



Crecimiento de *Pinus patula* var. *longepedunculata* Loock en plantaciones de la Sierra Sur de Oaxaca

Pinus patula var. *longepedunculata* Loock growth in plantations of the Sierra Sur of Oaxaca

Adrián Pedro Cruz¹, Rolando Galán Larrea^{1*}, Héctor M. de los Santos Posadas², Gricelda Valera Venegas¹, Juana Laura Rivera Nava¹ y Celestino Sandoval García¹

¹ Universidad del Mar. Campus Puerto Escondido. San Pedro Mixtepec, Oaxaca, México.

² Colegio de Postgraduados. Postgrado Forestal. Montecillo. Texcoco, Estado de México.

* Autor de correspondencia.
rolando@zicatela.umar.mx

RESUMEN

Las investigaciones sobre crecimiento y rendimiento de plantaciones forestales, particularmente en especies de coníferas plantadas en las distintas regiones tropicales de México, son escasas. Los modelos matemáticos son una herramienta útil para el manejo óptimo de los recursos forestales maderables. En este trabajo, se ajustaron modelos de predicción explícita de rodal completo, con datos provenientes de parcelas permanentes, para determinar el crecimiento y rendimiento maderable de plantaciones forestales de *Pinus patula* var. *longepedunculata* Loock en la Sierra Sur de Oaxaca. El índice de sitio se determinó con el modelo de Schumacher tipo polimórfico, el cual se correlacionó con los modelos de área basal y volumen mediante regresión aparentemente no correlacionada. Se obtuvieron familias de curvas con índices de sitio de 9 m, 11 m, 13 m y 15 m para altura a una edad base de 10 años. En área basal se estimaron índices de sitio de $32.9 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, $37.9 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, $42.5 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ y $47 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ a la edad de 20 años. Asimismo, a esta edad se determinó un volumen por índices de sitio de $187.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $234.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $282 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $330.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. El rendimiento máximo obtenido para cada sitio fue de $10.23 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, $12.04 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, $14.12 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, $16.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, lo que sugiere turnos diferentes para cada sitio que van de 19 años a 30 años.

PALABRAS CLAVE: Miahuatlán, modelo de predicción explícita, productividad, regresión aparentemente no correlacionada, rendimiento.

ABSTRACT

The research works on growth and yield of forest plantations, particularly in coniferous species planted in the different Mexican tropical regions, are scarce. Mathematical models are a useful tool for optimal timber forest resources management. In this work, whole stand explicit prediction models were fitted, with data from permanent plots, to determine the growth and timber yields of forest plantations of *Pinus patula* var. *longepedunculata* Loock in the Sierra Sur of Oaxaca. Site index was determined with the polymorphic Schumacher model, which was correlated with the basal area and volume models through seemingly unrelated regression. Families of curves with site indexes of 9 m, 11 m, 13 m and 15 m for height at a base age of 10 years were obtained; in basal area site indexes of $32.9 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, $37.9 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, $42.5 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ and $47 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ at 20 years of age were estimated. In addition, a volume per site indexes of $187.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $234.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $282 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ and $330.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ was determined at this latter age. The maximum yield obtained for each site was $10.23 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, $12.04 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, $14.12 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, $16.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, which suggests rotation periods different for each site ranging from 19 years to 30 years time.

KEYWORDS: Miahuatlan, explicit growth model, productivity, seemingly unrelated regression, yield.

INTRODUCCIÓN

Los responsables del manejo forestal requieren un mayor conocimiento de herramientas matemáticas para predecir y obtener parámetros importantes para la toma de decisiones. Estas herramientas les permiten formular documentos técnicos (programas de manejo forestal) y, a través de ellos, proponer un manejo óptimo de los recursos forestales maderables. Entre las herramientas matemáticas de mayor interés para el administrador forestal se encuentran los modelos de crecimiento y rendimiento maderable (López et al., 2007; Galán Larrea et al., 2008). El adecuado uso de los modelos matemáticos puede incrementar a largo plazo la productividad de los ecosistemas forestales, de manera que se maximicen los beneficios económicos y ambientales (Monroy Rivera, 1997). Estos modelos permiten evaluar el desarrollo de un rodal y facilitan la toma de decisiones para su manejo (García, 1988; Monárez-González y Ramírez-Maldonado, 2003; Rodríguez-Ortíz et al., 2011). El crecimiento forestal es complejo y dinámico, por lo que se necesitan modelos acordes a la complejidad del bosque o plantación bajo estudio. De manera tradicional los modelos de crecimiento con fines de manejo maderable utilizan variables de estado como: altura, diámetro, volumen y densidad (Peng, 2000; Santiago García, 2009).

Existen modelos de crecimiento que brindan información agregada o directa (predicción explícita) y otros que brindan un nivel de detalle como distribuciones diamétricas (predicción implícita) o hasta de árboles individuales (Vanclay, 1994; Torres y Magaña, 2001). Para bosques coetáneos o monoespecíficos, como las plantaciones forestales comerciales (PFC) que tienen una estructura sencilla, es recomendable utilizar los modelos de predicción explícita, pues se pueden predecir las variables de estado básicas con datos sencillos y fáciles de obtener en campo (Magaña Torres et al., 2008). Dado que el principal objetivo de muchas PFC es la producción bruta de madera (Diario Oficial de la Federación, 2003), estos modelos resultan adecuados para evaluar su desarrollo.

En México se han aplicado modelos de crecimiento y rendimiento maderable para el manejo de PFC, principalmente de especies latifoliadas, las cuales ocupan mayor superficie en el país, tales como del género *Eucalyptus*, *Cedrela*, *Tectona*, *Gmelina*, *Tabebuia* y *Acrocapus* (Reyes Valdovinos, 2006; Galán Larrea et al., 2008; Muñoz Flores et al., 2009). Para el caso de coníferas, específicamente del género *Pinus*, existen estudios de crecimiento enfocados a rodales naturales, sin embargo, existen algunas evaluaciones de PFC de algunas especies como: *Pinus cooperi*, *P. engelmannii*, *P. arizonica* y *P. durangensis* en el estado de Durango (Maldonado y Návar, 2002), *Pinus radiata*, *P. oaxacana*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus* en el estado de Guerrero (Arteaga-Martínez, 2000) y *P. patula* en el estado de Michoacán (Muñoz Flores et al., 2010).

Pinus patula var. *longepedunculata* Loock se puede encontrar plantada en los estados de Michoacán, Hidalgo, Veracruz, Puebla, Morelos, Estado de México y Oaxaca principalmente, aunque las áreas por lo general son superficies pequeñas, teniendo así una superficie aproximada de 4230 ha en el país (Sáenz-Romero et al., 2011). Es una especie endémica de México, se distribuye en Tamaulipas, Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Veracruz y Oaxaca (Perry, 1991). Se utiliza en los programas de reforestación por su abundancia y productividad (Romo Guzmán et al., 2014) y en la industria maderera por su calidad de traza, fuste recto y capacidad de poda natural (Escobar-Sandoval et al., 2018; Velazquez et al., 2004). Es una especie de alto potencial para la región de la Sierra Sur de Oaxaca por el hecho de ser nativa y ser una especie de rápido crecimiento y de alto valor comercial. Para aplicar una silvicultura cuantitativa de dicha especie en esa zona es necesario contar con información del crecimiento y rendimiento maderable mediante modelos matemáticos.

En el presente trabajo se determinó el crecimiento y rendimiento maderable mediante el ajuste de modelos matemáticos para *Pinus patula* var. *longepedunculata* Loock en plantaciones forestales comerciales localizadas en la comunidad de San Mateo Río Hondo, Miahuatlán, Oaxaca.

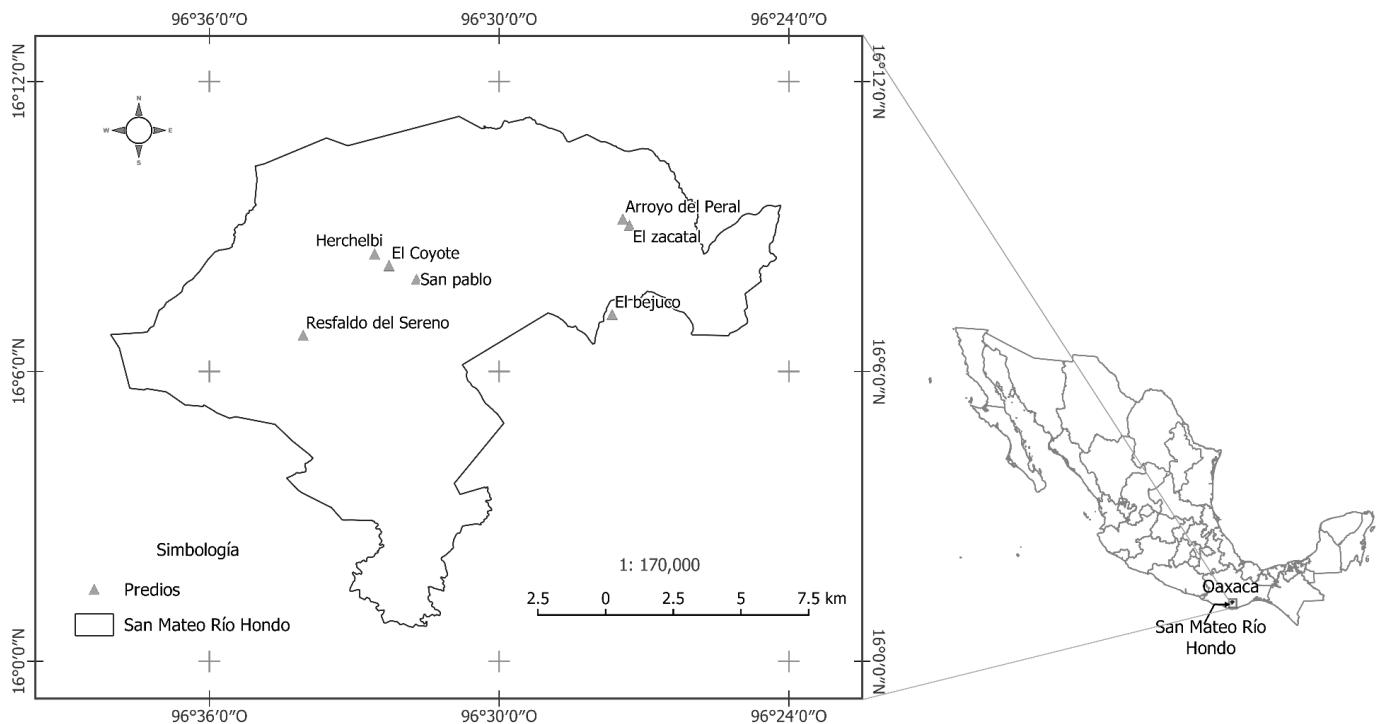


FIGURA 1. Ubicación de los predios donde están establecidas las plantaciones de *Pinus patula* en el municipio de San Mateo Río Hondo, Miahuatlán, Oaxaca (Fuente del polígono: Inegi, 2012; disponible en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 2012).

Cubicación del arbolado

Para la cubicación de los árboles individuales se utilizó el modelo de la variable combinada ajustado por Carrillo-Anzures et al. (2004), utilizado para cubicar *Pinus patula* en el estado de Hidalgo. Dicho modelo se expresa de la siguiente manera:

$$VCC = e^{-9.7688} \times (DN^2 \times HT)^{0.9451}$$

donde:

VCC = volumen total del fuste con corteza (m^3)

e = base de los logaritmos

DN = diámetro a 1.3 m (cm)

HT = altura total (m)

-9.7688 y 0.9451 = parámetros estimados

Posterior al cálculo del volumen por árbol individual se sumaron los volúmenes por sitio de muestreo y se multiplicó por 25 para extrapolar el volumen a una hectárea de superficie.

Función de altura dominante (HD) e índice de sitio

La función de altura dominante que se utilizó es el modelo de Schumacher (1) por ser un modelo ampliamente utilizado, el cual se ajustó con datos de alturas dominantes promedio (3 árboles por cada sitio de muestreo) de todos los predios, a fin de obtener la curva guía.

$$HD = \delta_0 \times e^{-\delta_1 \left(\frac{1}{E}\right)} \quad (1)$$

donde:

HD = altura dominante a la edad E

e = base de los logaritmos

δ_0, δ_1 = parámetros estimados

Para obtener el conjunto de curvas de índice de sitio, donde se relaciona la altura dominante y la edad, se utilizó el modelo de Schumacher de tipo anamórfico (2) y polimórfico (3), tomando como referencia una edad base (EB), la cual se obtuvo localizando la edad en el que el



incremento medio anual (IMA) en altura alcanza su valor máximo (Zepeda y Rivero, 1984); las ecuaciones de HD quedaron de la forma siguiente:

$$HD = IS \times e^{\delta_1 \left(\frac{1}{EB} - \frac{1}{E} \right)} \quad (2)$$

$$HD = \delta_0 \times \left(\frac{IS}{\delta_0} \right)^{\frac{EB}{E}} \quad (3)$$

donde:

IS = índice de sitio

EB = edad base

E = edad del arbolado

las demás variables y parámetros ya fueron definidas.

Área basal y volumen por hectárea

Para calcular el área basal actual se utilizó la siguiente expresión:

$$AB = \sum_i^n ab_i = \frac{\pi}{40000} \sum_i^n DN_i^2 \quad (4)$$

donde:

AB = área basal ($m^2 ha^{-1}$)

ab_i = área basal del i -ésimo árbol en el sitio n (m^2)

DN = diámetro en centímetros a 1.3 m sobre el fuste

Al tener el AB por sitio, se multiplicó por 25 para conocer el valor por hectárea y por edad de plantación.

Una vez definida la familia de curvas de IS, se realizó la proyección en AB y VCC. Para dicha proyección se utilizaron modelos para estimar el ab_i (m^2) y el VCC (m^3) que consideran a la altura dominante, lo que los hace sensibles al índice de sitio.

Para predecir el AB por hectárea se utilizó un modelo que incluye tanto la edad como la altura dominante (Torres y Magaña, 2001), el cual se expresa de la siguiente manera:

$$AB = e^{\left(\frac{-\beta_0}{E} \right)} \times HD^{\beta_1} \quad (5)$$

donde

AB = área basal ($m^2 ha^{-1}$)

β_0 y β_1 = parámetros por estimar

las demás variables ya fueron definidas.

Para la predicción del volumen se utilizó el modelo de Schumacher y Dos Santos Hall (1933) que engloba tanto el área basal como la altura dominante.

$$V = \gamma_0 \times AB^{\gamma_1} \times HD^{\gamma_2} \quad (6)$$

donde:

V = volumen por hectárea ($m^3 ha^{-1}$)

γ_0 , γ_1 y γ_2 = parámetros a estimar

las demás variables ya fueron definidas

Para el ajuste de los modelos se utilizó el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS (*Statistical Analysis System*) versión 9.0 (SAS, 2002); además, se utilizó el método de regresión aparentemente no correlacionada (SUR, por sus siglas en inglés), esto para obtener una mejor ganancia en la estimación de parámetros, ya que por este método se logra correlacionar los componentes del error de un sistema de ecuaciones (Galán Larrea et al., 2008; Santiago-García et al., 2014).

La técnica SUR proporciona una mejor estimación de parámetros cuando los componentes del error se correlacionan en un sistema de ecuaciones; además, permite compatibilidad total entre el modelo de predicción y el de proyección, de forma que los parámetros comunes de ambas ecuaciones toman los mismos valores mientras se cumple con el criterio de minimización de cuadrados de los residuos (Galán Larrea et al., 2008; Santiago-García et al., 2013).

La determinación de bondad de ajuste de los modelos utilizados se basó en los criterios utilizados por Rentería Anima (1995), los cuales son: alto valor de R^2 o pseudo R^2 (cercano a 1), cuadrado medio del error (CME) bajo, parsimonia y significancia estadística de los parámetros estimados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Función de altura dominante (HD) e índice de sitio

Con el ajuste del modelo de Schumacher se estimó la HD (curva guía), con datos de altura dominante promedio por sitio y la edad. Siendo que la edad máxima presente de los datos es de 7 años, inicialmente se usó este valor como la edad base. A partir del análisis gráfico se decidió usar de edad base 10 años por ser un número redondeado en una decena (Fig. 2). Debe mencionarse que el modelo propuesto es invariante (transitivo) de la edad base por lo que las proyecciones de altura y el etiquetado de sitios es independiente de la selección de la edad base.

Los valores de ajuste del modelo de Schumacher se muestran en la tabla 2, en donde se puede notar que el modelo tuvo un buen coeficiente de determinación (R^2) y un error estándar bajo; así mismo, los parámetros fueron altamente significativos ($p < 0.01$), lo que indica un buen ajuste del modelo, aunque el ajuste y las predicciones

podrían mejorar al tener una mayor cantidad de datos de edad.

Las familias de curvas que se obtuvieron fueron de tipo anamórficas y polimórficas, pero en el presente trabajo se decidió usar estas últimas, ya que, al sobreponer los datos de todos los árboles muestreados, estos se ajustan a este tipo de curva (Fig. 3), mientras que con las curvas anamórficas la altura proyectada se sobreestima. Esto concuerda con lo que indican Madrigal et al. (2004) en cuanto a que la mayoría de las especies forestales van a presentar un tipo de crecimiento polimórfico, debido a condiciones específicas de clima, suelo y topografía.

Las curvas de altura muestran un crecimiento exponencial hasta los 9 años de acuerdo con el IMA en altura; esto se debe a que en edades tempranas no existe competencia, posteriormente se nota un crecimiento lento. Por ejemplo, a los 20 años se predice una altura para el IS₉ o calidad de sitio bajo de 15.3 m, para el IS₁₁, 16.9 m, en el IS₁₃, 18.4 m y para el mejor sitio IS₁₅ se predice una altura de 19.8 m.

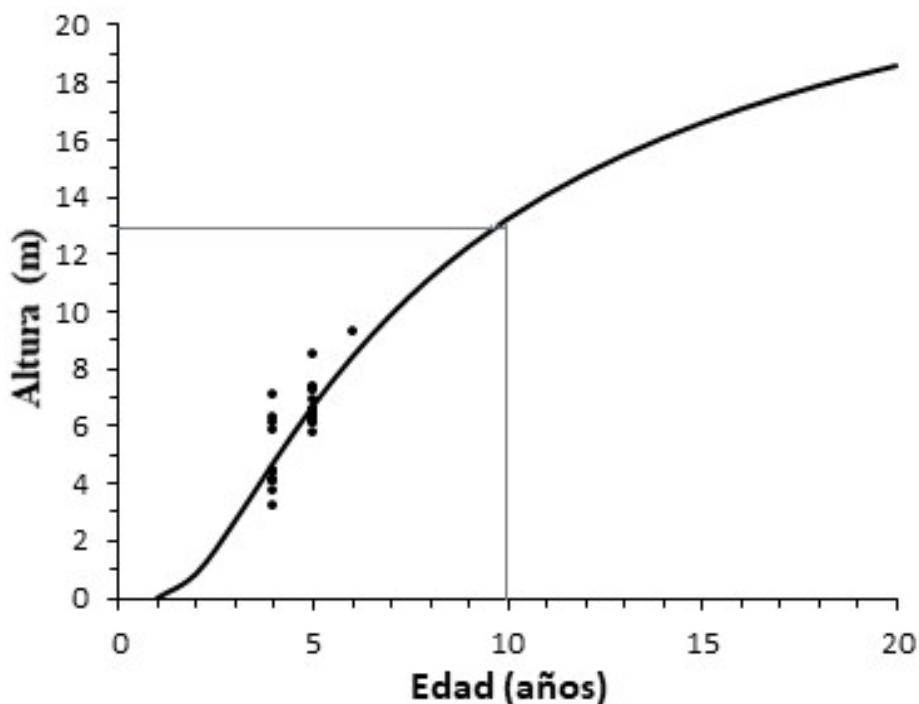


FIGURA 2. Crecimiento promedio en altura dominante (curva guía) para *Pinus patula* var. *longepedunculata* en San Mateo Río Hondo, Miahuatlán, Oaxaca.



TABLA 2. Resultado del ajuste del modelo de Schumacher con datos de edad-altura de *Pinus patula* var. *longipedunculata* en San Mateo Río Hondo, Miahuatlán, Oaxaca.

Modelo	R^2	SCE	CME	Parámetros	Valores estimados	Error estándar	Prob> t
1	0.5882	24.5941	0.8198	α_0 α_1	26.11641 6.786578	6.0171 1.0934	0.0001 <.0001

R^2 = coeficiente de determinación del modelo; SCE: Suma de cuadrados del error; CME: Cuadrado medio del error; Prob>|t|: probabilidad.

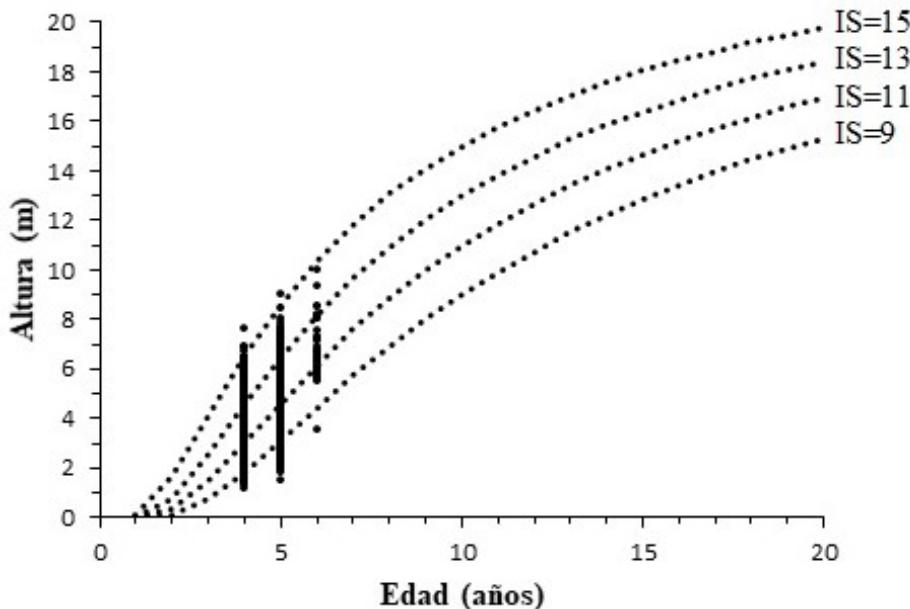


FIGURA 3. Curvas polimórficas de IS para *Pinus patula* var. *longipedunculata* en San Mateo Río Hondo, Miahuatlán, Oaxaca.

Monroy Rivera (1997) evaluó rodales naturales de *Pinus patula* en Huayacocotla, Veracruz, encontrando que, a la edad de 20 años con una EB de 40 años, en una calidad de sitio bajo IS₁₈ se alcanzan alturas de 12.90 m, 15.8 m para el IS₂₂, 18.6 m en el IS₂₆, 21.5 m en el IS₃₀ y para el mejor sitio IS=34 se puede alcanzar 24.4 m de altura. Los últimos dos IS se encuentran por arriba de lo predicho en el presente trabajo, cabe señalar que en la región de Veracruz se encuentran los rodales más productivos para esta especie en el país (Romo et al., 2014) y los datos provienen de bosques naturales, los cuales han tenido un manejo forestal los últimos 30 años, además de que se utilizan árboles cuyas edades van de 20 años a 60 años, teniendo así mayor

representatividad del crecimiento de los árboles, lo que resulta en una mejor predicción.

Existe similitud con los resultados de Santiago García (2009), quien evaluó rodales naturales de *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo, encontrando que a la edad de 20 años los árboles pueden alcanzar una altura de 17.7 m en una calidad de sitio baja y 19.8 m en una calidad de sitio alta.

Por otra parte, López Hernández (2010) encontró, en rodales naturales de Comaltepec, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, que los árboles alcanzan a los 20 años una altura de 12.6 m en un sitio de calidad baja y 16.5 m en sitios de calidad alta. Cabe resaltar que los resultados del presente estudio están por arriba de los resultados obtenidos por dicho autor, lo antes señalado podría deberse, entre otras condiciones, a

que los datos provienen de una plantación en donde los árboles tienen un crecimiento más acelerado por la intensidad del manejo.

Una vez determinados las ecuaciones de altura dominante y el índice de sitio para calificar la productividad del sitio, se puede ligar el crecimiento en AB y VCC para determinar el rendimiento por IS.

Área basal por hectárea

El resultado del ajuste del modelo no lineal de área basal por hectárea (Torres y Magaña, 2001) se muestra en la tabla

3. Para este modelo, el coeficiente de determinación (R^2) fue bueno, así mismo, se puede notar que tanto el CME como el error estándar son bajos y, además, los parámetros fueron altamente significativos ($p < 0.01$) lo que indica que el modelo tiene un buen ajuste.

En la figura 4 se manifiesta que el crecimiento en área basal de la plantación es exponencial, debido a que la plantación era aún muy joven y, como es lógico, en los sitios más productivos el área basal fue más alta por unidad de superficie.

TABLA 3. Resultado del ajuste del modelo de área basal para *Pinus patula* var. *longipedunculata* en San Mateo Río Hondo, Miahuatlán, Oaxaca.

Modelo	R^2	SCE	CME	Parámetros	Valores estimados	Error estándar	Prob> t
4	0.6535	53.905	1.7968	β_0 β_1	5.9946 1.3900	1.6465 0.171	0.001 <.0001

R2 = coeficiente de determinación del modelo. SCE: Suma de cuadrados del error; CME: Cuadrado medio del error; Prob>|t|: probabilidad

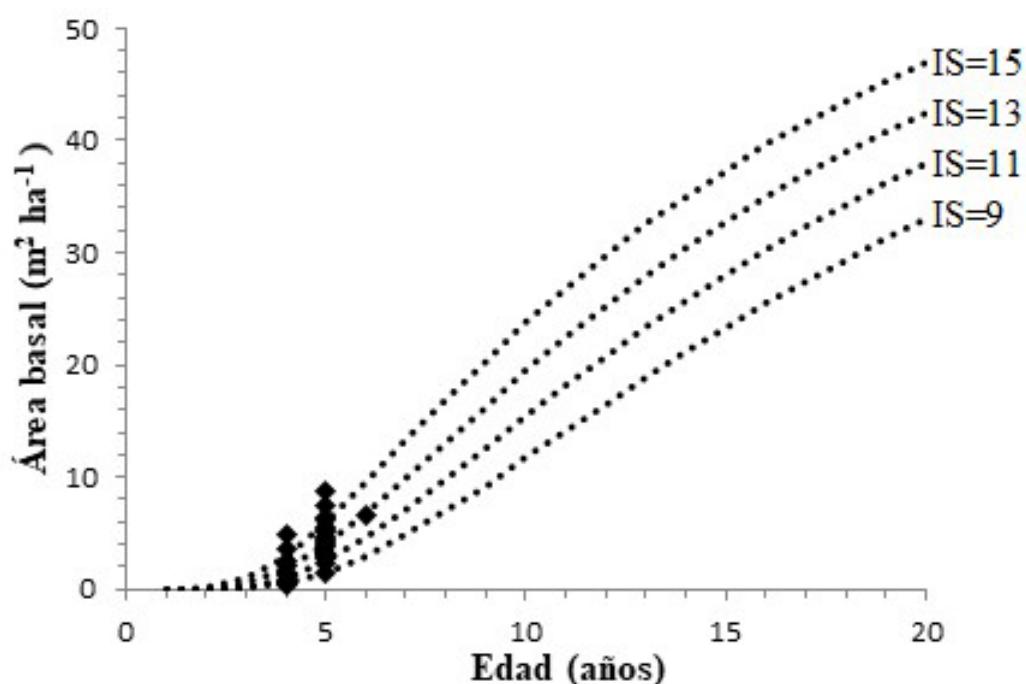


FIGURA 4. Crecimiento en área basal en diferentes índices de sitio para *Pinus patula* var. *longipedunculata* en San Mateo Río Hondo, Miahuatlán, Oaxaca.



Por otro lado, para el sitio más productivo el crecimiento acelerado continuó hasta la edad de 8 años y para el sitio más pobre, aunque los incrementos son menores, el crecimiento rápido se determina hasta la edad de 11 años. A partir de estas edades el crecimiento disminuye, esto es principalmente por la densidad, la cual no se consideró en el modelo, pues como mencionan Rodríguez-Ortíz et al. (2011), al tener un rodal denso a una cierta edad determinada, los incrementos tienden a disminuir, lo que indica la edad aproximada en donde se requerirá de un aclaro para redistribuir el AB de un rodal en un número menor de individuos para aumentar la calidad de la madera.

En el presente trabajo, el AB en los sitios comunes (IS₁₅, IS₁₃, IS₁₁, IS₉) a la edad de 20 años fue de 47 m² ha⁻¹, 43 m² ha⁻¹, 38 m² ha⁻¹ y 33 m² ha⁻¹ respectivamente; estos valores están por arriba de los observados por Monroy Rivera (1997), quienes, a la misma edad en los IS₃₀, IS₂₆, IS₂₂ e IS₁₈, obtuvieron AB de 41.14 m² ha⁻¹, 36.54 m² ha⁻¹, 32.11 m² ha⁻¹ y 28.03 m² ha⁻¹; así mismo, Santiago García (2009) encontró para el IS₂₉ un AB de 30 m² ha⁻¹ y para el IS₂₆ un AB de 26.1 m² ha⁻¹, considerando un cambio en la densidad. Dicha diferencia podría ser porque en el presente trabajo no se consideró la mortalidad o variación de la densidad.

En Angola, Delgado-Matas y Pukkala (2012) evaluaron el crecimiento de nueve especies de coníferas entre ellas *Pinus patula*, concluyendo que esta especie puede tener un crecimiento de 40 m² ha⁻¹ a la edad de 20 años, lo que coincide parcialmente con el IS₁₃ que es el IS promedio, en

el cual a esta edad se proyectan 42.5 m² ha⁻¹ por lo que se puede concluir que el modelo proporciona proyecciones que son factibles para árboles de *P. patula* creciendo en la franja tropical.

Crecimiento en volumen por hectárea

El resultado del ajuste del modelo de volumen (Schumacher y Dos Santos Hall, 1933) se resume en la tabla 4, en donde se puede notar que el coeficiente de determinación está próximo a 1, lo que indica que el modelo si tuvo un buen ajuste, asimismo, se puede ver que el error estándar es bajo y que los parámetros son altamente significativos ($p < 0.01$).

En el presente trabajo se consideraron cuatro índices de sitio (IS₉, IS₁₁, IS₁₃, IS₁₅), de los cuales a la edad de 20 años el volumen predicho fue de 187 m³ ha⁻¹, 234 m³ ha⁻¹, 282 y 330 m³ ha⁻¹, respectivamente.

En la figura 5 se puede observar que el crecimiento en volumen es exponencial, lo que indica que la plantación está en la etapa de crecimiento acelerado, pero, al igual que sucede con AB, para el sitio más pobre (IS₉) se da hasta la edad de 11 años y para el mejor sitio (IS₁₅) hasta la edad de 9 años, posteriormente los incrementos son mínimos.

Monroy Rivera (1997) predijo para los IS_{18, 22, 26, 30, 36} un volumen de 174.88 m³ ha⁻¹, 230.61 m³ ha⁻¹, 302.45 m³ ha⁻¹, 384.57 m³ ha⁻¹ y 479.41 m³ ha⁻¹, en estos resultados se incluye la densidad.

TABLA 4. Resultado del ajuste del modelo de volumen para *Pinus patula* var. *longipedunculata* en San Mateo Río Hondo, Miahuatlán, Oaxaca.

Modelo	R ²	SCE	CME	Parámetros	Valores estimados	Error estándar	Prob> t
5	0.9967	9.4885	0.3272	γ ₀	0.717101	0.0676	<.0001
				γ ₁	1.014025	0.0223	<.0001
				γ ₂	0.849373	0.0555	<.0001

R² = coeficiente de determinación del modelo. SCE: Suma de cuadrados del error; CME: Cuadrado medio del error; Prob>|t|: probabilidad.

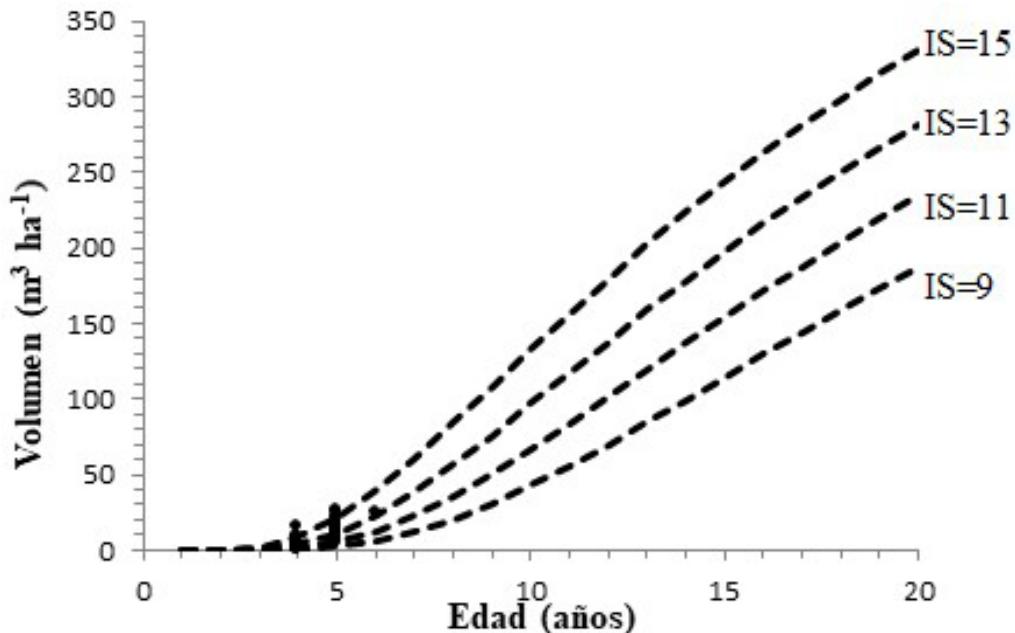


FIGURA 5. Crecimiento en volumen en diferentes índices de sitio para *Pinus patula* var. *longpedunculata* en San Mateo Río Hondo, Miahuatlán, Oaxaca.

Los resultados del presente trabajo concuerdan con los obtenidos por Santiago García (2009) hasta la edad de 12 años; sin embargo, aunque se utilizó un modelo conservador en la predicción, el volumen proyectado en el IS₁₅ ($180 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) es superior a los resultados obtenidos por dicho autor para el IS₂₉ ($109.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), dado que el modelo utilizado en el presente trabajo no considera la mortalidad. Por otra parte, para el IS₉ ($70 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), la proyección está por abajo de lo obtenido por Santiago García (2009) en el IS₂₆ ($94 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), esto podría ser porque en el área de estudio existen diferentes condiciones de pendientes y exposiciones lo que da como resultado calidades de sitio muy ricas y muy pobres.

Rendimiento maderable

En la figura 6 se muestra el incremento medio anual (IMA) y el incremento corriente anual (ICA) en volumen por IS con lo que se puede determinar el turno técnico, es decir, la edad en donde se puede obtener la máxima cosecha de madera; así, para el IS₁₅ el ICA e IMA se interceptan a la edad de 19 años (Tabla 5); lo contrario sucede con los IS inferiores en donde la edad de intercepción de los

incrementos está por arriba de los 20 años, si se siguiera con la proyección.

El IMA máximo obtenido para el sitio más productivo fue de $16.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, el cual, de acuerdo con la proyección, se logra alcanzar a la edad de 18 años. Para el IS₁₃ o sitio promedio, el IMA máximo es de $14.12 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ alcanzado a los 21 años y para el IS₁₁ o calidad regular es de $12.04 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ que se alcanza a los 25 años; para el IS₉ o de calidad baja se tiene $10.23 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y se alcanza a los 30 años. El hecho de que las diferentes productividades tengan diferentes turnos técnicos probables tiene que ver con la selección de los modelos de índice de sitio. Puesto que las curvas seleccionadas fueron polimórficas y que el supuesto de estas es que las tasas de crecimiento son específicas del sitio, cada calidad de estación tendrá su propio turno técnico.

En algunos países en donde se ha introducido esta especie se han hecho evaluaciones, tal es el caso de Delgado-Matas y Pukkala (2012), quienes mencionan que el IMA máximo para *Pinus patula* en Angola es de $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ alcanzado a la edad de 16 años; sin embargo, la rotación o turno propuesto es de 20 años, además, cabe



mencionar que el tipo de suelo y la casi nula pendiente pueden influir para que esta especie alcance tales rendimientos.

Restrepo et al. (2012) estimaron el rendimiento de esta especie en Colombia, encontrando que se pueden alcanzar incrementos medios máximos de $14 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, lo que a su vez coincide con el turno técnico obtenido a los 15 años.

Igualmente Varmola y Del Lungo (2003) mencionan que esta especie puede tener un incremento mínimo de $11 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ hasta un máximo de $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, esto de acuerdo con evaluaciones a escala mundial; en cuanto a México, la evaluación de rodales naturales se encontró que el IMA máximo que se puede alcanzar es de $11.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Santiago García, 2009), o rendimientos similares como los mencionados por Muñoz Flores et al. (2010) para esta especie, en la Sierra Purépecha en Michoacán, que alcanzó un IMA de $4.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a $15.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a

los 19 años y en la comunidad de Angahuan a los 18 años alcanzó un IMA de $17 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Sandoval García (2006) evaluó plantaciones en la Sierra Sur de Oaxaca, en los municipios pertenecientes al distrito de Miahuatlán, donde concluyó que a los 5 años *Pinus patula* var. *longipedunculata* tenía un IMA de $2.34 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y en otro predio a los 11 años tenía un IMA de $14.09 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Los datos concuerdan parcialmente con los obtenidos en este estudio, ya que, para los mejores sitios, los incrementos están por arriba de los resultados obtenidos por dicho autor, pues en el presente trabajo, a la edad de 5 años para el IS₁₃ (IS promedio) e IS₁₅ los IMA que se predijeron fueron $2.27 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $4.28 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Así, para la edad de 11 años para los mismos IS se predijeron $10.67 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $14.24 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Sin embargo, dicho autor no provee datos de altura dominante lo que no permite definir con certeza cuales son las condiciones productivas de cada sitio en particular.

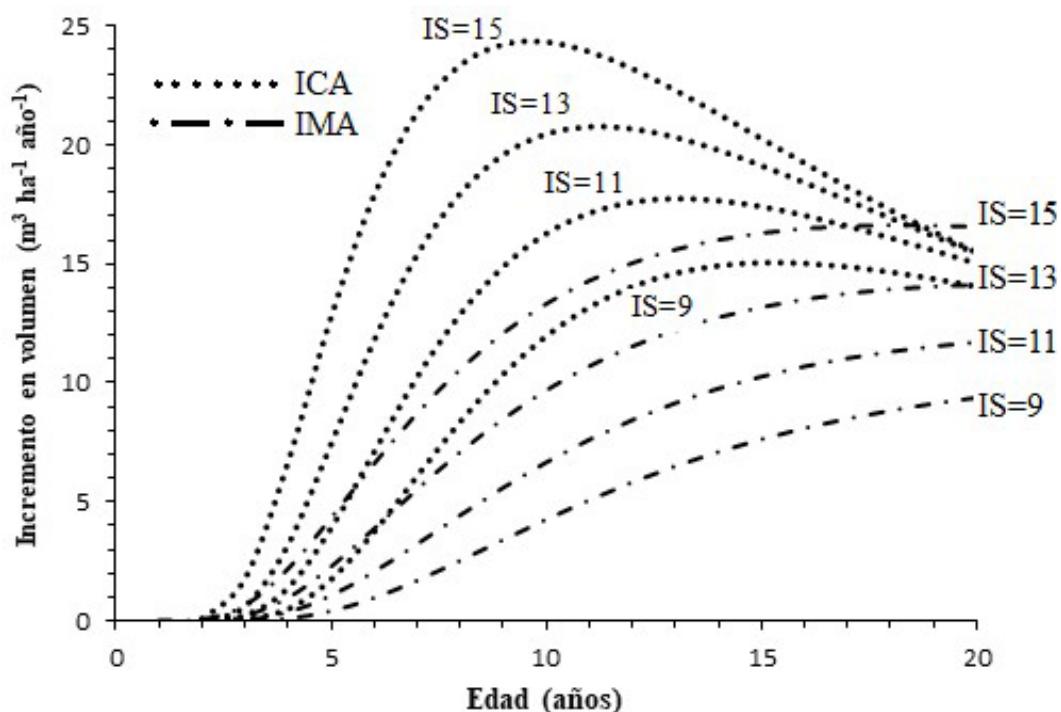


FIGURA 6. Incremento medio y corriente anual en volumen por índices de sitio para *Pinus patula* var. *longipedunculata* en San Mateo Río Hondo, Miahuatlán, Oaxaca.

TABLA 5. Predicción de crecimiento en altura, área basal, volumen y rendimiento en volumen por IS para *Pinus patula* var. *longepedunculata* Loock en San Mateo Río Hondo, Miahuatlán, Oaxaca.

Edad (años)	Altura dominante (m) por IS (EB: 10 años)				Área basal por IS (m ² ha ⁻¹)				Volumen por IS (m ³ ha ⁻¹)				ICA en volumen por IS (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)				IMA en volumen por IS (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)			
	9	11	13	15	9	11	13	15	9	11	13	15	9	11	13	15	9	11	13	15
3	0.7	1.5	2.6	4.1	0.1	0.2	0.5	1.0	0.04	0.2	0.7	1.9	0.04	0.2	0.6	1.8	0.01	0.1	0.2	0.6
4	1.8	3.0	4.6	6.5	0.5	1.0	1.8	3.0	0.5	1.5	3.9	8.6	0.5	1.4	3.2	6.7	0.1	0.4	1.0	2.2
5	3.1	4.6	6.5	8.6	1.5	2.5	4.0	6.0	2.2	5.4	11.4	21.4	1.7	3.9	7.5	12.8	0.4	1.1	2.3	4.3
6	4.4	6.2	8.2	10.4	2.9	4.6	6.8	9.5	5.9	12.5	23.2	39.4	3.7	7.1	11.8	17.9	1.0	2.1	3.9	6.6
7	5.7	7.6	9.6	11.8	4.8	7.1	9.9	13.2	12.0	22.7	38.6	60.8	6.1	10.2	15.4	21.4	1.7	3.2	5.5	8.7
8	6.9	8.9	10.9	13.1	6.9	9.8	13.1	16.8	20.4	35.6	56.6	84.2	8.4	12.9	18.0	23.4	2.5	4.4	7.1	10.5
9	8.0	10.0	12.0	14.1	9.2	12.6	16.3	20.3	30.8	50.5	76.2	108.4	10.4	14.9	19.6	24.3	3.4	5.6	8.5	12.0
10	9.0	11.0	13.0	15.0	11.6	15.4	19.4	23.7	42.7	66.7	96.6	132.8	12.0	16.2	20.5	24.4	4.3	6.7	9.7	13.3
11	9.9	11.9	13.9	15.8	14.1	18.1	22.4	26.8	55.9	83.8	117.4	156.7	13.2	17.1	20.8	23.9	5.1	7.6	10.7	14.2
12	10.7	12.7	14.6	16.5	16.5	20.8	25.2	29.8	69.9	101.4	138.1	180.0	14.0	17.6	20.7	23.2	5.8	8.4	11.5	15.0
13	11.5	13.4	15.3	17.0	18.8	23.3	27.9	32.5	84.5	119.1	158.4	202.3	14.6	17.7	20.3	22.3	6.5	9.2	12.2	15.6
14	12.2	14.1	15.9	17.6	21.1	25.7	30.4	35.0	99.5	136.7	178.2	223.6	14.9	17.6	19.8	21.3	7.1	9.8	12.7	16.0
15	12.8	14.7	16.4	18.0	23.3	28.1	32.8	37.4	114.5	154.1	197.3	243.9	15.0	17.4	19.1	20.3	7.6	10.3	13.2	16.3
16	13.4	15.2	16.9	18.5	25.4	30.2	35.0	39.6	129.5	171.1	215.8	263.1	15.0	17.0	18.4	19.3	8.1	10.7	13.5	16.4
17	14.0	15.7	17.3	18.8	27.4	32.3	37.0	41.6	144.4	187.7	233.4	281.4	14.9	16.6	17.7	18.2	8.5	11.0	13.7	16.6
18	14.5	16.2	17.7	19.2	29.4	34.3	39.0	43.5	159.1	203.7	250.3	298.7	14.7	16.1	16.9	17.3	8.8	11.3	13.9	16.6
19	14.9	16.6	18.1	19.5	31.2	36.1	40.8	45.3	173.4	219.3	266.5	315.0	14.4	15.5	16.2	16.4	9.1	11.5	14.0	16.6
20	15.3	16.9	18.4	19.8	32.9	37.9	42.5	47.0	187.5	234.3	282.0	330.5	14.0	15.0	15.5	15.5	9.4	11.7	14.1	16.5

EB: edad base; IS: índice de sitio; ICA: incremento corriente anual; IMA: incremento medio anual.

CONCLUSIONES

El crecimiento y rendimiento de *Pinus patula* var. *longepedunculata* Loock en plantaciones forestales localizadas en la comunidad de San Mateo Río Hondo, Miahuatlán, Oaxaca son muy buenos y aceptables, considerando que son más altos que el crecimiento de la misma especie en bosques naturales de la región.

REFERENCIAS

- Arteaga-Martínez, B. (2000). Evaluación dasométrica de plantaciones de cuatro especies de pinos en Ayototla, Guerrero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 6(2), 151-157.
- Carrillo-Anzures, F., Acosta-Mireles, M., Tenorio-Galindo, G., & Becerra Luna, F. (2004). Tabla de volumen para *Pinus patula* Schl. et Cham., en el Estado de Hidalgo. Folleto Técnico No. 2. Inifap-Sagarpa.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio] (2012). *Portal de Geoinformación, Áreas Geoestadísticas Municipales 2012*. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Delgado-Matas, C., & Pukkala, T. (2012). Growth and yield of nine pine species in Angola. *Journal of Forestry Research*, 23(2), 197-204. <https://doi.org/10.1007/s11676-012-0239-3>
- Diario Oficial de la Federación. (2003). *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/pdf/wo83184.pdf>
- Escobar-Sandoval, M. C., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Espinosa-Zaragoza, S., & Borja-de la Rosa, A. (2018). Parámetros genéticos de calidad de madera, crecimiento y ramificación en *Pinus patula*. *Madera y Bosques*, 24(2), e2421595. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421595>



Galán Larrea, R., De los Santos Posadas, H. M., & Valdez Hernández, J. I. (2008). Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosques*, 14(2), 65-82. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1421213>

García, E. (1987). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (4^a ed.). Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México.

García, O. (1988). Growth modelling - a (re)view. *New Zealand Journal of Forestry*, 33(3), 14-17. http://nzjf.org.nz/free_issues/NZJF33_3_1988/1BC16DCE-AF0F-4839-8CFA-A5D9D11C4319.pdf

Hernández Carmona, O., Ramírez García, E. O., & Mendizábal Hernández, L. (2003). Variación en semillas de cinco procedencias de *Pinus pseudostrobus* Lindl. *Forestal veracruzana*, 5(2), 23-28.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (1999). Conjunto de Datos Vectoriales Edafológico, Serie II, escala 1:250 000 (Continuo Nacional). http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/vectorial_sericii.aspx

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2010). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación, Serie IV, escala 1:250 000 (Continuo Nacional). <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/usosuelo/Default.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2013). Áreas Geoestadísticas Municipales, escala: 1:250 000. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825292829>

López, A. M., Barrios, A., Ortega, A., Nieto V. M., Gasca, G., & Salamanca, M. (2007). Empleo de un modelo de crecimiento y rendimiento para la determinación de la edad óptima de rotación de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* creciendo en la región oriental de Colombia. *Revista Colombia Forestal*, 10(20), 119-126. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2007.1.a06>

López Hernández, E. N. (2010). *Índice de sitio para Pinus patula Schl. et Cham., en Santiago Comaltepec, Ixtlán; Oaxaca* [Tesis de licenciatura no publicada]. Universidad Autónoma Chapingo.

Madrigal, S., Moreno, J., & Vázquez, I. (2004). Comportamiento de dos métodos en la predicción y representación gráfica del índice de sitio. *Revista Ciencia Forestal en México*, 29(95), 23-41. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/Forestales/issue/view/10>

Magaña Torres, O. S., Torres Rojo, J. M., Rodríguez Franco, C., Aguirre Díaz, H., & Fierros González, A. M. (2008). Predicción de la producción y rendimiento de *Pinus rufa* Endl. en Aloapan, Oaxaca. *Madera y Bosques*, 14(1), 5-19. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1411214>

Maldonado, D., & Návar, J. (2002). Ajuste y predicción de la distribución Weibull a las estructuras diamétricas de plantaciones de pino de Durango, México. *Madera y Bosques*, 8(1), 61-72. <https://doi.org/10.21829/myb.2002.811306>

Monárez-González, J. C., & Ramírez-Maldonado, H. (2003). Predicción del rendimiento en masas de densidad excesiva de *Pinus durangensis* Mtz. en el estado de Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(1), 45-56.

Monroy Rivera, C. R. (1997). *Evaluación de crecimiento y productividad de Pinus patula Schl. et Cham. en la región de Huayacocotla, Veracruz, México*. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/7705/>

Muñoz Flores, H. J., Coria Ávalos, V. M., García Sánchez, J. J., & Balam Che, M. (2009). Evaluación de una plantación de tres especies tropicales de rápido crecimiento en Nuevo Urecho, Michoacán. *Revista Ciencia Forestal en México*, 34(106), 61-87. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/Forestales/article/view/132/123>

Muñoz Flores, H. J., Orozco Gutiérrez, G., Coria Ávalos, V. M., & García Magaña, J. J. (2010). Factores ambientales de *Pinus patula* Schl. et Cham. y su adaptación a las condiciones de la Sierra Purépecha, Michoacán. *Forestal Veracruzana*, 12(2), 27-33.

Peng, C. (2000). Growth and yield models for uneven-age stands: past, present and future. *Forest Ecology and Management*, 132(2-3), 259-279. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00229-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00229-7)

Perry Jr. J. P. 1991. *The pines of Mexico and Central America*. Timber Press.

Rentería Anima, J. B. (1995). *Sistema de cubicación para Pinus cooperi Blanco mediante ecuaciones de abusamiento en Durango*. [Tesis de Maestría no publicada]. Universidad Autónoma Chapingo.

Restrepo, H. I., Orrego, S. A., del Valle, J. I., & Salazar, J. C. (2012). Rendimiento, turno óptimo forestal y rentabilidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* y *Pinus patula* en Colombia. *Interciencia*, 37(1), 14-20.

Reyes Valdovinos, J. R. (2006). *Sistemas de cubicación de Eucalyptus grandis y E. urophylla en los límites de Veracruz y Oaxaca*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo]. <http://files.departamento-de-productos-forest.webnode.es/200001677-929ae948e4/Reyes%20Valdovinos%20Jose%20Rogelio%20202006.pdf>

- Rodríguez-Ortíz, G., Aldrete, A., González-Hernández, V. A., De los Santos-Posadas, H. M., Gómez-Guerrero, A., & Fierros-González, A. M. (2011). ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula*? *Agrociencia*, 45(6), 719-732. <http://www.colpos.mx/agrocienc/Bimestral/2011/ago-sep/art-7.pdf>
- Romo Guzmán, D., Navarro Garza, H., De los Santos Posadas, H. M., Hernández Romero, O. & López Upton, J. (2014). Crecimiento maderable y biomasa aérea en plantaciones jóvenes de *Pinus Patula* Schiede ex Schtdl. et Cham. en Zacualpan, Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(23), 78-91.
- Sáenz-Romero, C., Beaulieu, J., & Rehfeldt, G. E. (2011). Variación genética altitudinal entre poblaciones de *Pinus patula* de Oaxaca, México, en cámaras de crecimiento simulando temperaturas de calentamiento global. *Agrociencia*, 45(3), 399-411.
- Sandoval García, C. (2006). Evaluación de sobrevida, estado fitosanitario y crecimiento de plantaciones de pinos en Miahuatlán, Oaxaca. [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. <http://repositorio.aaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/903/59344s.pdf?sequence=1>
- Santiago García, W. (2009). *Sistema de crecimiento y rendimiento para Pinus patula de Zinacantan, Hidalgo, México*. [Tesis de maestría no publicada]. Colegio de Postgraduados.
- Santiago-García, W., De los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., Valdez-Lazalde, J. R., Del Valle-Paniagua, D. H., & Corral-Rivas, J. J. (2013). Auto-aclareo y guías de densidad para *Pinus patula* mediante el enfoque de regresión de frontera estocástica. *Agrociencia*, 47(1), 75-89. <http://www.colpos.mx/agrocienc/Bimestral/2013/ene-feb/art-7.pdf>
- Santiago-García, W., De los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., Corral-Rivas, J. J., Valdez-Lazalde, J. R., & Del Valle-Paniagua, D. H. (2014). Predicción del rendimiento maderable de *Pinus patula* Schl. et Cham. A través de modelos de distribución diamétrica. *Agrociencia*, 48(1), 87-101. <http://www.colpos.mx/agrocienc/Bimestral/2014/ene-feb/art-6.pdf>
- SAS (Statistical Analysis System). (2002). The SAS System for Windows version 9.0. SAS Institute Inc.
- Schumacher, F. X., & Dos Santos Hall, F. (1933). Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, 47(9), 719-734. <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND43968352/PDF>
- Torres, J. M., & Magaña, O. S. (2001). *Evaluación de plantaciones forestales*. Limusa.
- Vanclay, J. K. (1994). *Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests*. Wallingford, UK: CAB International. http://epubs.scu.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1538&context=esm_pubs
- Varmola, M., & Del Lungo, A. (2003). Planted forests database (PFDB): structure and contents. *Planted Forests and Trees Working Papers*, Working Paper FP/25. Forest Resources Development Service, FAO.
- Velazquez, M. A., Ángeles-Pérez, G., Llanderal, O. T., Roman, J. A. & Reyes, H. V. (2004). Monografía de *Pinus patula* (1^a ed.). Conafor-Semarnat-Colpos.
- Zepeda, E. M., & Rivero, P. (1984). Construcción de curvas anamórficas de índice de sitio: exemplificación del método de la curva guía. *Ciencia Forestal*, 9(51), 3-38. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/Forestales/article/view/1070/1068>

Manuscrito recibido el 10 de febrero de 2022

Aceptado el 4 de julio de 2022

Publicado el 19 de julio de 2022

Este documento se debe citar como:

Pedro Cruz, A., Galán Larrea, R., de los Santos-Posadas, H. M., Valera Venegas, G., Rivera Nava, J. L., & Sandoval García, C. (2022). Crecimiento de *Pinus patula* var. *longepedunculata* Loock en plantaciones de la Sierra Sur de Oaxaca. *Madera y Bosques*, 28(1), e2811438. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2811438>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.