

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

VARIATION OF FORM FACTOR AND TAPER IN PROVENANCES OF SPANISH CEDAR (*Cedrela odorata* L.)

Rolando M. Tlaxcala-Méndez¹, Héctor M. de los Santos-Posadas^{1*}, Patricia Hernández-de la Rosa¹, José L. López-Ayala²

¹Postgrado en Ciencias Forestales, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5. 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. (hmsantos@colpos.mx). ²Instituto Tecnológico Superior de Zongolica. Carretera a la Compañía s/n, Tepetitlanapa-Zongolica km 4. 95005, Zongolica, Veracruz, México.

RESUMEN

El conocimiento de la geometría en los fustes de los árboles es relevante en los estudios de progenies para obtener germoplasma, debido a que los individuos mejores deben tener crecimiento adecuado y también las características mejores en la conformación del fuste. Para ello, es necesario evaluar la forma de los fustes mediante métodos analíticos. El objetivo de esta investigación fue identificar la progenie con el rendimiento mayor de aserrío considerando la forma, el ahusamiento y el volumen comercial de siete procedencias de *Cedrela odorata* L. establecidas en Tezonapa, Veracruz, México. Para esto, se realizaron muestreo destructivo de 211 árboles. Dos modelos de regresión lineal y no lineal se ajustaron y complementaron con pruebas de adicionalidad en los parámetros de forma y ahusamiento. Los resultados mostraron que los parámetros de forma de las progenies de Tuxtepec, Tierra Blanca y Tezonapa adoptaron forma de paraboloides, y las de María Lombardo, San Andrés Tuxtla, Costa del Golfo y Comala tendieron a la conicidad. Todas las progenies fueron estadísticamente diferentes en parámetros de ahusamiento, lo cual se atribuyó a la interacción genotipo-ambiente y a la invasión del barrenador *Hypsipyla grandella* Zeller. Además, los parámetros de forma se evaluaron en tres sistemas compatibles de ahusamiento y volumen, mediante el ajuste con estimación SUR (Seemingly Unrelated Regressions). La fuente geográfica de Tuxtepec presentó conicidad menor por su fustes geométricamente más cercanos al paraboloides (factor de forma, $ff=0.45$), por lo cual podría ser la línea principal para acopio de germoplasma y producción local.

ABSTRACT

Knowledge of tree stem geometry is relevant for progeny studies aiming to obtain germplasm since the best individuals should have adequate growth and the best characteristics of stem formation. Thus, it is necessary to evaluate stem form with analytical methods. The objective of this study was to identify the progeny with the highest milling yield, considering form factor, taper variation and commercial volume of seven provenances of *Cedrela odorata* L. established in Tezonapa, Veracruz, Mexico. To this end, destructive sampling of 211 trees was carried out. Two linear regression and two non-linear regression models were fit and complemented with tests of additionality in the parameters form and taper. The results showed that the form parameters of the progenies from Tuxtepec, Tierra Blanca and Tezonapa adopted a paraboloid shape, and those from María Lombardo, San Andrés Tuxtla, Costa del Golfo and Comala tended to be conical. All the progenies were statistically different in taper parameters, which is attributed to the interaction genotype-environment and to infestation by the borer *Hypsipyla grandella* Zeller. Moreover, form parameters were evaluated in three compatible form and taper systems fitted with SUR (Seemingly Unrelated Regressions) estimation. The geographical source of Tuxtepec was less conical because the stems were geometrically closer to a paraboloid (form factor, $ff=0.45$). Therefore, Tuxtepec could be the main line of germplasm collection for local production.

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

INTRODUCTION

One of the first Spanish cedar breeding programs in Mexico began in 1994 with a study of seven provenances established in

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: enero, 2015. Aprobado: octubre, 2015.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 50: 89-105. 2016.

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

INTRODUCCIÓN

Uno de los primeros Programas de Mejoramiento Genético (PMG) con cedro rojo en México se inició en 1994 con un estudio de siete procedencias establecidas en el Campo Experimental El Palmar del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en Tezonapa, Veracruz. El objetivo del estudio fue proporcionar germoplasma mejorado a los propietarios de la región, quienes aumentaron su interés en plantar cedro rojo en sus parcelas, por medio de sistemas agroforestales, porque su valor comercial es superior al de otras especies tropicales, con excepción de la caoba (Patiño, 1997; Sánchez *et al.*, 2003).

La mayoría de los PMG definen caracteres objetivo como la forma de los fustes, el crecimiento, la adaptabilidad, y la resistencia a plagas y enfermedades, dado que están relacionados con la calidad de la madera (Zobel y Talbert, 1988). El fuste expresa como los factores ambientales y el potencial genético o heredabilidad, y como su interacción, modifican la morfología de un árbol en el sitio (Chambel *et al.*, 2005).

La forma de los fustes en las pruebas de procedencias, solo se analiza durante la etapa juvenil con métodos subjetivos que pueden ser imprecisos. Los métodos con mediciones a lo largo del fuste suelen ser más exactos y no dependen de apreciaciones subjetivas, aunque, son más costosos y toman más tiempo (Sierra de Grado *et al.*, 1999). Por ello, el estudio de los fustes y la estimación de su volumen se pueden realizar mediante procedimientos matemáticos y estadísticos convenientes, como los factores de forma, los modelos de ahusamiento puro y los sistemas simultáneos 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). El tercero describe simultáneamente el perfil y el volumen del árbol (Cruz *et al.*, 2008).

the Experimental Station El Palmar of the National Institute of Research in Forestry, Agriculture and Livestock (INIFAP) in Tezonapa, Veracruz. The objective of the study was to provide improved germplasm to landowners of the region whose interest in planting red cedar in their agroforestry system plots was growing because its commercial value is higher than that of other tropical species, with the exception of mahogany (Patiño, 1997; Sánchez *et al.*, 2003).

Most of the breeding programs define target traits such as stem shape, growth, adaptability and resistance to pests and diseases since these are related to wood quality (Zobel and Talbert, 1988). The stem expresses how environmental factors and genetic potential or heritability, as well as their interaction, modify tree morphology at the site (Chambel *et al.*, 2005).

Stem shape in provenance trials are analyzed only during the juvenile stage with subjective methods, which can be imprecise. Methods that use measurements along the stem are usually more exact and do not depend on subjective appraisal, but they are more costly and time-consuming (Sierra de Grado *et al.*, 1999). For this reason, the study of tree stems, or boles, and the estimation of their volume can be carried out using appropriate mathematical and statistical procedures, such as form factors, pure taper methods and simultaneous taper and commercial volume systems. The first method assesses a form constant relating tree volume to a geometric solid of revolution that contains the same diameter and total height (Gama *et al.*, 2010). The second evaluates the coefficient of diameter narrowing along the stem and its integration provides the total and commercial volume (Bi, 2000). The third describes the tree profile and volume simultaneously (Cruz *et al.*, 2008).

Therefore, the study of stems is relevant because, when the sections are sawmilled, the most cylindrical stems have higher milling yield. This contributes economic profits, especially when differentiated markets are supplied with products of different qualities and dimensions (Zavala, 1996; Quirós *et al.*, 2005).

The objective of this study was to identify the red cedar provenance with the highest milling yield through comparison of performance in phenotypical characteristics such as form factor, taper and commercial volume in order to obtain germplasm

Por consiguiente, el estudio de los fustes es relevante dado que los más cilíndricos al momento de escuadrar sus trozas tienen rendimiento mayor de escuadría, 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).

El objetivo de este estudio fue identificar la procedencia de cedro rojo con rendimiento mayor de aserrío al comparar su desempeño en características fenotípicas, como el factor de forma, ahusamiento y volumen comercial, para obtener germoplasma de los mejores individuos y proveer a los propietarios de la región de Tezonapa, Veracruz. Se asumió que la geometría de los fustes es un rasgo determinado por los factores ambientales, el potencial genético y su interacción.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos de volumen y ahusamiento

El estudio de procedencias se localizó en el municipio de Tezonapa, Veracruz, México, en el Campo Experimental El Palmar del INIFAP (18° 32' 55 N, y 96° 47' 23 O y 180 m de altitud), en 1 ha (Cuadro 1). El clima es cálido húmedo, con precipitación anual de 2885 mm, temperatura media de 24.4 °C, mínima de 16.1 °C y máxima de 35.4 °C. La fisiografía es de terrenos planos y lomeríos con pendientes de 5 a 29 %, los suelos son acrisoles y vertisoles profundos con buen drenaje natural, textura migajón arcillo-arenosa y pH de 4.8 a 6.1 (Sánchez y Velázquez, 1998).

La información se obtuvo de 211 árboles, con 16 años de edad, producto del único aclareo aplicado al estudio de progenies en diciembre del 2010, para conformar un huerto semillero

from the best individuals for distribution among landowners of the Tezonapa region, Veracruz. It was assumed that the geometry of the stems is a trait determined by environmental factors, genetic potential and their interaction.

MATERIALS AND METHODS

Data on volume and taper

The provenance trial was conducted on 1.8 ha study of the INIFAP experimental station El Palmar located in the municipality of Tezonapa, Veracruz, México (18° 32' 55 N, and 96° 47' 23 W and 180 m altitude) (Table 1). The climate is hot humid with an annual precipitation of 2885 mm, mean temperature of 24.4 °C, and minimum and maximum temperatures of 16.1 °C and 35.4 °C. Flatlands and hills with slopes of 5 to 29 % make up the physiography. Soils are deep acrisols and vertisols with good natural drainage, crumbly textured sandy clay and pH 4.8 to 6.1 (Sánchez and Velázquez, 1998).

Information was obtained from 211 sixteen-year-old trees, which were the product of the only thinning applied to the progeny trial in December 2010 to establish a seed orchard with 126 individuals per hectare, as suggested by Zobel and Talbert (1988). Thinning covered the highest possible diversity in tree sizes and forms to eliminate dominant, co-dominant, intermediate and suppressed individuals. The data were obtained by stem analyses, recording the variables diameter at breast height (cm, *Dbh*), total height (m, *H*), diameter at different stem heights with bark (cm, *d*), and heights above ground level of each section (m, *h*). The first of these measurements was taken at 0.25 m, the second at 1.05 m (*Dbh*) and the following measurements were every 2 m until reaching the minimum diameter of 3 cm. The register included 1670 pairs of *d* and *h* data. For cubage calculations, we used the Overlapping Bolt

Cuadro 1. Localidades establecidas en la prueba de procedencias de cedro rojo en el Campo Experimental El Palmar INIFAP, Veracruz, México.

Table 1. Localities established in the provenance trial with Spanish cedar in the Experimental Station El Palmar, INIFAP, Veracruz, México.

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

con 126 individuos por ha, como lo sugirieron Zobel y Talbert (1988). El aclareo cubrió la diversidad mayor de tamaños y formas de árboles, para eliminar individuos dominantes, co-dominantes, intermedios y suprimidos. Los datos se obtuvieron mediante análisis troncales, las variables fueron diámetro normal (cm, Dn), altura total (m, H), diámetro con corteza a diferentes alturas del fuste (cm, d) y alturas para cada sección con respecto al suelo (m, h), la primera medición se realizó a 0.25 m, la segunda a 1.05 m (Dn) y las demás cada 2 m hasta tener un diámetro mínimo de 3 cm. El registro incluyó 1670 pares de datos de d y h . Para los cálculos de cubicación se usó el método de trozas traslapadas (Overlapping Bolt Method) propuesto por Bailey (1995), que permite obtener volúmenes totales y parciales precisos (Cruz *et al.*, 2008). Los datos de ahusamiento y volumen acumulado se presentan en la Figura 1.

Comparación de procedencias en el factor de forma

El modelo de Spurr (1952) de la variable combinada estima 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. Con esto se supone que el volumen del fuste es proporcional al volumen del cilindro ($V_a \propto V_c$), y se asume que el diámetro normal (Dn en cm) y la altura total (H en m) del cilindro y el árbol son los mismos.

El volumen se correlaciona con el Dn^2 y la H ; en este contexto el volumen del cilindro es:

Method, proposed by Bailey (1995), which obtains precise total and partial volumes (Cruz *et al.*, 2008). Figure 1 presents data on taper and accumulated volume.

Comparison of provenances by form factor

The Spurr (1952) combined variable model estimates the tree form coefficient, parting from the fact that an irregular shaped body (tree stem form) is commonly compared with a cylinder. It is assumed that the volume of the stem is proportional to the volume of a cylinder ($V_a \propto V_c$) and that diameter at breast height (Dbh in cm) and total height (H in m) of the cylinder and the tree are the same.

The volume correlates with Dbh^2 and H . In this context, the volume of the cylinder is

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

However, tree volume will always be smaller than the volume of the theoretical cylinder ($V_a < V_c$), and therefore, the tree volume should be proportional to the volume of the cylinder multiplied by a constant ($V_a \propto V_c \times C$) smaller than 1 ($C < 1$). Here, C is the tree form factor. This leads us to a first model in which tree volume will be approximately equal to the cylinder volume because of its proportionality constant, such that:

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

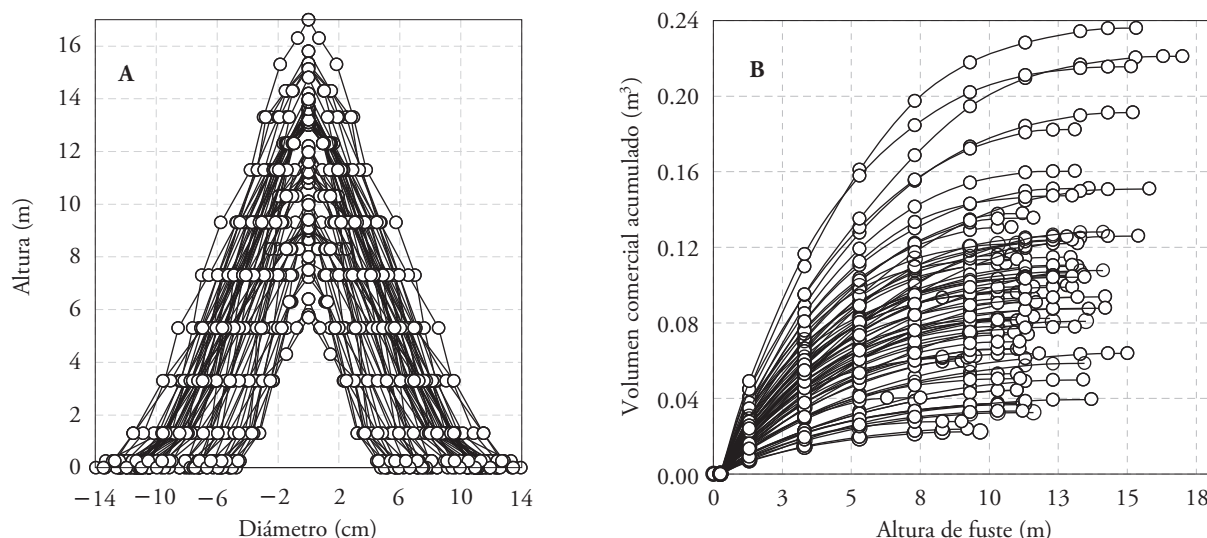


Figura 1. A) Alturas parciales en función de los diámetros parciales, y B) volumen comercial en función de la altura de fuste, para los árboles muestreados.

Figure 1. A) Partial heights in function of partial diameters, and B) commercial volume in function of stem height, for sampled trees.

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

Sin embargo, el volumen del árbol siempre será menor al volumen del cilindro teórico ($V_a < V_c$), por lo que el volumen del árbol debe ser proporcional al volumen del cilindro multiplicado por una constante ($V_a \propto V_c \times C$) menor a uno ($C < 1$), de aquí que C es el factor de forma de los árboles. Esto lleva a un primer modelo, en el cual el volumen del árbol será aproximadamente igual al volumen del cilindro por su constante de proporcionalidad:

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

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:

$$V_a \approx \beta \times (Dn^2 H) + \varepsilon \quad (4)$$

Eventualmente los árboles tienen un diámetro mínimo inventariable y cualquier individuo menor a este diámetro se asume con volumen cero, lo cual origina el siguiente modelo de la variable combinada:

$$V_a = \alpha + \beta \times (Dn^2 H) \times \frac{1}{k} + \varepsilon \quad (5)$$

donde α reflejará el efecto del diámetro mínimo inventariable y β será la constante de forma siempre que se considere a la constante $k = \pi/40000$.

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 5), se desarrolló una prueba de adicionalidad simple, mediante un análisis de regresión lineal e incorporando variables indicadoras (dummy) para denotar la ausencia o presencia de algún efecto aditivo (Montgomery *et al.*, 2005; Sheng *et al.*, 2011). Para ello se incorporaron 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, de no ser la procedencia base de Tuxtepec entonces:

Then

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

This evidence leads to the expression that represents the model of the constant morphic coefficient, assuming a zero intercept, in the following way:

$$V_a \approx \beta \times (Dbb^2 H) + \varepsilon \quad (4)$$

Eventually, for trees, there is a minimum measurable diameter and any individual with a smaller diameter is assumed to have zero volume, originating the following combined variable model:

$$V_a = \alpha + \beta \times (Dbb^2 H) \times \frac{1}{k} + \varepsilon \quad (5)$$

where α reflects the effect of the minimum measurable diameter and β will be the form constant as long as the constant $k = \pi/40000$ is considered.

To detect differences in intercepts and form factors among provenances in the combined variable model with the direct form factor (Equation 5), a test of simple additionality was developed using a linear regression analysis and incorporating indicator variables (dummies) to denote the absence or presence of some additive effect (Montgomery *et al.*, 2005; Sheng *et al.*, 2011). Dummy variables were incorporated into the provenances, where $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2 + \alpha_3 Z_3 + \alpha_4 Z_4 + \alpha_5 Z_5 + \alpha_6 Z_6$ and $\beta = \beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2 + \beta_3 Z_3 + \beta_4 Z_4 + \beta_5 Z_5 + \beta_6 Z_6$.

In the remainder of the document, if it is not the base provenance of Tuxtepec, then:

$$Z_1 = \begin{cases} 1, & \text{if it belongs to Tierra Blanca} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Z_2 = \begin{cases} 1, & \text{if it belongs to Tezonapa} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Z_3 = \begin{cases} 1, & \text{if it belongs to San Andrés Tuxtla} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Z_4 = \begin{cases} 1, & \text{if it belongs to María Lombardo} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Z_5 = \begin{cases} 1, & \text{if it belongs to Costa del Golfo} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

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

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

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

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

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

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

donde V_d 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 debidos a la adicionalidad y ε el error aleatorio. Los efectos toman como referencia a Tuxtepec, procedencia elegida por presentar mayor número de observaciones. La hipótesis considera la homogeneidad entre interceptos y factores de forma (*i.e.* $H_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0$). El procedimiento de estimación de los parámetros fue por mínimos cuadrados ordinarios.

Comparación de procedencias en el ahusamiento

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

$$d = \alpha Dn^\gamma H^\theta (H - h)^\delta + \varepsilon \quad (6)$$

No obstante, la Ecuación (6) tiene expresada la forma del fuste en dos componentes, es decir en la fracción de escala del volumen de fuste total ($\alpha Dn^\gamma H^\theta$) y en la fracción del volumen acumulado $(H - h)^\delta$. De aquí que α y δ pueden considerarse como los parámetros con influencia mayor en la determinación del volumen total y comercial. 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 $\delta = \delta_0 + \delta_1 Z_1 + \delta_2 Z_2 + \delta_3 Z_3 + \delta_4 Z_4 + \delta_5 Z_5 + \delta_6 Z_6$. El procedimiento

$$Z_6 = \begin{cases} 1, & \text{if it belongs to Comala} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

where V_d is the volume of the entire tree stem (m^3); Dbb is the diameter at breast height (cm); H is the total height (m); $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6$ are the dummy variables; α_0 and β_0 are the regression parameters; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ are the regression parameters due to additionality and ε the random error. The effects take Tuxtepec as the reference provenance, selected because it has the highest number of observations. The hypothesis considers homogeneity among intercepts and form factors (*i.e.*, $H_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0$). The procedure for estimating the parameters was by ordinary least squares.

Comparison of provenances by taper

To determine the differences in taper among provenances, the Clutter (1980) type model of pure taper was taken as the base and expressed as:

$$d = \alpha Dbb^\gamma H^\theta (H - h)^\delta + \varepsilon \quad (6)$$

Nevertheless, Equation (6) expresses stem form in two components, that is, in the scale fraction of the total stem volume ($\alpha Dbb^\gamma H^\theta$) and in the accumulated volume fraction $(H - h)^\delta$. It is here that α and δ can be considered the most influential parameters in determining total and commercial volume. Therefore, they were restated in function of the dummy variables in such a way that $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2 + \alpha_3 Z_3 + \alpha_4 Z_4 + \alpha_5 Z_5 + \alpha_6 Z_6$ and $\delta = \delta_0 + \delta_1 Z_1 + \delta_2 Z_2 + \delta_3 Z_3 + \delta_4 Z_4 + \delta_5 Z_5 + \delta_6 Z_6$. The procedure for estimating the parameters was ordinary least squares.

Where d is the diameter at a partial height h (cm), the rest of the variables have the same notation. The additive effects likewise have the Tuxtepec provenance as base. The working hypothesis poses homogeneity in the taper parameters (*i.e.* $H_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = \delta_5 = \delta_6 = 0$).

Commercial volume models

Three Fang and Bailey (1999) type systems were tested to estimate commercial volume and taper simultaneously. These models permit comparing stem form among provenances in a more complete way, that is, in two form parameters. To this end, we replaced the total volume model of Schumacher-Hall, implicit in the systems, with the combined variable model with the direct form factor in β . Also, the taper function and the structure of the volume of the non-commercial tip share another form

de estimación de los parámetros fue por mínimos cuadrados ordinarios.

Donde d es el diámetro a la altura parcial h (cm); y las demás variables tienen la misma notación. Los efectos aditivos tienen igualmente como base a la procedencia de Tuxtepec. La hipótesis de trabajo plantea la homogeneidad en los parámetros de ahusamiento (*i.e.* $H_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = \delta_5 = \delta_6 = 0$).

Modelos de volumen comercial

Tres sistemas tipo Fang y Bailey (1999) se probaron para estimar el volumen comercial y el ahusamiento simultáneamente. Estos modelos permiten 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 . Además, 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 las procedencias diferentes de los árboles (Cuadro 2), Corral *et al.* (2007) y Quiñonez *et al.* (2014) utilizaron un enfoque similar en ajustes globales considerando variables dummy para distintas especies de pino. 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.

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 estimación SUR. Pruebas iniciales de ajuste del sistema de ecuaciones más sencillo (caso I-a) sugieren evidencia de autocorrelación y heterocedasticidad bajo SUR y que estas incrementan poco la varianza del sistema y la escala de los errores estándar de los parámetros. Quiñonez *et al.* (2014) recomiendan este procedimiento de ajuste cuando los parámetros globales se replantean en función de variables indicadoras que absorben gran parte de la variabilidad del sistema y una corrección inadecuada de la autocorrelación y heterocedasticidad podría aumentar el sesgo de los parámetros estimados.

La estimación SUR es apropiada para el ajuste simultáneo de ecuaciones, minimizar el error estándar e incrementar el nivel de significancia de los estimadores, tanto en la ecuación de ahusamiento como en la del volumen comercial, aumentando la sensibilidad de las pruebas de hipótesis en los parámetros de forma (Rose y Lynch, 2001). El procedimiento MODEL de

parameter δ (Fang and Bailey, 1999). Therefore, these two overall parameters were restated in function of the dummy variables to define the additive effect of the different provenances of the trees (Table 2). Corral *et al.* (2007) and Quiñonez *et al.* (2014) used a similar approach in overall adjustments considering dummy variables for different species of pine. Like the additionality test of the form factors and pure taper, we used the same base provenance and description of the dummy variables.

Fitting strategy

Parameter estimation for the Fang and Bailey (1999) systems, case I-a, case II-a, case II-b, was under SUR estimation. Initial adjustment tests of the simplest system of equations (case I-a) suggest evidence of self-correlation and heteroscedasticity under SUR and that these increase variance of the system, while the scale of standard errors of the parameters increase very little. Quiñonez *et al.* (2014) recommends this fitting procedure when the overall parameters are restated in function of dummy variables that absorb a large part of the system variability, and an inadequate correction of self-correlation and heteroscedasticity could increase the bias of the estimated parameters.

SUR estimation is appropriate for simultaneous equation fitting, to minimize standard error and to increase the level of significance of the estimators in both the taper equation and commercial volume, increasing hypothesis test sensitivity in the form parameters (Rose and Lynch, 2001). We followed the MODEL procedure of SAS/ETS™ (SAS Institute Inc., 2004) to adjust the models.

To compare the systems and select the best goodness of fit, we used the fitted coefficient of determination (R^2_{Adj}), which measures the variability explained by the taper and commercial volume model, the root mean squared error (RMSE), which provides the measure of the average differences between estimated and observed values, the coefficient of variation (CV %), which explains variability relative to the mean response of the dependent variable and the average absolute ($\bar{S}$) bias and provides information on the tendency of the model to under-or overestimate the response variable (Diéguez *et al.*, 2003; Galán *et al.*, 2008; Quiñones *et al.*, 2014). These statistics are calculated with the following expressions:

$$R^2_{Adj} = 1 - \left[\frac{n - p \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 1 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \right] \quad (7)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n - p} \right]^{0.5} \quad (8)$$

Cuadro 2. Sistemas compatibles ajustados a las procedencias de cedro rojo establecidas en Tezonapa, Veracruz, México.
Table 2. Compatible systems fit to the Spanish cedar provenances established in Tezonapa, Veracruz, Mexico.

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

V_c es el volumen comercial (m^3); d es el diámetro a la altura parcial h (cm); h es la altura parcial de fuste (m); H es la altura total de fuste (m); $k = \pi/40000$; α , β , δ , θ , 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. V_c is the commercial volume (m^3); d is diameter at partial height h (cm); h is the partial height of the stem (m); H is the total height of the stem (m); $k = \pi/40000$; α , β , δ , θ are the regression parameters; Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , Z_5 , Z_6 are dummy variables for each progeny; β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , β_5 , β_6 , δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 , δ_5 , δ_6 ; are the regression parameters due to additionality.

SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004) se siguió para el ajuste de los modelos.

Para comparar los sistemas y seleccionar el de mejor bondad de ajuste, se utilizó el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{Adj}) que mide la variabilidad explicada por el modelo de ahusamiento y del volumen comercial, la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) que proporciona la medida de las diferencias en promedio entre los valores estimados y los observados, el coeficiente de variación (CV %) que explica la variabilidad relativa en relación con la respuesta media de la variable dependiente y el sesgo promedio absoluto ($\bar{S}$) y proporciona información sobre la tendencia del modelo a subestimar o sobreestimar la variable respuesta (Diéguez *et al.*, 2003; Galán *et al.*, 2008; Quíñones *et al.*, 2014). Estos estadísticos se calculan con las expresiones:

$$R^2_{Adj} = 1 - \left[\frac{n - p \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 1 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right] \quad (7)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n - p} \right]^{0.5} \quad (8)$$

$$CV(\%) = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - p) \right]}{\bar{y}} \times 100 \quad (9)$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (10)$$

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.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Procedencias y factor de forma

La prueba de comparación de grupos de procedencias por adición a Tuxtepec (Cuadro 3) 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 estimadores de parámetros no son significativamente diferentes de cero a una probabilidad de rechazo de 0.05. Para los factores de forma, la procedencia base de Tuxtepec posee fustes más esbeltos, cercanos al paraboloide ($ff = 0.4$). Al respecto

$$CV(\%) = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - p) \right]}{\bar{y}} \times 100 \quad (9)$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (10)$$

where y_i , $\hat{y}_i$ and $\bar{y}_i$ are the observed, estimated and measured values, respectively, of the response variable; n is the number of observations and p is the number of parameters in the system.

RESULTS AND DISCUSSION

Provenances and form factor

The test comparing groups of provenances by addition to Tuxtepec (Table 3) indicates that all of the 16-year-old progenies have the same intercept to the origin ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6$, $p > 0.05$), since the parameter estimators are not significantly different from zero at a 0.05 probability of rejection. Regarding the form factors, the Tuxtepec base provenance has slenderer stems, nearly paraboloid ($ff = 0.44$). In this respect, we found that the geographical sources Tierra Blanca ($\beta_0 = \beta_1$, $p > 0.05$), Tezonapa ($\beta_0 = \beta_2$, $p > 0.05$) and San Andrés Tuxtla ($\beta_0 = \beta_3$, $p > 0.05$) were not statistically different, whereas María Lombardo, Costa del Golfo and Comala are different because additionality in the form parameters is statistically significant ($\beta_4 \neq \beta_5 \neq \beta_6$, $p \leq 0.05$).

The negative value of the additionality parameters β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , β_5 and β_6 (Table 3) is due to the effect of the provenances and indicates that the form factor in the geographic sources of Tuxtepec, Tierra Blanca, Tezonapa and San Andrés Tuxtla is similar, tending toward paraboloid. In contrast, the provenances Costa del Golfo, María Lombardo and Comala, even when the diameters at breast height and total height are the same, are much more conical.

Up to a certain point, form factors can be considered a phenotypical characteristic peculiar to the provenances, the result of genetic potential or “heritability” and the environment in which they grow—soil, wind, moisture, climate, precipitation—as well as of the effect of the pest *Hypsipyla grandella* Zeller (Zobel and Talbert, 1988).

Cuadro 3. Resultados de la prueba de adicinalidad con el modelo de la variable combinada de Spurr (1952) con el factor de forma directo.**Table 3. Results of the additionality test with the combined variable model of Spurr (1952) with the direct form factor.**

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 ♦ α_0, β_0 : regression parameters from the base provenance; $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \alpha_3, \beta_3, \alpha_4, \beta_4, \alpha_5, \beta_5, \alpha_6, \beta_6$: additionality parameters due to the provenances.

se encontró que estadísticamente no hubo 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 ($\beta_0=\beta_3$, $p>0.05$); al contrario, María Lombardo, Costa del Golfo y Comala son diferentes, ya que la adicinalidad en los parámetros de forma es estadísticamente significativa ($\beta_4\neq\beta_5\neq\beta_6$, $p\leq 0.05$).

El valor negativo de los parámetros de adicinalidad $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ y β_6 (Cuadro 3) corresponde al efecto de las procedencias, e indica que el factor de forma en las fuentes geográficas de Tuxtepec, Tierra Blanca, Tezonapa y San Andrés Tuxtla es similar, tendiendo al paraboloide, mientras que para las procedencias de Costa del Golfo, María Lombardo y Comala, aunque 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, es resultado del potencial genético o heredabilidad y del ambiente en el cual crecen, como suelo, viento, humedad, clima, precipitación, así como el efecto de la plaga *Hypsipyla grandella* Zeller (Zobel y Talbert, 1988).

Provenances and taper

The search for evidence to show the different stem forms among provenances was more sensitive in the additionality test with the Clutter (1980) pure taper model. The results (Table 4) indicate that the geographical sources Tierra Blanca, Tezonapa, San Andrés Tuxtla, María Lombardo, Costa del Golfo and Comala, by addition to Tuxtepec, have different tapers. That is, there are significant differences in the parameter of the volume scale fraction of the entire stem ($\alpha_1\neq\alpha_2\neq\alpha_3\neq\alpha_4\neq\alpha_5\neq\alpha_6$, $p<0.05$) and the parameter of the accumulated volume fraction ($\delta_1\neq\delta_2\neq\delta_3\neq\delta_4\neq\delta_5\neq\delta_6$, $p<0.05$); thus, the effect of the dummy variable Z was significant.

In the Clutter (1980) type model for taper, it can be observed that all the estimators of the additionality parameters are significantly different from zero. This indicates that, unlike the first approach based on total tree form factor (with a single observation per individual), all the provenances have different tapers relative to the base provenance (Tuxtepec). Given the fact that average *Dbh* was 13.5 cm and average *H* was 11 m, when calculating the total stem volume by provenance with the Schumacher-Hall

Procedencias y ahusamiento

La búsqueda de evidencias para mostrar las formas diferentes de fuste entre procedencias fue más sensible en la prueba de adicionalidad, con el modelo de ahusamiento puro tipo Clutter (1980). Los resultados (Cuadro 4) indican que las fuentes geográficas de Tierra Blanca, Tezonapa, San Andrés Tuxtla, María Lombardo, Costa del Golfo y Comala por adición a Tuxtepec tienen ahusamiento diferente, es decir, hay diferencias significativas en el parámetro de la fracción de escala de volumen de fuste total ($\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq \alpha_4 \neq \alpha_5 \neq \alpha_6$, $p \leq 0.05$) y el parámetro de la fracción del volumen acumulado ($\delta_1 \neq \delta_2 \neq \delta_3 \neq \delta_4 \neq \delta_5 \neq \delta_6$, $p \leq 0.05$) por lo que el efecto de la variable indicadora Z fue significativo.

En el modelo tipo Clutter (1980) para ahusamiento se aprecia que todos los estimadores de parámetros de adicionalidad son significativamente diferentes de cero. Esto indica que a diferencia del primer enfoque, basado en el factor de forma total de un árbol (con una sola observación por individuo), todas las procedencias tienen ahusamiento distinto con respecto a la procedencia base (Tuxtepec).

model, derived from Clutter (1980), it is estimated that Tuxtepec had the highest form factor ($ff=0.57$). Moreover, when the taper model is used to estimate height at the 5 cm diameter limit, Tuxtepec exhibits the greatest height limit and commercial volume (Figure 2), and therefore, is the most cylindrical provenance.

Taper is a phenotypical characteristic resulting from genetic potential, the environment and their interaction, but the most geometrically cylindrical stems from Tuxtepec, Tierra Blanca and Tezonapa reflect the capacity of resistance (tolerance) to or recovery from attack by the borer *Hypsipyla grandella* Zeller in their juvenile stage. This pest bores the apical meristem, making galleries in the young stems and modifying their morphology (Briceño, 1997). Zepahua and Sánchez (2013) studied the incidence of the pest in clones of the same progenies and concluded that these geographical sources can tolerate the pest, showing strong apical growth and rapid regeneration of their tissues during attack. In this way, they retain the economic value of their stem. Although this characteristic has great potential value, the genetic and physiological base of the pattern is not entirely understood (Newton *et al.*,

Cuadro 4. Resultados de la prueba de adicionalidad con el modelo de ahusamiento puro tipo Clutter (1980).
Table 4. Results of the additionality test with the Clutter (1980) type pure taper model.

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	α_5	-1.2443	0.141	-8.84	<.0001
		δ_5	0.2180	0.024	9.17	<.0001
Cómala	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 ♦ $\alpha_0, \delta_0, \gamma_0, \theta_0$: regression parameters; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6$: additionality parameters due to provenances.

Dado que Dn promedio fue 13.5 cm y H promedio fue 11 m, cuando calcula el volumen de fuste total por procedencia con el modelo Schumacher-Hall, derivado de Clutter (1980), se estima que el factor mayor de forma lo tuvo Tuxtepec ($ff=0.57$). También, cuando se usa el modelo de ahusamiento para estimar la altura al diámetro límite de 5 cm, Tuxtepec muestra la altura límite y volumen comercial mayores (Figura 2), por lo que es la procedencia más cilíndrica.

El ahusamiento es una característica fenotípica, resultante del potencial genético, el ambiente y su interacción, pero los fustes geoméricamente más cilíndricos de Tuxtepec, Tierra Blanca y Tezonapa son un reflejo a la capacidad de resistencia o recuperación que tuvieron en la etapa juvenil al ataque de barrenador *Hypsipyla grandella* Zeller (tolerancia); esta plaga barrena el meristemo apical, hace galerías en los tallos jóvenes y modifica su morfología (Briceno, 1997). Zepahua y Sanchez (2013) estudiaron la incidencia de la plaga en clones de estas mismas progenies y concluyeron que estas fuentes geográficas pueden tolerar la plaga al mostrar crecimiento apical fuerte y regeneración rápida de sus tejidos durante el ataque, con lo que retienen el valor económico de su tallo. Aunque esta característica tiene gran valor potencial, la base genética y fisiológica del patrón no se entiende totalmente (Newton *et al.*, 1995). Otro factor interesante es la poda natural, probablemente estas procedencias pudieron presentar autopoda fuerte en la parte baja de sus fustes, ya que las ramas son fotosintéticamente activas, por lo tanto hubo concentración mayor de clorofila en la parte superior del fuste y el crecimiento diamétrico aumentó ahí, lo cual se tradujo en fustes más cilíndricos (Barrio, 2009).

El modelo de ahusamiento tipo Clutter (1980) revela que todas las procedencias son diferentes, posiblemente porque mientras 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 cual implica que tienda a ser más sensible cuando se plantean pruebas de hipótesis, básicamente porque está explorando a lo largo del fuste, hay más grados de libertad en el error y permite probar con más éxito hipótesis en los parámetros de ahusamiento. Clutter (1980) aplica un modelo de volumen total, tipo Schumacher-Hall, cuando

1995). Another interesting factor is natural pruning. It is likely that these provenances can strongly self-prune the lower part of their stems. Since the branches are photosynthetically active, self-pruning the lower branches allows for a higher concentration of chlorophyll in the upper part of the stem where diametric growth increases, resulting in more cylindrical stems (Barrio, 2009).

The Clutter (1980) type taper model reveals that all the provenances are different, possibly because in the Spurr (1952) combined variable model each tree is one observation, whereas in the taper model each tree represents multiple observations. This implicates a tendency toward more sensitivity when posing tests of hypotheses, basically because when exploring all along the stem there are more degrees of freedom in the error and the hypotheses are tested more successfully in the taper parameters. Clutter (1980) applies a total volume Schumacher-Hall-type model; when the total volume model is fit independently, the estimators differ, basically because in one the deviations on the stem are minimized and in the other the deviations on volume are minimized. With the values of these parameters, we were able to make useful total and commercial volume calculations on the stem.

Taper and compatible volume systems fit

SUR estimation decreased the standard error and the statistically significant level of the estimators increased, in both taper and commercial volume, and made the estimators more efficient (Rose and Lynch, 2001). For this reason, when conducting the test of additionality in the form parameters β and δ , significant differences were found by addition to Tuxtepec ($\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq \beta_5 \neq \beta_6$, $p < 0.05$; $\delta_1 \neq \delta_2 \neq \delta_3 \neq \delta_4 \neq \delta_5 \neq \delta_6$, $p < 0.05$). Thus, the effect of the dummy variable was significant in the systems (Table 5). This coincides with the findings of Quiñonez *et al.* (2014), who reported differences in the parameters that define taper and commercial volume for five pine species.

The Fang and Bailey (1999) model, case I-a, assumes that the β and δ form coefficients on both sides of the system are similar for each of the progenies (the form coefficient in delta calculated as $ff = \delta_i \times k$). However, Tuxtepec keeps the best form ($\beta_0 = 0.45 - \delta_0 = 0.41$). In contrast, Comala possesses the most conical stems ($\beta_6 = 0.33 - \delta_6 = 0.32$). The

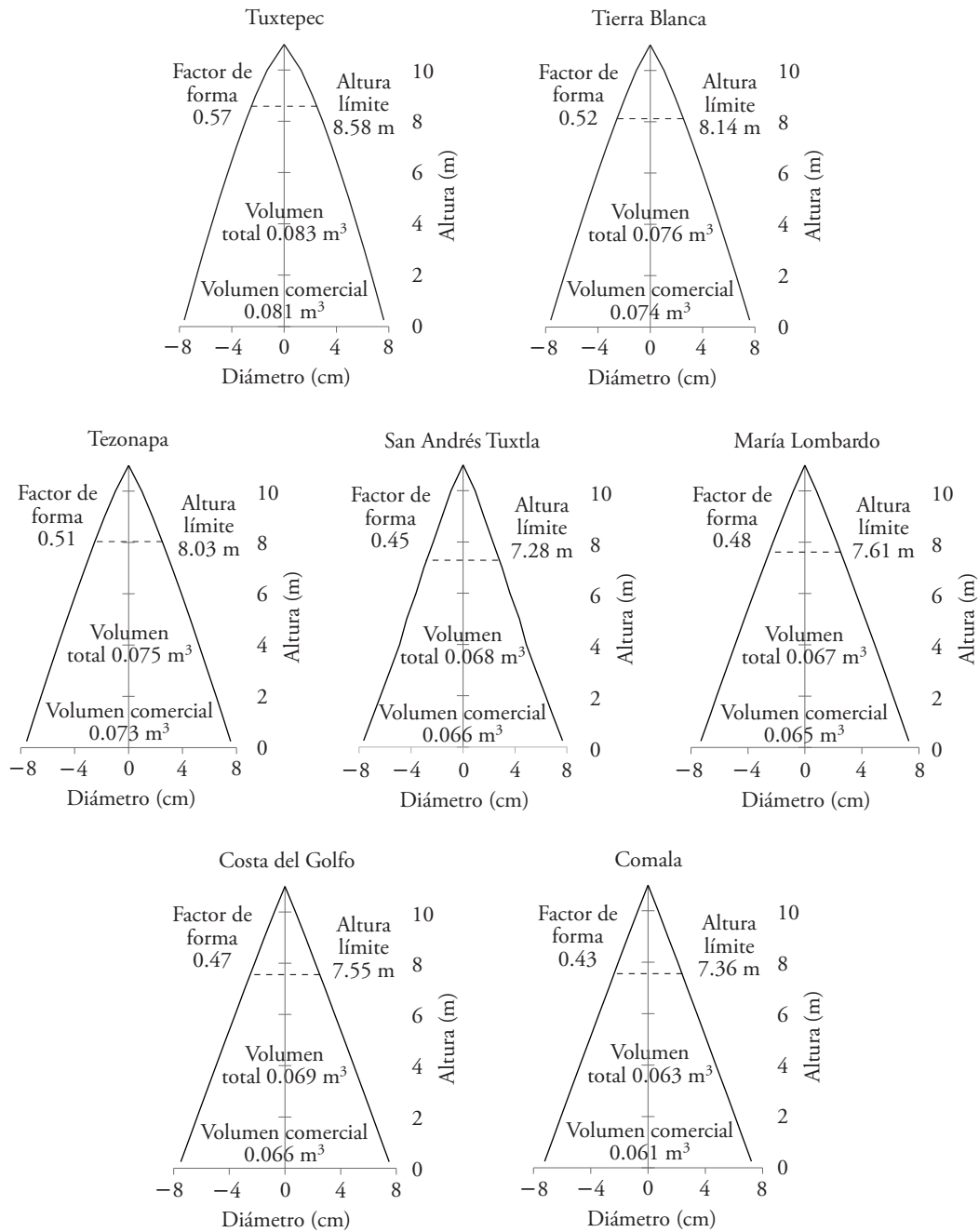


Figura 2. Variación del ahusamiento en procedencias de cedro rojo derivados del modelo tipo Clutter (1980).
Figure 2. Taper variation in Spanish cedar provenances derived from the Clutter (1980) type model.

ajusta independientemente el modelo de volumen total los estimadores difieren, básicamente porque en uno se minimizan las desviaciones sobre el fuste y en el otro se minimizan las desviaciones sobre el volumen, y con los valores de estos parámetros se pudieron realizar cálculos de volumen total y comercial sobre el fuste que resultaron útiles.

estimators are similar when compared with the first approach of the combined variable model and the direct form factor, but the system is more sensitive and detects differences in all the geographic sources by addition to Tuxtepec.

The effect of thinning to establish the seed orchard could have stimulated diametric growth

Ajuste de los sistemas de ahusamiento y volumen compatible

La estimación SUR redujo el error estándar y aumentó el nivel estadísticamente significativo de los estimadores en el ahusamiento y en volumen comercial, e hizo más eficientes los estimadores (Rose y Lynch, 2001). Por esta razón, al realizar la prueba de adicionalidad en los parámetros de forma β y δ hubo diferencias significativas por adición a Tuxtepec ($\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq \beta_5 \neq \beta_6$, $p \leq 0.05$; $\delta_1 \neq \delta_2 \neq \delta_3 \neq \delta_4 \neq \delta_5 \neq \delta_6$, $p \leq 0.05$); por lo que, el efecto de la variable indicadora Z fue significativo en los sistemas (Cuadro 5). Esto coincide con Quiñonez *et al.* (2014), quienes observaron 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 $ff = \delta_i \times k$); sin embargo, Tuxtepec conserva la mejor forma ($\beta_0 = 0.45 - \delta_0 = 0.41$). Al contrario, Comala posee los fustes más cónicos ($\beta_6 = 0.33 - \delta_6 = 0.32$). Los estimadores son similares al compararse con el

of the trees by redistributing future growth among a few individuals. However, because thinning was too strong, it possibly promoted greater cone-like taper, low branches and therefore, thick nodes and less dense wood because diametric growth was too accelerated. For this reason, it is recommendable to maintain relative competition among trees (Rosso and Ninin, 1998; Chaves *et al.*, 2013). Moreover, the sources of origin of each provenance possibly had an influence in the geometry of the stems given that they are from an extensive geographic area and are adapted to environmental conditions different from the site where the trial was established. This is a common phenomenon called genotype-environment interaction and the reason that introducing provenances from the ecological zone most similar to the introduction site is advised (Chambel *et al.*, 2005).

Local growers, before using unknown sources of Spanish cedar germplasm, should consider the volumetric proportions that plantations with Tuxtepec progenitors could contribute. Nevertheless, it would be useful to conduct more in-depth investigation to study, for example, the degree to which the progenitors transmit their stem characteristics to their descendants.

Cuadro 5. Estadísticos de los sistemas de Fang y Bailey (1999) para las progenies de cedro rojo establecidas en Tezonapa, Veracruz, México.

Table 5. Statistics of the Fang and Bailey (1999) systems for Spanish cedar progenies established in Tezonapa, Veracruz, Mexico.

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 ♦ [†]EE: standard error of parameters.

primer enfoque del modelo la variable combinada y el factor de forma directo, pero el sistema es más sensible y detecta diferencias en todas las fuentes geográficas por adición a Tuxtepec.

El efecto del aclareo para conformar el huerto semillero pudo estimular el crecimiento diamétrico en los árboles al redistribuir el crecimiento futuro en pocos individuos. Sin embargo, como el aclareo fue demasiado fuerte posiblemente propició una mayor conicidad, ramas bajas y, por lo tanto, nudos gruesos y madera menos densa, debido a un crecimiento en diámetro demasiado acelerado. Por esto es recomendable mantener siempre una competencia relativa entre árboles (Rosso y Ninin, 1998; Chaves *et al.*, 2013). Las fuentes de origen de cada procedencia probablemente influyeron en la geometría de los fustes dado que provienen de un área geográfica amplia y están adaptadas a condiciones ambientales diferentes a las del sitio donde se estableció el experimento. Este es un fenómeno común llamado interacción genotipo-ambiente, y se aconseja introducir procedencias de la zona ecológica más semejante al sitio de introducción (Chambel *et al.*, 2005).

Los productores locales antes de utilizar fuentes desconocidas de germoplasma de cedro rojo, deben considerar las proporciones volumétricas que podrían aportar plantaciones con progenitores de Tuxtepec. No obstante, sería útil realizar estudios más profundos como evaluar el grado al cual los progenitores transmitan sus características de fuste a su descendencia.

Los sistemas presentaron valores altos en el coeficiente de determinación ajustado ($R_{Adj}^2 > 0.94$), valores bajos de RMSE, CV, $\bar{E}$ (Cuadro 6), por lo cual se pueden usar para estimar una distribución de

The systems had high values in the adjusted coefficient of determination ($R_{Adj}^2 > 0.94$), low RMSE, CV, and $\bar{E}$ (Table 6), and therefore, can be used to estimate a distribution of products for each provenance. Nevertheless, the Fang and Bailey (1999) system, case I-a, is recommended because the form factors have better behavior in both equations of the system. Moreover, all its regression coefficients were highly significant. The model selected with dummy variables is equivalent to having seven specific models for each group of progenies, which are statistically different.

CONCLUSIONS

In all the approaches, the Spanish cedar progeny from Tuxtepec had the most geometrically cylindrical stems, surpassing the local provenance of Tezonapa. Therefore, the geographical movement of this provenance was positive in this aspect. Likewise, it could be the principal line to consider in collecting germplasm for local production.

The structure with dummy variables strengthens compatible systems; all the data are used in the fitting process, the degrees of freedom increase in the models, and the standard errors of the parameters decrease.

—End of the English version—



productos para cada procedencia. No obstante, se recomienda el sistema de Fang y Bailey (1999) caso I-a, por presentar los factores de forma comportamiento mejor en ambas ecuaciones del sistema; además,

Cuadro 6. Comparativo y estadísticos de bondad de ajuste de los sistemas Fang y Bailey (1999).

Table 6. Comparison and statistics of goodness of fit of the Fang and Bailey (1999) systems.

Caso	Función de volumen comercial				Función de ahusamiento			
	RMSE [†] (m ³)	CV [‡] (%)	$\bar{S}$ [§] (m ³)	R_{Adj}^2 [¶]	RMSE [†] (cm)	CV [‡] (%)	$\bar{S}$ [§] (cm)	R_{Adj}^2 [¶]
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; [¶] R_{Adj}^2 : coeficiente de determinación ajustado. [†]RMSE: root mean squared error; [‡]CV: coefficient of variation; [§] $\bar{S}$: average bias; [¶] R_{Adj}^2 : adjusted coefficient of determination.

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.

CONCLUSIONES

En todos los enfoques la progenie de cedro rojo de Tuxtepec presento los fustes geométricamente más cilíndricos y supera a la procedencia local de Tezonapa; por lo tanto, el movimiento geográfico de esta procedencia fue positivo en este aspecto. Así mismo, podría ser la principal línea de consideración para el acopio de germoplasma con fines de producción local.

La estructura con variables indicadoras robustecen los sistemas compatibles, se utilizan todos los datos en el proceso de ajuste, se aumentan los grados de libertad en los modelos y los errores estándar de los parámetros disminuyen.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el apoyo otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) en el transcurso de los estudios de maestría, un agradecimiento al Postgrado en Ciencias Forestales del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo y al M. C. Vicente Sánchez Monsalvo del INI-FAP Campo Experimental “El Palmar” por proporcionar datos dasométricos del programa de mejoramiento genético forestal de cedro rojo.

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.
- Briceño V., A. 1997. Aproximación hacia un manejo integrado del barrenador de las meliáceas, *Hypsipyla grandella* (Zeller). *Rev. Forest. Venez.* 41: 23-28.
- Chambel, R., C. Alía, and F. Valladares. 2005. Phenotypic plasticity: a useful framework for understanding adaptation in forest species. *Inv. Agrar. Sist. Recur. For.* 14: 334-344.
- Chaves S., E., O. Chinchilla, y F. Mora C. 2013. Comparación de dos sistemas de aclareos en plantaciones de *Tectona grandis* L.f. en la península de Nicoya, Costa Rica. *Rev. Forest. Venez.* 57: 131-145.
- 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.
- Cruz C., F., H. M. De Los Santos P., y J. R. Valdez L. 2008. Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia* 42: 473-485.
- Diéguez A., U., M. Barrio A., F. Castedo D., A. D. Ruíz G., M. F. Álvarez T., J. G. Álvarez G., y A. Rojo A. 2003. Dendrometría. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 327 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., H., H. M. De Los Santos P., y J. I. Valdez H. 2008. Crecimiento y rendimiento maderable de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosques* 14: 65-82.
- 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.
- Montgomery, D. C., E. A. Peck, y G. G. Vining. 2005. Introducción al Análisis de Regresión Lineal. Tercera edición. Ed. Continental. México. 742 p.
- 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 Genetica* 44: 146-150.
- Patino V., F. 1997. Genetic resources of *Swietenia macrophylla* and *Cedrela odorata* in the neotropics: Priorities for coordinated actions. *Forest Genetic Resources* No. 25. FAO, Roma. 12 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. *Agron. 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. *For. Ecol. Manage.* 148: 51-61.
- Rosso, F., y P. Ninin. 1998. Variabilidad de los defectos de trozas de la especie teca (*Tectona grandis* L.f.) en diferentes densidades arbóreas, en la unidad experimental de la reserva forestal de Ticoporo, Barinas-Venezuela. *Rev. Forest. Venez.* 42: 103-112.
- Sánchez, M. V., y C. Velázquez E. 1998. Evaluación de dos insecticidas biológicos en el control de *Hypsipyla grandella* (Zeller), barrenador de brotes de las Meliaceas. *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.

- Sheng, W., H. Ru, and S. Zheng. 2011. Using the dummy variable model approach to construct compatible single-tree biomass equations at different scales-a case study for Masson pine (*Pinus massoniana*) in southern China. *Can. J. For. Res.* 41: 1547-1554.
- Sierra de Grado, R., R. Díez 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.
- Zavala Z., D. 1996. Coeficientes de aprovechamiento de trocería de pino en aserraderos banda. *Revista Ciencia Forestal en México* 21: 165-181.
- Zepahua A. G., y V. Sánchez M. 2013. Variación en crecimiento y tolerancia en clones de *Cedrela odorata* L. al ataque de *Hypsipyla grandella* Zeller. *In: Memoria del XI Congreso Mexicano Sobre Recursos Forestales*. 1-4 de octubre. Saltillo, Coahuila, México. pp: 251.
- Zobel, B., y J. Talbert. 1988. *Técnicas de Mejoramiento Genético de Árboles Forestales*. Editorial Limusa S.A., México. 545 p.