumen comercial como sistemas compatibles permitió minimizar simultáneamente el error en la ecuación de ahusamiento y volumen comercial (Bordes, 1989; Jiang *et al.*, 2005; Brooks *et al.*, 2008; Cruz-Cobos *et al.*, 2008), lo cual es una ventaja cuando se ajusta ya sea la ecuación de ahusamiento o la de volumen comercial y se usan los estimadores de los parámetros para ambas. Con el ajuste simultáneo se logró optimizar los estimadores de los parámetros para ambos componentes.

4. RESULTADOS

En el Cuadro 11 se presentan los estadísticos, los estimadores de los parámetros con su respectivo error estándar y los resultados de la prueba de Durbin-Watson (DW) obtenidos del ajuste simultáneo para las ecuaciones ahusamiento y volumen comercial. Todos los parámetros fueron significativos al 5%.

Los modelos de Fang *et al.* (2000), Max y Burkhart (1976) presentaron resultados similares con una R^2_{adj} de 0.97 para el volumen y 0.98 para el diámetro y los puntos de inflexión ($p1$ y $p2$) los estiman a 6% y 9% para $p1$ de la altura total para la especie en estudio mientras que el modelo de Parresol (1987) el $p1$ fue de 65%, el $p2$ estimado con la primer ecuación es de 91% para el $p2$ en el modelo de Max y Burkhart se fijó en 88% para lograr la convergencia del sistema.

ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE VARIABLES DASOMÉTRICAS Y CÁLCULO DE VOLUMEN EN *Pinus pseudostrabus* EN EL SUR DE NUEVO LEÓN

Cuadro 11. Valores de los parámetros y estadísticos de las ecuaciones compatibles de ahusamiento-volumen ajustadas para *Pinus pseudostrabus*.

Sistema	RCME	CV	R ² adj	Sesgo	AIC	P	Ψ	ε†	∞	DW	
1	Vac d	0.1714 2.1256	15.3396 6.9356	0.9785 0.9855	0.0200 0.2444	-3392.47 1465.26	α0	0.000067	0.0000048	<.0001	1.801
							α1	1.904765	0.0217	<.0001	
							α2	0.978906	0.0287	<.0001	
							β1	0.000013	0.0000005	<.0001	
							β2	0.00004	0.0000003	<.0001	
							β3	0.00006	0.0000068	<.0001	
							p1	0.061396	0.00299	<.0001	
							p2	0.913774	0.0102	<.0001	
							y1	0.912786	0.0208	<.0001	
							y2	0.760348	0.0211	<.0001	
2	Vac d	0.1751 2.2217	15.4966 7.2799	0.9775 0.9841	0.0327 0.1716	-3355.7209 1547.6639	β1	-3.91756	0.0201	<.0001	1.857
							β2	50.8718	6.6740	<.0001	
							β3	-1.8041	0.0424	<.0001	
							p1	0.0960	0.0062	<.0001	
							P2	.88			
							y1	0.8900	0.0227	<.0001	
							y2	0.7344	0.0243	<.0001	
							β1	3.4436	0.1052	<.0001	
							β2	-2.4112	0.1418	<.0001	
							β3	-0.6372	0.1741	0003	
3	Vac d	0.4946 3.1899	43.50 10.51	0.8197 0.9674	0.1117 0.0788	-1355.31 2251.25	β4	1.3299	0.1755	<.0001	1.834
							p1	0.6557	0.0887	<.0001	
							y1	0.9497	0.0218	<.0001	
							y2	0.8164	0.0197	<.0001	

Donde; Ψ es el estimador del parámetro, ε† es el error estándar y ∞ nivel de significancia de los parámetros.

Es común que la mayor parte de los modelos de volumen sufran problemas de heterocedasticidad dado que a mayores valores de diámetro y altura la variación en los volúmenes de los árboles se hace más grande (Torres y Magaña 2001). En la Figura 9 se observan los residuos antes y después de la corrección por autocorrelación y heterocedasticidad.

ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LA PREDICCIÓN DE VARIABLES DASOMÉTRICAS Y CÁLCULO DE VOLUMEN EN *Pinus pseudostrobus* EN EL SUR DE NUEVO LEÓN

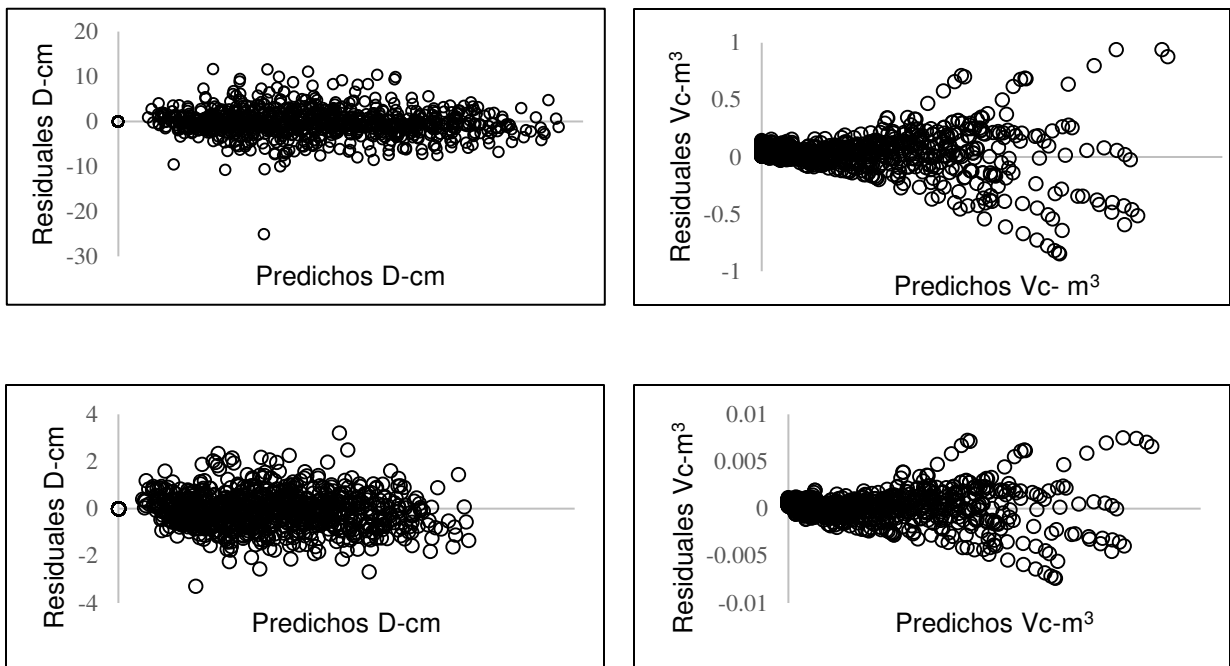


Figura 9. Gráfica de residuales de ahusamiento contra los valores predichos de diámetro y volumen comercial del sistema Fang *et al.* (2000) sin corrección (izquierda) y con corrección (derecha) por heterocedasticidad en *Pinus pseudostrobus*.

Lo que destaca es la disminución del error estándar de los parámetros al considerar la variabilidad específica del árbol, sin embargo, los valores de los parámetros no difieren de manera considerable (García, 2015), aunque corrigieron la violación a los supuestos de regresión (autocorrelación y heterocedasticidad).

En la Figura 10 se muestra el comportamiento de los diámetros observados contra las estimaciones realizadas y se puede observar que tienen una tendencia semejante, lo mismo ocurre en el volumen comercial, indicador de un buen ajuste del modelo para la especie en estudio.

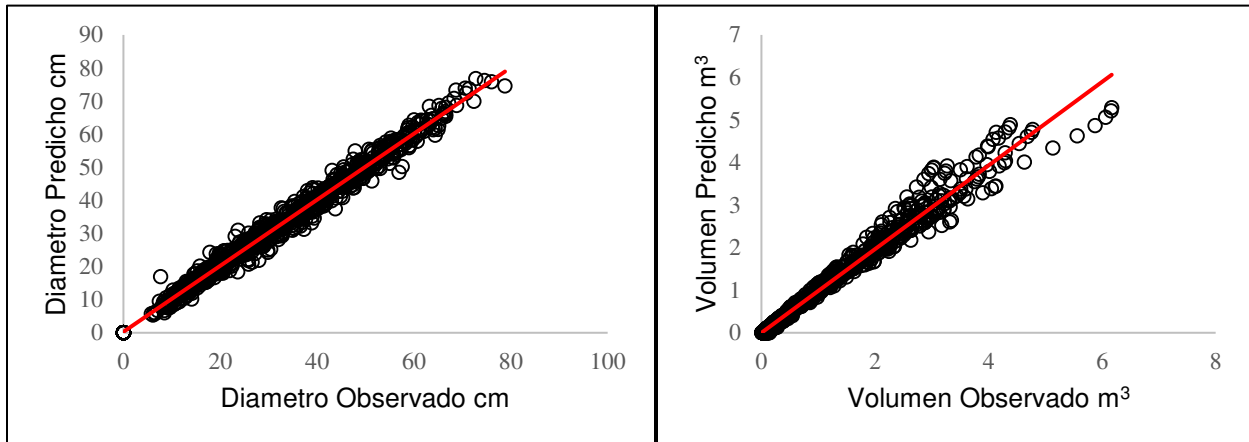


Figura 10. Gráficos de Diámetro Observado contra Diámetro Predicho y Volumen Observado contra Volumen Predicho.

Las estimaciones del volumen comercial con la ecuación propuesta presenta buenos ajustes aunque tiene problemas al predecir valores en árboles con volúmenes comerciales mayores a 5 m³, causa sesgo en las predicciones, se asume que la causa es a la poca información que se tiene en esta parte de los datos.

5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos del sistema Fang *et al.* (2000), ajustados con regresión aparentemente no relacionada (SUR), muestran estadísticos adecuados ya que los errores estándar se minimizaron y todos los parámetros fueron significativos, lo que concuerda con Quiñonez *et al.* (2014).

Los estadísticos obtenidos del sistema compatible de ahusamiento-volumen fueron similares a los presentados por García (2015), quien obtuvo valores de R^2 0.98 para la ecuación de ahusamiento y 0.97 para la ecuación de volumen en *Pinus pseudostrabus* en San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Los puntos de inflexión se asemejan ya que rondan para $p1$ entre 6% y 8% y para $p2$ entre 88% y 91%, los valores de la prueba Durbin-Watson se asemejan y son deseables.

El segundo mejor sistema para ambos estudios fue el Max y Burkhart (1976) mientras que el de Parresol,(1987) no ajustó significativamente. Resultados en

términos de calidad de ajuste fueron similares en un estudio de Pompa *et al.* (2009) para árboles de *Quercus sp.* donde el modelo de Fang *et al.* (2000) describió de manera precisa el perfil fustal, y predijo adecuadamente el volumen comercial en el noreste del estado de Chihuahua, México. Quiñonez *et al.* (2014) reportan así mismo que el modelo de Fang *et al.* (2000) fue el que tuvo los mejores resultados para las principales especies de *Pinus* en Durango estableciendo parámetros globales con variables indicadoras para todas las especies.

López (2013) y Fierros y Martínez (2013) también concluyen que el modelo de Fang *et al.* (2000) es el mejor para predecir el perfil fustal, así como el volumen comercial para especies de *Pinus* en Durango en los municipios de San Dimas y Pueblo Nuevo.

Brooks *et al.* (2008) seleccionaron el sistema de Max y Burkhart (1976) para calcular los diámetros relativos y los volúmenes de las especies de *pinus brutia*, cedro del Líbano y *Abies cilica* en Turquía, el modelo demostró ser el más preciso en base a sus estadísticos de ajuste y mostró un rendimiento constante en la estimación de diámetro y volumen.

El modelo de Fang *et al.* (2000) permite estimar el diámetro a cualquier altura y el volumen a cualquier diámetro, lo cual tiene aplicación en la distribución de productos para determinar el uso más adecuado de la materia prima forestal.

6. COCLUSIONES

De los sistemas compatibles de ahusamiento-volumen, el basado en el modelo de Fang *et al.* (2000) fue el que tuvo mejores estadísticos para la base de datos utilizada, estos se generaron bajo la técnica de regresión aparentemente no relacionada (SUR), permitiendo estimar de forma directa el diámetro a cualquier altura y de la misma manera referir el volumen a una altura dada o a un diámetro determinado.

La confiabilidad del sistema compatible de ahusamiento-volumen de Fang *et al.* (2000), ajustado con información procedente de métodos no destructivos, se garantiza por la alta precisión en la descripción del perfil fustal para la especie en estudio sobre todo en la sección donde se concentra la mayor cantidad de volumen.

Los sistemas compatibles de ahusamiento y volumen comercial ajustados constituyen una herramienta importante en la planeación del manejo forestal, ya que permiten a los técnicos responsables del manejo de los bosques de la región en estudio una estimación precisa del volumen y de productos maderables.

7. BIBLIOGRAFÍA

- 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.
- Bailey R. L. 1994. A compatible volume — taper model base on the Schumacher and Hall generalized constant form factor volume equation. *For. Sci.*, 40: 303-313.
- Bautista, C., A. 2016. Funciones de Ahusamiento-Volumen para *Pinus patula* Schl.et cham. en la Región Chinaguapan- Zacatlan Puebla. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. 49p.
- Borders B. E. 1989. Systems of equations in forest stand modeling. *For. Sci.* 35(2): 548-556.
- Brooks JR, Jiang L, Ozçelik R, 2008. Compatible stem volume and taper equations for Brutian pine, Cedar of Lebanon, and Cilicica fir in Turkey. *For. Ecol. Manage.* 256: 147–151.
- Clutter, J. L.; J. C. Fortson, L. V.; Pienaar, G. H.; Brister, and R. L. Bailey. 1983 *Timber management a quantitative approach.* Wiley, New York. 333 p.
- Crecente F, Rojo A. y Diéguez U. 2000. A merchantable volumen system for *Pinus sylvestris* L. in the major mountains ranges of Spain. *Ann. For.Sci.* 66(808): 1-12.
- Cruz F, De los Santos, H.M. y Valdez JR.2008. Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia* 42(4):473-485.
- Draper N.R. , Smith H. 1998. *Applied regression analysis.* John Wiley & Sons. 243 p.

- Fang Z., B. E. Borders, 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): 1-12.
- Fierros, R. Martinez, L. 2013. Modelos Compatibles de Ahusamiento y Volumen para *Pinus cooperi* y *Pinus engelmannii* en la Región de San Dimas Durango. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de El Salto. 40p
- García E. G. 2015. Ecuaciones de Ahusamiento para Estimar el Volumen de dos Especies de Pino en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. 72p.
- Linnell A. 1996. Analysis of repeated measures and time series. An introduction with forestry examples. Working paper. British Columbia Ministry of forests. 45 p.
- López M., J. 2013. Modelos de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus oocarpa* y *Pinus douglasiana* en la región de Pueblo Nuevo, Durango. Tesis de Maestría en Ciencias Forestales. Instituto Tecnológico de El Salto. 34p.
- Lynch T. B., S. T. Chang, Chandler J. P. 1992. Estimation of individual tree volume by importance sampling and antithetic variates from the cylindrical shells integral. *Can. J. For. Res.* 22: 326-335.
- Max, T. A., and H. E. Burkhart. 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. *For. Sci.* 22(3): 283–289.
- Navar J. de J., Domínguez P.A. 1997. Ajuste de modelos de volumen y funciones que describen el perfil diamétrico de cuatro especies de pino plantadas en el noroeste de México. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.* Vol. 6 (1 y 2).

- Pérez LD and Kannien D.M. 2003. Provisional equations for estimating total and merchantable volume for *Tectona grandis* trees in Costa Rica. *Forests, Trees and Livelihoods* 13(4): 345-359.
- Pompa M, Corral JJ, Díaz MA y Martínez M. 2009. Función de ahusamiento y volumen compatible para *Pinus arizonica* Engelm. En el suroeste de Chihuahua. *Rev. Cien. For. Méx.* 34: 119-136.
- Prodan, M.; Peters, R.; Cox, F. y Real, P. 1997. *Mensura Forestal*. San José, Costa Rica. IICA-GTZ0. 561 p.
- Quiñonez Barraza, G. (2014). Sistema de crecimiento y rendimiento para las principales especies comerciales de *Pinus* en Durango, México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Programa Forestal. 174p.
- Quiñonez-Barraza, G., De los Santos-Posadas, D., Héctor, M., Álvarez-González, J. G., Velázquez-Martínez, A. (2014). Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para las principales especies de *Pinus* en Durango, México. *Agrociencia*, 48(5), 553-567.
- Statistical Analysis System Institute Inc. (SAS). 2013. *User's Guide*. Version 9.4 for Windows. Cary, N.C. 556 p.
- Torres R J.M; Magaña OS., 2001. *Evaluación de Plantaciones Forestales*. Ed. LIMUSA, México. 472 p.
- Torres, R.; J. M.; S. O. Magaña T. y G. A. Valles G. 1993. Funciones de ahusamiento para 8 especies Forestales del Estado de México. In: I Congreso Mexicano de Recursos Forestales, Resumen de ponencias Saltillo, Coahuila, 109 p.

8. CONCLUSIONES GENERALES

Las ecuaciones alométricas constituyen una contribución muy importante en el estudio y manejo de los recursos naturales particularmente los forestales, ya que permiten medir una variable difícil de medir en función de otra u otras fáciles de medir, lo cual es de gran utilidad en la planeación de actividades de cuantificación de los recursos y manejo forestal, ya que con el uso de herramientas estadísticas se disminuye el tiempo en las mediciones forestales.

El diámetro normal es la variable dasométrica de mayor importancia y de gran utilidad en el inventario de manejo forestal y con el uso de la altura, otra variable de gran importancia, se pueden cuantificar las existencias maderables de las masas forestales, con estas dos variables se pueden generar ecuaciones de volumen y si se les incorporan ecuaciones de ahusamiento se pueden cuantificar volúmenes a diferentes alturas y diámetros.

El uso de modelos matemáticos tanto para estimar el diámetro, la altura y el volumen del fuste en función de las dimensiones del tocón, como en los modelos de ahusamiento y volumen comercial, es restringida al rango de la base de datos utilizada y al área de estudio, la utilización en rangos diferentes pudiera generar resultados poco precisos.