

Sistema de crecimiento explícito para plantaciones forestales comerciales de *Pinus patula* schiede ex schltfl. *Et cham*

Explicit growth system for commercial forest plantations of *Pinus patula* schiede ex schltfl. *Et cham*

Uranga-Valencia Luisa Patricia ^{1✉}; Héctor Manuel De los Santos-Posadas²; José René Valdez Lazalde² ;
Gerónimo Quiñonez Barraza ³

¹ Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Universidad Autónoma de Chihuahua. Km. 2.5 Carretera Delicias a Rosales. Campus Delicias. Cd. Delicias, Chihuahua. México. ² Posgrado Forestal. Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km.36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. México. ³ Campo Experimental Valle del Guadiana, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Carretera Durango-Mezquitlan km 4.5, 34170 Durango, Durango, México

✉ Autor para correspondencia: luranga@uach.mx.

Recibido: 15/09/2018

Aceptado: 15/11/2018

RESUMEN

Se desarrolló un sistema de crecimiento y rendimiento maderable explícito, para la Cooperativa Integradora Forestal de Zacualpan, Veracruz, debido a que no contaban con estudios que permitieran predecir el crecimiento maderable para programar cosechas y evaluar financieramente las plantaciones. En su construcción se estableció una red de 50 sitios de remediación bajo un muestreo sistemático estratificado por edad para pino patula. El registro dasométrico se hizo en parcelas de forma rectangular, cubriendo una superficie de 400 m², cada uno de los sitios conformados de tres a cinco parcelas por edad oscilando éstas, entre los 3 y 21 años. El sistema utiliza un ajuste simultáneo de los componentes vía regresión aparentemente no relacionada y dos modelos para la estimación de área basal por ha. El ajuste explícito sugiere que el turno técnico en volumen se alcanza a los 20 años en el sitio promedio. Comparando estos resultados con los obtenidos en rodales puros repoblados naturalmente de *P. patula* en Zacualtipán, Hidalgo donde el turno técnico se da también a los 20 años en el sitio promedio se tiene un rendimiento de 250m³/ha contra 420 m³/ha estimados en las plantaciones a la edad de 20 años.

Palabras claves: Hossfeld IV, Explícito, turno técnico, volumen.

ABSTRAC

The growth and yield explicit system for the Cooperativa Integradora Forestal, in Zacualpan, Veracruz, was developed because it haven't a studies that predicted timber growth to schedule harvests and financially evaluate the plantations. The data was obtained from two consecutive re-measurements of 50

permanents plots under a system stratified sampling by age for patula pine. The dasometric record was made in rectangular plots, of 400 m², each of the sites consisting of three to five plots per age oscillating between 3 and 21 years. The system uses a simultaneous adjustment of the components via apparently unrelated regression and two models for the estimate of basal area per ha. The explicit adjustment suggests that the technical turn in volume is reached at 20 years in the average site. Comparing these results with those obtained in pure stands repopulated naturally of *P. patula* in Zacualtipán, Hidalgo where the technical turn is also given at 20 years in the average site has a yield of 250m³ / ha against 420 m³ / ha estimated in the plantations at the age of 20 years.

Keywords: Hossfeld IV, Explicit, technical turn, volume.

INTRODUCCIÓN

Lograr un manejo forestal óptimo en plantaciones forestales comerciales (PFC), requiere de estimaciones confiables del rendimiento e incremento en volumen de madera para establecer adecuadamente un plan de operación en el mediano y largo plazo, para ello, es necesario que los silvicultores cuenten con las herramientas cuantitativas adecuadas que les permitan simular y predecir los efectos del manejo a realizar. Lo anterior se lleva a cabo mediante la modelación del rendimiento e incremento con ecuaciones matemáticas que representan los componentes del rodal (Davis *et al.*, 2001, Velázquez *et al.*, 2009; Santiago-García *et al.*; 2013). El Sistema de Crecimiento y Rendimiento Maderable (SCRM) explícito predice la condición actual de las variables, además de proyectar a tiempo futuro las condiciones a nivel de rodal (Maldonado y Nívar, 2002; Galán *et al.*, 2008; Magaña *et al.*,

2008), esta información puede utilizarse para actualizar los inventarios forestales. En este estudio, el objetivo es evaluar el SCRM explícito para las PFC de la Cooperativa Integradora Forestal de Zacualpan, Veracruz (CIFZA), permitiendo modelar de mejor manera las características dasométricas; ya que la CIFZA cuenta con más de 3,000 hectáreas plantadas de *Pinus patula*, pero carece de información silvícola para realizar planificación a mediano y largo plazo.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se desarrolló en el municipio de Zacualpan, ubicado en la Huasteca baja del estado Veracruz, México entre los paralelos 20° 24' y 20° 37' de LN; los meridianos 98° 13' y 98° 27' de LO. La información dasométrica fue recabada dentro de sitios experimentales establecidos en una gradiente altitudinal que va de 400 hasta 2700 m.s.n.m. A partir del establecimiento de una red de 50 sitios de

remediación bajo un muestreo sistemático estratificado por edad para pino patula, se efectuó el registro dasométrico en parcelas de forma rectangular de 400 m², cada uno de los sitios conformado de tres a cinco parcelas por edad, oscilando éstas, entre los 3 y 21 años. En cada parcela se midió el diámetro normal (a 1.30 m) de todos los árboles y la altura total (H) de los cinco árboles dominantes o codominantes. Al considerar los datos en un contexto de cronosecuencia se pueden ajustar modelos de crecimiento para la altura dominante. Con el fin de añadir más datos y hacer más robustos los modelos en 2012 se hizo la primer re-medicación de todos los sitios. De esta forma se cuenta con un par de observaciones por parcela y esto permite usar estos datos para llevar a cabo un proceso de ajuste-validación como propone Gómez-Tejero *et al.*, (2009) o utilizar la totalidad de los datos para un ajuste que implique modelos de predicción y proyección ajustados de manera simultánea (Galán *et al.*, 2008).

SCRM EXPLÍCITO COMO UN SISTEMA DE ECUACIONES

Las ecuaciones de predicción y de proyección son los dos tipos de funciones que conforman un SCRM para las variables de estado, como la altura total (H, m), área basal (AB, m²), diámetro promedio (Dn, cm) y volumen (V, m³). El ajuste de las ecuaciones para estimar altura dominante (H) e índice de sitio es generalmente el primer paso para crear un SCRM, ya que a partir de estas ecuaciones se deduce la fertilidad o calidad de estación del bosque o rodal (Clutter *et al.*, 1983; Diéguez *et al.*, 2005).

En un estudio previo sobre la determinación de familias de índice de sitio para la región, Uranga-Valencia *et al.*, 2014, encontró que el modelo más promisorio el de Hossfeld IV en su familia de curvas polimórficas derivadas a partir del parámetro α_1 de la ecuación promedio (cuadro 1) seguido del modelo anamórfico.

Cuadro 1. Estructura del modelo Hossfeld IV para altura dominante

Modelo promedio	$H = \alpha_0 / (1 + e^{\alpha_1 \times E^{-\alpha_2}})$
Anamórfico	$H_2 = H_1 \times \left[\frac{1 + e^{\alpha_1 \times E_2^{-\alpha_2}}}{1 + e^{\alpha_1 \times E_1^{-\alpha_2}}} \right]$
Polimórfico I	

donde H es la altura dominante promedio del sitio; H_1 es la altura dominante en metros a la edad E_1 en años (condiciones iniciales); H_2 es la altura dominante a proyectar en metros a la edad E_2 de proyección en años; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ = son los parámetros a estimar.

Teniendo en cuenta que el patrón de crecimiento en altura dominante afectará a todo el sistema y que la estructura polimórfica propuesta es muy flexible y puede tomar formas variadas, se decide que el sistema de predicción-proyección utilizará esta estructura que además permite estimar el IS en cualquiera de los modelos del SCRM.

Ecuaciones

Las ecuaciones propuestas para este estudio se basaron en modificaciones del modelo básico de rendimiento de Schumacher (1939) y Clutter (1963) pues permite flexibilidad para incluir variables dentro del modelo y son ampliamente conocidas. El segundo paso fue obtener un modelo compatible que permitiera hacer una distinción entre los modelos de predicción para el estado actual (E_1) y los modelos de proyección para el estado futuro del rodal (E_2) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Modelos de predicción y proyección para la generación del SCRM explícito.

Modelo	PREDICCIÓN	PROYECCIÓN
	$AB = e^{\beta_0} \times IS^{\beta_1} \times \exp\left(-\frac{\beta_2}{E} + \frac{\beta_3}{E} \times N\right)$	
Área basal		$AB_2 = AB_1 \times \exp\left(-\beta_2 \times \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1}\right) + \beta_3 \times \left(\frac{N_2}{E_2} - \frac{N_1}{E_1}\right)\right)$ $AB_2 = AB_1 \times \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{\beta_1} \times \exp\left(-\beta_2 \times \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1}\right) + \beta_3 \times \left(\frac{N_2}{E_2} - \frac{N_1}{E_1}\right)\right)$
Superficie residual	$N = \delta_0 \times \exp(-\delta_1 \times E)$	$N_2 = N_1 \times \exp(-\delta_1 \times (E_2 - E_1))$
Volumen	$V = \gamma_0 \times AB^{\gamma_1} \times H^{\gamma_2} \times \exp\left(-\frac{\gamma_3}{E}\right)$	$V_2 = V_1 \times \left(\frac{AB_2}{AB_1}\right)^{\gamma_1} \times \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{\gamma_2} \times \exp\left(-\gamma_3 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1}\right)\right)$

Dónde: AB= Área basal en $m^2 \cdot ha^{-1}$; AB_1 =Área basal inicial en m^2 a la E_1 ; AB_2 =Área basal en $m^2 \cdot ha^{-1}$ a la E_2 ; E= Edad en años; E_1 = Edad inicial en años; E_2 = Edad de proyección en años; N= Número de árboles vivos por ha; N_1 =Número total de árboles vivos por ha a la E_1 ; N_2 =Número total de árboles vivos por ha a la E_2 ; IS es el índice de sitio en m a la edad base de 15 años; H=es la altura dominante promedio del sitio; H_1 =Altura dominante en metros a la E_1 ; H_2 =Altura dominante a proyectar en metros a la edad E_2 ; V=Volumen en m^3 a la edad E; V_1 =Volumen en m^3 a la E_1 ; V_2 =Volumen en m^3 a la E_2 ; $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ y $\beta_3, \delta_0, \delta_1, \gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ y γ_3 = Parámetros a estimar.

Los parámetros estimados de las ecuaciones se pueden obtener ajustado de manera independiente cada ecuación o haciendo que los parámetros sean estimados de manera simultánea tanto para el modelo de proyección como predicción. Este último enfoque permite que ambas ecuaciones compartan parámetros y es un enfoque adecuado para cada elemento del SCRM. En este caso el SCRM fue ajustado de manera simultánea a través de regresión aparentemente no relacionada (SUR, por sus siglas en inglés), con el paquete SAS (SAS Institute Inc., 2002) usando el procedimiento MODEL y una estructura de diferencia algebraica (Bordes *et al.*, 1987). La técnica de estimación de parámetros SUR produce

estimadores consistentes y eficientes, en presencia de correlaciones contemporáneas en un sistema de ecuaciones (Galán *et al.*, 2008 Tamarit *et al.*, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el cuadro 3, se presentan los parámetros estimados y de bondad de ajuste para el modelo más conservador, el cual fue el del AB dependiente del IS. A pesar de que los resultados para ambos sistemas resultaron estadísticamente robustos y adecuados para estimar el rendimiento y con ambos se puede construir tablas de rendimiento y densidad variable. y cada uno de los sistemas explícitos fueron ajustados de manera simultánea con regresión aparentemente no correlacionada.

Cuadro 3. Estadísticas de bondad de ajuste y parámetros estimados del SCRM explícito con el modelo AB donde su asíntota depende de manera directa del índice de sitio ($AB = e^{\beta_0} \times IS^{\beta_1} \times \exp(-\frac{\beta_2}{E} + \frac{\beta_3}{E} \times N)$; H (altura, m), AB (área basal, m^2ha^{-1}), V (volumen, m^3ha^{-1}) y N (número de árboles vivos por ha^{-1}) ajustados de manera simultánea con regresión aparentemente no correlacionada (SUR, por sus siglas en inglés).

Ecuación	GL		Raíz				
	Modelo	Error	SCE	CME	CME	R ²	R ² ajustada
<i>H</i> ₁	1.667	48.33	205.9	4.2607	2.0642	0.8254	0.8230
<i>H</i> ₂	0.667	49.33	51.7662	1.0493	1.0244	0.9538	0.9542
<i>AB</i> ₁	3.667	46.33	976.3	21.0713	4.5904	0.8440	0.8350
<i>AB</i> ₂	1	49	224.2	4.5759	2.1391	0.9655	0.9655
<i>V</i> ₁	2.5	47.5	2727.3	57.4172	7.5774	0.9933	0.9931

V_2	1.5	48.5	372.6	7.6832	2.7719	0.9992	0.9992
N_1	1.5	48.5	7520582	155064	393.8	0.0956	0.0862
N_2	0.5	49.5	27047.4	546.4	23.3755	0.9967	0.9968

GL modelo= son los grados de libertad del modelo, *GL Error*= son los grados de libertad de error, *SCE*=suma de cuadrados del error, *CME*=cuadrado medio del error, *Raíz CME*= raíz del cuadrado medio del error. R^2 = coeficiente de determinación del modelo. R^2 *ajustada*= raíz del coeficiente de determinación del modelo.

No obstante, durante la construcción de las tablas de rendimiento partiendo de una densidad inicial de 1,100 árboles/ha, se pudo establecer que el sistema que utiliza el modelo del AB dependiente de IS en lugar de la altura dominante tiende a ser mucho más conservador a medida que aumenta la edad para las diferentes

calidades de estación sobre todo a medida que mejora el IS (Figura 1). Otra implicación es en la estimación del turno técnico. En el sistema que usa el IS de manera directa el promedio del turno técnico en volumen para los diferentes IS rondan los 15 años (Figura 2); en el otro caso este es en promedio a los 22 años.

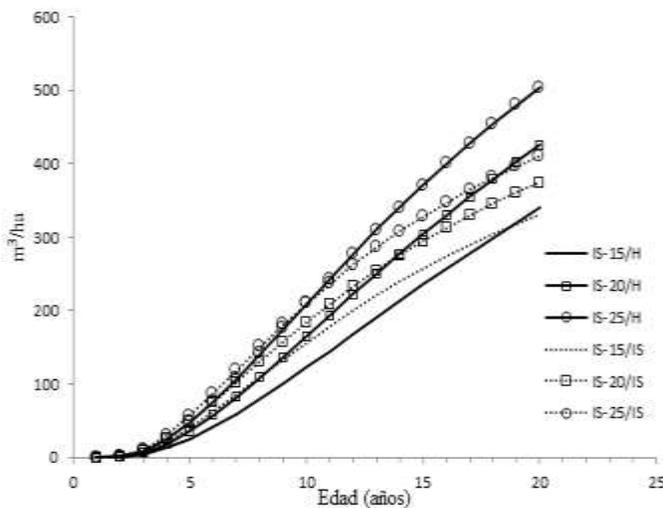


Figura 1. Curva de crecimiento en volumen para el modelo dependiente de la altura dominante (líneas continuas) y para el modelo dependiente del IS (líneas punteadas) para los índices de sitio 15, 20 y 25 a una edad base de 15 años en rodales de *Pinus patula*.

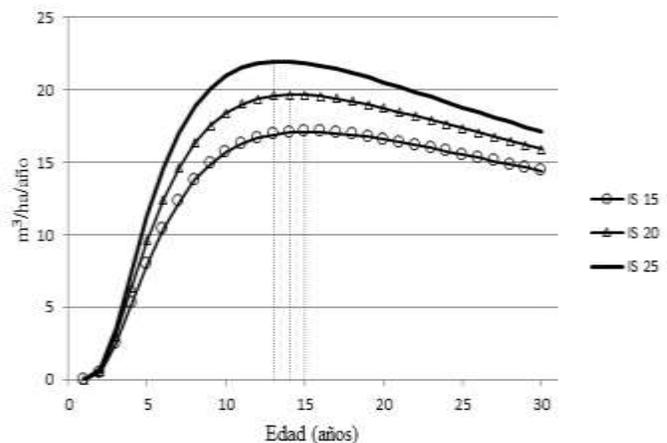


Figura 2. Incremento Medio Anual (IMA) en volumen para determinar el turno técnico (IMA máximo) en volumen para los diferentes IS (15, 20 y 25) para el modelo dependiente del IS, a una edad base en rodales de *Pinus patula*

Revisando los patrones de las variables utilizadas en el sistema contra la variable proyectada se puede apreciar que cuando se usa el IS de manera directa en los modelos de AB

este reproduce un patrón más compacto que cuando se usa directamente la altura dominante (Figura 3) y además con asíntotas menores.

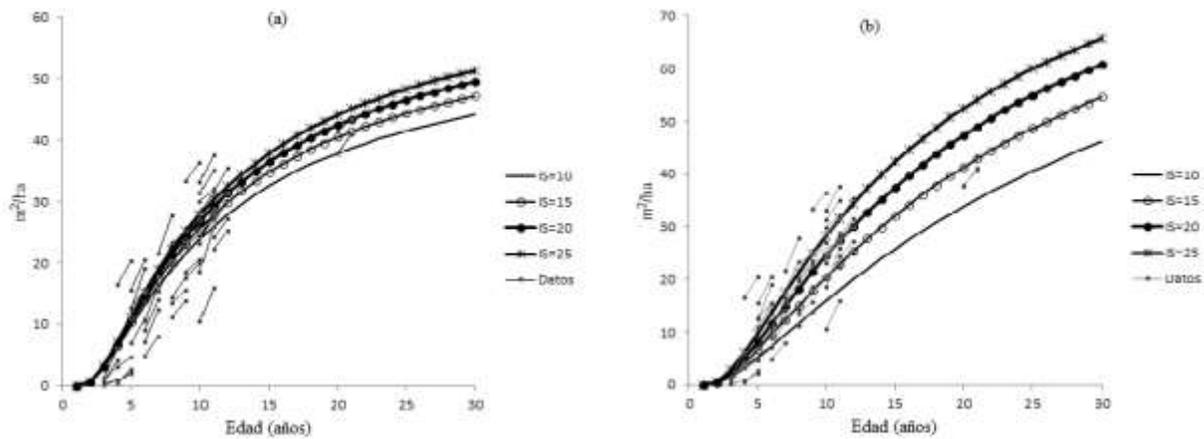


Figura 3. Curvas de crecimiento en área basal para IS (10, 15, 20, 25) para el modelo (a) dependiente del IS y (b) modelo dependiente de la altura dominante, a una edad base de 15 años en rodales de *Pinus patula*.

Para el volumen (Figura 4) se observó que se logra una mejor cobertura de los datos, sobre todo los más extremos, en la estimación del

volumen cuando se usa el modelo de AB que depende directamente de la altura dominante

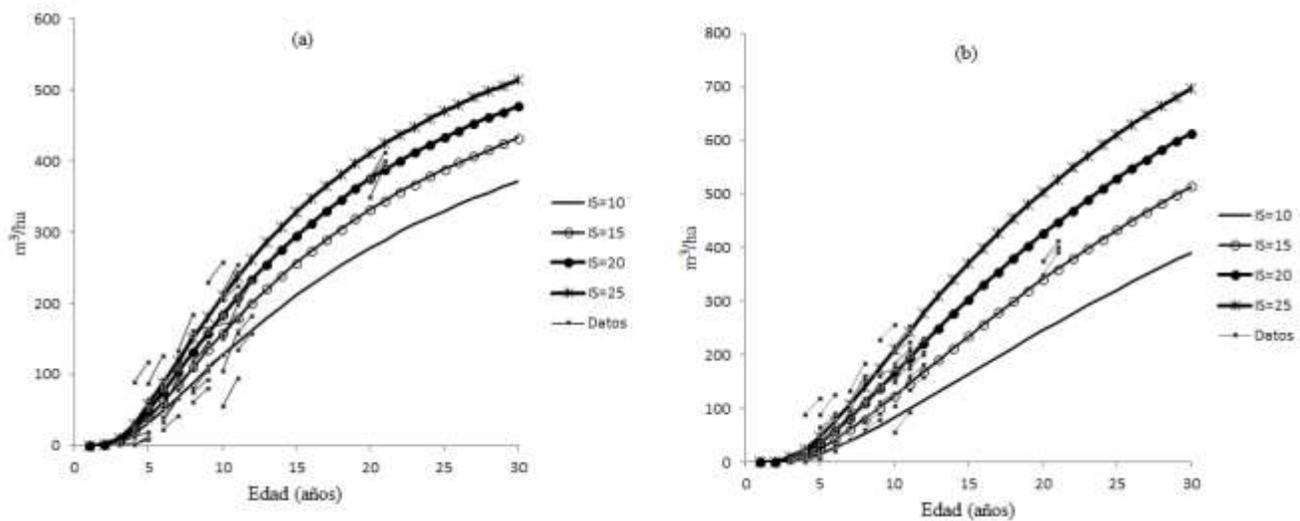


Figura 4. Curvas de crecimiento en volumen para IS (10, 15, 20, 25) para el modelo (a) dependiente del IS y (b) modelo dependiente de la altura dominante, a una edad base de 15 años en rodales de *Pinus patula*.

En este caso y en ausencia de datos que nos permitan validar los resultados sobre todo en el efecto de la densidad es preferible usar el modelo de AB que utiliza la altura dominante pues tiende a producir resultados que cubren de mejor manera el rango de los datos y las condiciones de variabilidad. Sin lugar a duda una nueva remediación permitirá refutar o confirmar estas tendencias.

En una tabla de rendimiento generada para las plantaciones de pino patula en Zacualpan, Veracruz; con una densidad base usada al momento de la plantación de 1,100 árboles por ha y usando los modelos promisorios antes analizados. Se encontró que el comportamiento de los incrementos medios indica que el turno técnico ocurre en promedio a los 22 años en esta zona. Este resultado concuerda con el turno que propone Santiago- García *et al.*, 2013; en donde en su estudio para la zona de Zacualtipán, Hidalgo con la misma especie, el turno técnico es de 25 años y este se podría reducir si se sometieran los rodales a tratamientos silvícolas más intensivos como la repoblación artificial y si se aplicaran prácticas de control de vegetación competidora y de manejo de densidad. No obstante, el rendimiento proyectado en Zacualpan es mucho mayor a edades similares. Para los rodales naturales Santiago-García *et al.*, 2013, reportan un rendimiento promedio a la edad 20 de 220 m³/ha y 275 m³/ha a la edad de 25. En Zacualpan los rendimientos más

conservadores son a la edad 20 de 366m³/ha y de 425 m³/ha a la edad 25 (sistema con modelo de área basal compacto). Para el sistema ilustrado en el cuadro 4 se puede observar que a los 20 años el rendimiento estimado es de 426 m³/ha y a los 25 años se estima en 528 m³/ha (409 y 510 m³/ha respectivamente para el IS=19 m).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sistema de ecuaciones de crecimiento y rendimiento explícito construido permite simular un amplio grupo de escenarios en rodales plantados de *Pinus patula* en Zacualpan, Veracruz. El sistema sugiere un turno técnico en volumen cercano a la edad de 20 años lo que implica que todo trabajo de cultivo debe realizarse antes de esta edad para lograr que la masa responda adecuadamente al tratamiento. El sistema también permite simular escenarios donde cambios en la densidad inicial de árboles plantados deberían mejorar la distribución de árboles de mayor tamaño. El sistema sugiere que las PFC producen rendimientos mayores que en bosques regenerados de manera natural. Si bien la red de sitios en la crono-secuencia muestreada permitió construir un SCRM estadísticamente robusto es recomendable hacer más remediciones a esta red a fin de mejorar algunos elementos y construir (guías de densidad) que permitan validar estos resultados y completar el SCRM.

LITERATURA CITADA

- Borders, B. E., R.A. Souter, R. L. Bailey, and K. D. Ware. 1987. Percentile-based distributions characterize forest stand tables. *Forest Science* 33: 570-576.
- Clutter J. L. 1963. Compatible growth and yield models for loblolly pine. *Forest Science* 9: 354-371.
- Clutter J. L., J. C. Forston., L. V. Pienaar., G. H. Brister., R. L. Bailey. 1983. *Timber Management: A Quantitative Approach*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 333 p.
- Davis L. S., K. N. Johnson., P. S. Bettinger and T. E. Howard. 2001. *Forest Management*. 4th ed. McGraw-Hill Series in Forest Resources. 804 p.
- De la Fuente E. A., A Velásquez M., J. M. Torres R., H. Ramírez M., C. Rodríguez F. y A. Trinidad S. 1998. Predicción del crecimiento y rendimiento de *Pinus rudis* Endl., en Pueblos Mancomunados, Ixtlán, Oaxaca. *Rev. Ciencia Forestal en México* 23: 3-8.
- Galán L. R., H. M. De los Santos P. y J. I. Valdez H. 2008. Crecimiento y rendimiento maderable de *Cedrela odorata* I. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosques* 14: 65-82. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1421>
- Gómez-Tejedo, J., H. M. De los Santos-Posadas, A. M. Fierros-González, y J. R. Valdez-Lazalde. 2009. Modelos de crecimiento en altura dominante para *Eucalyptus grandes* Hill ex Maiden y *E. rophylla* S. T. Blake en Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 32 (2): 161-169.
- Magaña T. O. S., J. M. Torres R., C. Rodríguez F. H. Aguirre D., y A. M. Fierros G. 2008. Predicción de la producción y rendimiento de *Pinus rudis* Endl. en Aloapan. Oaxaca. *Madera y Bosques* 14: 5-19. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1411214>
- Maldonado D. A. y J. Nívar Ch. 2002. Ajuste y predicción de la distribución Weibull a las estructuras diamétricas de plantaciones de pino de Durango, México. *Madera y Bosques* 8: 61-72. <https://doi.org/10.21829/myb.2002.811306>
- Santiago-García, W., H. M. De los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, J. R. Valdez-Lazalde y G. Ramírez-Valverde. 2013. Sistema compatible de crecimiento y rendimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula*. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 36 (2): 163-172. <https://doi.org/10.35196/rfm.2013.2.163>

Uranga-Valencia, L. P., H. M. De los Santos P., J. R. Valdez L., J. López U., H. Navarro G., y G. Cruz de León. 2014. Crecimiento y Rendimiento Maderable en plantaciones de *Pinus patula* en Zacualpan, Veracruz. In press.

Velázquez M., A. A. M. Fierros G., A. Aldrete., A. Gómez G., H. M. De los Santos P., M. González G., J. López U., T. Llanderal O., y S. Fernández C. 2009. Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. Comisión Nacional Forestal- Colegio de Postgraduados. México 429p.

Copyright (c) 2018 Luisa Patricia Uranga Valencia, Héctor Manuel De los Santos Posadas, José René Valdez Lazalde

y Gerónimo Quiñonez Barraza



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](#).

Usted es libre para **Compartir** —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y **Adaptar** el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)