



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS

AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**VARIACIÓN DEL FACTOR DE FORMA Y EL AHUSAMIENTO EN
PROCEDENCIAS DE CEDRO ROJO (*Cedrela odorata* L.)**

ROLANDO MISAEAL TLAXCALA MÉNDEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

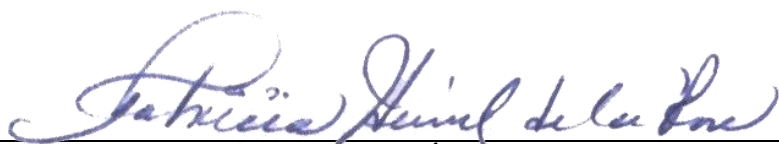
2015

La presente tesis titulada: “**VARIACIÓN DEL FACTOR DE FORMA Y EL AHUSAMIENTO EN PROCEDENCIAS DE CEDRO ROJO (*Cedrela odorata* L.)**”, realizada por el alumno: **ROLANDO MISAE L TLAXCALA MÉNDEZ**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



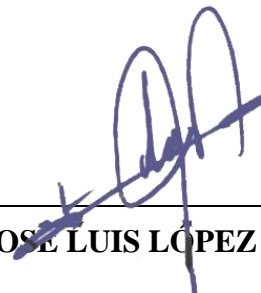
DRA. PATRICIA HERNÁNDEZ DE LA ROSA

ASESOR:



DR. HÉCTOR MANUEL DE LOS SANTOS POSADAS

ASESOR:



M. C. JOSÉ LUIS LÓPEZ AYALA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Febrero de 2015.

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a:

A Dios por prestarme la vida y permitirme llegar a esta etapa profesional.

Al Colegio de Postgraduados, especialmente al Postgrado en Ciencias Forestales por darme la oportunidad de seguir preparándome.

A la Dra. Patricia Hernández de la Rosa, por su gran paciencia y confianza depositada en mí, así como por el apoyo en la realización del presente trabajo.

Al Dr. Héctor Manuel de los Santos Posadas, por las enseñanzas de sus valiosos conocimientos biométricos y acertadas sugerencias en este trabajo.

Al M. C. José Luis López Ayala, por el apoyo mostrado en las etapas de mi preparación profesional.

Al M. C. Vicente Sánchez Monsalvo por la autorización y la oportunidad de realizar esta investigación en el programa de mejoramiento genético de cedro rojo de “El Palmar” en Tezonapa, Ver.

A mis amigos y compañeros del COLPOS: Eileen Salinas, Martín Aquino, Joel Rodríguez, Lissette Hervert, Constantino Escamilla, German Bautista, Luis Martínez, Reynol Fierros, María Luisa Acevedo y David García.

A los profesores del COLPOS que influyeron en mi formación académica, Doctores: J. René Valdez, J. Ignacio Valdez, Manuel de J. González y Alejandro Velázquez.

DEDICATORIA

.....Especialmente a mi hermanita Valeria

Flaxcala, por ser la mayor fuerza de voluntad que me ha dado la vida.

.....A mis padres, José Flaxcala y María Emma Méndez por apoyarme y preocuparse por mi en todo momento.

.....A mi hermano José Luis Domínguez, por el apoyo incondicional que me has ofrecido.

Contenido

ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	v
SUMMARY	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
2.3. Hipótesis	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1. Caracterización de cedro rojo	4
3.2. Conceptos genéticos y de mejoramiento	6
3.2.1. Ensayo de procedencias o progenies	6
3.2.2. El fenotipo	7
3.2.3. El genotipo	7
3.2.4. El ambiente	7
3.3. Fuentes de variación en la geometría de los fustes	7
3.4. Arquitectura de los fustes	9
3.5. Métodos analíticos para evaluar la geometría de los fustes	10
3.5.1. El factor de forma	10
3.5.2. Funciones de ahusamiento puro	11
3.5.3. Sistemas compatibles de ahusamiento y volumen	12
3.6. Métodos de ajuste para los sistemas compatibles de ahusamiento y volumen	13
4. MATERIALES Y MÉTODOS	14
4.1. Descripción del área de estudio	14
4.2. Muestreo destructivo y cubicación de los árboles	16
4.3. Comparación de procedencias en el factor de forma	18
4.4. Comparación de procedencias en el ahusamiento	21
4.5. Comparación de procedencias en sistemas compatibles de ahusamiento y volumen	24
4.6. Modelo de volumen comercial genérico para las plantaciones operativas de la región	26
4.6.1. Estrategia de ajuste	27

5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
5.1.	Procedencias y el factor de forma.....	29
5.2.	Procedencias y el ahusamiento	31
5.3.	Procedencias en los sistemas compatibles de ahusamiento y volumen	35
5.4.	Sistema genérico compatible de ahusamiento y volumen	39
6.	CONCLUSIONES	41
7.	LITERATURA CITADA.....	42
8.	ANEXO.....	48
8.1.	Coeficientes derivados y estimados en el modelo de Schumacher-Hall.....	48

ÍNDICE DE CUADROS

Página

Cuadro 1. Localidades establecidas en el ensayo de procedencias de cedro rojo en el Campo Experimental “El Palmar” INIFAP, Ver.	14
Cuadro 2. Valores descriptivos de las principales variables dasométricas a utilizar en el factor de forma, ahusamiento puro y sistemas de ahusamiento y volumen.	17
Cuadro 3. Sistemas compatibles ajustados a las procedencias de cedro rojo establecidas en Tezonapa, Veracruz, México.....	25
Cuadro 4. Resultados de la prueba de adicionalidad con el modelo de la variable combinada de Spurr (1952) con el factor de forma directo.....	30
Cuadro 5. Resultados de la prueba de adicionalidad con el modelo de ahusamiento puro tipo Clutter (1980).....	32
Cuadro 6. Resultados de la prueba de adicionalidad en los sistemas de Fang y Bailey (1999) para las progenies de cedro.	37
Cuadro 7. Comparativo y estadísticos de bondad de ajuste de los sistemas Fang y Bailey (1999).	38
Cuadro 8. Estadísticos y bondad de ajuste del sistema genérico de ahusamiento y volumen comercial tipo Fang y Bailey (1999) caso I-a.	40

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Sistema de crecimiento A) monopódico y B) simpódico.	9
Figura 2. Ubicación geográfica de las localidades incluidas en el ensayo de progenies de Cedro rojo en el Campo Experimental “El Palmar” INIFAP. Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 3. A) Alturas parciales en función de los diámetros parciales; B) Volumen comercial en función de la altura de fuste, para los árboles muestreados.	17
Figura 4. Variación del ahusamiento en procedencias de cedro rojo derivados del modelo tipo Clutter (1980).	33
Figura 5. Distribución de los residuales para el sistema de ahusamiento y volumen comercial tipo Fang y Bailey (1999) caso I-a.	39
Figura 6. Distribución de los residuales para el sistema reducido Fang y Bailey (1999) caso I-a.	40

VARIACIÓN DEL FACTOR DE FORMA Y EL AHUSAMIENTO EN PROCEDENCIAS DE CEDRO ROJO (*Cedrela odorata* L.)

Rolando Misael Tlaxcala Méndez, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2015

RESUMEN

El conocimiento de la geometría de los fustes de los árboles es relevante en los ensayos de progenies para la obtención de germoplasma, debido a que los mejores individuos no solo deben tener un crecimiento adecuado sino también las mejores características en la conformación del fuste. Para ello, es necesario evaluar la forma de los fustes mediante métodos analíticos. El objetivo de la presente investigación fue identificar la progenie con mayor rendimiento maderable considerando el factor de forma, el ahusamiento y el volumen comercial en un ensayo de siete procedencias de *Cedrela odorata* L. establecidas en Tezonapa, Veracruz, México, utilizando muestreo destructivo de 211 árboles. Se ajustaron dos modelos de regresión lineal y no lineal los cuales se complementaron con pruebas de adicionalidad en los parámetros de forma y de ahusamiento. Los resultados obtenidos muestran que los parámetros de forma de las progenies de Tuxtepec, Tierra Blanca y Tezonapa son las que adoptan una forma del paraboloides, mientras que las de María Lombardo, San Andrés Tuxtla, Costa del Golfo y Comala tienden fuertemente a la conicidad. Con respecto a los parámetros de ahusamiento, todas las progenies fueron estadísticamente diferentes, lo cual se atribuye a su potencial genético y al ambiente en el cual crecieron. Así mismo, se evaluaron los parámetros de forma en tres sistemas compatibles de ahusamiento y volumen, mediante el ajuste con regresión SUR (*Seemingly Unrelated Regressions*). Se propone un sistema genérico de ahusamiento y volumen para las plantaciones operativas donde se desconoce el origen genético de los árboles. Los resultados sugieren que en general la fuente geográfica de Tuxtepec presenta mayor rendimiento maderable por poseer fustes geoméricamente más cercanos al paraboloides (factor de forma, $ff = 0.45$), por lo tanto, podría ser la principal línea de acopio de germoplasma para proveer a los propietarios de la región.

Palabras clave: *Cedrela odorata* L., *Hypsipyla grandella* Zeller, características fenotípicas, variable indicadora.

FORM FACTOR AND TAPER VARIATION IN PROVENANCES OF SPANISH CEDAR

(*Cedrela odorata* L.)

Rolando Misael Tlaxcala Méndez, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2015

SUMMARY

The knowledge of tree stem geometry is relevant in progeny trials for seed production since the best individuals must have good growth but also good stem shape. In this case this implies evaluating stem shape using analytical methods. This research was aimed to identify stem shape of seven provenances of *Cedrela odorata* L. established in Tezonapa, Veracruz, Mexico, using the stem form factor, taper and variable merchantable volume. 211 trees were destructively sampled. Linear and nonlinear regression models with co-variates to identify provenance effects were used. The result suggest that Tuxtepec, Tierra Blanca and Tezonapa provenances show a form factor close to a paraboloid while the Maria Lombardo, San Andres Tuxtla, Gulf Coast and Comala provenances strongly taper to a conic shape. When stem profiles were analyzed all progenies were statistically different, which is attributed to the genetic-environment interaction of the trial. The compatible taper and merchantable volume models fitted as a system of Seemingly Unrelated Regressions also suggest statistical differences among all provenances. The results strongly suggest that Tuxtepec provenances can produce greater value by producing timber shafts geometrically closest to the paraboloid (form factor, $ff = 0.45$), and should be the main source for germoplasm to provide forest land-owners of the region.

Key words: *Cedrela odorata* L., *Hypsipyla grandella* Zeller, phenotypic characteristics, indicator variable.

1. INTRODUCCIÓN

En México uno de los primeros programas de mejoramiento genético (PMG) en cedro rojo, se inició en 1994 con un ensayo de siete procedencias establecidas en el INIFAP del Campo Experimental “El Palmar”, Tezonapa, Veracruz, con el fin de proporcionar germoplasma mejorado a los propietarios de la región, ya que ha venido aumentando su interés en plantar cedro rojo en sus parcelas por medio de sistemas agroforestales. Se considera que esta especie maderable representa un tipo de “cuenta de ahorro” para el futuro, así mismo, dejan que la especie genere una proporción de duramen considerable a fin de que la madera alcance un mayor precio en el mercado, ya que su valor comercial es superior a otras especies tropicales a excepción de la caoba (Patiño, 1997; Sánchez *et al.*, 2003), por esta razón, la forma de los fustes junto con el crecimiento, la adaptabilidad, y la resistencia a plagas y enfermedades, se define como carácter objetivo en la mayoría de los PMG para la obtención de madera de calidad (Zobel y Talbert, 1988). El fuste expresa cómo, los factores ambientales y el potencial genético o “heredabilidad”, así como su interacción modifican la morfología de un árbol en el sitio (Zobel y Talbert, 1988), además, el cedro rojo es muy susceptible a los ataques del barrenador de las meliáceas *Hypsipyla grandella* Zeller, que es una plaga que barrena especialmente el meristemo apical y hace galerías en los tallos jóvenes modificando su morfología (Briceño, 1997), sin embargo, existen evidencias de pruebas de procedencias que indican que algunos genotipos pueden tolerar la plaga al mostrar un fuerte crecimiento apical y una regeneración de sus tejidos durante el ataque y así retener el valor económico de su tallo; sin embargo, aunque tal característica es de gran valor potencial, la base genética y fisiológica de este patrón todavía no se entiende muy bien (Newton *et al.*, 1995).

En los ensayos de procedencias por lo general la forma de los fustes solo se analiza durante la etapa juvenil con métodos subjetivos que pueden ser imprecisos, por otro lado, los métodos que implican mediciones a lo largo del fuste suelen ser más precisos y no dependen de apreciaciones subjetivas, sin embargo, son más costosos y llevan más tiempo (Sierra de Grado *et al.*, 1999), por lo tanto, el estudio de los fustes y la estimación de su volumen se pueden llevar a cabo empleando métodos matemáticos y estadísticos más convenientes, como los factores de forma, los modelos de ahusamiento puro y los sistemas de ahusamiento y volumen comercial. El primer método, valora una constante de forma mediante la relación del volumen del árbol con un sólido geométrico de revolución, que contenga el mismo diámetro y altura total (Gama *et al.*, 2010); el segundo, evalúa el coeficiente de estrechamiento del diámetro a lo largo del fuste y su integración proporciona el volumen total y comercial (Bi, 2000); y el tercero, describe de manera simultánea el perfil y el volumen del árbol (Clutter, 1980).

Por consiguiente, es importante estudiar los fustes dado que los más cilíndricos al momento de escuadrar sus trozas tienen mayor rendimiento maderable, contribuyendo a la ganancia económica, sobre todo, cuando se abastecen mercados diferenciados con productos de distinta calidad y dimensión (Zavala, 1996; Quirós *et al.*, 2005).

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo general

El objetivo del presente trabajo fue identificar la procedencia de cedro rojo con mayor rendimiento maderable al comparar su desempeño en características fenotípicas como el factor de forma, ahusamiento y volumen comercial; para la obtención de germoplasma de los mejores individuos y proveer a los propietarios de la región de Tezonapa, Veracruz.

2.2. Objetivos específicos

- Comparar las procedencias en el parámetro de forma mediante el modelo de volumen total tipo Spurr (1952).
- Comparar las procedencias en los parámetros de ahusamiento mediante el modelo de Clutter (1980).
- Comparar las procedencias en los parámetros de forma en el contexto de ahusamiento-volumen comercial de manera conjunta.
- Proponer un sistema genérico de ahusamiento y volumen comercial para plantaciones de la región con origen genético desconocido.

2.3. Hipótesis

- La geometría de los fustes es un rasgo determinado por los factores ambientales, el potencial genético y su interacción.
- La procedencia local de Tezonapa, Veracruz, presenta los fustes más cilíndricos dado que se encuentra adaptado a las condiciones ambientales del sitio.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Caracterización de cedro rojo

Cedrela odorata L. es una especie heliófila (demanda gran cantidad de luz solar para su desarrollo), de 20 a 35 m de altura, con un diámetro normal de hasta 1.7 m. La copa es grande, redondeada, robusta y extendida o copa achatada; las hojas alternas, paripinnadas o imparipinnadas, de 15 a 50 cm, incluyendo el pecíolo, compuestas por 10 a 22 folíolos opuestos o alternos, de 4.5 a 14 cm de largo por 2 a 4.5 cm de ancho, lanceolados u oblongos. El tronco es recto, robusto, formando a veces pequeños contrafuertes poco prominentes (1 m de alto); ramas ascendentes o arqueadas y gruesas. La corteza externa es ampliamente fisurada con las costillas escamosas, pardo grisácea a moreno rojiza y la corteza interna es rosada cambiando a pardo amarillenta, fibrosa y amarga y puede alcanzar un grosor de 20 mm. Las flores son largas y sueltas, de 15 a 30 cm de largo; muchas flores angostas aparentemente tubulares pero con 5 pétalos, suavemente perfumadas, actinomorfas; cáliz en forma de copa, corola crema verdosa. Los frutos son cápsulas leñosas dehiscentes (parecidas a nueces), de 2.5 a 5 cm de largo, 4 a 5 valvadas, elipsoides a oblongas, pardo verdosas a morenas, con un fuerte olor a ajo y produciendo un exudado blanquecino y acuoso cuando están inmaduras. El fruto contiene alrededor de 20 a 40 semillas y permanece adherido al árbol por algún tiempo. Las semillas son aladas de 2 a 3 cm de largo, incluyendo el ala, morenas, adheridas al eje (Pennington y Sarukhán, 2005).

Por lo general el cedro rojo es cultivado por medio de sistemas agroforestales, es decir, asociado a cultivos agrícolas, tales como el café, maíz, plátano, vainilla, palma camedor, piña, entre otros; además, el uso de esta especie maderable contribuye a la recarga de los mantos

acuíferos, disminuye los riesgos de erosión y empobrecimiento del suelo, mejora el microclima y sirve de tutor para los cultivos (Maldonado *et al.*, 2006).

Por otro lado, cedro rojo después de la caoba es la especie maderable de angiospermas más importante de la industria forestal en México. Su madera de características excelentes, se usa para obtener vigas, tablas y chapas, así como para fabricar diversos artículos torneados, cajas de puros y hacer tallas. El uso más adecuado para esta especie, por el bello jaspeado de su madera, es para la fabricación de muebles de calidad, chapas y madera terciada para exportación (Pennington y Sarukhán, 2005).

Actualmente en condiciones naturales, el cedro rojo se ha visto reducido a tal grado que algunos autores señalan existencias promedio de un árbol por cada dos hectáreas, esto como consecuencia de la extracción selectiva, escasa o nula regeneración natural y cambios de uso de suelo principalmente (Melchor y Barbosa, 1992), situación que en México es preocupante, por lo que la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) han incluido al cedro rojo en la lista de especies sujetas a protección especial (Pr) en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010); así mismo, expertos en recursos genéticos forestales de la FAO (Food and Agriculture Organization) recomendaron tomar medidas para promover, conservar y utilizar de forma sostenible esta especie (Patiño, 1997).

3.2. Conceptos genéticos y de mejoramiento

3.2.1. Ensayo de procedencias o progenies

La procedencia se usa como sinónimo de fuente geográfica o raza geográfica, estos términos denotan el área geográfica donde los árboles crecen o el lugar de origen de las semillas, del mismo modo, la progenie son los árboles producidos a partir de la semilla de un árbol progenitor (Zobel y Talbert, 1988). Por lo tanto, un ensayo de procedencias/progenies es una plantación de varias fuentes de semilla procedentes de diferentes áreas geográficas, establecidas de tal manera que permitan una comparación estadísticamente válida en cuanto a rendimiento y otras características de interés (Mesén, 1994).

Los ensayos de procedencias/progenies son útiles para identificar las fuentes geográficas con mayor rendimiento en volumen o biomasa y para proveer germoplasma para el establecimiento de plantaciones operativas o de sistemas agroforestales. No obstante, las características que se pueden evaluar en un ensayo de procedencias son aquellas del fuste, de ramas, de copa, las reproductivas y de madera, entre otras. En particular, para las especies maderables, las características de fuste son de primordial importancia, ya que pueden cambiar las decisiones acerca de la selección de una u otra procedencia. Por ejemplo, las especies destinadas a la producción de madera para aserrío, en donde una procedencia con fustes más cónicos podría desecharse a cambio de una más productiva o con fustes más cilíndricos; en este contexto, el propósito de las evaluaciones es describir eficientemente la variación en rasgos de importancia económica que presenta el árbol y que permita la selección de los mejores individuos o poblaciones (Mesén, 1994).

3.2.2. El fenotipo

El fenotipo es la suma de características físicas del árbol, está afectado por el potencial genético del individuo y por el ambiente en el cual crece, incluyendo la historia del manejo del sitio por lo tanto, las características fenotípicas de un árbol son las que se miden y con lo que se trabaja para su evaluación (Zobel y Talber, 1988).

3.2.3. El genotipo

El genotipo es el potencial genético de un árbol o “heredabilidad”, se determina a través de los genes que residen en los cromosomas del núcleo de cada célula del árbol y sólo es posible determinarlo con pruebas de laboratorio (Zobel y Talber, 1988).

3.2.4. El ambiente

La suma total de factores no genéticos (bióticos y abióticos) son causas importantes de la variación entre procedencias y se denomina ambiente. Generalmente se aplica a los suelos, humedad, clima, espaciamiento, y con frecuencia el efecto de las plagas y en ocasiones a la acción del hombre (Zobel y Talber, 1988).

3.3. Fuentes de variación en la geometría de los fustes

Se han propuesto tres teorías para explicar las leyes que regulan la geometría de los fustes. La primera es la mecanicista, indica que la forma es el resultado de esfuerzos internos y externos sometidos por dos agentes físicos, el peso y las fuerzas horizontales, generadas principalmente por el viento, esta teoría supone que el comportamiento estructural del fuste es una viga de resistencia uniforme a la flexión y está anclada por su base. Si una fuerza horizontal se aplica en la parte superior el esfuerzo del tallo se incrementa uniformemente hasta la base, por esta razón,

se debería de producir un fuste de conicidad uniforme. La segunda teoría es la fisiológica, señala que la configuración del fuste se fundamenta en las funciones de transporte de savia y agua dentro del tronco, así como las presiones internas liberadas en él. La tercera teoría es la hormonal, explica que la distribución de madera en el fuste está dada por la acción de translocación de auxinas generadas por la copa como reguladores del crecimiento radial de los tallos (Lema, 1995).

Las teorías expuestas omiten el contexto genético, silvícola y posición sociológica, que podrían dar una explicación más satisfactoria y completa de las causas que dan origen a la forma del fuste. Por ejemplo, se hace referencia a que la forma de los árboles es una característica heredable (Zobel y Talber, 1988); asimismo, que las podas y la densidad del arbolado tienen una marcada influencia en la forma de los fustes. Un aumento en la densidad del arbolado propicia eliminación de ramas bajas y por tanto del tamaño de la copa, originando un cambio en la distribución del crecimiento a lo largo del fuste. Si las ramas de la parte baja del tallo son fotosintéticamente activas, la eliminación de las mismas reduce el crecimiento en diámetro en esa porción inferior del tronco, por lo tanto, el crecimiento dimétrico tiende a incrementarse en la parte del tronco cercana a la base de la copa viva que permanece tras la poda. Todo ello se traduce en una reducción de la conicidad del tronco y aumento de su cilindridad (Barrio *et al.*, 2009). Con respecto a la posición sociológica, los árboles suprimidos pueden presentar fustes más cilíndricos en comparación a los dominantes y codominantes, también la fertilización puede ser un factor que influya en la forma (Lema, 1995).

3.4. Arquitectura de los fustes

Los fustes de los árboles pueden presentar dos sistemas de crecimiento: monopódico y simpódico (Figura 1). El tronco, formado de un eje principal ocasionado por la actividad de una yema apical se le denomina monopódico, por otra parte, el tronco formado por encadenamiento de ejes con crecimiento determinado se conoce como simpódico, este último se origina por la actividad de varias yemas axilares sucesivas. La yema apical es sustituida por una yema axilar que produce una rama que crece verticalmente y el patrón continúa repitiéndose sucesivamente por la acción de yemas axilares (Interián *et al.*, 2009).

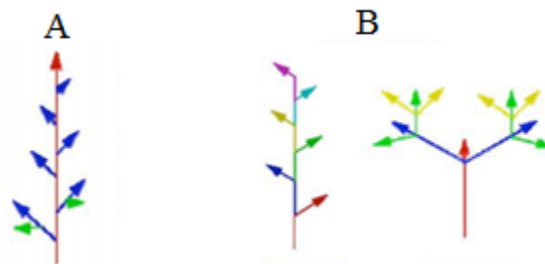


Figura 1. Sistema de crecimiento A) monopódico y B) simpódico.

Algunas especies tropicales que crecen aisladamente subdividen su tronco en ramas gruesas de modo que pierden su carácter monopodial, sin embargo, se ha observado que en plantaciones y en bosques donde hay una mayor densidad los fustes conservan esta característica, porque las ramas se someten a procesos naturales, como la poda natural, que limitan su sistema de crecimiento (Lema, 1995; Burkhart y Tomé, 2012).

3.5. Métodos analíticos para evaluar la geometría de los fustes

La forma y el ahusamiento de fuste de los árboles ha sido motivo de estudio por más de cien años. Aunque estos términos han sido usados indistintamente en el pasado, hoy en día, es aceptado que “forma” se refiere a las figuras estereométricas que adoptan los tallos, por otra parte, el “ahusamiento” se refiere a la reducción gradual del diámetro a medida que aumenta la altura sobre el fuste (Pompa, 1997).

El estudio de la forma, ahusamiento y volumen de los fustes, se pueden llevar a cabo empleado diferentes metodologías; el empleo de factores de forma, funciones de ahusamiento puro y, sistemas de ahusamiento y volumen comercial.

3.5.1. El factor de forma

A este factor se le conoce como: coeficiente mórfico, factor de forma, factor mórfico, y se define como la relación entre el volumen del fuste de un árbol con el volumen de una figura estereométrica (cilindro, paraboloides, neiloide o cono), que tiene las mismas dimensiones de diámetro normal y altura total. Además de ser una técnica para evaluar la geometría de los fustes también se emplea en la medición del volumen del arbolado en pie, sin hacer uso de ecuaciones de volumen u otros procedimientos de estimación; su mayor ventaja es la simplicidad de su aplicación, pero el principal inconveniente es la determinación de su valor (Da Silva *et al.*, 1994).

Caballero (1970) realizó en México uno de los primeros estudios sobre coeficientes mórficos en cedro rojo con base al cilindro. El estudio demostró que el empleo de factores de forma para la estimación de volúmenes en cedro rojo resulta satisfactorio, el método se basó en la división de la

muestra total en categorías de altura de fuste limpio y en el cálculo de una ecuación basada en coeficientes mórficos para cada una de esas categorías, además, se concluyó que el factor de forma en esta especie no cambia significativamente entre categorías de alturas.

3.5.2. Funciones de ahusamiento puro

Los fustes de los árboles tienen varios puntos de inflexión a lo largo de su longitud que resulta en múltiples formas geométricas, por esta razón, es difícil de obtener una descripción matemática de todo su tallo. Uno de los criterios más modernos para resolver este problema es el uso de funciones de ahusamiento puro, éstos permiten estimar el grado de disminución del diámetro a medida que aumenta la altura desde el nivel del suelo, además, la integración de la ecuación de ahusamiento desde el suelo hasta cualquier altura proporciona una estimación del volumen a esa altura (Newnham, 1992; Kozak, 2004).

La historia sobre funciones de ahusamiento se remonta a 1956, esto ha dado lugar a varias investigaciones sobre el tema con diferentes enfoques (Kozak, 2004). Aunque la forma de los fustes de las especies forestales se ha estudiado por mucho tiempo a través del desarrollo de diferentes funciones de ahusamiento en el mundo (Demaerschalk, 1972; Max y Burkhart, 1976; Newnham, 1992; Bi, 2000), el tema sigue siendo relevante, tal vez porque ninguna teoría se ha desarrollado para explicar adecuadamente la variación en la forma de los tallos para todo tipo de árboles.

Los modelos de ahusamiento no están restringidos al grupo de las coníferas, sino más bien a la forma de los fustes de los árboles. Algunas especies tropicales logran desarrollar fustes monopódicos, bajo ciertas circunstancias explicadas anteriormente, por lo tanto, se pueden utilizar las funciones de perfil. En México estas técnicas se han aplicado principalmente a

coníferas incluyendo a *Pinus haswegii* (Návar *et al.*, 1997), *Pinus cooperi*, *Pinus durangensis*, *Pinus engelmannii*, *Pinus herrerae* (Corral y Návar, 2009) y, *Pinus pseudostrobus* (Tapia y Návar, 2011). A pesar de la información sobre ahusamiento, hay escasos estudios sobre ecuaciones que describan el ahusamiento para ensayos de procedencias y menos aún para especies tropicales, las cuales se consideran en los apoyos gubernamentales para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales en México.

3.5.3. Sistemas compatibles de ahusamiento y volumen

El concepto compatibilidad de funciones de ahusamiento y volumen parece haber sido introducido formalmente por Demaerschalk (1972) y posteriormente mejorado por Burkhard (1977) y Clutter (1980) donde se incluyen sistemas compatibles de ahusamiento y volumen comercial, éstos están expresados por dos modelos que corren simultáneamente, ambos tienen una estructura geométrica común y están definidos por los mismos parámetros (Cruz, 2007).

El sistema de ahusamiento y volumen compatible tiene una mayor ventaja con respecto a los ajustes independientes de las funciones de ahusamiento puro y de volumen, ya que estima directamente el diámetro a cualquier altura, la altura a cualquier diámetro y simultáneamente estima el volumen a una altura dada o aun diámetro conocido.

En México estas técnicas al igual que las funciones de ahusamiento puro, se han desarrollado principalmente en coníferas, como el *Pinus patula* (Hernández *et al.*, 2013), *Pinus cooperi* (Cruz, 2007); *Pinus arizonica*, *Pinus engelmannii*, *Pinus durangensis*, *Pinus teocote* y *Pinus ayacahuite* (Quiñonez, 2009); no obstante, se han realizado escasos trabajos en plantaciones de cedro rojo, por ejemplo, Galán (2007) y Bravo (2007) ajustaron los sistemas compatibles de ahusamiento y volumen de Clutter (1980), Piennar y Reheney (1988) y Fang y Bailey (1999). Ambos estudios

difierieron en cuanto a la elección de los modelos, a pesar de que las plantaciones tenían la misma edad. Sin embargo, lo anterior se atribuyó a que el primer estudio era una plantación de enriquecimiento de acahual mientras que el segundo estudio evaluó una mezcla de cedro rojo y caoba bajo silvicultura intensiva.

3.6. Métodos de ajuste para los sistemas compatibles de ahusamiento y volumen

Cruz (2007) y Quiñonez *et al.* (2014) recomiendan que el ajuste de los sistemas compatibles de ahusamiento y volumen se realice con regresión aparentemente no correlacionada SUR, por sus siglas en inglés (*Seemingly Unrelated Regressions*) o regresión por máxima verosimilitud con información completa FIML, por sus siglas en inglés (*Full Information Maximum Likelihood Estimation*). Estos métodos minimizan el error estándar e incrementan el nivel de significancia de los estimadores en ambos lados del sistema, cosa que no cumple el ajuste con mínimos cuadrados ordinarios OLS ya que la computadora debe decidir si minimiza el error en la función de ahusamiento o en la del volumen comercial.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción del área de estudio

El ensayo de procedencias (Cuadro 1) se localiza en el municipio de Tezonapa, Veracruz, dentro del Campo Experimental “El Palmar” del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), entre las coordenadas 18°32'55 de latitud Norte y 96°47'23 de longitud Oeste, a una altitud de 180 m; con una superficie de 1.8 ha. El clima es cálido húmedo, con una precipitación de 2885 mm anuales., la temperatura media es de 24.4 °C con una mínima de 16.1 °C y una máxima 35.4 °C., la fisiografía se conforma de terrenos planos y lomeríos con pendientes de 5% a 29%., los suelos son acrisoles y vertisoles profundos de buen drenaje natural, con textura migajón arcillo-arenosa y pH de 4.8 a 6.1 (Sánchez y Velázquez, 1998). La ubicación geográfica de las procedencias se observan en la Figura 2.

Cuadro 1. Localidades establecidas en el ensayo de procedencias de cedro rojo en el Campo Experimental “El Palmar” INIFAP, Ver.

Procedencia	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud(m)	Tipo de suelo
Costa del Golfo, Ver.	18°58'-19°46'	96°10'-96°25'	0-80	Vertisol-Regosol
Tezonapa, Ver.	18°30'-18°35'	96°41'-96°48'	180	Acrisol
Tierra Blanca, Ver.	18°27'-18°32'	96°20'-96°36'	200	Vertisol-Luviosol
San Andrés Tuxtla, Ver.	18°27'	95°13'	300	Luviosol
Tuxtepec, Oax.	18°06'	96°07'	20	Cambisol-Luviosol
María Lombardo, Oax.	17°28'	95°46'	200	Cambisol-Regosol
Cómala, Chis.	15°40'	92°09'	500	Litosol Vertisol

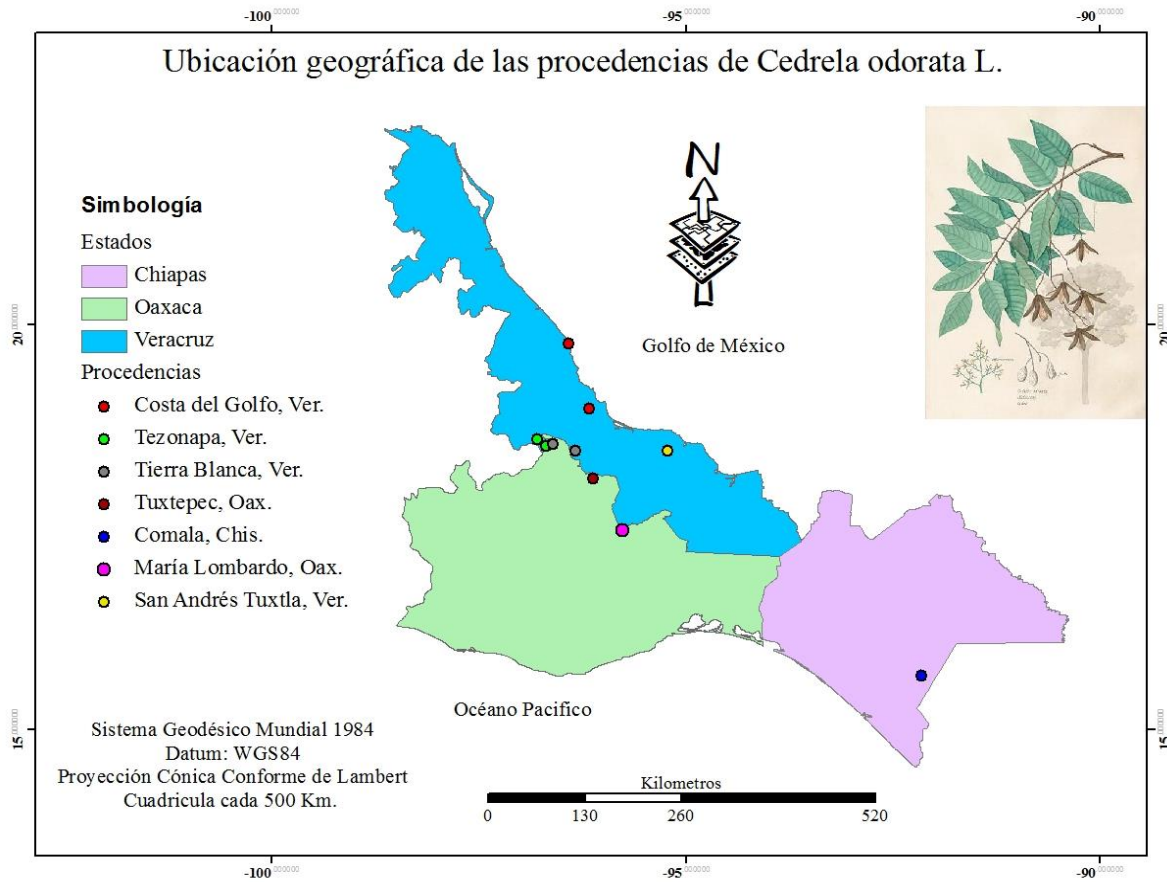


Figura 2. Ubicación geográfica de las localidades incluidas en el ensayo de progenies de Cedro rojo en el Campo Experimental “El Palmar” INIFAP. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Muestreo destructivo y cubicación de los árboles

Se obtuvo información de 211 árboles, con 16 años de edad, producto del primer aclareo aplicado al ensayo de progenies en diciembre del 2010 para conformar un huerto semillero, los datos se obtuvieron mediante análisis troncales, las variables registradas fueron diámetro normal, en centímetros (D_n); altura total, en metros (H); diámetro con corteza a diferentes alturas del fuste, en centímetros (d) y alturas para cada sección con respecto al suelo, en metros (h), la primera medición se realizó a una longitud de 0.25 m, la segunda a 1.05 m (D_n) y las siguientes cada 2 m hasta tener un diámetro mínimo de 3 cm. Se registró un total de 1670 pares de datos de diámetro (d) y altura (h).

El método de cubicación utilizado fue el de trozas traslapadas (*Overlapping Bolts Method*) propuesto por Bailey (1995), esta técnica disminuye el error y aumenta la precisión debido a su naturaleza de complementación con que se realiza, los resultados se corrigen en forma automática (Cruz, 2007). El método utiliza la fórmula de Newton generalizada para las trozas dobles $V = \left[\frac{\pi}{40000} \times (D_i^2 + 4D_m^2 + D_f^2) \right] \times \left(\frac{L}{6} \right)$ y la del cono para la punta $V = \frac{(\pi / 40000 \times D_i^2) \times L}{3}$; donde V : volumen (m^3); D_i : Diámetro inicial; D_m : diámetro medio; D_f : diámetro final y L : longitud de la troza (m). Los datos de ahusamiento y volumen acumulado se presentan en la Figura 3.

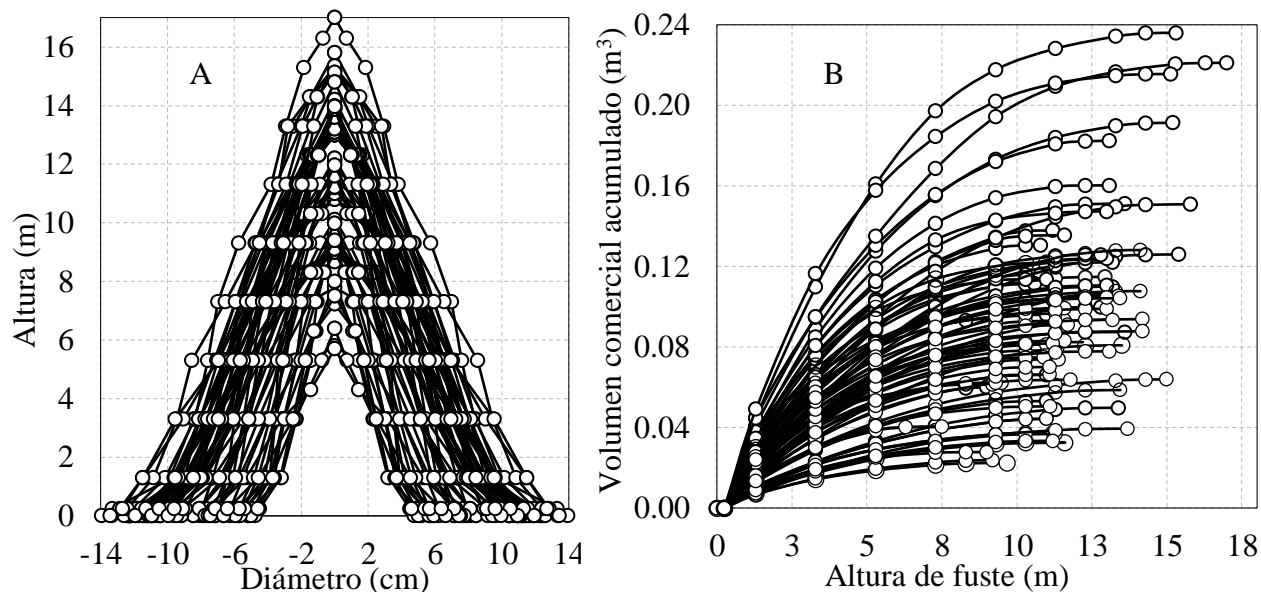


Figura 3. A) Alturas parciales en función de los diámetros parciales; B) Volumen comercial en función de la altura de fuste, para los árboles muestreados.

Los estadísticos de las principales variables de los árboles como número de observaciones, valores de la media, mínimo, máximo y la desviación estándar se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Valores descriptivos de las principales variables dasométricas a utilizar en el factor de forma, ahusamiento puro y sistemas de ahusamiento y volumen.

Variables	n	Media	Desviación estándar	Máximo	Mínimo
Dn^{\dagger} (cm)	211	13.51	3.45	23.00	6.40
d^{\ddagger} (cm)	1670	7.86	5.71	26.60	0.00
H^{\S} (m)	211	11.60	2.22	17.00	5.70
h^{P} (m)	1670	6.15	4.22	17.00	0.25
V^{a} (m ³)	211	0.08	0.04	0.24	0.06

$^{\dagger}Dn$: diámetro normal (cm); $^{\ddagger}d$: diámetro a la altura parcial h (cm); $^{\S}H$ (m): altura total; $^{\text{P}}h$: Altura parcial del fuste (m); $^{\text{a}}V$: Volumen total (m³).

4.3. Comparación de procedencias en el factor de forma

Mediante el modelo de la variable combinada de Spurr (1952) es posible estimar el coeficiente de forma de los árboles, partiendo de que un cuerpo de forma irregular (la forma de fuste del árbol) comúnmente se compara con un cilindro, básicamente lo que se supone es que el volumen del fuste del árbol va a ser proporcional al volumen del cilindro ($V_a \propto V_c$), asumiendo que el cilindro y el árbol tengan el mismo diámetro normal (Dn en cm) y la misma altura total (H en m).

El volumen se correlaciona adecuadamente con el Dn^2 y la H , bajo este contexto el volumen del cilindro es:

$$V_c = \frac{\pi}{40000} \times Dn^2 \times H \quad (1)$$

Sin embargo, el volumen del árbol siempre va a ser menor con respecto al volumen del cilindro teórico ($V_a < V_c$), según este razonamiento empírico, el volumen del árbol tiene que ser proporcional al volumen del cilindro multiplicado por una constante ($V_a \propto V_c \times C$) menor a uno ($C < 1$), de igual manera, C es el factor de forma de los árboles; esto lleva a un primer modelo, si el volumen del árbol va a ser aproximadamente igual al volumen del cilindro por su constante de proporcionalidad como:

$$V_a \approx C \times \frac{\pi}{40000} \times Dn^2 \times H \quad (2)$$

Entonces:

$$V_a \approx \beta \times Dn^2 H \quad (3)$$

Esta evidencia conduce a la expresión que representa el modelo del coeficiente mórfo constante, asumiendo un intercepto cero de la siguiente manera:

$$Va = \beta \times (Dn^2 H) + \varepsilon \quad (4)$$

Eventualmente los árboles tienen un diámetro mínimo inventariable, cualquier árbol menor al diámetro mínimo inventariable se asume con volumen cero, esto da origen al siguiente modelo de la variable combinada:

$$Va = \alpha + \beta \times (Dn^2 H) + \varepsilon \quad (5)$$

Donde α reflejará el efecto del diámetro mínimo inventariable y β será la constante de forma, cuando se ajuste el modelo de forma constante o variable combinada siempre será posible estimar el factor de forma si se toma en cuenta a la constante $k = \pi / 40000$, no obstante, la regresión correrá de acuerdo a los modelos mencionados a menos que el modelo se ajuste de manera completa, es decir que tengan expresado el factor de forma en la variable regresora de la siguiente manera:

$$Va = \alpha + \beta \times (Dn^2 H) \times \frac{1}{k} + \varepsilon \quad (6)$$

Para detectar diferencias de interceptos y factores de forma entre procedencias en el modelo de la variable combinada con el factor de forma directo (Ecuación 6), se desarrolló una prueba de adicionalidad simple por medio de un análisis de regresión lineal incorporando variables indicadoras (“*dummy*”) para denotar la ausencia o presencia de algún efecto aditivo (Draper y Smith, 1981; Montgomery y Peck, 1982). Para ello se le incorporó variables indicadoras a las

procedencias, donde $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2 + \alpha_3 Z_3 + \alpha_4 Z_4 + \alpha_5 Z_5 + \alpha_6 Z_6$ y $\beta = \beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2 + \beta_3 Z_3 + \beta_4 Z_4 + \beta_5 Z_5 + \beta_6 Z_6$.

Para el resto del documento, si no es la procedencia base de Tuxtepec entonces:

$$Z_1 = \begin{cases} 1, \text{ si pertenece a Tierra Blanca} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{cases}$$

$$Z_2 = \begin{cases} 1, \text{ si pertenece a Tezonapa} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{cases}$$

$$Z_3 = \begin{cases} 1, \text{ si pertenece a San Andrés Tuxtla} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{cases}$$

$$Z_4 = \begin{cases} 1, \text{ si pertenece a María Lombardo} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{cases}$$

$$Z_5 = \begin{cases} 1, \text{ si pertenece a Costa del Golfo} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{cases}$$

$$Z_6 = \begin{cases} 1, \text{ si pertenece a Comala} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{cases}$$

Donde Va es el volumen de fuste total del árbol (m^3); Dn es el diámetro normal (cm); H es la altura total (m); $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6$ corresponde a las variables indicadoras; α_0, β_0 son los parámetros de regresión; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ son los parámetros de regresión debido a la adicionalidad y ε el error aleatorio; los efectos son por adición a Tuxtepec por presentar mayor número de observaciones. La hipótesis considera la homogeneidad entre interceptos y factores de forma ($H_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0$).

4.4. Comparación de procedencias en el ahusamiento

Para conocer las diferencias en cuanto al ahusamiento entre procedencias se tomó como base el modelo de ahusamiento puro tipo Clutter (1980) que se expresa como:

$$d = \alpha Dn^\gamma H^\theta (H - h)^\delta + \varepsilon \quad (7)$$

No obstante, la Ecuación (7) tiene expresada la forma del fuste en dos lados, es decir en la fracción de escala del volumen de fuste total $(\alpha Dn^\gamma H^\theta)$ y en la fracción del volumen acumulado $(H - h)^\delta$, en consecuencia, los parámetros globales que más influyen en el volumen total y comercial son α y δ , por lo tanto, se replantearon en función de las variables indicadoras, de tal manera que $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2 + \alpha_3 Z_3 + \alpha_4 Z_4 + \alpha_5 Z_5 + \alpha_6 Z_6$ y $\delta = \delta_0 + \delta_1 Z_1 + \delta_2 Z_2 + \delta_3 Z_3 + \delta_4 Z_4 + \delta_5 Z_5 + \delta_6 Z_6$.

Donde d es el diámetro a la altura parcial h (cm); Dn es el diámetro normal (cm); h es la altura parcial de fuste (m); H es la altura total (m); $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6$ corresponden a las variables indicadoras; $\alpha_0, \gamma, \theta, \delta_0$ son los parámetros de regresión; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6$ son los parámetros de regresión debidos a la adicionalidad y ε el error aleatorio; los efectos aditivos tienen como base a la procedencia de Tuxtepec por presentar mayor número de observaciones. La hipótesis plantea la homogeneidad en los parámetros de ahusamiento ($H_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = \delta_5 = \delta_6 = 0$).

En otras palabras, se puede demostrar que α y δ tienen más efecto en el volumen de fuste total y comercial de los árboles, partiendo de que la Ecuación (7) se puede integrar para calcular el volumen total del fuste del árbol (Va) y el volumen de la troza comercial (Vc). Se integra el

diámetro d a lo largo de una sección deseada como un sólido en revolución mediante la expresión:

$$Vc = k \int_{h_1}^{h_2} d^2 \partial h \quad (8)$$

Donde, la constante volumétrica $k = \pi / 40000$, cuando d está en centímetros y la longitud de la troza en metros, y ∂h es el diferencial sobre la altura del fuste, de tal manera, despejando d de la Ecuación (7) y sustituyendo en la Ecuación (8) se tiene:

$$Vc = \frac{\pi}{40000} \int_{h_1}^{h_2} \alpha^2 D n^{2\gamma} H^{2\theta} (H - h)^{2\delta} \partial h \quad (9)$$

Así, la expresión de volumen comercial, definida entre dos alturas de fuste h_2 y h_1 queda como:

$$Vc = \alpha^2 \frac{\pi}{40000} D n^{2\gamma} H^{2\theta} \frac{(H - h_1)^{2\delta+1} - (H - h_2)^{2\delta+1}}{2\delta+1} \quad (10)$$

De la Ecuación (7) es fácil ver que para definir la altura a la que sucede cierto diámetro ésta se obtiene al despejar h al diámetro límite d quedando entonces el sistema de ahusamiento definido como:

$$h = H - \left(\frac{d}{\alpha \times D n^\gamma \times H^\theta} \right)^{\frac{1}{\delta}} \quad (11)$$

Siguiendo con el desarrollo de la Ecuación (10), el volumen total del fuste del árbol (Va), es decir del tocón a la punta, se define de la siguiente manera:

$$Va = \alpha^2 \frac{\pi}{40000} D n^{2\gamma} H^{2\theta} \int_{h=0}^{h_2=H} \frac{(H - h)^{2\delta+1}}{2\delta+1} \quad (12)$$

En síntesis, el volumen total del fuste del árbol (Va) queda reducido a la expresión:

$$Va = \frac{\alpha^2}{2\delta + 1} \frac{\pi}{40000} Dn^{2\gamma} H^{2\theta + 2\delta + 1} \quad (13)$$

Por lo tanto, realizando la prueba de adicionalidad en α y δ directamente sensibiliza la mayor parte del volumen comercial de la Ecuación (10) y el volumen total de la Ecuación (13), esta misma expresión se reduce a un modelo de la forma $Va = c_o Dn^{c_1} H^{c_2}$, estructura que representa el modelo de volumen total tipo Schumacher-Hall, así mismo, el factor de forma

queda definido como $ff = \frac{Va}{k \times Dn^2 \times H}$, sin embargo, este coeficiente cambia de acuerdo al

tamaño del árbol.

4.5. Comparación de procedencias en sistemas compatibles de ahusamiento y volumen

Se probaron tres sistemas de Fang y Bailey (1999) para estimar el volumen comercial y el ahusamiento para plantaciones con origen genético del huerto semillero, además, estos modelos también permitirán comparar la forma de los fustes entre procedencias de manera más completa, es decir, en dos parámetros de forma, para ello, se reemplazó el modelo de volumen total de Schumacher-Hall implícito en los sistemas por el de la variable combinada con el factor de forma directo en β , así mismo, la función de ahusamiento y la estructura del volumen de punta no comercial comparten otro parámetro de forma δ , (Fang y Bailey, 1999) por lo que estos dos parámetros globales se replantearon en función de las variables indicadoras para definir el efecto aditivo de los diferentes orígenes de los árboles (Cuadro 3). Corral *et al.* (2007) y Quiñonez *et al.* (2014) utilizaron un enfoque similar en ajustes globales considerando variables *dummy* para distintas especies de pino. Al igual que en la prueba de adicionalidad de los factores de forma y del ahusamiento puro se consideró la misma procedencia base y descripción de las variables indicadoras.

Cuadro 3. Sistemas compatibles ajustados a las procedencias de cedro rojo establecidas en Tezonapa, Veracruz, México.

Fang y Bailey (1999)	Función de ahusamiento	Función de volumen comercial
Caso I-a	$d = \left[\left(\frac{1}{\beta} \right) \times \left(\alpha + \beta Dn^2 H \frac{1}{k} \right) \times (H)^{\frac{-k}{\delta}} \times (H-h)^{\frac{k-\delta}{\delta}} \right]^{\frac{1}{2}} + \varepsilon$	$Vc = \left[\alpha + \beta (Dn^2 H) \frac{1}{k} \right] - [\delta d^2 (H-h)] + \varepsilon$
Caso II-a	$d = \left[\frac{k(\gamma-1)}{\gamma\delta} \ln(H-h) + \left(\frac{\alpha + \beta Dn^2 H \frac{1}{k}}{\delta} \right)^{1-\frac{1}{\gamma}} - \frac{k(\gamma-1)}{\gamma\delta} \ln H \right]^{\frac{1}{2\gamma-2}} (H-h)^{0.5} + \varepsilon$	$Vc = \left[\alpha + \beta (Dn^2 H) \frac{1}{k} \right] - [\delta d^\theta (H-h)^{\frac{\theta}{2}}] + \varepsilon$
Caso II-b	$d = \left[\frac{k(\theta-2)}{(\theta-2\gamma)\delta} \left((H-h)^{\frac{1-2\gamma}{\theta}} - H^{\frac{1-2\gamma}{\theta}} \right) + \left(\frac{\alpha + \beta Dn^2 H \frac{1}{k}}{\delta} \right)^{\frac{1-2}{\theta}} \right]^{\frac{1}{\theta-2}} (H-h)^{\frac{-\gamma}{\theta}} + \varepsilon$	$Vc = \left[\alpha + \beta (Dn^2 H) \frac{1}{k} \right] - [\delta d^\theta (H-h)^\gamma] + \varepsilon$
Variables indicadoras	$\delta = \delta_0 + \delta_1 Z_1 + \delta_2 Z_2 + \delta_3 Z_3 + \delta_4 Z_4 + \delta_5 Z_5 + \delta_6 Z_6$	$\beta = \beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2 + \beta_3 Z_3 + \beta_4 Z_4 + \beta_5 Z_5 + \beta_6 Z_6$

Vc es el volumen comercial (m^3); d es el diámetro a la altura parcial h (cm); h es al altura parcial de fuste(m); H es la altura total de fuste (m); Dn es el diámetro normal; $k = \pi/40000$; α , β , δ , θ , γ son los parámetros de regresión; Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , Z_5 , Z_6 son las variables indicadoras para cada progenie; β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , β_5 , β_6 , δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 , δ_5 , δ_6 son los parámetros de regresión debido a la adicionalidad.

4.6. Modelo de volumen comercial genérico para las plantaciones operativas de la región

Se presenta un sistema de volumen comercial bajo un ajuste global (sistema reducido), combinando todas las fuentes geográficas de cedro rojo, es decir, sin diferenciar grupos de procedencias, en vista que en la región de Tezonapa Veracruz, puede haber plantaciones de esta especie con origen genético desconocido además, no se cuenta con un sistema local de cubicación del arbolado que permita optimizar la estimación de su volumen y la distribución de sus productos. Dicho lo anterior, el modelo propuesto fue el de Fang y Bailey (1999) caso 1-a, en su forma original; este es uno de los más sencillos en su estructura con solo cuatro parámetros a estimar y de fácil aplicación (Galán, 2007):

$$V_c = \alpha \times D n^\beta \times H^\delta - \theta \times d^2 \times (H - h) + \varepsilon \quad (14)$$

Donde V_c es el volumen comercial en m^3 definidos a la punta no comercial de d en cm que se encuentra a la distancia desde la punta h en m, las demás variables ya fueron definidas anteriormente; a esta función le corresponde un modelo de ahusamiento de la forma:

$$d = \left[\left(\frac{\alpha}{\theta} \times D n^\beta \times H^{\delta - \frac{k}{\theta}} \right) \times (H - h)^{\frac{k - \theta}{\theta}} \right]^{\frac{1}{2}} + \varepsilon \quad (15)$$

Y un modelo de altura límite de la forma:

$$h = \left[\frac{d^2}{\left(\frac{\alpha}{\theta} \times D n^\beta \times H^{\delta - \frac{k}{\theta}} \right)} \right]^{\frac{\theta}{k - \theta}} + \varepsilon \quad (16)$$

Este sistema permitirá conocer el volumen y la distribución de productos por dimensiones del diámetro y longitud de trozas.

4.6.1. Estrategia de ajuste

La estimación de los parámetros para los sistemas Fang y Bailey (1999) caso I-a, caso II-a, caso II-b, fue bajo regresión SUR (*Seemingly Unrelated Regressions*), la cual es apropiada para un ajuste simultáneo de ecuaciones, así mismo minimiza el error estándar e incrementa el nivel de significancia de los estimadores tanto en la ecuación de ahusamiento como en la ecuación del volumen comercial aumentando la sensibilidad de las pruebas de hipótesis en los parámetros de forma (Zellner, 1962; Rose y Lynch, 2001). El procedimiento MODEL de SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004) se usó para el ajuste de los modelos.

Con la finalidad de comparar los sistemas y seleccionar aquel con mejor bondad de ajuste, se utilizó el coeficiente de determinación ajustado (R_{Adj}^2) que mide la variabilidad explicada por el modelo de ahusamiento y del volumen comercial, la raíz del cuadrado medio del error (RMSE), que da la medida de las diferencias en promedio entre los valores estimados y los observados, el coeficiente de variación en % (CV), el cual explica la variabilidad relativa en relación con la respuesta media de la variable dependiente y el sesgo promedio absoluto (\bar{S}) que proporciona información sobre la tendencia del modelo a subestimar o sobreestimar a la variable respuesta (Hernández *et al.*, 2013; Quiñones *et al.*, 2014).

$$R_{Adj}^2 = 1 - \left[\frac{n-p \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \right] \quad (17)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n-p} \right]^{0.5} \quad (18)$$

$$CV(\%) = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n-p) \right]^{0.5}}{\bar{y}} \times 100 \quad (19)$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (20)$$

Donde, y_i , \hat{y}_i y \bar{y}_i es el valor observado de la variable respuesta, estimado y medio respectivamente; n es el número de observaciones y p es el número de parámetros en el sistema.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Procedencias y el factor de forma

La prueba de comparación de grupos de procedencias por adición a Tuxtepec (Cuadro 4), indica que todas las progenies a la edad de 16 años tienen el mismo intercepto al origen ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6$, $p > 0.05$), puesto que los parámetros no son significativos a una probabilidad de rechazo de 0.05, por otro lado, en cuanto a los factores de forma, la procedencia base de Tuxtepec posee fustes más esbeltos, cercanos al paraboloides ($ff = 0.44$). Al respecto se encontró que estadísticamente no hay diferencias con las fuentes geográficas de Tierra Blanca ($\beta_0 = \beta_1$, $p > 0.05$), Tezonapa ($\beta_0 = \beta_2$, $p > 0.05$) y San Andrés Tuxtla ($\beta_0 = \beta_3$, $p > 0.05$), por lo contrario, María Lombardo, Costa del Golfo y Comala son diferentes, ya que la adicionalidad en los parámetros de forma es estadísticamente significativa ($\beta_4 \neq \beta_5 \neq \beta_6$, $p < 0.05$).

El valor negativo de los parámetros de adicionalidad β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , β_5 y β_6 (Cuadro 4) corresponden al efecto de las procedencias, e indican que el factor de forma en las fuentes geográficas de Tuxtepec, Tierra Blanca, Tezonapa y San Andrés Tuxtla es similar, tendiendo al paraboloides, mientras que para las procedencias de Costa del Golfo, María Lombardo y Comala, aun cuando presenten el mismo diámetro normal y altura total la forma es mucho más cónica.

Los factores de forma pueden considerarse hasta cierto punto como una característica fenotípica propia de las procedencias, que son el resultado del potencial genético o “heredabilidad” y del ambiente en el cual crecieron, tales como suelo, viento, humedad, clima, precipitación, así como el efecto de la plaga *Hypsipyla grandella* Zeller (Zobel y Talbert, 1988).

Cuadro 4. Resultados de la prueba de adicinalidad con el modelo de la variable combinada de Spurr (1952) con el factor de forma directo.

Procedencia	Estado	Parámetros estimados					
		Parámetro	Estimador	Factor de forma	Error Estándar	Valor t	Pr > t
Tuxtepec	Oaxaca	α_0	0.0083	0.4416	0.0033	2.54	0.0118
		β_0	0.4416		0.0214	20.66	<.0001
Tierra Blanca	Veracruz	α_1	0.0019	0.3984	0.005	0.39	0.6994
		β_1	-0.0432		0.0266	-1.63	0.1055
Tezonapa	Veracruz	α_2	0.0003	0.3988	0.0036	0.1	0.9234
		β_2	-0.0428		0.0225	-1.9	0.059
San Andrés Tuxtla	Veracruz	α_3	-0.003	0.3747	0.0086	-0.35	0.7278
		β_3	-0.0669		0.0584	-1.15	0.2532
María Lombardo	Oaxaca	α_4	0.0047	0.3273	0.0049	0.97	0.3309
		β_4	-0.1143		0.0263	-4.34	<.0001
Costa del Golfo	Veracruz	α_5	0.0013	0.3601	0.0038	0.33	0.738
		β_5	-0.0815		0.0237	-3.44	0.0007
Comala	Chiapas	α_6	0.0085	0.3024	0.0075	1.13	0.2603
		β_6	-0.1392		0.0348	-3.99	<.0001

α_0, β_0 : parámetros de regresión de la procedencia base; $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \alpha_3, \beta_3, \alpha_4, \beta_4, \alpha_5,$

$\beta_5, \alpha_6, \beta_6$: parámetros de adicinalidad debido a las procedencias.

5.2. Procedencias y el ahusamiento

La búsqueda de evidencias para demostrar las diferentes formas de fuste entre procedencias fue más sensible en la prueba de adicionalidad con el modelo de ahusamiento puro tipo Clutter (1980). Las fuentes geográficas de Tierra Blanca, Tezonapa, San Andrés Tuxtla, María Lombardo, Costa del Golfo y Comala por adición a Tuxtepec tienen diferente ahusamiento, es decir, existen diferencias significativas en el parámetro de la fracción de escala de volumen de fuste total ($\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq \alpha_4 \neq \alpha_5 \neq \alpha_6$, $p < 0.05$) y el parámetro de la fracción del volumen acumulado ($\delta_1 \neq \delta_2 \neq \delta_3 \neq \delta_4 \neq \delta_5 \neq \delta_6$, $p < 0.05$) por lo que el efecto de la variable indicadora Z resultó significativo (Cuadro 5).

En el modelo tipo Clutter (1980) para ahusamiento se aprecia que todos los parámetros de adicionalidad son significativos y esto apunta que a diferencia del primer enfoque, basado en el factor de forma total a nivel árbol (con una sola observación por individuo), todas las procedencias tienen distinto ahusamiento con respecto a la procedencia base (Tuxtepec). Partiendo de que el diámetro normal (Dn) promedio es de 13.5 cm y la altura total promedio (H) es de 11 m, cuando se hace el cálculo del volumen de fuste total por procedencia con el modelo Schumacher-Hall derivado de Clutter (1980), este estima que el mayor factor de forma lo tiene Tuxtepec ($ff = 0.57$), de la misma manera cuando se usa el modelo de ahusamiento para estimar la altura al diámetro límite de 5 cm, Tuxtepec sugiere la mayor altura límite y volumen comercial (Figura 4), resultando por lo tanto la procedencia más cilíndrica.

Cuadro 5. Resultados de la prueba de adicionalidad con el modelo de ahusamiento puro tipo Clutter (1980).

Procedencia	Estado	Parámetros estimados				
		Parámetro	Estimador	Error Estándar	Valor t	Pr > t
Tuxtepec	Oaxaca	α_0	3.0013	0.158	19.01	<.0001
		δ_0	0.7461	0.019	40.09	<.0001
Tierra Blanca	Veracruz	α_1	-0.5865	0.161	-3.65	0.0003
		δ_1	0.0871	0.027	3.2	0.0014
Tezonapa	Veracruz	α_2	-0.7305	0.130	-5.64	<.0001
		δ_2	0.1144	0.021	5.59	<.0001
San Andrés Tuxtla	Veracruz	α_3	-1.5487	0.230	-6.74	<.0001
		δ_3	0.3073	0.064	4.82	<.0001
María Lombardo	Oaxaca	α_4	-1.1321	0.176	-6.43	<.0001
		δ_4	0.1815	0.034	5.3	<.0001
Costa del Golfo	Veracruz	δ_5	-1.2443	0.141	-8.84	<.0001
		δ_5	0.2180	0.024	9.17	<.0001
Comala	Chiapas	α_6	-1.3651	0.206	-6.64	<.0001
		δ_6	0.2330	0.047	4.96	<.0001
		γ_0	0.9268	0.015	62.67	<.0001
		θ_0	-1.0527	0.021	-51.33	<.0001

$\alpha_0, \delta_0, \gamma_0, \theta_0$: parámetros de regresión; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6$:

parámetros de adicionalidad debido a las procedencias.

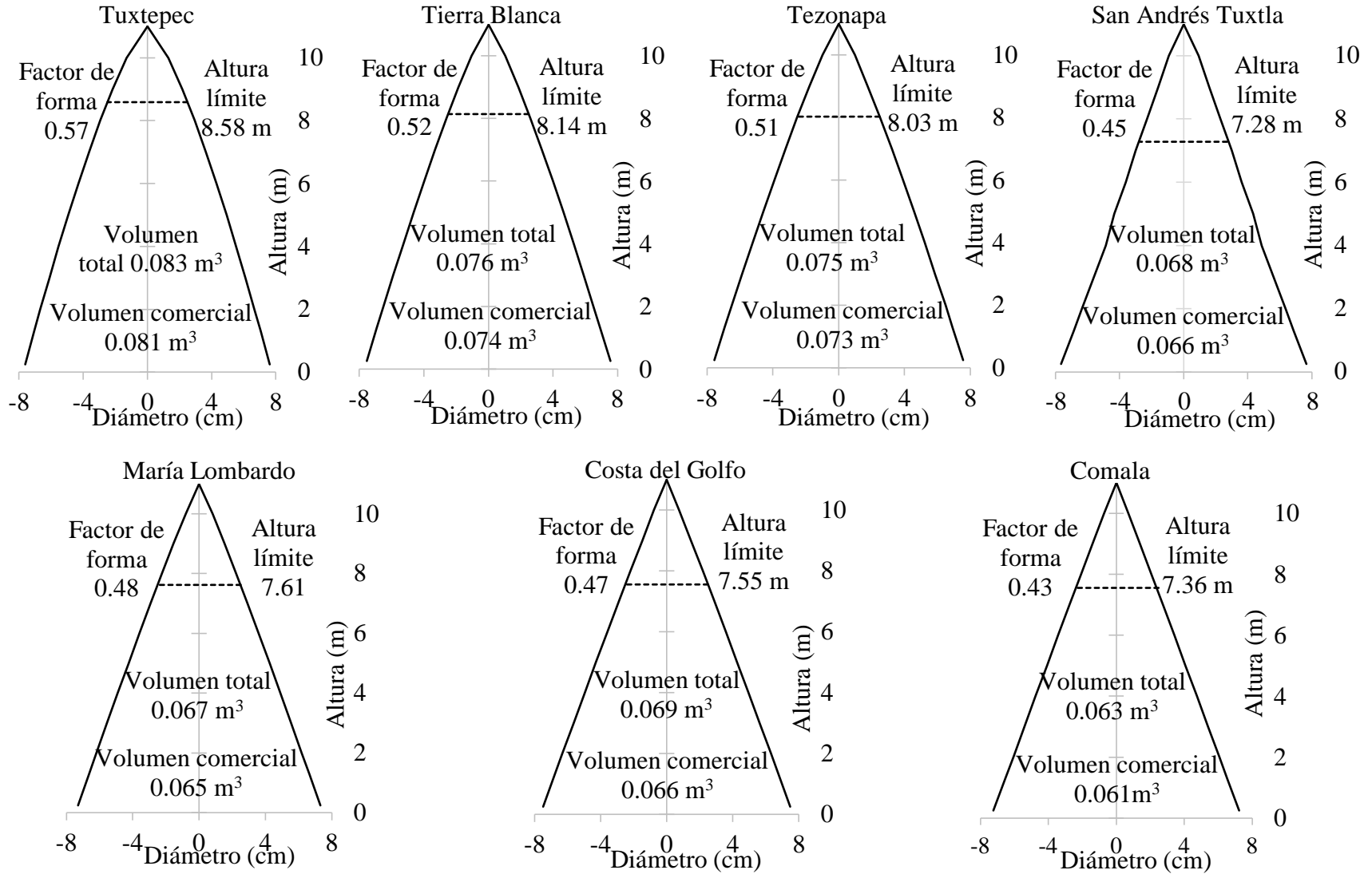


Figura 4. Variación del ahusamiento en procedencias de cedro rojo derivados del modelo tipo Clutter (1980).

El ahusamiento es el resultado del potencial genético y el ambiente, así como su interacción, sin embargo, los fustes geoméricamente más cilíndricos de Tuxtepec, Tierra Blanca y Tezonapa posiblemente también son un reflejo de su capacidad de resistencia o recuperación que tuvieron en la etapa juvenil al ataque de barrenador *Hypsipyla grandella* Zeller (tolerancia¹). En otros estudios con ensayos de procedencias de meliáceas se ha detectado esta capacidad potencial (Grijpma, 1976; Vega 1976; Newton *et al.*, 1993). Otro factor interesante es la poda natural, quizás estas procedencias también presentaron fuerte autopoda en la parte baja de sus fustes, ya que las ramas son fotosintéticamente activas, por lo tanto hubo una mayor concentración de sustancias elaboradas por la clorofila en la parte superior del fuste, por esta razón, el crecimiento diamétrico pudo incrementarse en esta parte traduciéndose en fustes más cilíndricos.

El modelo de ahusamiento tipo Clutter (1980) revela que todas las procedencia son diferentes, esto se puede deber a que mientras que en el modelo de la variable combinada de Spurr (1952) cada árbol es una observación, en el modelo de ahusamiento cada árbol representa múltiples observaciones, lo que implica que generalmente tiende a ser mucho más sensible cuando se plantean pruebas de hipótesis, básicamente es porque está explorando a lo largo del fuste, por lo tanto hay una mayor cantidad de grados de libertad en el error permitiendo probar con más éxito hipótesis en los parámetros de ahusamiento. Por otro lado, Clutter (1980) lleva a un modelo de volumen tipo Schumacher-Hall, cuando se ajusta de manera independiente el modelo de volumen los estimadores difieren (Anexo 8.1), básicamente porque en uno se están minimizando las desviaciones sobre el fuste y en el otro se están minimizando las desviaciones sobre el

¹ Tolerancia: es la habilidad genética de una planta para soportar un ataque y sobreponerse mediante recuperación de tejidos o adición de tejidos nuevos después de la destrucción o remoción causada por el insecto.

volumen, pero, con estos estimadores se pudieron realizar cálculos sobre el fuste que resultaron ser útiles.

5.3. Procedencias en los sistemas compatibles de ahusamiento y volumen

Al utilizar la regresión SUR (*Seemingly Unrelated Regressions*), se minimizó el error estándar e incrementó el nivel de significancia de los estimadores tanto en el ahusamiento como en volumen comercial, haciendo más eficientes los parámetros (Zellner, 1962; Rose y Lynch, 2001), por esta razón, al realizar la prueba de adicionalidad simultáneamente en los parámetros de forma β y δ , se encontraron diferencias significativas por adición a Tuxtepec ($\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq \beta_5 \neq \beta_6$ $p < 0.05$; $\delta_1 \neq \delta_2 \neq \delta_3 \neq \delta_4 \neq \delta_5 \neq \delta_6$, $p < 0.05$) por lo que el efecto de la variable indicadora Z es significativo en los sistemas (Cuadro 6), semejante a lo obtenido por Quiñonez *et al.* (2014) quienes reportaron diferencias en los parámetros que definen el ahusamiento y el volumen comercial para cinco especies de pino.

El modelo Fang y Bailey (1999) caso I-a, asume que los coeficientes de forma β y δ en ambos lados del sistema son similares por cada una de las progenies (el coeficiente de forma en delta calculado como $\beta = \delta_i \times k$), sin embargo, Tuxtepec sigue siendo la procedencia con mejor forma ($\beta_0 = 0.45$ - $\delta_0 = 0.41$). Por el contrario, Comala posee los fustes más cónicos ($\beta_6 = 0.33$ - $\delta_6 = 0.32$). Al compararse con el primer enfoque del modelo de la variable combinada y el factor de forma directo los estimadores son similares, sin embargo, el sistema es más sensible y detecta diferencias en todas las fuentes geográficas por adición a Tuxtepec.

En los programas de mejoramiento genético forestal nunca se tiene la certeza de saber si las características observadas son determinadas principalmente por el ambiente en el cual crecen las procedencias o por el potencial genético de los mismos, ya que ambos factores interactúan para afectar al fenotipo del individuo (Zobel y Talbert, 1988).

Cuadro 6. Resultados de la prueba de adicinalidad en los sistemas de Fang y Bailey (1999) para las progenies de cedro.

Parámetro	Caso I-a			Caso II-a			Caso II-b		
	Estimador	EE [†]	Pr > t	Estimador	EE [†]	Pr > t	Estimador	EE [†]	Pr > t
α_0	0.009595	0.000446	<.0001	0.011196	0.000409	<.0001	0.01218	0.000383	<.0001
β_0	0.451668	0.00689	<.0001	0.442155	0.00632	<.0001	0.431096	0.00584	<.0001
β_1	-0.04528	0.00812	<.0001	-0.04231	0.00747	<.0001	-0.0371	0.00691	<.0001
β_2	-0.0496	0.00677	<.0001	-0.04717	0.00624	<.0001	-0.04251	0.00577	<.0001
β_3	-0.08633	0.0168	<.0001	-0.08735	0.0154	<.0001	-0.0847	0.0144	<.0001
β_4	-0.10544	0.00877	<.0001	-0.10381	0.00802	<.0001	-0.09925	0.00743	<.0001
β_5	-0.08045	0.00731	<.0001	-0.07993	0.00672	<.0001	-0.0761	0.00623	<.0001
β_6	-0.11633	0.0109	<.0001	-0.11403	0.00998	<.0001	-0.10732	0.0093	<.0001
δ_0	0.000032	4.54E-07	<.0001	0.000048	9.44E-07	<.0001	0.000062	1.69E-06	<.0001
δ_1	-2.22E-06	6.33E-07	0.0005	-2.17E-06	8.99E-07	0.0161	-1.39E-06	1.20E-06	0.2469
δ_2	-2.68E-06	4.91E-07	<.0001	-2.99E-06	6.89E-07	<.0001	-4.01E-06	9.26E-07	<.0001
δ_3	-6.96E-06	1.13E-06	<.0001	-0.00001	1.57E-06	<.0001	-0.00001	2.09E-06	<.0001
δ_4	-4.88E-06	7.32E-07	<.0001	-6.26E-06	1.04E-06	<.0001	-8.26E-06	1.37E-06	<.0001
δ_5	-5.20E-06	5.36E-07	<.0001	-7.06E-06	7.56E-07	<.0001	-9.22E-06	1.02E-06	<.0001
δ_6	-6.49E-06	9.10E-07	<.0001	-8.61E-06	1.31E-06	<.0001	-0.00001	1.72E-06	<.0001
θ_0				1.882046	0.00436	<.0001	1.641001	0.0184	<.0001
γ_0							1.101844	0.016	<.0001

[†]EE: error estándar de los parámetros.

Los sistemas presentaron altos valores en el coeficiente de determinación ajustado ($R_{Adj}^2 > 0.94$), valores bajos de RMSE, CV, \bar{E} , (Cuadro 7), por lo tanto, pueden utilizarse para la cubicación y la distribución de productos para cada procedencia. No obstante, se recomienda el sistema de Fang y Bailey (1999) caso I-a, por presentar mejor comportamiento en cuanto a los factores de forma en ambos lados del sistema, además, todos sus coeficientes de regresión fueron altamente significativos. El modelo seleccionado con variables indicadoras es equivalente a tener siete modelos específicos para cada grupo de progenies, los cuales son estadísticamente diferentes.

Cuadro 7. Comparativo y estadísticos de bondad de ajuste de los sistemas Fang y Bailey (1999).

Caso	Función de volumen comercial				Función de ahusamiento			
	RMSE [†] (m ³)	CV [¶] (%)	\bar{S} [§] (m ³)	R_{Adj}^2 ^p	RMSE [†] (cm)	CV [¶] (%)	\bar{S} [§] (cm)	R_{Adj}^2 ^p
I-a	0.011	19.585	0.0003	0.940	1.080	13.181	0.30	0.964
II-a	0.009	16.554	0.001	0.956	0.982	12.383	0.12	0.970
II-b	0.008	14.620	0.001	0.966	0.957	12.071	0.11	0.971

[†]RMSE: raíz de los cuadrados medios del error; [¶]CV: coeficiente de variación; [§] \bar{S} : sesgo promedio; ^p R_{Adj}^2 coeficiente de determinación ajustado.

Torres y Magaña (2001) mencionaron que es común que la mayor parte de los modelos de volumen muestren problemas de heterocedasticidad dado que a mayores valores de diámetros y alturas la variación en los volúmenes de los árboles se hace más grande; es decir, se incrementan las varianzas de los parámetros.

Los tres sistemas presentan residuales heterocedásticos, sin embargo, en el modelo Fang y Bailey (1999) caso I-a se considera que el problema no es grave (Figura 5), dado que los valores de la prueba t son altamente significativos $p \leq 0.0001$ para las hipótesis planteadas.

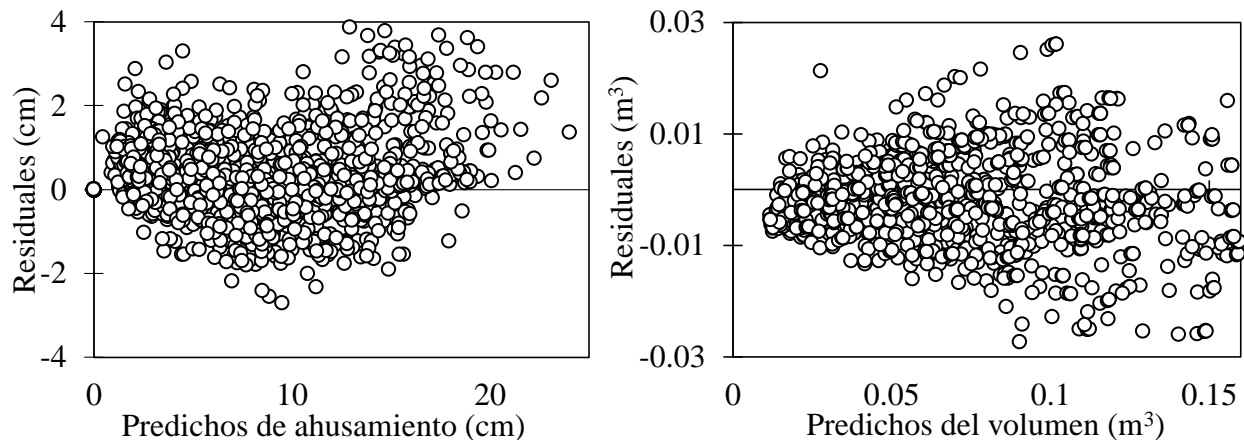


Figura 5. Distribución de los residuales para el sistema de ahusamiento y volumen comercial tipo Fang y Bailey (1999) caso I-a.

5.4. Sistema genérico compatible de ahusamiento y volumen

El sistema reducido de Fang y Bailey (1999) caso I-a, presenta buena bondad de ajuste (Cuadro 8), sus residuales son ligeramente heterocedásticos en la función del volumen comercial (Figura 6), sin embargo, los parámetros globales son altamente significativos, por lo tanto, se puede emplear para cubicar y realizar la distribución de productos para las plantaciones operativas de cedro rojo establecidas en la región de Tezonapa, Veracruz, con origen genético desconocido. Este mismo sistema también fue ajustado por Galán (2007) para plantaciones de cedro rojo, sugiriendo que este modelo es el más adecuado para estimar el volumen y ahusamiento en dicha especie.

Cuadro 8. Estadísticos y bondad de ajuste del sistema genérico de ahusamiento y volumen comercial tipo Fang y Bailey (1999) caso I-a.

Estadístico	Estimadores, error estándar y estadísticos de ajuste			
	α	β	δ	θ
ϖ_i^\dagger	0.000125**	1.8124**	0.6972**	0.000029**
$\varepsilon_i^{\ \}$	6.069E-6	0.0182	0.0243	1.355E-7
Componente	RMSE ^{††} (m ³)	CV ^{\ \} (%)	\bar{S} ^{§§} (m ³)	$R_{Adj}^{2\ P\ P}$
d^\S	1.112	13.531	0.319	0.961
Vc^P	0.011	19.983	0.0001	0.940

[†] ϖ_i : estimador; ^{\|\} ε_i : error estándar; [§] d : diámetro parcial; ^P Vc : volumen comercial; ^{††}RMSE: raíz de los cuadrados medios del error; ^{\|\}CV: coeficiente de variación; ^{§§} \bar{S} : sesgo promedio; ^{P\ P} R_{Adj}^2 : coeficiente de determinación ajustado; ** parámetros significativos ($p \leq 0.0001$).

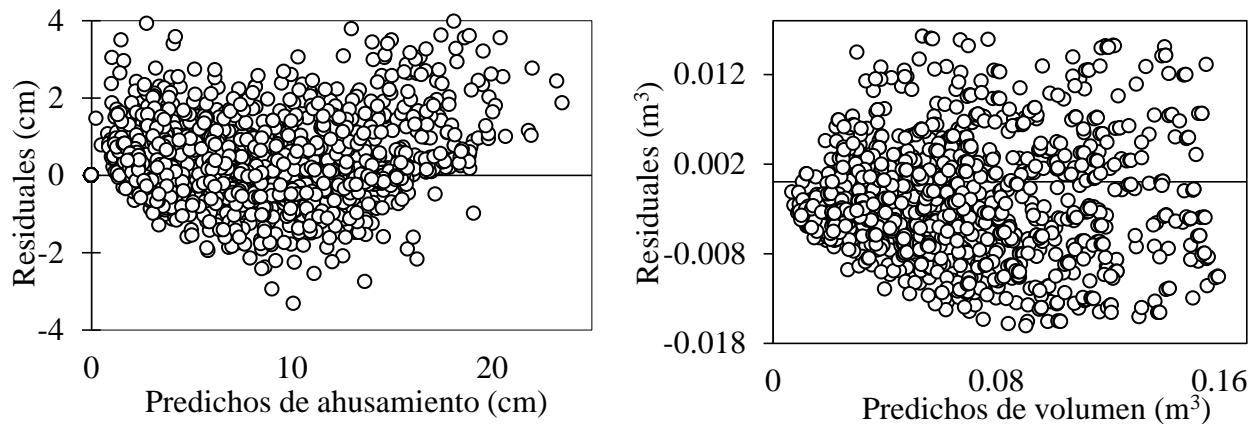


Figura 6. Distribución de los residuales para el sistema reducido Fang y Bailey (1999) caso I-a.

6. CONCLUSIONES

En todos los enfoques la progenie de cedro rojo de Tuxtepec presentó los fustes geoméricamente más cilíndricos superando a la procedencia local de Tezonapa, por lo tanto el movimiento geográfico de esta procedencia fue positiva en esta característica.

La principal línea de acopio de germoplasma para proveer a los propietarios de la región de Tezonapa, Veracruz, podría ser la procedencia de Tuxtepec de acuerdo a su factor de forma, ahusamiento y volumen comercial.

Con los sistemas de ahusamiento y volumen comercial complementado con variables indicadoras se da la opción a los investigadores y silvicultores de tener una herramienta más eficiente y práctica para la cubicación y la distribución de productos en cada una de las siete procedencias de cedro rojo, del mismo modo con el modelo genérico para plantaciones con origen genético desconocido.

7. LITERATURA CITADA

- Bailey, R. L. 1995. Upper-stem volumes from stem-analysis data: an overlapping bolt method. *Can. J. For. Res.* 25:170-173.
- Barrio, M., F. Castedo D., J. Majada G. y A. Hevia C. 2009. Manual básico de la poda y formación de los árboles forestales. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 255 p.
- Bi, H. 2000. Trigonometric variable-form taper equations for Australian eucalyptus. *For. Sci.* 46:397-409.
- Bravo, M., A. 2007. Estimación maderable y evaluación financiera de plantaciones forestales comerciales de cedro y caoba en Oaxaca, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México, México. 86 p.
- Briceño V., A. 1997. Aproximación hacia un manejo integrado del barrenador de las meliáceas, *Hypsipyla grandella* (Zeller). *Revista Forestal Venezolana* 41:23-28.
- Burkhart, H. E. 1977. Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. *South. J. of Appl. For.* 1:7-9.
- Burkhart, H. E., Tomé, M. 2012. *Modeling Forest Trees and Stands*; Springer: New York, NY, USA. 457 p.
- Caballero, M. 1982. Empleo de coeficientes mórficos en la elaboración de tablas de volúmenes de cedro rojo. *Boletín Divulgativo* 26-B. Secretaria de Agricultura y Ganadería. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. México. D.F. 27 p.
- Clutter, J. L. 1980. Development of taper functions from variable-top merchantable volume equations. *For. Sci.* 26:117-120.

- Corral R., 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). *For. Ecol. Manage.* 238:118-129.
- Corral R., S. y J. J. Návar C. 2009. Comparación de técnicas de estimación de volumen fustal total para cinco especies de pino de Durango, México. *Rev. Chapingo S. C. For. Amb.* 15:5-13.
- Cruz, C., F. 2007. Modelos de volumen y crecimiento en altura dominante para *Pinus cooperi* Blanco en el estado de Durango, México. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México, México. 69 p.
- Da Silva, J., B. Borders, and G. Brister. 1994. Estimating tree volume using a new form factor. *The Commonwealth Forestry Review* 73:14-17.
- Demaerschalk, J. P. 1972. Converting volume equations to compatible taper equations. *For. Sci.* 18:241-245.
- Draper, N. R., and H. Smith. 1981. *Applied Regression Analysis*. 2da. ed. John Wiley & Sons. New York. 709 p.
- Fang, Z., and R. L. Bailey. 1999. Compatible volume and taper models with coefficients for tropical species on Hainan Island in Southern China. *For. Sci.* 45:85-100.
- Galán, L., R. 2007. Crecimiento y rendimiento de especies arbóreas en una plantación de enriquecimiento de acahuales en el sur de Oaxaca. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México, México. 93 p.
- Gama F., F., J. R. dos Santos, y J. C. Mura. 2010. *Eucalyptus* biomass and volume estimation using interferometric and polarimetric SAR data. *Remote Sensing* 2:939-956.

- Grijpma, P. 1976. Resistance of Meliaceae against the shoot borer *Hypsipyla* with particular reference to *Toona ciliata* MJ Roem. var. *australis* (FV Muell.) C. DC. Studies on the shootborer *Hypsipyla grandella*, pp: 90-96.
- Hernández P., D., H. M. De Los Santos P., G. Ángeles P., J. R. Valdez L. y V. H. Volke H. 2013. Funciones de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. Rev. Mex. Cien. For. 4:34-45.
- Interian K., V., J. Valdez H., E. García M., A. Romero M., M. A. Borja de la R. y H. Vaquera H. Arquitectura y morfometría de dos especies arbóreas en una selva baja caducifolia del sur de Yucatán, México. Boletín de la Sociedad Botánica de México 85:17-29.
- Kozak, A. 2004. My last words on taper functions. For. Chron. 80:507-515.
- Lema T., Á. 1995. Dasometría. Algunas aproximaciones estadísticas a la medición forestal. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Ciencia Forestales. Medellín. 400 p.
- Maldonado M., F., J. Jasso M., D. J. Palma L., S. Salgado M. y V. A. González H. 2006. Dinámica de materia orgánica, P y K en suelos de sistemas agroforestales “cedro-plátano” en Tabasco, México. Rev. Fitotec. Mex. Vol. 29:223-230.
- Max, T. A., and H. E. Burkhart. 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. For. Sci. 22:283-289.
- Mesén, F. 1994. Ensayos de procedencias en especies forestales: establecimiento, manejo, evaluación y análisis. In: Manual sobre mejoramiento genético forestal con referencia especial a América Central.
- Montgomery D., C., and E.A. Peck. 1982. Introduction to linear regression analysis. Wiley. New York, 504 p.

- Návar J., C. Contreras J. y C. Estrada M. 1997. Ajuste de siete modelos de ahusamiento a los perfiles fustales de *Pinus hartwegii* Lindl. del noreste de México. *Agrociencia* 31:73-81.
- Newnham, R. 1992. Variable-form taper functions for four Alberta tree species. *Can. J. For. Res.* 22:210-223.
- Newton, A. C., R. R. Leakey, and J. F. Mesén. 1993. Genetic variation in mahoganies: its importance, capture and utilization. *Biodiversity and Conservation* 2:114-126.
- Newton, A. C., J. P. Cornelius, J. F. Mesén, and R. R. B. Leakey. 1995. Genetic variation in apical dominance of *Cedrela odorata* seedlings in response to decapitation. *Silvae Genética* 44:146-150.
- Patiño V., F. 1997. Genetic resources of *Swietenia* and *Cedrela* in the neotropics: Priorities for coordinated actions. *Forest Genetic Resources* No. 25. FAO, Roma. 12 p.
- Pennington, T. D., y J. Sarukhán. 2005. Árboles de México. Manual para la identificación de las principales especies. Universidad Nacional Autónoma de México. Fondo de Cultura Económica. México. 523 p.
- Quiñónez, B., G. 2009. Estimación de relaciones alométricas para el manejo forestal del Ejido San Diego de Tezains, Durango, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto Tecnológico de El Salto. Durango. México. 51 p.
- Quiñónez B., G., H. M. De Los Santos P., J. G. Álvarez G. y A. Velázquez M. 2014. Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para las principales especies de *Pinus* en Durango, México. *Agrociencia* 48:553-567.
- Quirós, R., O. Chinchilla y M. Gómez. 2005. Rendimiento en aserrío y procesamiento primario de madera proveniente de plantaciones forestales. *Agronomía Costarricense* 29:7-15.

- Rose, C. E., and T. B. Lynch. 2001. Estimating parameters for tree basal area growth with a system of equation and seemingly unrelated regressions. *Forest Ecol. Manag.* 148:51-61.
- Sánchez, M. V., y C. Velázquez E. 1998. Evaluación de dos insecticidas biológicos en el control de *Hypsiphylia grandella* (Zeller), barrenador de brotes de las Meliáceas. *Ciencia Forestal en México* 23:33-39.
- Sánchez, M. V., G. Salazar G., J. J. Vargas H., J. López U. y J. Jasso M. 2003. Parámetros genéticos y respuesta a la selección en características del crecimiento de *Cedrela odorata* L. *Rev. Fitotec. Mex.* 26:19-27.
- SAS Institute Inc. 2004. *SAS/ETS® 9.1 User's Guide*. Cary, NC. 2416 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2010. Norma Oficial Mexicana. Nom-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestre. Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión o cambio. Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación. Jueves 30 de diciembre de 2010. México, D. F. México. Segunda Sección: 1-78.
- Sierra de Grado, R., R. Diez B. y R. Alía M. 1999. Evaluación de la rectitud del fuste en seis procedencias de *Pinus pinaster* Ait. *Sist. Recur. For.* 8:263-278.
- Spurr, S. H. 1952. *Forest inventory*. Ronald Press. Nueva York. 476 p.
- Tapia J., y J. Návar. 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* 13:19-28.
- Torres, R. J. M., y O. S. Magaña T. 2001. *Evaluación de plantaciones forestales*. Editorial. Limusa. México. 472 p.

- Vega, L. E. 1976. Influencia de la silvicultura en el comportamiento de *Cedrela* in Surinam. In: Whitmore, J. L. (Ed.). Studies on the Shootborer *Hypsipyla grandella* (Zeller) Lep. Pyralidae. Volume III. IICA Miscellaneous publication no.101, CATIE, Turrialba, Costa Rica. pp. 26-49.
- Zavala Z., D. 1996. Coeficientes de aprovechamiento de trocería de pino en aserraderos banda. Revista Ciencia Forestal en México 21:165-181.
- Zellner, A. 1962. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias. J. Am. Stat. Assoc. 57:348-368.
- Zobel, B., y J. Talbert. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Editorial Limusa SA, México.

8. ANEXO

8.1. Coeficientes derivados y estimados en el modelo de Schumacher-Hall.

Procedencia	Estado	Schumacher-Hall derivado de Clutter (1980)			Ajuste independiente de Schumacher-Hall		
		C_0	C_1	C_2	C_0	C_1	C_2
Tuxtepec	Oaxaca	0.00028	1.854	0.387	0.00019	1.826	0.536
Tierra Blanca	Veracruz	0.00017	1.854	0.561	0.00014	1.826	0.650
Tezonapa	Veracruz	0.00015	1.854	0.616	0.00009	1.826	0.808
San Andrés Tuxtla	Veracruz	0.00005	1.854	1.001	0.00013	1.826	0.595
María Lombardo	Oaxaca	0.00010	1.854	0.750	0.00015	1.826	0.578
Costa del Golfo	Veracruz	0.00008	1.854	0.823	0.00011	1.826	0.710
Comala	Chiapas	0.00007	1.854	0.853	0.00034	1.826	0.226

Al integrar el modelo de ahusamiento puro tipo Clutter (1980) desde 0 hasta H y sustituir los parámetros estimados, se observa que la expresión del volumen total coincide con la expresión del volumen obtenido con el modelo tipo Schumacher-Hall, sin embargo, los estimadores son semi-equivalentes.