

# SISTEMA DE CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO PARA EVALUAR SUMIDEROS DE CARBONO EN BOSQUES DE *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. BAJO APROVECHAMIENTO FORESTAL

## GROWTH AND YIELD SYSTEM TO EVALUATE CARBON SINKS IN MANAGED *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. FORESTS

Dorian J. Palacios-Cruz<sup>1</sup>, Héctor M. De los Santos-Posadas<sup>1</sup>, Gregorio Ángeles-Pérez<sup>1</sup>, Aurelio M. Fierros-González<sup>1</sup>, Wenceslao Santiago-García<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ciencias Forestales. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (hmsantos@colpos.mx). <sup>2</sup>Instituto de Estudios Ambientales-División de Estudios de Postgrado. Universidad de la Sierra Juárez. Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

### RESUMEN

Los bosques con gestión forestal son importantes sumideros de carbono (C) para el planeta porque ayudan a mitigar el cambio climático producido por los gases de efecto invernadero. Tanto el tipo de bosque como las condiciones de manejo determinarán la cantidad de C capturado. El objetivo de este estudio fue construir un sistema de crecimiento y rendimiento (SCR) para estimar el volumen de *Pinus patula* y el C aéreo arbóreo almacenado en bosques con manejo forestal de Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo. Ya que el volumen muestra una relación estrecha con la biomasa y el C en una masa forestal, es posible integrar estos componentes dentro de un SCR para modelar la dinámica de los sumideros de C aéreos a nivel rodal. Los datos se obtuvieron de 160 sitios de 400 m<sup>2</sup> establecidos sistemáticamente en cronosecuencia de edades dentro de un sitio de monitoreo intensivo de C. El sistema está compuesto por ecuaciones de altura dominante, área basal, número de árboles, volumen, biomasa y C para *P. patula* y para hojosas. Los índices de sitio (IS) obtenidos fueron 15, 20, 25, 30 y 35 m a la edad base de 40 años. El turno técnico en volumen ocurre en promedio a los 29 años, lo cual indica que el turno de 40 años usado en la región puede acortarse mediante la aplicación de labores silvícolas intensivas como aclareos fuertes para mantener una distribución de productos orientada al aserrío. La inclusión del componente proporción de hojosas permitió modelar la competencia interespecífica y el efecto sobre la especie comercial (pino). El SCR modeló de manera adecuada el comportamiento de la biomasa y el C, estimó el C en 89.1 Mg ha<sup>-1</sup> para el IS 30 a los 35 años. Este valor es semejante a los obtenidos en bosques naturales y con manejo en la región.

### ABSTRACT

Forests through forest-management are important carbon sinks (C) for the planet because they help mitigate climate change caused by greenhouse gases. Both forest type and management conditions will determine the amount of C captured. The objective of this study was to build a growth and yield system (SCR) to estimate the volume of *Pinus patula* and above-ground tree C stored in forests with forest management in Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, Mexico. Since volume shows a close relationship with biomass and C in a forest stand, it is possible to integrate these components within an SCR to model the dynamics of above-ground C sinks at the stand level. Data were obtained from 160 sites of 400 m<sup>2</sup> systematically established in chronosequence of stand-ages within an intensive site monitoring of C. The system was composed of equations of dominant height, basal area, number of trees, volume, biomass and C for *P. patula* and broadleaf species. The site indices (IS) obtained were 15, 20, 25, 30 and 35 m at the base age of 40 years. Volume rotation occurs on average at 29 years of age, which indicates that the 40-year rotation used in the region can be shortened by applying intensive silvicultural work, such as heavy thinning to maintain a sawmill-oriented product distribution. The inclusion of the broadleaf species proportion component allowed to model the interspecific competition and the effect on the commercial species (pine). The SCR adequately modeled the behavior of biomass and C, estimated C at 89.1 Mg ha<sup>-1</sup> for IS 30 at 35 years. This value is similar to those obtained in natural and managed forests in the region.

**Key words:** dominant height, chronosequence, performance, broadleaf species, algebraic difference, *Pinus patula*.

\* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.

Recibido: septiembre, 2018. Aprobado: febrero, 2019.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 54: 241-257. 2020.

**Palabras clave:** altura dominante, cronosecuencia, rendimiento, hojosas, diferencia algebráica, *Pinus patula*.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de crecimiento y rendimiento (SCR) son una herramienta cuantitativa confiable para predecir el comportamiento de variables de estado de los bosques con manejo forestal (Santiago-García *et al.*, 2015). Los SCR permiten definir alternativas de manejo, tales como programar el plan de cortas, el abastecimiento de materia prima a la industria, implementar aclareos, estimar ingresos económicos futuros, y son útiles para cuantificar y proyectar biomasa y C aéreo (Parra-Piedra *et al.*, 2017).

Desde la década de 1980, en los bosques de Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México, se ha aplicado manejo forestal con tendencia a la formación de masas coetáneas de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. *et* Cham. mediante la aplicación del Método de Desarrollo Silvícola (MDS). Sin embargo, la productividad alta de los sitios y la intensidad baja de las labores silvícolas han propiciado la regeneración de especies hojosas que compiten con la especie de mayor interés desde el punto de vista comercial (Ángeles *et al.*, 2015).

El área de estudio es el sitio de monitoreo intensivo de carbono en Atopixco, Hidalgo, el cual tiene entre sus objetivos determinar el efecto del manejo forestal sobre la productividad de los rodales y la dinámica del C, así como las tasas de acumulación (Ángeles *et al.*, 2015). El conocimiento de la dinámica de crecimiento de las masas forestales y su potencial de acumulación y producción de biomasa es necesario para evaluar la contribución de los bosques al ciclo del C (Cutini *et al.*, 2013).

En los bosques de Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, se han realizado diversas investigaciones relacionadas con el crecimiento de los bosques de *P. patula* en volumen (Cruz-Leyva *et al.*, 2010; Hernández *et al.*, 2013; Santiago-García *et al.*, 2013; Santiago-García *et al.*, 2015) y con biomasa y C (Aguirre-Salado *et al.*, 2009; Figueroa-Navarro *et al.*, 2010; Soriano-Luna *et al.*, 2015). Sin embargo, el primer estudio para estimar el incremento en volumen en el área se concentró en una superficie pequeña de 100 ha en el Ejido “La Mojonera”, en tanto que para el estudio de biomasa y C se han desarrollado ecuaciones

## INTRODUCTION

Growth and yield systems (SCR) are a reliable quantitative tool to predict the behavior of state-variables of a forest with forest management (Santiago-García *et al.*, 2015). The SCRs allow defining management alternatives, such as harvest programming, the supply of raw material to industry, implementing thinning, estimating future economic income, and quantifying and projecting biomass and above-ground C (Parra-Piedra *et al.*, 2017).

Since the 1980s, in the forests of Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, Mexico forest management is applied with a tendency toward even-aged stands of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. *et* Cham., by applying the Silvicultural Development Method (MDS). However, the high productivity of the sites and the low intensity of silvicultural work have led to the regeneration of broadleaf species that compete with the species of greatest interest from a commercial point of view (Ángeles *et al.*, 2015).

The study area is the carbon intensive monitoring site of Atopixco, in Hidalgo, which objectives are to determine the effect of forest management on the productivity of stands and study of C dynamics, as well as the accumulation rates (Ángeles *et al.*, 2015). Knowledge of the growth dynamics of forest stands and their potential for biomass accumulation and production is necessary to assess the contribution of forests to the C cycle (Cutini *et al.*, 2013).

Various studies have focused on the forests of Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, regarding the growth of *P. patula* forests in volume (Cruz-Leyva *et al.*, 2010; Hernández *et al.*, 2013; Santiago-García *et al.*, 2013; Santiago-García *et al.*, 2015), and biomass and C (Aguirre-Salado *et al.*, 2009; Figueroa-Navarro *et al.*, 2010; Soriano-Luna *et al.*, 2015). However, the first study to estimate the increase in volume in the area focused on a small surface of 100 ha in the Ejido “La Mojonera”, while for the study of biomass and C, allometric prediction equations were developed at the tree level, and for their estimation, Aguirre-Salado *et al.* (2009) used remote sensors.

The objective of this research was to build an SCR for forests with forest management that estimates timber production and C storage of the above-ground growth of the trees at stand level. The hypothesis was that, given the relationship between volume, biomass

alométricas de predicción a nivel de árbol y en el caso de Aguirre-Salado *et al.* (2009) la estimación se realizó a partir de sensores remotos.

El objetivo de esta investigación fue construir un SCR para bosques con manejo forestal que estime la producción maderable y el almacenamiento de C de la parte aérea de los árboles a nivel rodal. La hipótesis fue que, dada la relación entre el volumen, biomasa y C, estas variables pueden integrarse al SCR para modelar adecuadamente su comportamiento en los rodales a través del tiempo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el sitio de monitoreo intensivo de carbono - Atopixco ubicado en el municipio de Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México. El área está delimitada por un polígono de 3 × 3 km (coordenadas extremas 20° 40' 17" y 20° 34' 51" N, 98° 40' 07" y 98° 34' 22" O) que se encuentra dentro de los ejidos Atopixco, La Mojonera, El Reparo, Tzincuatlán, Zahuastipán, Santo Domingo y pequeñas propiedades.

La vegetación natural predominante corresponde a bosque mesófilo de montaña, bosque de pino y bosque de pino-encino. El clima es C(fm)w**b**(e)g, corresponde a clima templado-húmedo con lluvias todo el año, con temperatura media anual de 13.5 °C y precipitación media anual de 2050 mm. El suelo de las partes bajas es Feozem háplico (Hh), con una capa superficial oscura, suave y rica en materia orgánica, mientras que en las partes con pendiente mayor se encuentra el Regosol calcárico (Rc).

En las últimas tres décadas, la gestión forestal en el área de estudio se ha orientado hacia el cultivo de rodales coetáneos puros de *P. patula* (Aguirre-Salado *et al.*, 2009). A pesar de este hecho, en el registro de los datos se encontró presencia de especies diversas de hojosas debido a que las labores silvícolas se orientan fundamentalmente hacia aclareos no comerciales en edades tempranas (durante los primeros años después de la regeneración natural), seguidos de aclareos ligeros sin control de vegetación competidora.

### Obtención de datos

Los datos se obtuvieron de tres inventarios (2013, 2014 y 2016) de 40 parcelas de medición forestal similares a las usadas por el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2012), es decir, 40 conglomerados, cada uno compuesto por cuatro sitios de 400 m<sup>2</sup> distribuidos en forma de "Y" invertida dentro de una superficie de 1 ha.

and C, these variables can be integrated into the SCR to adequately model their behavior in the stands over time.

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

The study was carried out at the carbon intensive monitoring site of Atopixco located in the municipality of Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, Mexico. The area was delimited by a 3 × 3 km polygon (extreme coordinates 20° 40' 17" and 20° 34' 51" N, 98° 40' 07" and 98° 34' 22" W), within the ejidos of Atopixco, La Mojonera, El Reparo, Tzincuatlán, Zahuastipán, Santo Domingo, and small privately owned forest lands.

The predominant natural vegetation corresponds to mountain mesophile forest, pine forest and pine-oak forest. The climate is C (fm)w**b**(e)g, and corresponds to a temperate-humid climate with rainfall throughout the year, with an average annual temperature of 13.5 °C and an average annual precipitation of 2050 mm. The soil of the lower parts is Feozem haplic (Hh), with a dark, soft surface layer rich in organic matter, while Regosol Calcareic (Rc) is found in the steeper parts.

For the last three decades, forest management in the study area is oriented towards silviculture of pure even-aged stands of *P. patula* (Aguirre-Salado *et al.*, 2009). Despite this, in the data record we found diverse broadleaf species because silvicultural work is mainly oriented towards non-commercial thinning at early ages (during the first years after natural regeneration), followed by light uncontrolled thinning of competing vegetation.

### Data gathering

Data were obtained from three inventories (2013, 2014 and 2016) of 40 forest measurement plots similar to those used by the National Forest and Soil Inventory (INFyS) of the National Forest Commission (CONAFOR, 2012); that is, 40 clusters, each one composed of four sites of 400 m<sup>2</sup> distributed in the form of an inverted "Y" within a surface of 1 ha.

Clusters were located as follows: in the central square of 1 km<sup>2</sup>, we systematically arranged 16 clusters at a distance of 250 m; in the remaining 8 km<sup>2</sup>, we established one cluster in the center of each square kilometer; finally, 17 more units were established, with the purpose of obtaining different ages in a chronosequence of almost 35 years.

All the trees with a normal diameter of 5 cm or more were measured on the following variables: total height (*H*, m) and diameter with bark at 1.3 m (*D*, cm); the age of the site (*E*, years) was determined by considering the time from which the regeneration cut was carried out. In order to obtain the volume

Los conglomerados se encuentran ubicados de la siguiente forma: en el cuadro central de 1 km<sup>2</sup> se ubicaron 16 conglomerados dispuestos sistemáticamente a una distancia de 250 m; en los 8 km<sup>2</sup> restantes, se estableció un conglomerado en el centro de cada uno; finalmente, se establecieron 17 unidades más, con el propósito de obtener edades diferentes en una cronosecuencia de casi 35 años.

A todos los árboles con diámetro normal de 5 cm o más se les midieron las variables: altura total ( $H$ , m) y diámetro con corteza a 1.3 m ( $D$ , cm); la edad del sitio ( $E$ , años) se determinó al considerar el tiempo desde el cual se llevó a cabo la corta de regeneración. Para la obtención del volumen de cada árbol se emplearon las ecuaciones del Sistema Biométrico Forestal (SiBi-For) (Vargas-Larreta *et al.*, 2017); en tanto que para biomasa se implementaron las ecuaciones generadas por Soriano-Luna *et al.* (2015).

Las variables de estado estimadas por hectárea a partir de las variables colectadas fueron: altura dominante promedio ( $HD$ , m), área basal de pino ( $ABP$ , m<sup>2</sup>), volumen de pino ( $VP$ , m<sup>3</sup>), biomasa aérea arbórea de pino ( $BP$ , Mg), carbono aéreo arbóreo de pino ( $CP$ , Mg), número de árboles vivos de pino ( $NAP$ ), área basal de hojosas ( $ABH$ , m<sup>2</sup>), volumen de hojosas ( $VH$ , m<sup>3</sup>), biomasa aérea arbórea de hojosas ( $BH$ , Mg), y carbono aéreo arbóreo de hojosas ( $CH$ , Mg).

## Sistema de crecimiento y rendimiento

### Altura dominante

Generalmente, el primer paso para desarrollar un SCR es estimar la productividad del rodal, para ello se usan ecuaciones de índice de sitio. La variable que se usó para determinar la productividad de cada rodal fue HD. Esta se definió como la altura de los 100 árboles más altos por hectárea. En el ajuste de los modelos de HD se seleccionaron 278 pares de datos no traslapados que correspondieron al promedio de las alturas de los cuatro árboles dominantes por sitio, y edades referidas al año en el cual se intervino el rodal para lograr la regeneración. Las edades variaron de 2 a 34 años.

El método de la diferencia algebraica se utilizó para generar la familia de curvas de HD. El método consiste en desarrollar, en forma de diferencia, un modelo que relacione HD con la edad. Por ejemplo el de Schumacher (1), el cual se plantea para dos mediciones consecutivas de altura dominante ( $HD_1$  y  $HD_2$ ) y edad ( $E_1$  y  $E_2$ ). De la primera se identifica el parámetro que representa la hipótesis de crecimiento y se resuelve con respecto a dicho parámetro. Luego, la solución se sustituye en la segunda ecuación para obtener el modelo de proyección de  $HD_2$  (Hernández-Cuevas *et al.*, 2018). Cuatro modelos clásicos en biometría forestal,

of each tree, we used the equations of the Forest Biometric System (SiBiFor) (Vargas-Larreta *et al.*, 2017); and for biomass the equations generated by Soriano-Luna *et al.* (2015).

The state variables estimated per hectare from the collected variables were: average dominant height ( $HD$ , m), basal area of pine ( $ABP$ , m<sup>2</sup>), volume of pine ( $VP$ , m<sup>3</sup>), pine tree above-ground biomass ( $BP$ , Mg), pine tree above-ground carbon ( $CP$ , Mg), number of live pine trees ( $NAP$ ), broadleaf species basal area ( $ABH$ , m<sup>2</sup>), broadleaf species volume ( $VH$ , m<sup>3</sup>), broadleaf species above-ground biomass ( $BH$ , Mg), and broadleaf species above-ground carbon ( $CH$ , Mg).

## Growth and yield system

### Dominant height

Generally, the first step in developing an SCR is to estimate stand productivity, for which we used site index equations. The variable used to determine the productivity of each stand was HD. This was defined as the height of the 100 tallest trees per hectare. In the adjustment of the HD models, we selected 278 pairs of non-overlapping data, which corresponded to the average of the heights of the four dominant trees per site, and ages referred to the year in which the stand was intervened to achieve regeneration. Ages ranged from 2 to 34 years.

The algebraic difference method was used to generate the family of HD curves. The method consists of developing, in the form of a difference, a model that relates HD to age. An example was that by Schumacher (1), which was proposed for two consecutive measurements of dominant height ( $HD_1$  and  $HD_2$ ) and age ( $E_1$  and  $E_2$ ). From the first, we identified the parameter which represents the growth hypothesis and solved the equation related to this parameter. Then, the solution was substituted in the second equation to obtain the  $HD_2$  projection model (Hernández-Cuevas *et al.*, 2018). Four classic models in forest biometry, with a non-linear structure (Table 1), were adjusted to predict behavior in HD; from these we selected the one considered to have made the best estimates to build the SCR.

$$HD_1 = \alpha_0 \cdot e^{-\alpha_1(1/E_1)} \quad (1)$$

$$HD_2 = HD_1 \cdot \left[ \frac{e^{-\alpha_1/E_2}}{e^{-\alpha_1/E_1}} \right] \quad (2)$$

where  $HD_1$ : dominant height at initial age,  $HD_2$ : dominant height at projected age,  $\alpha_i$ : model parameters,  $E_1$ : initial age and  $E_2$ : projection age.

con estructura no lineal (Cuadro 1), se ajustaron para predecir el comportamiento en HD, de estos se seleccionó el que consideramos que realizó mejores estimaciones para construir el SCR.

$$HD_1 = \alpha_0 \cdot e^{-\alpha_i(1/E_i)} \tag{1}$$

$$HD_2 = HD_1 \cdot \left[ \frac{e^{-\alpha_i/E_2}}{e^{-\alpha_i/E_1}} \right] \tag{2}$$

donde  $HD_1$ : altura dominante a la edad inicial,  $HD_2$ : altura dominante a la edad proyectada,  $\alpha_i$ : parámetros del modelo,  $E_1$ : Edad inicial y  $E_2$ : Edad de proyección.

### Proporción de área basal de hojosas

Debido a la presencia de otras especies, además de *P. patula*, se decidió modelar su comportamiento en los rodales. Para ello se utilizó la variable proporción del área basal de hojosas, definida como  $q = ABH / (ABH + ABP)$ . Con base en el comportamiento de los datos de campo, el supuesto fue que el comportamiento de  $q$  en el tiempo, a lo largo del turno, tiende a aumentar; por ello, dejar una proporción alta de hojosas en cierta edad, si bien contribuye a mejorar los parámetros de biodiversidad del bosque así como a la biomasa aérea total, afectará de manera negativa la producción de la especie comercial. Para modelar este comportamiento

### Proportion of broadleaf species basal area

Due to the presence of other species, in addition to *P. patula*, we decided to model their behavior in the stands. Thus, the variable proportion of the basal broadleaf species area was used, defined as  $q = ABH / (ABH + ABP)$ . Based on the field data, the assumption was that the behavior of  $q$  over time throughout the rotation tended to increase. Therefore, leaving a high proportion of broadleaf species at a certain age will negatively affect the production of the species in commercial terms. Even though broadleaf species contribute to improve the parameters of forest biodiversity and the total aerial biomass. In order to model this behavior, we used equation (3) proposed by Martin and Brister (1999), which projects the rate of basal area from  $E_1$  to  $E_2$ .

$$q_2 = q_1 \left( \frac{E_1}{E_2} \right)^\omega \tag{3}$$

where  $q_1$  and  $q_2$ : rates of the basal area of broadleaf species at ages  $E_1$  and  $E_2$ ,  $\omega$ : the model parameter.

### Number of living trees over time

This variable is not easy to predict, despite the importance of knowing about it. Thus, we used projection models that start

**Cuadro 1. Estructura matemática de los modelos de altura dominante.**  
**Table 1. Mathematical structure of the dominant height models.**

Modelo	Predicción	Proyección
Weibull anamórfico	$HD_1 - b_0 \cdot (1 - e^{-b_1 \cdot E_1^{b_2}})$	$HD_2 = HD_1 \cdot \left[ \frac{1 - e^{-b_1 \cdot E_2^{b_2}}}{1 - e^{-b_1 \cdot E_1^{b_2}}} \right]$
Chapman-Richards polimórfico	$HD_1 - b_0 \cdot (1 - e^{-b_1 \cdot E_1})^{b_2}$	$HD_2 = b_0 \cdot \left[ 1 - e^{-b_1 \cdot E_2} \right]^{\left( \frac{\ln \left( \frac{HD_1}{b_0} \right)}{\ln [1 - e^{-b_1 \cdot E_1}]} \right)}$
Bass anamórfico	$HD_1 = \frac{b_0 \cdot (1 - e^{-b_1 \cdot E_1})}{1 + b_2 \cdot e^{-b_1 \cdot E_1}}$	$HD_2 = HD_1 \cdot \left[ \frac{1 - e^{-b_1 \cdot E_2} / 1 + b_2 \cdot e^{-b_1 \cdot E_2}}{1 - e^{-b_1 \cdot E_1} / 1 + b_2 \cdot e^{-b_1 \cdot E_1}} \right]$
Hossfeld IV polimórfico	$HD_1 = \frac{b_0}{1 + e^{b_1} \cdot e^{-b_2 \ln E_1}}$	$HD_2 = \frac{b_0}{1 + \left[ \left( \frac{b_0}{HD_1} - 1 \right) \cdot \left( \frac{E_2}{E_1} \right)^{b_2} \right]}$

$HD_1$  y  $HD_2$ : altura dominante en la condición inicial y proyectada,  $E_1$  y  $E_2$ : Edad inicial y de proyección, y  $b_i$ : parámetros del modelo ♦  $HD_1$  and  $HD_2$ : dominant height in the initial and projected condition,  $E_1$  and  $E_2$ : initial and projection age, and  $b_i$ : model parameters.

se utilizó la ecuación (3) propuesta por Martin y Brister (1999), la cual proyecta la proporción de área basal de  $E_1$  a  $E_2$ .

$$q_2 = q_1 \left( \frac{E_1}{E_2} \right)^\omega \tag{3}$$

donde  $q_1$  y  $q_2$ : proporción del área basal de hojosas a la edad  $E_1$  y  $E_2$ ,  $\omega$ : parámetro del modelo.

### Número de árboles vivos en el tiempo

Esta variable, a pesar de la importancia de conocerla, no es fácil de predecir. Debido a esto se recurre a modelos de proyección que parten de una condición inicial para estimar una condición futura, pero estos son un modelo continuo, es decir, que la mortalidad no se modela en periodos, como se esperaría que ocurra en un rodal; además de que solo transcurrieron tres años entre la primera y última medición de las parcelas. Por ello se ajustó el modelo (4), el cual consta en la primera parte del modelo de proyección empleado por Parra-Piedra *et al.* (2017), y la segunda parte del modelo es un factor de reducción del número de árboles de acuerdo con la proyección de la proporción del área basal de hojosas ( $q_2$ ).

$$NAP_2 = \left[ NAP_1 \cdot e^{(-\beta(E_2-E_1))} \right] \cdot (1-q_2)^{\left(1-\frac{E_1}{E_2}\right)} \tag{4}$$

donde  $NAP_1$  y  $NAP_2$ : número de árboles de pino a la edad  $E_1$  y  $E_2$ , respectivamente,  $\beta$ : parámetro del modelo, lo demás ya se definió previamente.

### Área basal

Para modelar el ABP se utilizaron las ecuaciones (5) y (6). La primera es el comportamiento promedio (modelo de predicción) y la segunda es el modelo de proyección, compuesto de dos partes: una ecuación de proyección de área basal y el factor de reducción por la presencia de hojosas.

Finalmente, el ABH se estimó aprovechando la equivalencia de  $q$  a una edad ( $E_2$ ), de donde se despeja  $ABH_2$  y resulta la ecuación (7), en la cual se observa que a medida que  $q_2$  decrece a cero,  $ABH_2$  también tiende a cero. No se incluyó un modelo para proyectar directamente el área basal total; sin embargo, puede calcularse al sumar el ABH más el ABP proyectada.

$$ABP_1 = \delta_0 \cdot HD_1^{\delta_1} \cdot e^{\left(-\frac{\delta_2}{E_1} + \frac{\delta_3}{E_1} \cdot NAP_1\right)} \tag{5}$$

from an initial condition to estimate a future condition. But this model is continuous over time, that is, mortality is not modeled within periods, as it is expected to occur in a stand; in addition, only three years elapsed between the first and last measurement of the plots.

For this reason, model (4) was adjusted, and it is formed by the first part of the projection model used by Parra-Piedra *et al.* (2017) and the second part of the model is a reduction factor of the number of trees according to the projection of the rate of the broadleaf species basal area ( $q_2$ ).

$$NAP_2 = \left[ NAP_1 \cdot e^{(-\beta(E_2-E_1))} \right] \cdot (1-q_2)^{\left(1-\frac{E_1}{E_2}\right)} \tag{4}$$

where  $NAP_1$  and  $NAP_2$ : number of pine trees at ages  $E_1$  and  $E_2$ , respectively,  $\beta$ : the model parameter; the remaining terms were previously defined.

### Basal area

Equations (5) and (6) were used to model the ABP. The first is the average behavior (prediction model) and the second is the projection model, made up of two parts: a basal area projection equation and the reduction factor for the presence of broadleaf species.

Finally, the ABH was estimated by using the equivalence of  $q$  at an age ( $E_2$ ), from where  $ABH_2$  is solved, and the result is equation (7). Here we observed that as  $q_2$  decreases to zero,  $ABH_2$  also tends to zero. A model to directly project the total basal area was not included; however, it can be calculated by adding the  $ABH$  plus the  $ABP$  projected.

$$ABP_1 = \delta_0 \cdot HD_1^{\delta_1} \cdot e^{\left(-\frac{\delta_2}{E_1} + \frac{\delta_3}{E_1} \cdot NAP_1\right)} \tag{5}$$

$$ABP_2 = \left[ ABP_1 \cdot \left( \frac{HD_2}{HD_1} \right)^{\delta_1} \cdot e^{-\delta_2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right) + \delta_3 \left( \frac{NAP_2}{E_2} - \frac{NAP_1}{E_1} \right)} \right] \cdot (1-q_2)^{\left(1-\frac{E_1}{E_2}\right)} \tag{6}$$

$$ABH_2 = \frac{ABP_2 \cdot q_2}{1-q_2} \tag{7}$$

where  $ABH_1$ : basal area of pine at age  $E_1$ ,  $ABH_2$ : basal area of pine at age  $E_2$ ,  $ABH_2$ : basal area of broadleaf species at age  $E_2$ ,  $\delta_1$ : model parameters; the other terms were previously defined.

$$ABP_2 = \left[ ABP_1 \cdot \left( \frac{HD_2}{HD_1} \right)^{\delta_1} \cdot e^{-\delta_2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right) - \delta_3 \left( \frac{NAP_2}{E_2} - \frac{NAP_1}{E_1} \right)} \right] \cdot (1 - q_2)^{\left( 1 - \frac{E_1}{E_2} \right)} \quad (6)$$

$$ABH_2 = \frac{ABP_2 \cdot q_2}{1 - q_2} \quad (7)$$

donde  $ABH_1$ : área basal de pino a la edad  $E_1$ ,  $ABH_2$ : área basal de pino a la edad  $E_2$ ,  $ABP_2$ : área basal de hojosas a la edad  $E_2$ ,  $\delta_1$ : parámetros del modelo, los demás términos ya se definieron antes.

### Volumen

Para modelar el VP por hectárea actual y futuro, se ajustaron las ecuaciones (8) y (9). Aunque dichas ecuaciones no incluyen de modo explícito la proporción de hojosas en los rodales, ésta ya se incluyó en la proyección de ABP y NAP. Para modelar el VH se aprovechó la relación entre este y el ABH, con la ecuación de proyección (10).

$$VP_1 = e^{\theta_0} \cdot e^{\frac{-\theta_1}{HD_1}} \cdot E_1^{\theta_2} \cdot ABP_1^{\theta_3} \quad (8)$$

$$VP_2 = VP_1 \cdot e^{-\theta_1 \left( \frac{1}{HD_2} - \frac{1}{HD_1} \right)} \cdot \left( \frac{E_2}{E_1} \right)^{\theta_2} \cdot \left( \frac{ABP_2}{ABP_1} \right)^{\theta_3} \quad (9)$$

$$VH_2 = \lambda \cdot ABH_2 \quad (10)$$

donde  $VP_1$ : volumen de pino a la edad  $E_1$ ,  $VP_2$  y  $VH_2$ : volumen de pino y volumen de hojosas a la edad  $E_2$ ,  $\theta_1$  y  $\lambda$ : parámetros de los modelos, lo demás ya se definió previamente.

### Biomasa y carbono

Las ecuaciones compatibles (11) y (12) se ajustaron para estimar BP. Además, se estimó la BH con la ecuación (13). El C aéreo arbóreo almacenado en los rodales para cada componente se estimó aplicando 0.5 como factor de proporción de C (Ordoñez *et al.*, 2015).

$$BP_1 = \gamma_0 \cdot VP_1^{\gamma_1} \quad (11)$$

$$BP_2 = BP_1 \cdot \left( \frac{VP_2}{VP_1} \right)^{\gamma_1} \quad (12)$$

$$BH_2 = \varphi \cdot VH_2 \quad (13)$$

### Volumen

For modelling the VP per current and future hectare, equations (8) and (9) were adjusted. Although these equations do not explicitly include the proportion of broadleaf species in the stands, the latter was included in the ABP and NAP projection. In order to model the VH, we used its relationship with ABH and the projection equation (10).

$$VP_1 = e^{\theta_0} \cdot e^{\frac{-\theta_1}{HD_1}} \cdot E_1^{\theta_2} \cdot ABP_1^{\theta_3} \quad (8)$$

$$VP_2 = VP_1 \cdot e^{-\theta_1 \left( \frac{1}{HD_2} - \frac{1}{HD_1} \right)} \cdot \left( \frac{E_2}{E_1} \right)^{\theta_2} \cdot \left( \frac{ABP_2}{ABP_1} \right)^{\theta_3} \quad (9)$$

$$VH_2 = \lambda \cdot ABH_2 \quad (10)$$

where  $VP_1$ : pine volume at age  $E_1$ ,  $VP_2$  and  $VH_2$ : pine volume and broadleaf species volume at age  $E_2$ ,  $\theta_1$  and  $\lambda$ : model parameters; the remaining terms were previously defined.

### Biomass and carbon

Compatible equations (11) and (12) were adjusted to estimate BP. Furthermore, we estimated the BH with equation (13). Above-ground C was estimated as stored in the stands for each component by applying 0.5 as the C rate factor (Ordoñez *et al.*, 2015).

$$BP_1 = \gamma_0 \cdot VP_1^{\gamma_1} \quad (11)$$

$$BP_2 = BP_1 \cdot \left( \frac{VP_2}{VP_1} \right)^{\gamma_1} \quad (12)$$

$$BH_2 = \varphi \cdot VH_2 \quad (13)$$

where  $BP_1$ : pine biomass in the initial condition,  $BP_2$  and  $BH_2$ : pine biomass and broadleaf species biomass in the projected condition,  $\gamma_1$  and  $\varphi$ : model parameters; the remaining terms were previously defined.

### Equation system adjustment

The  $HD$ ,  $ABP$ ,  $VP$ , and  $BP$  models were adjusted with the seemingly unrelated regression (SUR) method using the SAS/ETS<sup>®</sup> MODEL procedure (SAS Institute Inc., 2014).  $NAP$  and  $q$  were fitted with nonlinear ordinary least squares, while  $VH$  and  $BH$  with linear ordinary least squares.

donde  $BP_1$ : biomasa de pino en la condición inicial,  $BP_2$  y  $BH_2$ : biomasa de pino y biomasa de hojosas en la condición proyectada,  $\gamma_i$  y  $\varphi$ : parámetros de los modelos, lo demás ya se definió.

### Ajustes del sistema de ecuaciones

Los modelos de  $HD$ ,  $ABP$ ,  $VP$  y  $BP$  se ajustaron con el método de regresión aparentemente no relacionada ( $SUR$ , seemingly unrelated regression) mediante el procedimiento MODEL de SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2014).  $NAP$  y  $q$  se ajustaron con mínimos cuadrados ordinarios no lineales, mientras que  $VH$  y  $BH$  con mínimos cuadrados ordinarios lineales.

Como criterios de ajuste se utilizaron el coeficiente de determinación ajustado estimado para regresión no lineal ( $R^2$  ajustada), la raíz de los cuadrados medios del error (RCME), el nivel estadístico significativo de los parámetros ( $Pr>|t|$ ) y el comportamiento lógico de los modelos por medio del análisis gráfico de los valores estimados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Altura dominante

La variación en el estadístico  $R^2$  ajustada entre los modelos de HD fue poca, entre 0.77 y 0.79 para los modelos de predicción y entre 0.97 y 0.98 para los de proyección. Los cuatro modelos presentaron parámetros significativos con valor de  $p$  menor a 1% y tienen estadísticos de ajuste similares (Cuadro 2).

The fitting criteria used were the adjusted determination coefficient estimated for non-linear regression (adjusted  $R^2$ ), the root of the mean squares of the error (RCME), the significant statistical level of the parameters ( $Pr>|t|$ ), and the logical behavior of the models by means of the graphic analysis of the estimated values.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Dominant height

The variation in the adjusted  $R^2$  statistic between the HD models was little, from 0.77 to 0.79 for the prediction models and between 0.97 and 0.98 for the projection models. The four models presented significant parameters with a  $p$  value of less than 1% and have similar adjustment statistics (Table 2).

Due to the similarity in the indicators of goodness of fit, an essential criterion in the election of the growth model is its predictive capacity when superimposing the growth curves on the trajectories of the data observed (Hernández-Cuevas *et al.*, 2018). For this reason, we obtained five site indices (15, 20, 25, 30 and 35) at a base age ( $E_B$ ) of 40 years when substituting in the projection equation  $E_2$  for  $E_B$  and  $HD_2$  for  $IS$ . The  $IS$  15 denotes stands with low productivity and  $IS$  35 reveals stands with higher productive potential.

**Cuadro 2. Parámetros y estadísticos de ajuste de los modelos de altura dominante en *Pinus patula*.  
Table 2. Parameters and fitting statistics of the dominant height models in *Pinus patula*.**

Modelo	Ecuación	Estadísticos de ajuste			Parámetros estimados	Error estándar	Pr>  t
		CME	RCME	R <sup>2</sup> ajustada			
Weibull anamórfico	Predicción	7.8690	2.8052	0.7790	$b_0=32.61377$ $b_1=0.05854$	1.7899 0.0054	<0.0001 <0.0001
	Proyección	0.7306	0.8548	0.9766	$b_2=0.97602$	0.0539	<0.0001
Chapman- Richards polimórfico	Predicción	7.5822	2.7536	0.7871	$b_0=30.34393$ $b_1=0.07120$	0.8018 0.0063	<0.0001 <0.0001
	Proyección	0.4801	0.6929	0.9846	$b_2=1.22587$	0.0901	<0.0001
Bass Anamórfico	Predicción	7.4761	2.7342	0.7901	$b_0=29.09753$ $b_1=0.09225$	0.9464 0.0134	<0.0001 <0.0001
	Proyección	0.7636	0.8739	0.9756	$b_2=0.76927$	0.3360	0.0228
Hosfeld IV polimórfico	Predicción	7.8568	2.803	0.7794	$b_0=39.60097$ $b_1=3.34551$	2.5375 0.1198	<0.0001 <0.0001
	Proyección	0.6058	0.7784	0.9806	$b_2=1.17816$	0.0774	<0.0001

Pr>|t|: prueba de t Student para evaluar la significancia de parámetros, CME: cuadrados medios del error, RCME: raíz de los cuadrados medios del error ♦ Pr> |t|: Student t test to evaluate the significance of parameters, CME: mean squares of the error, RCME: root of the mean squares of the error.

Por la similitud en los indicadores de bondad de ajuste, un criterio esencial en la elección del modelo de crecimiento es su capacidad predictiva al sobrepasar las curvas de crecimiento sobre las trayectorias de los datos observados (Hernández-Cuevas *et al.*, 2018). Para ello, se derivaron cinco índices de sitio (15, 20, 25, 30 y 35) a una edad base ( $E_B$ ) de 40 años al sustituir en la ecuación de proyección  $E_2$  por  $E_B$  y  $HD_2$  por  $IS$ . El  $IS$  15 denota rodales con productividad baja y el  $IS$  35 rodales con potencial productivo mayor.

El modelo polimórfico de Chapman-Richards (b) no describió adecuadamente el comportamiento de los datos observados (Figura 1), debido a que el parámetro  $b_0=30.34$  relacionado con el valor asintótico de HD resultó menor a lo esperado y a otros estudios (Pacheco *et al.* 2016). Los demás modelos pueden usarse para estimar la HD.

The Chapman-Richards (b) polymorphic model did not adequately describe the behavior of the data observed (Figure 1) since the parameter  $b_0 = 30.34$  related to the asymptotic value of HD was less than expected and also when compared to other studies (Pacheco *et al.* 2016). The other models can be used to estimate HD.

In the construction of the growth and yield system, we used the Weibull anamorphic model since it describes the trend of the data to a reasonable extent. This model implies that the growth rate is constant, while the maximum potential varies. Authors such as Martínez-Zurimendi *et al.* (2015), Santiago-García *et al.* (2013), and Gonzalez-Benecke *et al.* (2012) used anamorphic models to describe the dominant height growth of *Gmelina arborea*, *Pinus patula*, *Pinus palustris* and *Cedrela odorata* and *Tabebuia donnell-smithii*, respectively.

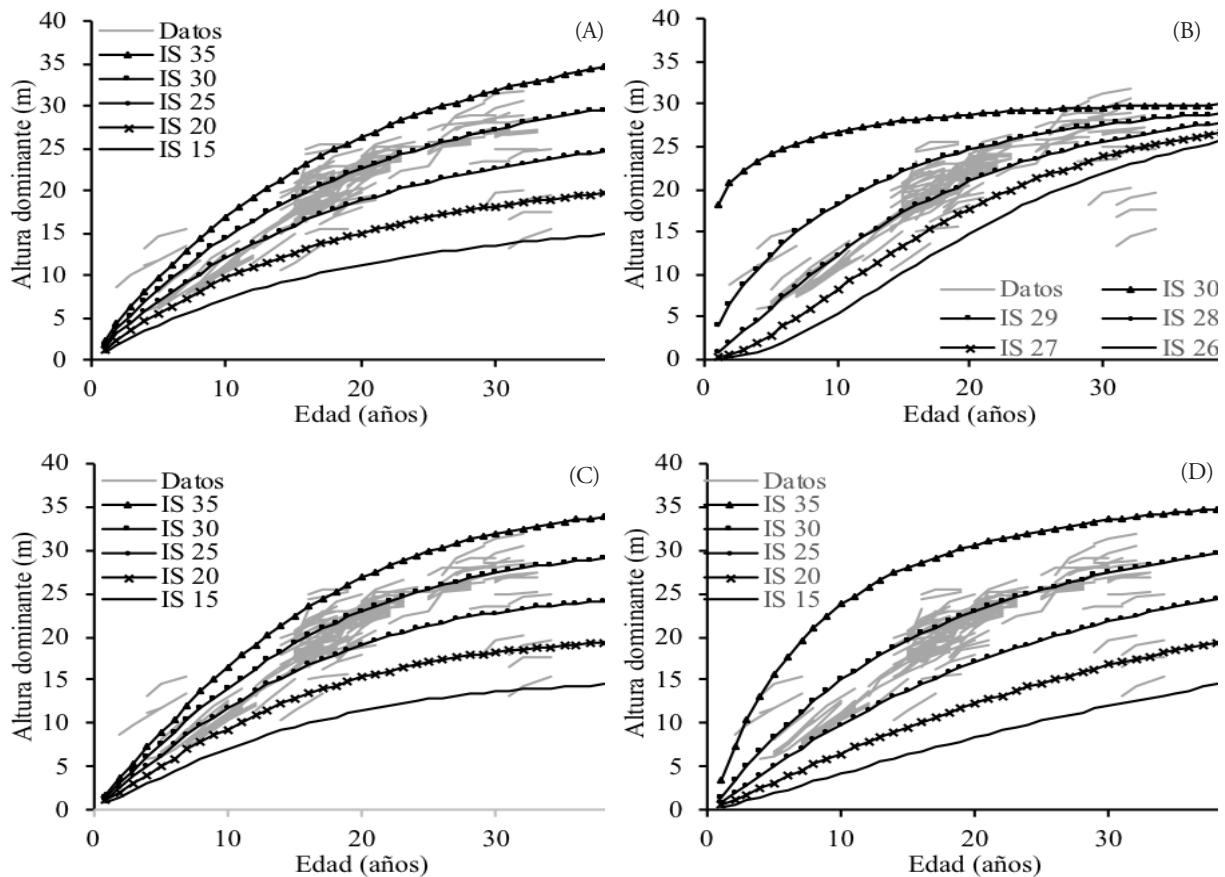


Figura 1. Familia de curvas de crecimiento en altura dominante para los modelos Weibull anamórfico (A), Chapman-Richards polimórfico (B), Bass anamórfico (C) y Hossfeld IV polimórfico (D).

Figure 1. Family of height-dominant growth curves for the anamorphic Weibull (A), polymorphic Chapman-Richards (B), anamorphic Bass (C) and polymorphic Hossfeld IV (D) models.

Para la construcción del sistema de crecimiento y rendimiento se utilizó el modelo anamórfico de Weibull ya que describe la tendencia de los datos en medida razonable. Este modelo implica que la tasa de crecimiento es constante, mientras que la potencialidad máxima varía. Autores como Martínez-Zurimendi *et al.* (2015), Santiago-García *et al.* (2013) y Gonzalez-Benecke *et al.* (2012) usaron modelos anamórficos para describir el crecimiento en altura dominante de *Gmelina arborea*, *Pinus patula*, *Pinus palustris* y *Cedrela odorata* y *Tabebuia donnell-smithii*, respectivamente.

Los modelos de Weibull explicaron el 77.9 y 97.6% de la varianza total de la variable altura dominante y los parámetros fueron significativos. Los valores altos de  $R^2$  son comunes para la variable HD en *P. patula* (Santiago-García *et al.*, 2013) y otras especies (Fierros-Mateo *et al.*, 2017; Hernández-Cuevas *et al.*, 2018), en especial para modelos de proyección. En tanto que para los de predicción los ajustes generalmente son más bajos como se observa en este estudio y en lo obtenido por Parra-Piedra *et al.* (2017), quienes hallaron valores de 79.5% en predicción y 86.6% en proyección.

### Proporción de área basal de hojosas

El ajuste del modelo de  $q_2$  resultó muy bueno (Cuadro 3), con el énfasis en una  $R^2$  ajustada de 0.97. Este valor es alto comparado con el 0.83 informado por Martin y Brister (1999). La ecuación (3) cumple con el supuesto de mantenerse creciente en el tiempo (Cuadro 4). Dentro del modelo ABP (6) el valor de  $q_2$  tiene una asíntota de 1, lo cual equivale a un rodal sin presencia de pino.

### Número de árboles y área basal

Santiago-García *et al.* (2013) mencionaron que la inclusión del número de árboles por hectárea como variable de predicción, le da la connotación de densidad variable al sistema, y con esto es posible simular regímenes silviculturales para distintos *IS*. Este modelo logra proyectar la mortalidad de los árboles de pino en función de la proporción de hojosas y la edad del sitio.

En otras investigaciones se ha usado como variable predictora el *IS*, Fierros-Mateo *et al.* (2017) para *Pinus chiapensis* y Magaña *et al.* (2008) para *Pinus*

The Weibull models explained 77.9 and 97.6% of the total variance of the dominant height variable, and the parameters were significant. High  $R^2$  values are common for the HD variable in *P. patula* (Santiago-García *et al.*, 2013) and other species (Fierros-Mateo *et al.*, 2017; Hernández-Cuevas *et al.*, 2018), especially for projection models. While for the prediction models, the fittings are generally lower as observed in this study and in Parra-Piedra *et al.* (2017), who found values of 79.5% in prediction and 86.6% in projection.

### Proportion of broadleaf species basal area

The fitting of the  $q_2$  model was very appropriate (Table 3), with emphasis on an adjusted  $R^2$  of 0.97. This value is high compared to 0.83 reported by Martin and Brister (1999). Equation (3) fulfills the assumption of keeping an increasing trend over time (Table 4). Within the ABP (6) model, the value of  $q_2$  has an asymptote of 1, which is equivalent to a stand without pine trees.

### Number of trees and basal area

Santiago-García *et al.* (2013) mentioned that the inclusion of the number of trees per hectare as a prediction variable gives the connotation of a variable density to the system, and with this it is possible to simulate silvicultural regimens for different *IS*. This model projects the mortality of pine trees based on the proportion of broadleaf trees and the age of the site.

In other studies, the predicting variable used is *IS* (Fierros-Mateo *et al.*, 2017) for *Pinus chiapensis*, and also for *Pinus rudis* (Magaña *et al.*, 2008). In order to make the estimates, we defined an initial value of 2000 trees per hectare, a value used by Santiago-García *et al.* (2015) in *P. patula* forests with similar characteristics.

The basal pine area equation (6) shows the effect of competition between pine and broadleaf species on stands. The model suggests that the increase of  $q$  will cause a decrease in ABP, especially in stands with high initial broadleaf species values (Figure 2). It is worth noticing how broadleaf species occupation rapidly expands if the proportion of these species is greater than 10% of the total basal area. This highlights the need for an adequate control of the

**Cuadro 3. Valores estimados de los parámetros y criterios de bondad de ajuste para los modelos de predicción y proyección de los modelos ajustados.**

**Table 3. Estimated values of the parameters and goodness of fit criteria for the prediction and projection models of the adjusted models.**

Modelo	Parámetro	Estimación	Error estándar	Pr>  t	Ec.	Estadísticos de ajuste		
						CME	RCME	R <sup>2</sup> ajustada
NAP	$q_2$	0.417304	0.0402	<.0001	(3)	0.0002	0.0155	0.9725
	$\omega$	0.067783	0.0104	<.0001	(4)	111181.0	333.4	0.8113
Área basal de pino	$\delta_0$	1.001188	0.2451	<.0001	(5)	24.2187	4.9212	0.7009
	$\delta_1$	1.082251	0.0706	<.0001	(6)	3.7670	1.9409	0.9459
	$\delta_2$	7.001105	0.6997	<.0001	(8)	98.1061	9.9049	0.9919
	$\delta_3$	0.003693	0.0002	<.0001	(9)	65.7913	8.1112	0.9945
Volumen de pino	$\theta_0$	2.622045	0.0862	<.0001	(10)	14.3551	3.7888	0.9546
	$\theta_1$	16.910520	0.4959	<.0001	(11)	40.8133	6.3885	0.9829
	$\theta_2$	-0.116930	0.1558	<.0001	(12)	1.2974	1.139	0.9995
Volumen de hojas	$\theta_3$	1.015271	0.0111	<.0001	(13)	1.4464	1.2027	0.9933
	$\lambda$	6.477901	0.0608	<.0001	(10)	14.3551	3.7888	0.9546
Biomasa de pino	$\gamma_0$	0.334109	0.00855	<.0001	(11)	40.8133	6.3885	0.9829
	$\gamma_1$	1.044842	0.00449	<.0001	(12)	1.2974	1.139	0.9995
Biomasa de hojas	$\varphi$	0.816530	0.0029	<.0001	(13)	1.4464	1.2027	0.9933

NAP: número de árboles de pino,  $q_2$ : proporción de área basal de hojas, Pr>|t|: prueba de t de Student para evaluar el nivel significativo de los parámetros; CME: cuadrados medios del error, RCME: raíz de los cuadrados medios del error y  $\alpha_i$ ,  $\omega$ ,  $\delta_p$ ,  $\beta_p$ ,  $\theta_p$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma_i$  y  $\varphi$ : parámetros estimados ♦ NAP: number of pine trees,  $q_2$ : rate of broadleaf species basal area, Pr> |t|: Student's t-test to evaluate the significant level of the parameters; CME: mean squares of error, RCME: root of mean squares of error and  $\alpha_i$ ,  $\omega$ ,  $\delta_p$ ,  $\beta_p$ ,  $\theta_p$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma_i$  and  $\varphi$ : estimated parameters.

**Cuadro 4. Valores proyectados de la proporción de área basal de hojas ( $q_2$ ) en rodales de *Pinus patula*, para intervalos de  $q_1$ ,  $E_1$  y  $E_2$  en el uso de la ecuación (3).**

**Table 4. Projected values of the rate of basal broadleaf species area ( $q_2$ ) in stands of *Pinus patula* for intervals of  $q_1$ ,  $E_1$  and  $E_2$  in the use of equation (3).**

$E_1$ (años)	$q_1$	$E_2$ (años)						
		10	15	20	25	30	35	40
5	0.01	0.03	0.05	0.08	0.10	0.11	0.13	0.14
	0.1	0.18	0.23	0.27	0.31	0.34	0.36	0.38
	0.2	0.30	0.36	0.41	0.44	0.47	0.49	0.51
10	0.01		0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08
	0.1		0.14	0.18	0.21	0.23	0.26	0.27
	0.2		0.26	0.30	0.33	0.36	0.39	0.41
15	0.01			0.02	0.02	0.03	0.04	0.05
	0.1			0.13	0.16	0.18	0.20	0.22
	0.2			0.24	0.27	0.30	0.32	0.34
20	0.01				0.02	0.02	0.03	0.03
	0.1				0.12	0.14	0.16	0.18
	0.2				0.23	0.26	0.28	0.30
25	0.01					0.01	0.02	0.02
	0.1					0.12	0.14	0.15
	0.2					0.23	0.25	0.27

$q_1$ : proporción de área basal de hojas inicial;  $E_1$ : edad inicial;  $E_2$ : edad de proyección ♦  $q_1$ : rate of basal broadleaf species initial area;  $E_1$ : initial age;  $E_2$ : projection age.

*rudis*. Para realizar las estimaciones se definió un valor inicial de 2000 árboles por hectárea, valor usado por Santiago-García *et al.* (2015) en bosques de *P. patula* con características similares.

La ecuación de área basal de pino (6), muestra el efecto de la competencia entre el pino y las hojosas en los rodales. El modelo sugiere que el incremento de  $q$  causará una disminución del ABP, sobre todo en rodales con valores iniciales altos de hojosas (Figura 2). Es interesante notar como la ocupación de las hojosas es acelerada si se deja una proporción mayor al 10% del área basal total. Esto resalta la necesidad de un control adecuado de la composición del rodal durante el ciclo de corta, sobre todo si se desean cosechas altas en turnos cortos.

En el caso del factor de reducción del modelo de área basal de pino, este toma el valor de 1 cuando en el rodal no hay presencia de hojosas. Martin y Brister (1999) sugirieron el uso de  $q_1 = 0.0001$  cuando el valor real sea cero, y asegurarse de que exista un componente de hojosas en el periodo de proyección. Sin embargo, debido a que este valor depende de la ecuación (3), y que en el área de estudio se encontraron sitios en esta condición, se deberá utilizar el valor de cero cuando ello ocurra, porque el ajuste se realizó a partir de sitios con y sin presencia de hojosas.

stand composition during the cutting cycle, especially if high harvests are expected in short rotations.

In the case of the reduction factor of the pine basal area model, the factor takes the value of 1 when there are no broadleaf species in the stand. Martin and Brister (1999) suggested using  $q_1 = 0.0001$  when the actual value is 0 (zero), also, making sure that there is a broadleaf species component in the projection period. However, since this value depends on equation (3), and the fact that we found sites in this condition in the study area, the value of zero should be used when broadleaf species occur because the adjustment was made from sites with and without the presence of broadleaf species.

## Volume

The VP model presented good fit statistics (Table 3), in addition to highly significant parameters. For the average site index (*IS* 30), the behavior of the average model was consistent with the field observations. At 35 years of age, its estimate was  $388.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , a more conservative yield than that projected by Santiago-García *et al.* (2015) of  $433.8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  in an *IS* 29 with the same base age. This yield is very similar to the  $430 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  estimated

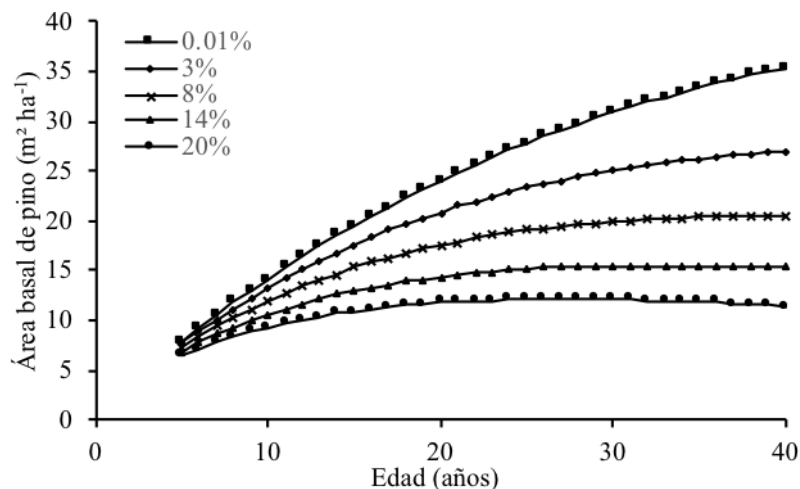


Figura 2. Proyección del área basal de pino en el índice de sitio promedio (*IS* 30) para cinco proporciones iniciales de área basal de hojosas, con  $8 \text{ m}^2$  de área basal total a la edad de 5 años y 2000 árboles de pino por hectárea.

Figure 2. Projection of the basal area of pine in the average site index (*IS* 30) for five initial proportions of basal area of broadleaf trees, with  $8 \text{ m}^2$  of total basal area at the age of 5, and 2000 pine trees per hectare.

## Volumen

El modelo de VP presentó buenos estadísticos de ajuste (Cuadro 3), además de niveles significativos altos en sus parámetros. Para el índice de sitio promedio (IS 30) el comportamiento del modelo promedio fue congruente con las observaciones de campo. A los 35 años de edad estimó  $388.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , rendimiento más conservador que el proyectado por Santiago-García *et al.* (2015) de  $433.8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  en un IS 29 a la misma edad base. Este rendimiento es muy parecido a los  $430 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  estimados por Parra-Piedra *et al.* (2017) en plantaciones de *P. patula* a la edad de 30 años en un IS equivalente, con una densidad inicial de 1100 árboles por hectárea en Zacualpan, Veracruz.

En nuestra investigación el turno técnico promedio en volumen se alcanza a los 29 años para el área de estudio, de manera particular para cada IS, se estimó a los 25, 27, 29, 31 y 35 años en los IS 35, 30, 25, 20 y 15, respectivamente. El turno resultó más largo que lo estimado por Santiago-García *et al.* (2015), quienes informaron valores de 20 y 22 años para los IS 29 y 27 en rodales coetáneos de *P. patula*, mientras que Parra-Piedra *et al.* (2017) estimaron turnos de 14 a 21 años en plantaciones de la misma especie. Aun así, la edad del turno técnico estimado en este estudio es menor que el turno de 40 años empleado en la zona, el cual puede reducirse mediante la aplicación de labores silvícolas intensivas como aclareos fuertes, repoblación rápida del rodal después de la cosecha y control de vegetación (Santiago-García *et al.*, 2013).

## Biomasa y carbono

Las ecuaciones de biomasa se comportaron de forma semejante a lo indicado por Figueroa-Navarro *et al.* (2010) para bosques de condiciones similares, en los cuales los valores estuvieron entre 45.9 y 166  $\text{Mg ha}^{-1}$  para edades de 9 a 25 años de acuerdo con datos de inventario forestal. En nuestro estudio los valores van de 25.8 a 122.4  $\text{Mg ha}^{-1}$  para el mismo intervalo de edades en el IS promedio.

Las estimaciones de C realizadas a través de las ecuaciones de biomasa proyectaron valores de 10.1 a 58.5  $\text{Mg ha}^{-1}$  para el IS 30 y de 15.4 a 85.5  $\text{Mg ha}^{-1}$  en el IS de productividad mayor para edades de 8 hasta 24 años. Estos valores son un poco menores a las estimaciones realizadas por Aguirre-Salado *et al.* (2009), de 20 a 100  $\text{Mg ha}^{-1}$  en un estudio realizado

by Parra-Piedra *et al.* (2017) in *P. patula* plantations at the age of 30 in an equivalent IS, with an initial density of 1100 trees per hectare in Zacualpan, Veracruz.

In our study, the average volume rotation was reached at 29 years of age for the study area; particularly for each IS, the estimates we did were at 25, 27, 29, 31 and 35 years in IS 35, 30, 25, 20 and 15, respectively. The rotation was longer than that estimated by Santiago-García *et al.* (2015), who reported values of 20 and 22 years for IS 29 and 27 in even-aged stands of *P. patula*. Whilst Parra-Piedra *et al.* (2017) estimated rotations from 14 to 21 years in plantations of the same species. Even so, the age of the volume rotation estimated in this study is less than the 40-year period used in the area, which can be reduced by applying intensive silvicultural work such as heavy thinning, rapid repopulation of the stand after harvest, and vegetation control (Santiago-García *et al.*, 2013).

## Biomass and carbon

The biomass equations behaved similarly to what was indicated by Figueroa-Navarro *et al.* (2010) in forests of similar conditions, in which the values were between 45.9 and 166  $\text{Mg ha}^{-1}$  for ages of 9 to 25 years according to forest inventory data. In our study the values ranged from 25.8 to 122.4  $\text{Mg ha}^{-1}$  for the same age range in the average IS.

The estimates of C made through the biomass equations rendered values from 10.1 to 58.5  $\text{Mg ha}^{-1}$  for IS 30 and from 15.4 to 85.5  $\text{Mg ha}^{-1}$  in the IS of higher productivity for ages from 8 to 24 years. These values are slightly lower than the estimates made by Aguirre-Salado *et al.* (2009), from 20 to 100  $\text{Mg ha}^{-1}$  in a study carried out with satellite images for forests in the region in the same age range.

In other estimates with inventory data, the results ranged from 50  $\text{Mg ha}^{-1}$  for oak forests (Báez-Pérez *et al.*, 2012) and 125, 112.5 and 96.7  $\text{Mg ha}^{-1}$  for pine, oak-pine and pine-oak forests, respectively (Ordoñez *et al.*, 2015). However, an advantage of our study and of the growth and yield systems is that reliable projections of the behavior of the variables over time can be made from data representing the initial conditions of the mass.

con imágenes de satélite para bosques de la región en el mismo intervalo de edades.

En otras estimaciones con datos de inventario, los resultados van de 50 Mg ha<sup>-1</sup> para bosques de encino (Báez-Pérez *et al.*, 2012) y 125, 112.5 y 96.7 Mg ha<sup>-1</sup> para bosque de pino, encino-pino y pino-encino, respectivamente (Ordoñez *et al.*, 2015). Sin embargo, una ventaja de nuestra investigación y de los sistemas de crecimiento y rendimiento, es que se pueden realizar proyecciones confiables del comportamiento de las variables en el tiempo desde datos que representan las condiciones iniciales de la masa.

**Uso del sistema de crecimiento y rendimiento**

Una de las principales aplicaciones del SCR es la simulación de escenarios de manejo. El Cuadro 5

**Use of the growth and yield system**

One of the main applications of SCR is the simulation of management scenarios. Table 5 shows a yield table for a scenario in the most common site indexes. It is worth mentioning that, to include the presence of broadleaf species with different initial percentages, we used the projection equations.

When comparing the results of the system with and without the presence of broadleaf species, we observed that the volume of pine decreases as the proportion of broadleaf species increases. However, for the total volume (volume of pine plus broadleaf species) the trend observed was that in the least productive sites (*IS* 15) in terms of volume, it makes no difference to manage stands of only pine or with a mixture of species (Figure 3a). But it is not so if

**Cuadro 5. Tabla de crecimiento y rendimiento promedio de *Pinus patula* para los índices de sitio 20, 25 y 30 m con una densidad inicial de 2000 árboles por hectárea y 0% de hojosa.**

**Table 5. Growth and yield of *Pinus patula* for site indexes 20, 25 and 30 m with an initial density of 2000 trees per hectare and 0% broadleaf species.**

Edad	NAP	Altura dominante (m)			Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )			Volumen (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )			Carbono (Mg ha <sup>-1</sup> )		
		20	25	30	20	25	30	20	25	30	20	25	30
1	2000	1.3	1.6	1.9	1.9	2.5	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1746	3.6	4.5	5.3	3.3	4.2	5.1	0.5	1.5	3.5	0.1	0.3	0.6
5	1525	5.6	7.0	8.3	4.9	6.2	7.6	4.0	9.3	17.1	0.7	1.7	3.2
7	1332	7.3	9.2	11.0	6.4	8.2	10.0	11.4	23.1	38.3	2.1	4.4	7.5
9	1163	8.9	11.1	13.4	7.9	10.1	12.3	21.8	40.7	64.0	4.2	8.0	12.9
11	1015	10.3	12.9	15.5	9.3	11.9	14.4	34.1	60.5	92.0	6.7	12.1	18.8
13	8867	11.6	14.5	17.4	10.6	13.6	16.5	47.6	81.5	120.9	9.5	16.6	25.1
15	774	12.7	15.9	19.1	11.9	15.1	18.5	61.7	102.9	150.1	12.4	21.2	31.4
17	676	13.7	17.1	20.6	13.1	16.6	20.3	75.9	124.2	178.8	15.4	25.7	37.7
19	590	14.6	18.3	21.9	14.2	18.0	22.0	90.1	145.1	206.8	18.4	30.3	43.9
21	516	15.4	19.3	23.1	15.2	19.3	23.5	103.9	165.3	233.8	21.4	34.7	49.9
24	421	16.5	20.6	24.7	16.6	21.1	25.7	123.8	194.3	272.1	25.7	41.1	58.5
25	393	16.8	21.0	25.2	17.0	21.6	26.4	130.2	203.5	284.3	27.1	43.1	61.2
26	367	17.1	21.4	25.7	17.4	22.2	27.0	136.4	212.5	296.2	28.4	45.1	63.9
27	343	17.4	21.7	26.1	17.8	22.7	27.6	142.5	221.2	307.7	29.7	47.1	66.5
28	321	17.7	22.1	26.5	18.2	23.2	28.2	148.5	229.7	318.9	31.0	49.0	69.0
29	300	17.9	22.4	26.9	18.6	23.6	28.8	154.2	238.0	329.8	32.3	50.8	71.5
30	280	18.2	22.7	27.3	18.9	24.1	29.3	159.8	246.1	340.4	33.5	52.6	73.9
31	262	18.4	23.0	27.6	19.3	24.5	29.9	165.3	253.9	350.6	34.7	54.4	76.2
32	245	18.6	23.3	27.9	19.6	24.9	30.4	170.6	261.5	360.6	35.9	56.1	78.4
34	214	19.0	23.8	28.5	20.2	25.7	31.3	180.8	276.0	379.6	38.1	59.3	82.8
35	200	19.2	24.0	28.8	20.5	26.1	31.8	185.6	282.9	388.7	39.2	60.9	84.8
36	187	19.4	24.2	29.1	20.8	26.5	32.2	190.3	289.6	397.5	40.2	62.4	86.8
38	163	19.7	24.6	29.6	21.3	27.1	33.0	199.3	302.4	414.3	42.2	65.3	90.7
40	142	20.0	25.0	30.0	21.8	27.7	33.8	207.8	314.4	430.0	44.1	68.0	94.3

NAP: número de árboles de pino por hectárea ♦ NAP: number of pine trees per hectare.

muestra una tabla de rendimiento para un escenario en los *IS* más comunes. Cabe resaltar que para incluir la presencia de hojosas con diferentes porcentajes iniciales se usaron las ecuaciones de proyección.

Al comparar los resultados del sistema con y sin presencia de hojosas se observó que el volumen de pino disminuye a medida que la proporción de hojosas aumenta. Sin embargo, para el volumen total (volumen de pino más el de hojosas) la tendencia observada fue que en los sitios menos productivos (*IS* 15), en términos de volumen, es indistinto manejar rodales puros de pino o con mezcla de especies (Figura 3a). No así si se considera el valor económico o la acumulación de biomasa. A medida que la productividad aumentó, los rodales puros de pino tuvieron más volumen total que aquellos con algún porcentaje de hojosas. En estos casos, la diferencia en volumen fue mayor a medida que el *IS* también fue mayor.

En el caso de la biomasa, la tendencia observada en el volumen total cambió. Al simular el comportamiento en condiciones de un rodal puro de pino y otro con 4% de hojosas, se encontró que los rodales menos productivos (*IS* 15) acumulan más biomasa con el componente de hojosas que si este se omite y se considera el manejo de rodales puros de *P. patula* (Figura 3b). En los sitios más productivos (*IS* 35) esto es indistinto en términos de acumulación de

the economic value or the accumulation of biomass is considered. As productivity increased, pure pine stands had a higher total volume than those with some percentage of broadleaf species. In these cases, the difference in volume was higher as the *IS* also increased.

In biomass, the trend observed in total volume changed. By simulating the behavior under conditions of a pure pine stand and another with 4% broadleaf species, we found that the least productive stands (*IS* 15) accumulate more biomass with the broadleaf component than if the latter is omitted and only *P. patula* stands are considered (Figure 3b). In the most productive sites (*IS* 35) this feature makes no difference in terms of biomass accumulation due to the high volumes of pine with which it is possible to offset the contribution of the broadleaf species.

## CONCLUSIONS

With the growth system generated, it is possible to simulate silvicultural scenarios for the different site qualities found in the even-aged *Pinus patula* forests, in Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo. The use of the generated growth system is recommended in other regions only under environmental conditions with similar species and silvicultural treatments.

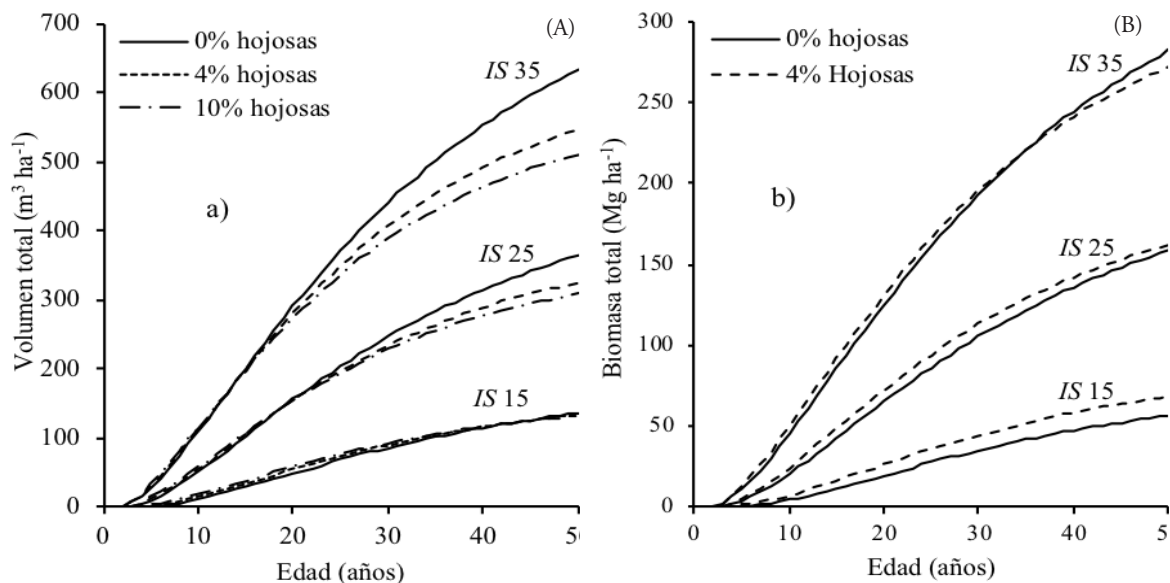


Figura 3. Volumen total (A) y biomasa total (B) en los *IS* 15, 25 y 35 m para diferentes porcentajes iniciales de hojosas a los cinco años de edad.

Figure 3. Total volume (A) and total biomass (B) in *IS* 15, 25 and 35 m for different initial percentages of broadleaf species at five years of age.

biomasa, debido a los volúmenes altos de pino con los cuales se logra compensar la aportación de las hojosas.

## CONCLUSIONES

Con el sistema de crecimiento generado se pueden simular escenarios silvícolas para las diferentes calidades de sitio encontradas en los bosques coetáneos de *Pinus patula* en la región de Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo. El uso del sistema de crecimiento generado se recomienda en otras regiones solo en condiciones ambientales, con especies y tratamientos silvícolas similares.

La incorporación en el sistema de la proporción de área basal de hojosas permitió modelar la competencia interespecífica en el rodal y conocer el efecto sobre el pino. La presencia de hojosas en particular porque, si los rodales muestran una proporción inicial alta de hojosas, disminuirá el área basal de pino. La composición del rodal debe controlarse si se desea favorecer el desarrollo del pino respecto al de hojosas, para lograr cosechas de productividad elevada en turnos cortos.

La inclusión de biomasa y carbono en el sistema de crecimiento y rendimiento permitió conocer la dinámica de estas variables en los rodales, por medio del uso de variables fáciles de medir y recolectadas en los inventarios de bosques con manejo. La presencia de hojosas en los rodales aumenta la captura de C en los sitios de menor productividad, pero significa menor volumen de la especie comercial, lo cual deberá tomarse en cuenta al definir las prácticas silvícolas en los rodales.

El turno técnico promedio se estimó en 29 años e indica que se pueden aumentar los flujos de caja de los productores en la zona al tener cosechas finales más frecuentes. Esto supone en términos de manejo un seguimiento mejor y una aplicación correcta de las labores silvícolas. En lo administrativo implica sensibilizar a las autoridades encargadas de la regulación forestal, para identificar que esta estrategia no solo es rentable sino también sostenible.

## LITERATURA CITADA

Aguirre-Salado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. De los Santos-Posadas, R. Haapanen, y A. I. Aguirre-Salado. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosque de *Pino patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43:209-220.

The incorporation in the system of the proportion of basal area of broadleaf species allowed to model the interspecific competition in the stand and find out the effect on the pine. Broadleaf species in particular, because if the stands show a high initial proportion of them, then the basal area of pine will decrease. The composition of the stand should be controlled if the aim is to favor the development of pine trees instead of broadleaf species to achieve high productivity harvests in short rotations.

The inclusion of biomass and carbon in the growth and yield system allowed to know the dynamics of these variables in the stands, through the use of easy-measurement variables, as the ones collected in inventories of managed forests. The presence of broadleaf species in the stands increases the capture of C in the places of lower productivity but it also means a lower volume of the commercial species. This fact should be considered when defining silvicultural practices in the stands.

The average volume rotation was estimated at 29 years and it indicates that the cash flows of producers in the area can increase by obtaining more frequent final harvests. In terms of technical management, this means better monitoring and the correct application of silvicultural prescriptions. Regarding administrative management, it involves leading the sensibility of the authorities in forest regulation to identify this strategy not only as profitable, but also sustainable.

—End of the English version—

-----\*-----

Ángeles P., G., B. Méndez L., R. Valdez L., F. O. Plascencia E., H. M. De los Santos P., G. Chávez A., A. D. Ortiz R., M. A. Soriano L., Z. Zaragoza C., E. Ventura P., A. Martínez L., C. Wayson, D. López M., M. Olguín A., O. Carrillo N., y V. Maldonado M. 2015. Estudio de Caso del Sitio de Monitoreo Intensivo del Carbono en Hidalgo. Fortalecimiento REDD+ y cooperación sur. CONAFOR, COLPOS. 105 p.

Báez-Pérez, A., M. A. Hernández-Martínez, M. Acosta-Mireles, y M. A. Bautista-Cruz. 2012. Inventario de carbono en la microcuenca La Laborcita en Sierra de Lobos, Guanajuato. *In: Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales.* Paz, F. y R. Cuevas (eds). Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de México y el Instituto Nacional de Ecología. Texcoco, Estado de México, México. pp. 215-221.

- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2012. Manual de procedimientos para el muestreo en campo. Re-Muestreo. Comisión Nacional Forestal, Jalisco, México. 136 p.
- Cruz-Leyva, I. A., J. R. Valdez-Lazalde., G. Ángeles-Pérez., H. M. de los Santos-Posadas. 2010. Modelación especial de área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *P. teocote* en el ejido Atopixco, Hidalgo. *Madera y Bosques* 16: 75-97.
- Cutini, A., F. Chianucci, and M. C. Manetti. 2013. Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. *IForest* 6: 331-337.
- Fierros-Mateo, R., H. M. De los Santos-Posadas, M. A. Fierros-González, y F. Cruz-Cobos. 2017. Crecimiento y rendimiento maderable en plantaciones de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. *Agrociencia* 51: 201-214.
- Figuroa-Navarro, C. M., G. Ángeles-Pérez, A. Velázquez-Martínez, y H. M. De los Santos-Posadas. 2010. Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Rev. Mex. Cien. For.* 1: 105-112.
- Gonzalez-Benecke, C. A., S. A. Gezan, D. J. Leduc, T. A. Martin, W. P. Cropper, and L. J. Samuelson. 2012. Modeling survival, yield, volume partitioning and their response to thinning for longleaf pine plantations. *Forests* 3: 1104-1132.
- Hernández-Cuevas, M., W. Santiago-García, H. M. De los Santos-Posadas, P. Antúnez, y F. Ruiz-Aquino. 2018. Modelos de crecimiento en altura dominante e índices de sitio para *Pinus ayacabuite* Ehren. *Agrociencia* 52: 437-453.
- Hernández P., D., H. M. de los Santos P., G. Ángeles P., J. R. Valdez L., y V. H. Volke. H. 2013. Funciones de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus patula* schltdl. et cham. en Zacualtipán, Hidalgo
- 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: 5-13.
- Martin, S. W., and G. H. Brister. 1999. A growth and yield model incorporating hardwood competition for natural loblolly pine stands in the Georgia Piedmont. *SJAF* 23: 179-185.
- Martínez-Zurimendi, P., M. Domínguez-Domínguez, A. Juárez-García, L. M. López-López, V. De la Cruz-Arias, y J. Álvarez-Martínez. 2015. Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* en Tabasco, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 38: 415-425.
- Ordoñez D., J. A. B., R. Rivera V., M. E. Tapia M., y L. R. Aledo H. 2015. Contenido y captura potencial de carbono en la biomasa forestal de San Pedro Jacuaro, Michoacán. *Rev. Mex. Cien. For.* 6: 7-16.
- Pacheco A., G., W. Santiago J., D. Martínez S., y R. Ortíz B. 2016. Analisis del crecimiento e incremento y estimación de índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb. en Santiago Textitlán, Sola de Vega, Oaxaca. *Foresta Mexicana* 18: 21-28.
- Parra-Piedra, J. P., H. M. De los Santos-Posadas, A. M. Fierros-González, J. R. Valdez-Lazalde, y J. L. Romo-Lozano. 2017. Proyección explícita e implícita del rendimiento maderable de plantaciones forestales comerciales de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. Et Cham. *Agrociencia* 51: 455-470.
- Santiago-García, W., H. M. De los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, J. R. Valdez-Lazalde, J. J. Corral-Rivas, G. Rodríguez-Ortiz, y E. Santiago-García. 2015. Modelos de crecimiento y rendimiento de totalidad del rodal para *Pinus patula*. *Madera y Bosques* 21: 95-110.
- 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*. *Rev. Fitotec. Mex.* 36: 163-172.
- SAS Institute Inc. 2014. SAS/ETS® 9.3 User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, NC. 2861 p.
- Soriano-Luna, M. A., G. Ángeles-Pérez, T. Martínez-Trinidad, F. O. Plascencia-Escalante, y R. Razo- Vargas-Larreta, B., J. J. Corral-Rivas, O. A. Aguirre-Calderón, J. O. López-Martínez, H. M. De los Santos-Posadas, F. J. Zamudio-Sánchez, E. J. Treviño-Garza, M. Martínez-Salvador, y C. G. Aguirre-Calderón. 2017. SiBiFor: Sistema Biométrico Forestal para el manejo de los bosques de México. *RCHSCFA* 23: 437-455.
- Zárate. 2015. Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia* 49: 423-438.

