



# Potencial productivo de *Cedrela odorata* L.: estimación mediante el modelo 3-PG

## Productive potential of *Cedrela odorata* L.: estimation through the 3-PG model

Flor María Montero-Solís<sup>1,2\*</sup>, José Álvarez-Muñoz<sup>3</sup> y Miguel Ángel López-López<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados. Postgrado Ciencias Forestales. Montecillo, Estado de México, México.

<sup>2</sup> Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Tuxpan, Veracruz, México.

<sup>3</sup> Weyerhaeuser. Seattle, Washington, Estados Unidos. \* Autora de correspondencia. fmontero\_s@hotmail.com

### RESUMEN

La productividad de los sistemas forestales en el trópico mexicano ha tenido serias restricciones por la carencia de prácticas silvícolas que promuevan su competitividad. *Cedrela odorata* L. (cedro rojo) es una especie económicamente importante en el trópico mexicano y se conoce poco acerca de sus rendimientos y de cómo mejorar su productividad. El modelo 3-PG (Principios fisiológicos de predicción del crecimiento) permite predecir el crecimiento de un rodal, incluso en áreas donde no ha crecido la especie, estimando la productividad del sitio. En el presente trabajo se estimó, mediante el modelo 3-PG, el crecimiento de *C. odorata* y el efecto que tiene la nutrición sobre la especie a partir de variables fisiológicas de esta y de especies similares. La biomasa de follaje y el diámetro promedio a la altura del pecho fueron mayores en la condición con fertilización. En el año cinco se registró el mayor volumen en la condición con fertilización (FR = 0.6): 66.9 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>; en ese mismo año, el incremento en volumen sin fertilización (FR = 0.3) fue 51.9 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Además, el volumen del rodal, la biomasa de tronco y la altura también incrementaron con la edad del rodal en el tratamiento con fertilización. El modelo 3-PG se aplica por vez primera en esta especie y en México, por lo que se requiere continuar con estudios ecofisiológicos de la especie y aspectos de nutrición, para lograr una mejor predicción del crecimiento y, de ese modo, que este modelo sea una herramienta útil en la toma de decisiones de manejo forestal.

PALABRAS CLAVE: nutrición; plantación forestal; procesos; trópico.

### ABSTRACT

The productivity of forest systems in the Mexican tropics has been severely constrained by the lack of silvicultural practices that promote their competitiveness. Red cedar wood is an economically important species in the Mexican tropics, and little is known about yields and how to improve its productivity. The 3-PG model (Physiological Processes Predicting Growth) allows to predict the growth of a stand even in areas where the species has not grown, estimating the productivity of the site. The present study estimated the growth and effect of nutrition on the species through the 3-PG model from the physiological variables of the species and similar one. Foliage biomass mean diameter at breast height, in the fertilized condition increased when fertilization was considered in the stand. The year five was the one that registered the highest volume in the condition with fertilization (FR = 0.6) of 66.9 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> vs without fertilization (FR = 0.3), 51.9 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. In addition, the stem volume (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), trunk biomass (Mg ha<sup>-1</sup>) and height (cm) also increased with the age of the stand in the fertilization treatment. The 3-PG model is applied for the first time in this species and in Mexico, so it is necessary to continue with ecophysiological studies of the species and aspects of nutrition, to achieve a better prediction of growth and to be a useful tool in decision making of forest management.

KEYWORDS: nutrition; forest plantation; processes; tropic.

### INTRODUCCIÓN

El cedro rojo es una especie multipropósito (López-Sánchez y Musálem, 2007). Actualmente, tiene la categoría de protección especial (PR) en la norma NOM-059-

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2010) y es una de las especies forestales de mayor importancia económica en México, seguida de *Eucalyptus* spp, se cataloga como madera preciosa

destinada para aserrío. A nivel comercial en el periodo de 1998 a 2008, *C. odorata* representó aproximadamente 20.7% (20 750 ha) de las plantaciones forestales comerciales (PFC) en México, siendo los estados de Veracruz y Campeche los que contienen 51% de ellas (Comisión Nacional Forestal [Conafor]-Colegio de Postgraduados [Colpos], 2011). Ha sido una de las especies demandadas en el mercado internacional por sus características estéticas, propiedades tecnológicas y durabilidad (Arnáez, 1988; Conafor-Colpos, 2011). Sin embargo, la productividad y competitividad de esta especie en el sector forestal ha estado restringida por la magnitud del turno y problemas sanitarios causados por el barrenador *Hypsipyla grandella*, que frena el crecimiento y la calidad de la madera (Plan Nacional de Desarrollo [PND] (2013-2018). A escala nacional, se han realizado algunos trabajos que evalúan el rendimiento promedio de plantaciones de *C. odorata* (Conafor-Colpos, 2011), no obstante, aún es escasa la información de campo. La zona norte del estado de Veracruz cuenta con potencial para la explotación forestal por poseer especies preciosas maderables en su composición florística, pero no se cuenta con registro del volumen de producción (Exploración y Producción [PACMA] e Instituto Nacional de Administración Pública, A.C. [INAP], 2013), debido a que la actividad es incipiente y existen muy pocas unidades de producción; a pesar de que el procesamiento de la madera (ebanistería) se ha venido ejecutando por más de 30 años.

Mediante el modelo 3-PG (Principios fisiológicos de predicción del crecimiento), se puede predecir el crecimiento de un rodal incluso en áreas donde no ha crecido la especie en cuestión, estimando así la productividad del sitio (Landsberg, Waring y Coops, 2003), con base en procesos fisiológicos que predicen el crecimiento de árboles de la misma edad a partir de datos parametrizados relativamente homogéneos en un rodal (Sands y Landsberg, 2002).

El modelo es aplicable a diversas especies arbóreas y predice el crecimiento de rodales de la misma edad. Utiliza características fisiológicas específicas de la especie (Rodríguez y Álvarez, 2010) en conjunto con datos

empíricos del rodal para cuantificar la producción primaria neta (PPN, Mg ha<sup>-1</sup>), la distribución de asimilados a los depósitos de biomasa, la dinámica de la población y el balance del agua en el suelo (González-Benecke, Jokela, Cropper, Bracho y Leduc, 2014).

El modelo 3-PG ha sido utilizado y adaptado para validar diversos procesos además del crecimiento: partición de biomasa, absorción de luz, balance de agua, respuestas a CO<sub>2</sub>, distribución del diámetro y mortalidad (Forrester y Tang, 2016) en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) (Coops, Hember y Waring 2010; Swenson, Waring, Fan y Coops, 2005) y *Eucalyptus globulus* (Sands y Landsberg, 2002; Rodríguez-Suárez, Soto e Iglesias, 2010; Vega-Nieva *et al.*, 2013), así también para evaluar interacciones y sus efectos en densidad de rodales con especies mixtas (Forrester y Tang, 2016), mas no en especies tropicales como *C. odorata*. Disponer de herramientas que permitan predecir el crecimiento y productividad de esta especie económicamente importante permitiría impulsar la actividad forestal con el establecimiento de plantaciones maderables, mejorando las prácticas silvícolas de la especie que permitan activar e incrementar el sector forestal en la zona norte del Estado de Veracruz.

## OBJETIVOS

Conocer el potencial productivo de *Cedrela odorata* L. mediante el modelo de predicción fisiológico 3-PG en el municipio de Tihuatlán, Veracruz.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del modelo

El modelo 3-PG fue desarrollado por Landsberg y Waring (1997); requiere como entradas datos climáticos mensuales de radiación solar (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), temperatura promedio del aire (°C), déficit atmosférico de presión de vapor (mbar), precipitación (mm mes<sup>-1</sup>) y días con heladas (días mes<sup>-1</sup>). Otras entradas son los factores de las propiedades físicas del suelo como latitud, fertilidad del suelo (FR), textura del suelo y máxima disponibilidad de agua en el suelo (mm) (González-Benecke *et al.*, 2014). El modelo se puede aplicar



desde los 2 años hasta los 20 años del rodal, usando datos mensuales del clima o bien datos históricos promedio.

Las salidas del modelo pueden ser de valores mensuales o anuales, incluyen tallo o fuste (madera de fuste + corteza + ramas, raíces y follaje ( $W_S$ ,  $W_R$ ,  $W_F$ ; t ha<sup>-1</sup>), disponibilidad de agua en el suelo (mm) y transpiración del rodal (mm). Las salidas del modelo también abarcan índice de área foliar del dosel ( $L$ ), volumen promedio del fuste (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), promedio del diámetro del fuste a la altura del pecho (DAP, cm), promedio del incremento del fuste, volumen (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y número de fustes (árboles por hectárea). El modelo 3-PG está formado por cinco submodelos: la asimilación de carbohidratos, la distribución de biomasa entre raíces, tallos y follaje, la determinación del número de fustes (ha), el balance del agua en el suelo y la conversión de los valores de biomasa en variables de interés comercial (Sands y Landsberg, 2002).

El primer submodelo predice la absorción de luz y calcula la productividad primaria bruta (PPB), con base en el máximo potencial de intercepción de luz, reducido en respuesta a limitaciones de la temperatura, heladas, déficit de la presión de vapor (VPD), humedad y fertilidad del suelo, CO<sub>2</sub> atmosférico y edad del rodal. La productividad primaria neta (PPN) se calcula considerando PPN/PPB = 0.47, la cual es una constante para los árboles. La nutrición se clasifica por un índice FR, basado en la evaluación de la fertilidad del suelo del sitio. La nutrición afecta la eficiencia cuántica del dosel, así como la distribución de carbohidratos. La radiación fotosintéticamente activa (PAR  $\Phi_{pa}$ ) que incide sobre el dosel se calcula de la radiación solar, suponiendo que 1 MJ de radiación solar es equivalente a 2.3 mol PAR. La PAR es absorbida por el dosel  $\Phi_{pa}$  (mol m<sup>-2</sup>) y se determina del índice de área foliar y  $\Phi_{pa}$  mediante la Ley de Beer. Este cálculo considera que el follaje se distribuye uniformemente en el rodal. Se calcula la producción primaria bruta  $P_G$  de la radiación fotosintéticamente activa utilizable ( $\Phi_{p.a.u.}$ ) y el coeficiente de la eficiencia cuántica del dosel. La radiación fotosintéticamente activa utilizable ( $\Phi_{p.a.u.}$ ) se obtiene reduciendo los valores de la radiación fotosintéticamente

activa  $\Phi_{p.a.}$  por cantidades determinadas por modificadores ( $f_i$ ) con valores que varían entre 0 y la unidad (1). El coeficiente de la eficiencia cuántica del dosel está basado en el déficit de la presión atmosférica de vapor, agua disponible en el suelo ( $f_{sw}$ ), temperatura promedio del aire ( $f_t$ ), días helados por mes ( $f_h$ ), fertilidad del sitio ( $f_N$ ) y edad del rodal ( $f_{edad}$ ). Los indicadores reflejan las restricciones impuestas en la utilización de radiación absorbida por las hojas debido al cierre estomático, causado por alto déficit en la presión de vapor ( $D$ ), sequía del suelo, definida por la relación de la cantidad de agua en la zona de la raíz a la máxima cantidad posible agua máxima disponible ( $\theta$ ) mm, o los efectos de temperaturas sub-heladas (González-Benecke *et al*, 2014; Landsberg, Johnsen, Albaugh, Lee Allen y McKeand, 2001; Forrester y Tang 2016; Sands y Landsberg *et al*, 2003; Landsberg y Waring, 1997).

La productividad primaria bruta (PPB o  $P_G$  carbono fijado por unidad de tiempo, mol m<sup>-2</sup> o Mg ha<sup>-1</sup>) es proporcional a  $\Phi_{pa}$  con 1 mol de carbono equivalente a 24 g<sub>DM</sub>. La productividad primaria neta, que es equivalente a la respiración autotrófica, es una fracción constante ( $Y = 0.47$ ) de PPB o GPP, se calcula de una relación simple de PPN a PPB o GPP. Posteriormente se distribuye a raíces, tallos y follaje. La distribución de carbono a las raíces se basa en el principio del buen establecimiento de la plantación que influencia las condiciones del crecimiento, así la proporción de PPN distribuida a las raíces incrementa si el estatus nutricional y/o relación de agua es pobre (Sands y Landsberg, 2002). El segundo submodelo se refiere a la distribución de la PPN al follaje, tallo y raíces. La distribución a las raíces es influida por la fertilidad, el VPD y la humedad del suelo. Esta distribución de la biomasa (PPN) a las raíces se determina por las condiciones de crecimiento, tal como se expresa por el agua disponible en el suelo, déficit de presión de vapor y nutrición del sitio; así, la proporción  $W_R$  de la distribución de PPN a las raíces incrementa cuando el estatus nutricional o la disponibilidad de agua en el suelo son bajos. La distribución de la biomasa al follaje  $W_F$  y a los tallos  $W_S$  varía con las condiciones de crecimiento y de tamaño de los individuos en el rodal. La

distribución a tallo y follaje en el modelo de 3-PG es autorregulado; se basa en la relación de derivadas de las ecuaciones alométricas que describen la biomasa de follaje ( $W_F$ ) y tallo en términos del diámetro del tronco a la altura del pecho. La distribución del carbono al follaje va a variar de acuerdo con la edad del rodal (tamaño del árbol) y las condiciones de crecimiento (humedad del suelo, VPD, fertilidad del suelo). El modelo calcula mensualmente cambios en biomasa del fuste, para ello se usa una ecuación alométrica inversa (resuelta del promedio de DAP), por lo que la relación entre DAP y  $W_F$  determina el área basal del rodal y el volumen en cualquier tiempo.

El tercer submodelo referido a la mortalidad de árboles determina si hay dependencia de densidad-mortalidad, usando la ley del autoclareo o de los  $-3/2$ , ajustando el número de árboles por hectárea. Así también, calcula si existe independencia de la densidad-mortalidad. El primer paso es el cálculo del promedio de la biomasa del fuste de árboles individuales ( $\text{kg árbol}^{-1}$ ), si el valor calculado es menor que la biomasa del fuste del árbol en un rodal a una densidad de 1000 árboles por hectárea, la mortalidad es posteriormente calculada usando una función de la mortalidad independiente de la densidad. Si el promedio del tronco de árboles individuales excede la biomasa del tronco del árbol objetivo, entonces el número de árboles se reduce por la ley de los  $-3/2$ . Cuando los tallos de los árboles se eliminan, se presume que es 20% de la biomasa y, por tanto, los árboles que mueren son aquellos más pequeños con baja biomasa y poco o nada de follaje. Después se calcula el área basal (AB,  $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ), a partir del diámetro promedio a la altura del pecho y se actualiza la densidad de árboles; el volumen del fuste sin corteza ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) se calcula de la actualización de  $W_s$  (descontando la fracción de corteza y ramas) y la gravedad específica de la madera; el volumen del fuste con corteza ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) se calcula del volumen del fuste sin corteza y la fracción del volumen de la corteza. Para el siguiente proceso (mes), se utiliza la actualización de los valores de biomasa de los árboles por hectárea,  $W_s$ ,  $W_F$  y  $W_R$ , repitiéndose el ciclo y ajustando las funciones de edad-dependencia.

El cuarto submodelo calcula el balance del agua en el suelo, esto se realiza calculando la conductancia del dosel a vapor de agua. Para ello, se emplea la conductancia máxima específica del dosel de la especie ( $\text{m s}^{-1}$ ) y el índice de área foliar IAF ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ). En seguida, se ajusta el valor sobre VPD y humedad del suelo. Se calcula posteriormente la transpiración del rodal ( $\text{mm mes}^{-1}$ ) con el modelo Penman-Monteith y la evaporación del dosel se calcula usando IAF, la intercepción del dosel y la cantidad de lluvia. La evapotranspiración del rodal es calculada como la transpiración del dosel + evaporación del dosel. Los cambios del agua disponible del suelo se calculan posteriormente y se consideran como la diferencia entre precipitación y pérdidas por evapotranspiración. Cuando la evapotranspiración es mayor que el agua disponible en el suelo, la PPN se reduce (González-Benecke *et al.*, 2014; Landsberg *et al.*, 2001; Forrester y Tang 2016; Sands y Landsberg *et al.*, 2003; Landsberg y Waring, 1997).

### Parametrización del modelo para *Cedrela odorata* L.

La versión utilizada para modelar el volumen ( $\text{m}^3$ ) de madera de cedro rojo a 20 años en este trabajo fue 3PGpjs.2.7 (Sands, 2010).

En la tabla 1 se presentan en forma resumida los parámetros que se utilizaron. Algunos de ellos fueron basados en la especie *Eucalyptus* sp, debido a que solo se cuenta con información de esta especie, la cual presenta cierta analogía con algunos parámetros fisiológicos y que para el modelo y por la carencia de trabajos ecofisiológicos para *C. odorata* se utilizó como referencia (Araque, Jaimez, Azócar, Espinoza y Tezara, 2009; Álvarez, Álvarez, Cano y Suescún, 2012), así como valores predeterminados del modelo. Los datos de inicialización del rodal y datos del sitio para el desarrollo del modelo se obtuvieron de la plantación de *C. odorata* establecida en arreglo factorial de  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  desde octubre de 2014 en la localidad de Miahuapan, Tlaxiahuatlán Veracruz. Este sitio se encuentra en la Llanura Costera del Golfo de México a una altitud de 110



TABLA 1. Descripción de parámetros 3-PG, símbolos 3PGpis y valores.

Descripción del parámetro	Símbolo	Unidad	Valor para C. odorata	Valor predeterminado, Ajustado, consultado
<b>Partición y movimiento de biomasa</b>				
<i>Relaciones alométricas y partición</i>				
Follaje: proporción de la partición del tronco en D = 2 cm	$p_{FS2}$	-	0.096	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Follaje: proporción de la partición del tronco en D = 20 cm	$p_{FS20}$	-	0.034	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Constante de la masa del tronco y relación con el diámetro	$a_S$	-	0.065	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Potencial de la masa del tronco y relación con el diámetro	$n_S$	-	2.68	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Máxima fracción de PPN a raíces	$n_{Rx}$	-	0.8	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Mínima fracción de PPN a raíces	$n_{Rn}$	-	0.25	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
<i>Hojarasca y rotación radicular</i>				
Máxima tasa de producción de hojarasca	$\gamma_{Fx}$	Mes	0.03	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Tasa de producción de hojarasca en t = 0	$\gamma_{F0}$	Mes	0.001	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Edad en la cual la tasa de producción de hojarasca tiene valor medio	$t_{\gamma F}$	Mes	4	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Tasa promedio mensual de la rotación radicular	$\gamma_R$	Mes	0.015	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
<b>PNN y modificadores de la conductancia</b>				
<i>Modificador de la temperatura <math>f_T</math></i>				
Temperatura mínima para crecer	$T_{min}$	°C	20	Conabio, 2016; OFI-Catie, 2016
Temperatura óptima para crecer	$T_{opt}$	°C	24	Conabio, 2016; OFI-Catie, 2016
Temperatura máxima para crecer	$T_{max}$	°C	35	Conabio, 2016; OFI-Catie, 2016
<i>Modificador de helada <math>f_{Frost}</math></i>				
Producción por pérdida por días de helada	$k_F$	Días	0	Conabio, 2016; OFI-Catie, 2016
<i>Modificadores de agua en el suelo <math>f_{SW}</math></i>				
Déficit de la tasa de humedad para $f_\theta = 0.5$	$S_{Wconst}$	-	0.7	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Potencial del déficit de la tasa de humedad	$S_{Wpower}$	-	9	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
<b>Modificador de CO<sub>2</sub> atmosférico <math>f_{CO_2}</math></b>				
Factor de asimilación mejorado en 700 ppm	$f_{C\alpha 700}$	-	1.4	Predeterminado
Factor de mejoramiento de la conductancia del dosel a 700 ppm	$f_{Cg 700}$	-	0.7	Predeterminado
<b>Efectos de la fertilidad</b>				
Valor de 'm' cuando FR = 0	$m_0$	-	0	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Valor de 'f Nutr' cuando FR = 0	$f_{N0}$	-	1	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Potencial de (1- FR) en 'f Nutr'	$f_{Nn}$	-	0	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
<b>Modificador de la edad <math>f_{edad}</math></b>				
Máxima edad usada del rodal como edad modificada	$t_x$	Años	50	Predeterminado
Potencial de edad relativa en función de $f_{edad}$	$n_{edad}$	-	4	Predeterminado
Edad relativa dada $f_{edad}=0.5$	$r_{edad}$	-	0.95	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp

<b>Mortalidad de árboles y auto-aclareo</b>				
Tasa de mortalidad para tiempo t	$\gamma_{Nx}$	Años	0	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Tasa de mortalidad de plántulas (t = 0)	$\gamma_{N0}$	Años	0	Predeterminado
Edad en la que la tasa de mortalidad tiene un valor medio	$t_{\gamma n}$	Años	0	Predeterminado
<b>Forma de respuesta de la mortalidad</b>				
Máxima masa del tronco por árbol en 1000 árboles/ha	$W_{Sx1000}$	kg/árbol	300	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Potencial en el principio de auto-raleo	$n_N$	-	1.5	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Fracción media de biomasa de follaje perdida por muerte individual de árbol.	$m_F$	-	1	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Fracción media de biomasa de raíz perdida por muerte individual del árbol.	$m_R$	-	0.2	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Fracción media de biomasa de tronco perdida por muerte individual del árbol.	$m_S$	-	0.2	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
<b>Producción y respiración</b>				
Eficiencia cuántica del dosel	$\alpha_{Cx}$	molC/molPAR	0.055	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Relación PPN/PPB	$\gamma$	-	0.47	Predeterminado
<b>Conductancia</b>				
Conductancia mínima del dosel	$g_{Cn}$	m/s	0	Predeterminado
Conductancia máxima del dosel	$g_{Cx}$	m/s	0.02	Predeterminado
Índice de área foliar (IAF) para la conductancia máxima del dosel	$L_{Cx}$	-	3.33	Predeterminado
Define la respuesta estomática a déficit de la presión atmosférica de vapor de presión (VPD).	$k_D$	mbar	0.05	Predeterminado
Capa límite de la conductancia del dosel	$g_B$	m/s	0.02	Predeterminado
<b>Madera y propiedades del rodal</b>				
Ramas y fracción de corteza				
Rama y fracción de corteza en la edad 0	$p_{BB0}$	-	0.75	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Rama y fracción de corteza para rodales maduros	$p_{BB1}$	-	0.15	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Edad de ramas y fracción de corteza = 1/2 ( $p_{BB0}+p_{BB1}$ )	$t_{BB}$	Años	2	Ajustado <i>Eucalyptus</i> sp
Densidad básica				
Densidad mínima básica –para árboles jóvenes-	$\rho_0$	t/m <sup>3</sup>	0.33	OFI-Catie, 2016
Densidad máxima básica –para árboles viejos-	$p_1$	t/m <sup>3</sup>	0.6	OFI-Catie, 2016
Edad en la cual $\rho = 1/2 =$ densidad de árboles viejos y jóvenes	$t_\rho$	Años	4	Predeterminado

m snm y la vegetación original fue selva mediana subperennifolia (Miranda y HernándezX., 1963; Pennington y Sarukhán, 1998). El suelo es franco arcilloso, el clima se clasifica como Aw<sub>1</sub> (e): cálido subhúmedo con lluvias en verano (junio-octubre) y temporada seca de cuatro a seis meses (enero-mayo), con una temperatura

media anual de 25 °C y precipitación media anual de 1156 mm. Los factores del sitio que se consideraron fueron: datos iniciales de biomasa de follaje, raíz y tronco ( $W_F$ ,  $W_R$  y  $W_s$ , respectivamente), se obtuvieron de literatura para cedro de dos años de edad (Hagggar y Ewel, 1995); la densidad fue de 1111 árboles por hectárea [Conafor-



Colpos](2011); la máxima y mínima cantidad de agua disponible en el suelo (ASW) se consideró con niveles de 150 mm y 40 mm, respectivamente (valores por defecto del modelo) y la fertilidad del suelo FR con valores de 0.3 para el tratamiento sin fertilización y 0.6 para el tratamiento con fertilización.

### Calibración del modelo

La calibración del modelo consistió en el ajuste individual iterativo de los valores alométricos del follaje con datos climáticos del sitio y datos de la capacidad de retención del agua en el suelo (ASW) a 20 años.

### Validación del modelo

Para la validación del modelo se aplicó una prueba de *t-Student* ( $p < 0.05$ ) al tratamiento sin fertilización, de manera gráfica en una relación 1:1. En dicha relación, se contrastaron los volúmenes observados ( $m^3 ha^{-1}$ ), que se tomaron como referencia de [Conafor-Colpos] (2011) vs volúmenes ( $m^3 ha^{-1}$ ) obtenidos del modelo 3-PG.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las tablas 2 y 3 se muestran las salidas del modelo 3 PG para los escenarios sin fertilización y con fertilización, respectivamente, así como la comparación del volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ) de acuerdo con datos obtenidos por Conafor-Colpos (2011) para la validación de volumen en el rodal ( $m^3 ha^{-1}$ ).

TABLA 2. Desarrollo del rodal bajo un escenario sin fertilización (FR=0.3) en la localidad de Miahuapan, Ver.

Edad del rodal (años)	Materia seca de follaje (Mg ha <sup>-1</sup> )	Materia seca de raíz (Mg ha <sup>-1</sup> )	Biomasa de árboles (Mg ha <sup>-1</sup> )	Volumen estimado del rodal ( $m^3 ha^{-1}$ ) excluyendo ramas y corteza	Índice de área foliar IAF ( $m^2 m^{-2}$ )	Incremento de volumen promedio anual ( $m^3 ha^{-1} año^{-1}$ )	Promedio DAP (cm)	Altura (m)	*Datos observados de volumen ( $m^3 ha^{-1}$ ).	Diferencias en volumen ( $m^3 ha^{-1}$ )
2	1.82	5.59	7.11	9.57	2.18	4.78	5.54		6.4	3.17
3	1.76	15.65	16.72	24.27	1.94	8.09	7.63	6.87		
4	1.64	23.32	25.75	38.77	1.76	9.69	8.96	8.33		
5	1.50	28.73	33.93	51.88	1.51	10.37	9.93	9.43	31.2	20.68
6	1.34	32.08	41.09	63.12	1.26	10.52	10.67	10.27		
7	1.18	33.65	47.18	72.35	1.01	10.33	11.23	10.93	49	23.35
8	1.02	33.76	52.20	79.66	0.79	9.96	11.66	11.44		
9	0.87	32.73	56.24	85.26	0.62	9.47	11.99	11.82		
10	0.72	30.90	59.42	89.45	0.47	8.94	12.24	12.12	71.3	18.15
11	0.60	28.58	61.90	92.51	0.36	8.41	12.43	12.34		
12	0.49	26.00	63.81	94.73	0.27	7.89	12.57	12.51	82.6	12.13
13	0.39	23.35	65.27	96.31	0.20	7.41	12.68	12.64		
14	0.31	20.76	66.40	97.43	0.16	6.96	12.76	12.74		
15	0.25	18.31	67.28	98.23	0.12	6.55	12.82	12.81	94.7	3.53
16	0.20	16.04	67.96	98.79	0.09	6.17	12.87	12.87		
17	0.16	13.99	68.49	99.18	0.07	5.83	12.91	12.92	100.3	-1.11
18	0.12	12.14	68.90	99.45	0.06	5.52	12.94	12.95		
19	0.10	10.49	69.22	99.64	0.04	5.24	12.96	12.98		
20	0.07	9.04	69.47	99.76	0.03	4.99	12.98	12.99	106.1	-6.33

TABLA 3. Desarrollo del rodal bajo un escenario con fertilización (FR=0.6) en la localidad de Miahuapan,

Edad del rodal (años)	Materia seca de follaje (Mg ha <sup>-1</sup> )	Materia seca de raíz (Mg ha <sup>-1</sup> )	Biomasa de árboles (Mg ha <sup>-1</sup> )	Volumen del rodal estimado (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) excluyendo ramas y corteza	Índice de área foliar IAF (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	Incremento de volumen promedio anual (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Promedio DAP (cm)	Altura (m)	Diferencias en volumen (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )
2	1.82	5.59	7.11	9.57	2.18	4.78	5.54		3.17
3	1.91	13.06	19.72	28.63	2.00	9.54	7.96	7.40	
4	1.88	19.09	32.11	48.34	1.94	12.08	9.49	9.20	
5	1.80	23.62	43.76	66.92	1.76	13.38	10.61	10.57	12.6
6	1.68	26.70	54.36	83.50	1.53	13.92	11.47	11.65	
7	1.53	28.48	63.72	97.71	1.28	13.96	12.14	12.50	14.71
8	1.37	29.00	71.74	109.47	1.05	13.68	12.67	13.18	
9	1.20	28.62	78.45	118.93	0.84	13.21	13.07	13.72	
10	1.04	27.49	83.94	126.35	0.66	12.63	13.39	14.15	12.64
11	0.88	25.85	88.37	132.07	0.51	12.00	13.63	14.48	
12	0.74	23.89	91.90	136.43	0.40	11.37	13.82	14.73	9.3
13	0.61	21.78	94.71	139.74	0.31	10.75	13.96	14.93	
14	0.50	19.64	96.94	142.24	0.24	10.16	14.07	15.09	
15	0.36	17.56	98.72	144.13	0.19	9.61	14.16	15.21	4.02
16	0.29	15.59	100.14	145.57	0.15	9.09	14.23	15.31	
17	0.23	13.76	101.28	146.67	0.12	8.63	14.28	15.39	0.98
18	0.19	12.09	102.19	147.51	0.09	8.19	14.326	15.45	
19	0.15	10.58	102.93	148.14	0.08	7.80	14.360	15.50	
20	0.12	9.22	103.51	148.63	0.06	7.43	14.39	15.54	-2.58

La figura 1 muestra que el modelo 3-PG predice cambios ligeros en la biomasa foliar de *Cedrela odorata* por efecto de la fertilización. A los dos años, los árboles de cedro en el rodal tuvieron una biomasa inicial de 1.8 Mg ha<sup>-1</sup> y a los 20 años disminuyó la biomasa para ambas condiciones de fertilización 0.08 Mg ha<sup>-1</sup> (Fig. 1a) y 0.15 Mg ha<sup>-1</sup> (Fig. 1b).

En la figura 2 se aprecia la biomasa de raíz en las dos condiciones estudiadas. A los dos años, en ambas condiciones se registró una biomasa de raíz de 5.6 Mg ha<sup>-1</sup>,

y a los 8 años esta variable alcanzó 33.7 Mg ha<sup>-1</sup> en la condición sin fertilización; un valor superior al de la condición con fertilización. La superioridad de la biomasa de raíz en la condición sin fertilización con respecto a la obtenida en la condición con fertilización se mantuvo hasta antes de los 20 años. A esa edad, la condición con fertilización incrementó tan solo 0.05 Mg ha<sup>-1</sup>, para presentar un total de 9.2 Mg ha<sup>-1</sup>.



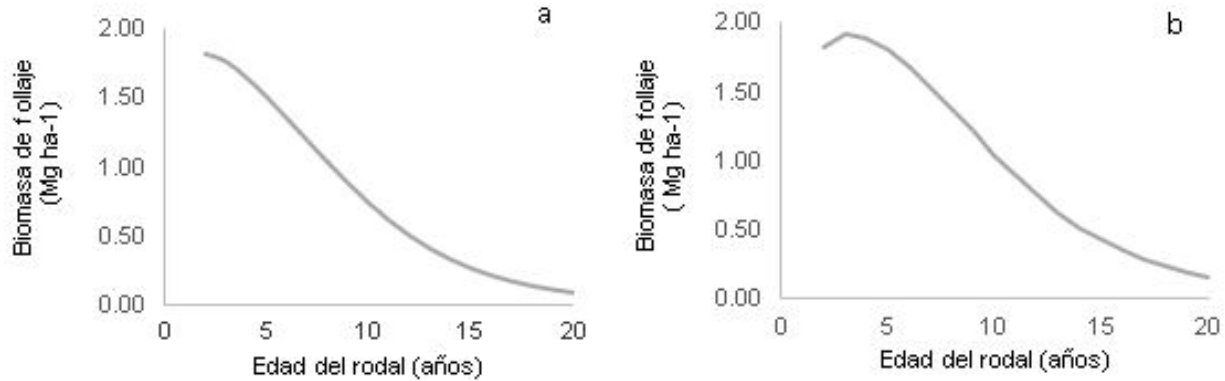


FIGURA 1. Biomasa de follaje en los tratamientos sin fertilización FR = 0.3 (a) y con fertilización FR = 0.6 (b).

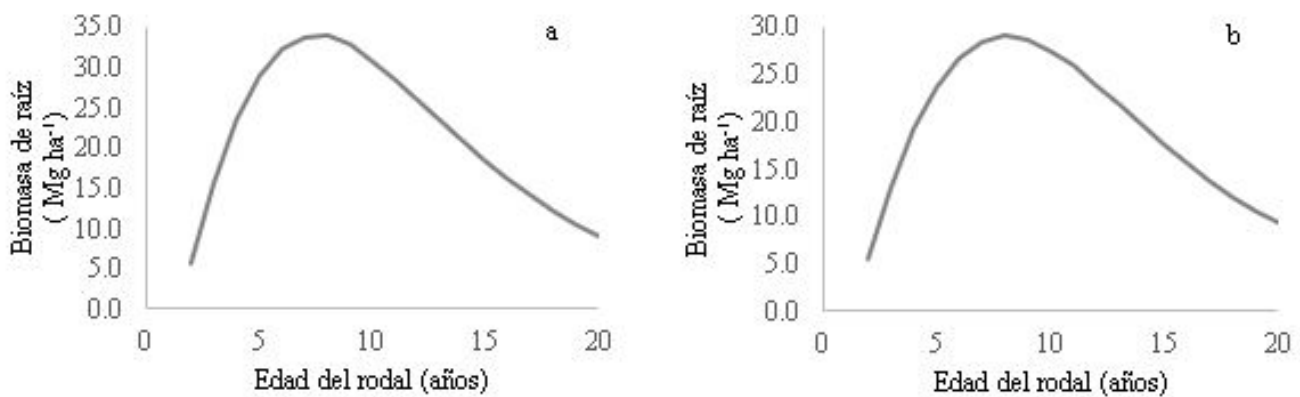


FIGURA 2. Biomasa de raíz en los tratamientos sin fertilización (FR = 0.3) (a) y con fertilización (FR = 0.6) (b).

A diferencia de los efectos de la fertilización sobre la biomasa foliar y de raíces, la biomasa de fuste sí fue afectada de manera conspicua por la fertilización. Sin fertilización, la biomasa de fuste alcanzó casi 70 Mg ha<sup>-1</sup> (Fig. 3a), mientras que, en condiciones de mayor fertilidad del suelo, la biomasa de fuste alcanzó 103.5 Mg ha<sup>-1</sup> (Fig. 3 b).

En la figura 4 se observan diferencias notables en cuanto al volumen del rodal. A los tres años, sin fertilización se alcanzó un valor de 28.6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, mientras que con fertilización se obtuvieron 24.2 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, una diferencia de 4 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> a favor del tratamiento sin fertilización. El máximo volumen del rodal se presentó a los 10 años en ambos tratamientos, FR = 0.3: 89.4 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> y FR = 0.6: 126.3 m<sup>3</sup>

ha<sup>-1</sup>. Esta misma tendencia se presentó a los 20 años con un volumen de 148.6 m<sup>3</sup> en el tratamiento con fertilización, presentando una diferencia de 48.8 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> entre ambas condiciones.

El incremento de volumen promedio (Fig. 5) anual alcanzó su máximo a los 6 años en ambos tratamientos, obteniendo a los 20 años una diferencia de 2.4 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> entre ambos.

En la figura 6, a los 10 años se observa una altura de 12.1 m para FR = 0.3 y de 14.1 m para FR = 0.6. A los 20 años el mayor crecimiento en altura se presentó en el tratamiento con fertilización, 15.5 m; una diferencia de 2.5 m entre ambas condiciones.

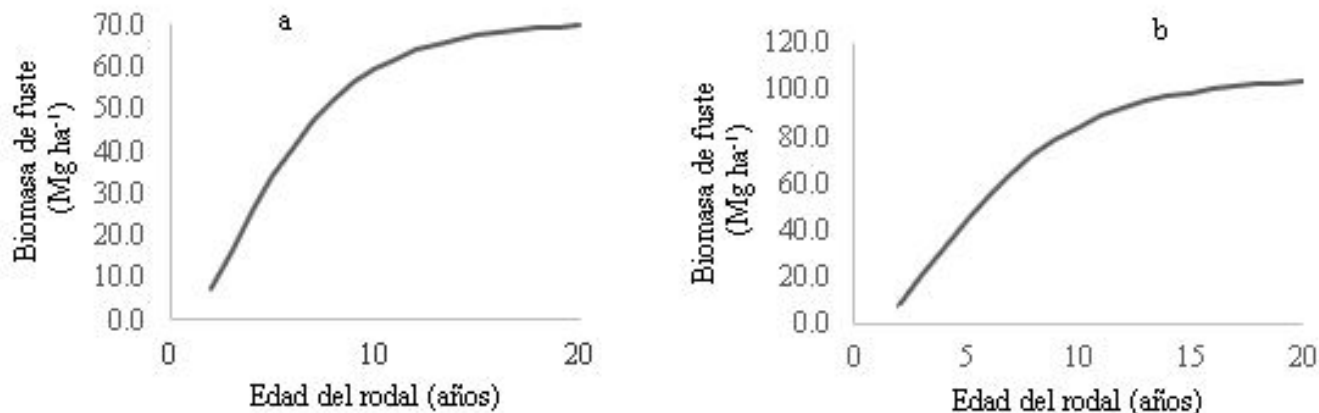


FIGURA 3. Biomasa de fuste en tratamiento sin fertilización (a) y con fertilización (b).

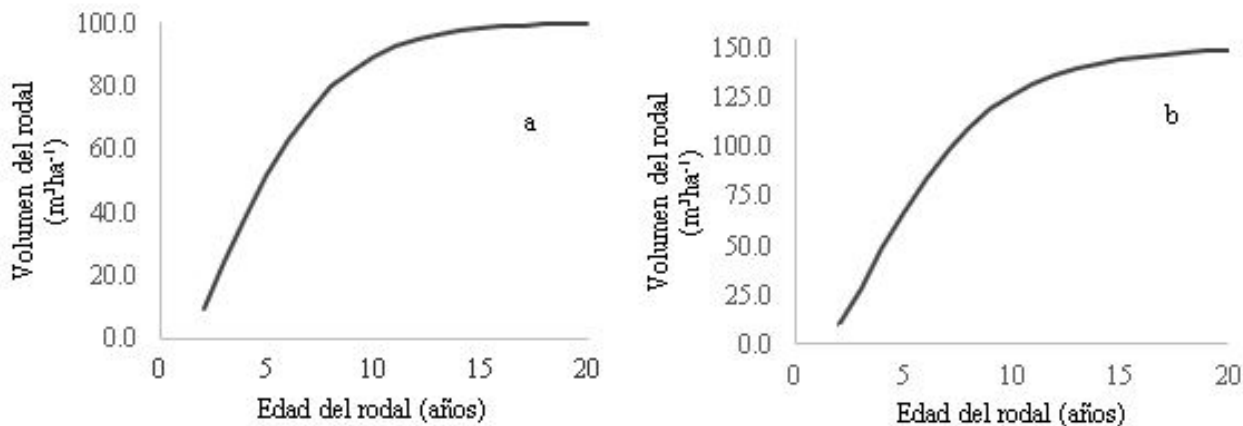


FIGURA 4. Volumen del rodal en tratamiento sin fertilización (a) y con fertilización (b).

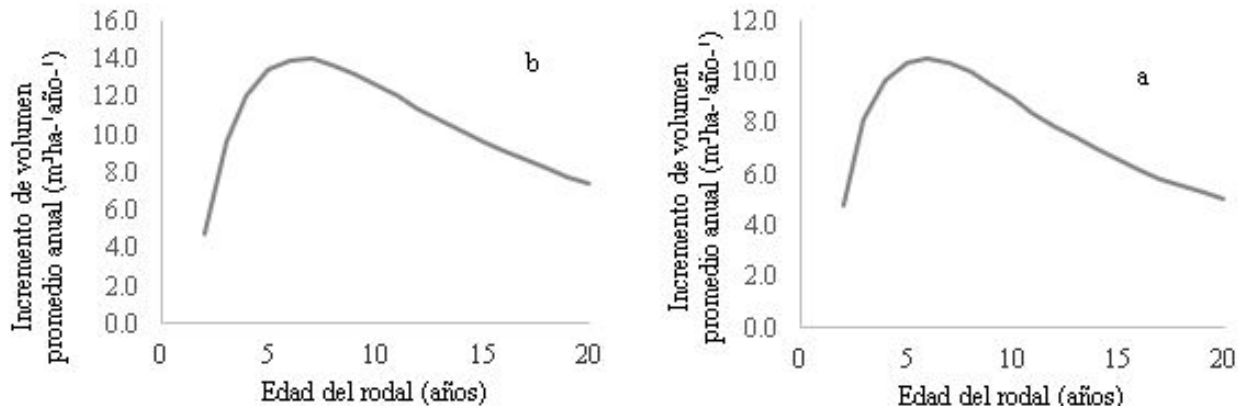


FIGURA 5. Incremento de volumen promedio anual en tratamiento sin fertilización (a) y con fertilización (b).

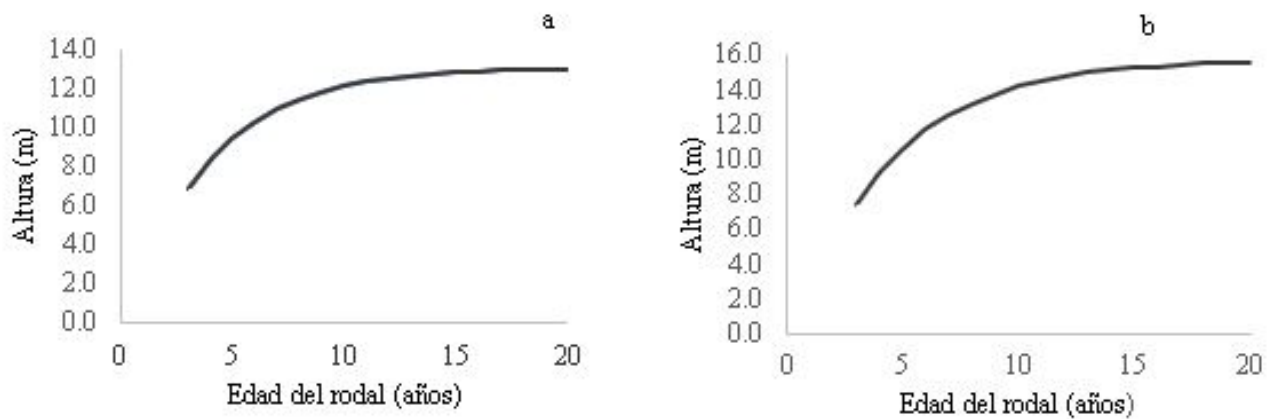


FIGURA 6. Altura (cm) en tratamiento sin fertilización (a) y con fertilización (b).

En el tratamiento sin fertilización se alcanzó un DAP de 13.0 cm a los 20 años. Para el tratamiento con fertilización, esta variable alcanzó 15.0 cm a la misma edad (Fig. 7).

De acuerdo con la figura 8 (izquierda), existe una notoria diferencia entre los tratamientos a los 20 años: el volumen del rodal para el tratamiento sin fertilización presentó un incremento de  $99.8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ; mientras que para el tratamiento con fertilización alcanzó  $148.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (Fig. 8 derecha). También hubo una notable diferencia en la biomasa del tronco o fuste, que inició con  $7.1 \text{ Mg ha}^{-1}$  en ambos tratamientos, pero obtuvo una biomasa final de  $69.5 \text{ Mg ha}^{-1}$  en el tratamiento sin fertilización y  $103.5 \text{ Mg ha}^{-1}$  para el tratamiento con fertilización a los 20 años (Fig. 8 izquierda).

En la figura 9a se observa que la biomasa en el árbol (Ws), alcanza su máximo a los 10 años ( $59.4 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (Tabla 2), en contraste con el IAF, que disminuye conforme aumenta la biomasa fuste. Hay una relación directa entre el IAF, la biomasa aérea (follaje, fuste) y el volumen del rodal. Por el contrario, en un escenario de fertilización, el modelo indica una biomasa que supera en más de 20% el valor de la que indica para el tratamiento sin fertilización a los 10 años ( $83.9 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (Fig. 9b). Antes de los diez años se presentó el mayor incremento en el tratamiento con fertilización (Tabla 3).

La radiación utilizable por el dosel en los primeros diez años permitió un rápido incremento de la biomasa distribuida a diversos compartimentos del árbol (Landsberg

y Waring, 1997) y, posteriormente, un descenso. La biomasa es proporcional a la cantidad de radiación absorbida fotosintéticamente activa (McMurtrie, 1991). Sin embargo, después de los primeros diez años el IAF disminuyó en la condición sin fertilización (Tabla 2, Fig. 9a). En la condición de fertilización podría haber una mayor competencia de copas que evitara la entrada de luz y otros factores intrínsecos de la especie como la longevidad foliar. Esta última característica pudiera deberse a que en los primeros años de vida existe un uso eficaz de nutrimentos en el follaje (Hiremath, 2000) y, por consiguiente, el aumento de su producción, presentando una disminución a los veinte años ( $0.08 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Por otro lado, cuando existe un estrés hídrico y es muy severo, los árboles sacrifican su IAF como una forma de disminuir la tasa de transpiración (Rodríguez y Álvarez, 2010).

Hay una relación inversa entre el incremento de la biomasa del fuste y la partición a las raíces (Beets y Whitehead, 1996) (Fig. 9), es decir, mientras que la biomasa de fuste incrementó con la fertilización ( $103.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), la biomasa en raíz disminuyó a  $9.2 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Fig. 2b y 9b). En la simulación con fertilización del rodal, la biomasa de raíz disminuyó a partir del año 10 (Tabla 3). La misma situación se presentó en la condición sin fertilización, a los diez años la biomasa de raíz era de  $32.7 \text{ Mg ha}^{-1}$  y disminuyó drásticamente a  $9.0 \text{ Mg ha}^{-1}$  en el año 20 (Tabla 2, Fig. 2a y 9a). El diámetro promedio a la altura del pecho, en la

condición con fertilización presentó mayores incrementos que los encontrados por Ramírez-García *et al.* (2008), teniendo en los años 1, 2 y 3 de la plantación de cedro rojo un diámetro promedio de 2.3 cm, 3.3 cm y 5.2 cm respectivamente. El modelo 3-PG, en el presente estudio, predijo mayores diámetros promedio: 5.5 cm en el segundo año y 8.1 cm en el tercer año (Fig. 7b y 8b).

Respecto a la biomasa aérea, esta incrementó ligeramente con la presencia de fertilización (Fig. 1b y 8b). Una de las características clave del modelo 3-PG es que la biomasa del follaje disminuye conforme el DAP aumenta, tanto en el tratamiento sin fertilización como en el tratamiento con fertilización (Lansberg *et al.*, 2005). El volumen del rodal por unidad de superficie, la biomasa de

fuste por unidad de superficie y la altura de los árboles son las principales variables que incrementaron con la edad del rodal en el tratamiento con fertilización (Fig. 9 b). La altura, de acuerdo con el modelo de procesos 3-PG en la condición con fertilización a los veinte años, presentó un aumento en promedio mayor a 10 m de altura (15.5 m). Lo anterior se contrasta con lo registrado por Villaseñor-López (2012) quien obtuvo, al año 5 en cedro rojo, una altura final de 5.4 m, y el modelo presentado fue el doble (10.6 m de altura). Así mismo, Ramírez-García *et al.* (2008) obtuvieron alturas comparativamente menores (3.1 m y 4.4 m) en los primeros 3 años y 4 años de edad del cedro y, en cambio, el modelo 3-PG obtuvo 7.4 m y 9.2 m en los años 3 y 4, respectivamente.

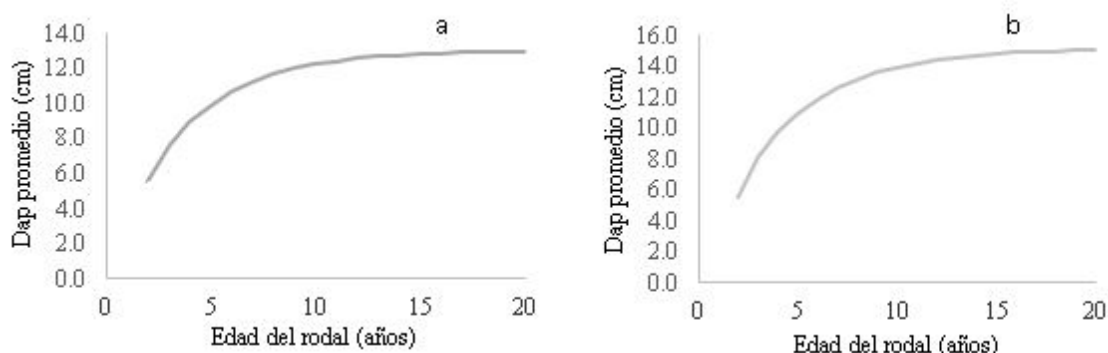


FIGURA 7. Diámetro a la altura del pecho (cm) en tratamiento sin fertilización (a) y con fertilización (b).

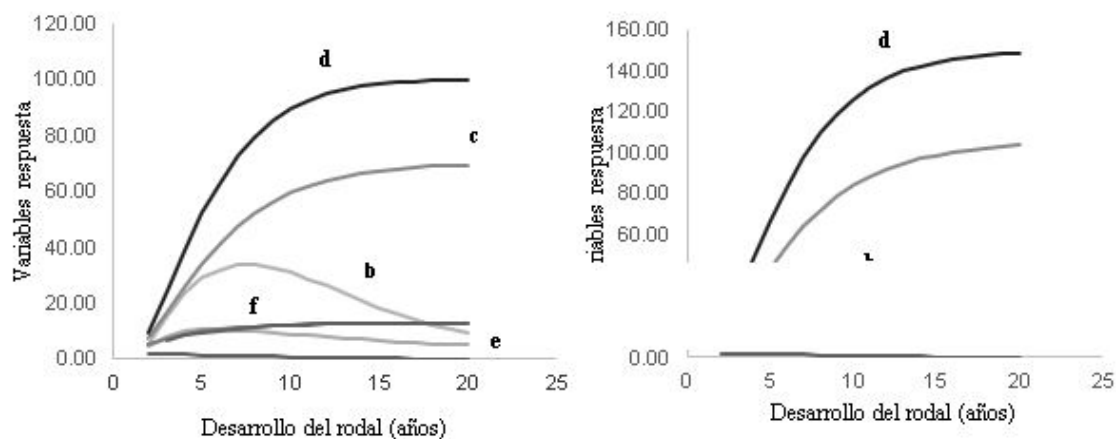


FIGURA 8. Variables respuesta del desarrollo del rodal en el tratamiento sin fertilización (izquierda) y con fertilización (derecha).

a) Biomasa de follaje, Mg ha-1, b) biomasa de raíz, Mg ha-1, c) biomasa de tronco, Mg ha-1, d) volumen del rodal, Mg ha-1, e) incremento de volumen promedio anual, m3 ha-laño-1, f) Altura, cm.

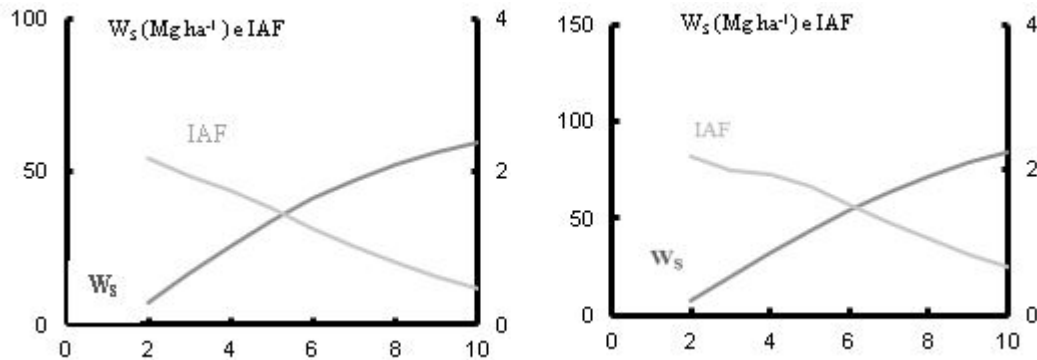


FIGURA 9. Relación de biomasa del fuste ( $W_s$ ) e IAF (índice de área foliar) en el tratamiento sin fertilización (izquierda) y con fertilización (derecha).

De acuerdo con lo obtenido por la predicción del modelo 3-PG, es en el año 5 de la plantación cuando se observan mayores diferencias en el volumen del rodal con respecto a información proporcionada por Conafor-Colpos (2011), siendo que para la condición del rodal sin fertilización el modelo predijo un volumen de  $51.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , mientras que el dato con el que se validó el volumen del rodal de cedro rojo (Conafor-Colpos, 2011) fue de  $31.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (Tabla 2).

Para la condición con el índice de fertilización de 0.6, el volumen del rodal fue  $66.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (Tabla 3). Existieron diferencias entre el volumen predicho por el modelo y los datos observados (Conafor-Colpos, 2011), principalmente al comparar estos últimos con los predichos para el tratamiento con fertilización. Sin embargo, la comparación y la calibración se hicieron únicamente con la poca información de volúmenes compilados por Conafor-Colpos (2011), referidos a solo ocho años. Lo anterior da la pauta de que la nutrición del sitio de plantación es un indicador importante para elevar el volumen de madera de *C. odorata*. En la condición sin fertilización, el volumen del rodal en el año dos fue  $9.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , mientras los datos disponibles Conafor-Colpos (2011) indican un volumen de  $6.4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (Tabla 2).

El modelo 3-PG es una herramienta que predice razonablemente las variables silvícolas del rodal. Es la primera vez que se intenta estimar el potencial productivo de *C. odorata* en México mediante modelos de procesos; sin embargo, la información de la especie con la que se cuenta

es muy limitada y se requiere mayor atención para continuar con investigación en aspectos ecofisiológicos, de índice de área foliar, de nutrición y de volumen para continuar modelando y obtener mejor y más información que sea verificada posteriormente en sitios de plantación.

Para la validación del modelo, la figura 10 muestra la relación entre el volumen observado y el predicho mediante el modelo para el tratamiento sin fertilización. Las diferencias observadas no son estadísticamente significativas ( $p > 0.67$ ), ajustando el modelo a una relación 1:1, por lo que se puede argumentar que el modelo predice el incremento en volumen del rodal (Tabla 2) con precisión razonable. Los valores observados (Conafor-Colpos, 2011) se ajustan a la recta del modelo predicho.

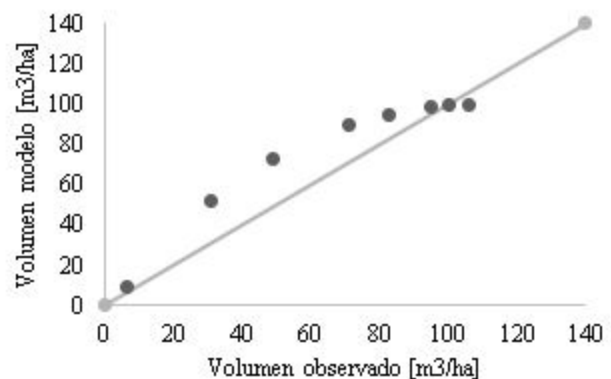


FIGURA 10. Relación entre el volumen modelado y el observado de *C. odorata* sin fertilización (FR = 0.3).

## CONCLUSIONES

El modelo de procesos 3-PG resultó una herramienta útil para predecir la productividad de *Cedrela odorata* L. El uso de este modelo de procesos permite sentar las bases para posteriores estudios en especies tropicales, además de instar la continuidad de estudios ecofisiológicos que amplíen la información de la especie en estudio.

## REFERENCIAS

- Álvarez, Y., Álvarez, E., Cano, J., & Suescún, D. (2012). Modelo matemático para estimar área foliar en árboles del bosque tropical seco en el Caribe Colombiano. *Revista Intrópica*, 7, 69-79.
- Araque, O., Jaimez, R. E., Azócar, C., Espinoza, W., & Tezara, W. (2009). Relaciones entre anatomía foliar, intercambio de gases y crecimiento en juveniles de cuatro especies forestales. *Interciencia*, 34(10), 725-729.
- Arnáez, E. (1988). Características de la madera de *Cedrela odorata* L. (cedro amargo, Meliaceae) en Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 36(1), 67-73.
- Beets, P. N., & Whitehead, D. (1996). Carbon partitioning in *Pinus radiata* in relation to foliage nitrogen status. *Tree Physiology*, 16, 131-138.
- Comisión Nacional Forestal [Conafor] & Colegio de Postgraduados [Colpos]. (2011). Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México
- Coops, N. C., Hember, R. A., & Waring, R. H. (2010). Assessing the impact of current and projected climates on Douglas-Fir productivity in British Columbia, Canada, using a process-based model (3-PG). *Canadian Journal of Forest Research*, 40, 511-524. doi: 10.1139/X09-201
- Forrester, D. I. & Tang, X. (2016). Analysing the spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests and the effects of stand density using the 3-PG model. *Ecological Modelling*, 319, 233-254.
- González-Benecke, C. A., Jokela, E. J., Cropper Jr W. P., Bracho, R., & Leduc, D. J. (2014). Parameterization of the 3-PG model for *Pinus elliottii* stands using alternative methods to estimate fertility rating, biomass partitioning and canopy closure. *Forest Ecology and Management*, 327, 55-75. doi: 10.1016/j.foreco.2014.04.030
- Haggar, J. P. & Ewel, J. J. (1995). Establishment, resource acquisition, and early productivity as determined by biomass allocation patterns of three tropical tree species. *Forest Science*, 41(4), 689-708. doi: 10.1093/forestscience/41.4.689
- Hiremath, A. J. (2000). Photosynthetic nutrient-use efficiency in three fast-growing tropical trees with differing leaf longevities. *Tree Physiology*, 20, 937-944.
- Landsberg, J. J. & Waring, R. H. (1997). A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95, 209-228. doi: 10.1016/S0378-1127(97)00026-1
- Landsberg, J. J., Johnsen, K. H., Albaugh, T. J., Lee Allen H., & McKeand S. E. (2001). Applying 3-PG, a simple process-based model designed to produce practical results, to data from Loblolly pine experiments. *Forest Science*, 41(1), 43-51.
- Landsberg, J. J., Waring, R. H., & Coops, N. C. (2003). Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. *Forest Ecology and Management*, 172, 199-214. doi: 10.1016/S0378-1127(01)00804-0
- Landsberg, J. J., Mäkelä A., Sievänen, R., & Kukkola, M. (2005). Analysis of biomass accumulation and stem size distributions over long periods in managed stands of *Pinus sylvestris* in Finland using the 3-PG model. *Tree Physiology*, 25, 781-792.
- López-Sánchez, E., & Musálem, M.A. (2007). Sistemas agroforestales con cedro rojo, cedro nogal y primavera, una alternativa para el desarrollo de plantaciones forestales comerciales en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13(1), 59-66.
- McMurtrie, R. E. (1991). Relationship of forest productivity to nutrient and carbon supply a modeling analysis. *Tree Physiology*, 9, 87-99. doi: 10.1093/treephys/9.1-2.87
- Miranda, F. & Hernández-X., E. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 28, 29-179. doi: 10.17129/botsci.1084
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat] (30 de diciembre de 2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo*. Diario Oficial. Segunda sección 1-78
- Exploración y Producción (PACMA) e Instituto Nacional de Administración Pública, A.C. (INAP) (2013). Diagnósticos Municipales PACMA. Entidad: Veracruz de Ignacio de la Llave (30) Municipio: Tihuatlán, 175
- Pennington, T. D. & Sarukhán, J. (1998). *Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies Tropical trees of Mexico. A guide for identification of the main species*. México, D.F. México: UNAM-Fondo de Cultura Económica.



- Programa Nacional de Desarrollo [PND] (2013-2018). Gobierno de la República. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195157/Logros\\_2016\\_PRONAFOR\\_2014-2018.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195157/Logros_2016_PRONAFOR_2014-2018.pdf)
- Ramírez-García, C., Vera-Castillo, G., Carrillo-Anzures, F., & Magaña-Torres, O.S. (2008). El cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) como alternativa de reconversión en terrenos abandonados por la agricultura comercial en el sur de Tamaulipas. *Agricultura Técnica en México*, 34(2), 243-250.
- Rodríguez, S. J., & Álvarez M. J. (2010). *Nutrición y fertilización de las plantaciones forestales*. Santiago de Chile: Forestal Mininco S.A.
- Rodríguez-Suárez, J. A., Soto, B., & Iglesias, M. L. (2010). Application of the 3PG forest growth model to a *Eucalyptus globulus* plantation in Northwest Spain. *European Journal of Forest Research*, 129, 573-583. doi: 10.1007/s10342-010-0355-6
- Sands, P. J., & Landsberg, J. J. (2002). Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management*, 163, 273-292. doi: 10.1016/S0378-1127(01)00586-2
- Swenson, J. J., Waring, R. H., Fan, W., & Coops, N. (2005). Predicting site index with a physiologically based growth model across Oregon, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 1697-1707. doi: 10.1139/x05-089
- Sands, P. (2010). 3PGPJS 2.4 User guide.
- Vega-Nieva, D. J., Tomé, M., Tomé, J., Fontes, L., Soares, P., Ortíz, L., Basurco, F., & Rodríguez- Soalleiro, R. (2013). Developing a general method for the estimation of the fertility rating parameter of the 3-PG model: application in *Eucalyptus globulus* plantations in northwestern Spain. *Canadian Journal of Forest Research*, 43, 627-636. doi: 10.1139/cjfr-2012-0491
- Villaseñor-López, O. A., Cabanillas-Beltrán, R. E., Tamayo-Esquer, L. M., Fernández-Bocardo, J. A., García-Quintana, Y., Álvarez-Olivera, P., & Bonilla-Vichot, M. (2012). Evaluación del crecimiento de *Cedrela odorata* L. En las condiciones del Valle del Yaqui, Sonora, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 8(1), 1-8.
- Manuscrito recibido el 29 de septiembre de 2017  
Aceptado el 23 de octubre de 2018  
Publicado el 1 de noviembre de 2019
- Este documento se debe citar como:  
Montero-Solís, F. M., Álvarez-Muñoz, J., & López-López, M. A. (2019). Potencial productivo de *Cedrela odorata* L.: estimación mediante el modelo 3-PG. *Madera y Bosques*, 25(2), e2521641. doi: 10.21829/myb.2019.2521641



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