

DENSIDAD INICIAL EN EL RENDIMIENTO MADERABLE Y BIOMASA DE *Pinus patula* CON ESPECIES LATIFOLIADAS

INITIAL DENSITY IN THE TIMBER YIELD AND BIOMASS OF *Pinus patula* WITH HARDWOOD SPECIES

Agustín **Ramírez-Martínez**¹, Héctor M. **De los Santos-Posadas**^{1*}, Gregorio **Ángeles-Pérez**¹,
Manuel J. **González-Guillén**¹, Wenceslao **Santiago-García**²

¹Ciencias Forestales. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, México. ²Instituto de Estudios Ambientales-División de Estudios de Postgrado. Universidad de la Sierra Juárez, Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

RESUMEN

En México los bosques de clima templado manejados presentan en su mayoría una repoblación de origen natural y niveles de densidad diferentes entre rodales. Los modelos de mortalidad asumen tasa de disminución constante para todas las edades, índices de sitio y densidades. El objetivo de este estudio fue determinar las tasas de mortalidad en tres densidades iniciales y construir un sistema de crecimiento y rendimiento (SCR) de *Pinus patula* en presencia de latifoliadas, en la región de Zacualtipán, Hidalgo, México. Los datos provinieron de tres inventarios realizados en 2013, 2014 y 2016 de 160 sitios de 400 m². La productividad se describió por medio del patrón de crecimiento en altura dominante de tipo anamórfico con el modelo Hossfeld IV. El ajuste de los modelos de mortalidad generó tasas de decremento anuales de 2.47, 1.17 y 0.81% con densidades mayor que 2000, entre 1000 y 2000 y menor que 1000 árboles ha⁻¹, respectivamente. El SCR mostró que los rendimientos mayores correspondieron a la densidad inicial de 2000 árboles ha⁻¹ y los turnos técnicos estimados en volumen entre los 24 y 27 años. Con presencia del 5% de latifoliadas, a partir de los 5 años los turnos se encontraron entre los 20 y 23 años. En un índice de sitio (IS) 36 el volumen de pino fue mayor que el volumen total (la suma de pinos y latifoliadas), mientras que en los IS 18, 24 y 30 las diferencias no fueron tan significativas. La biomasa fue mayor en todos los sitios con pinos más latifoliadas, dado que estas especies concentran una mayor cantidad de biomasa en su estructura. En los sitios más productivos (IS 30 y 36) las latifoliadas tienden a afectar los rendimientos finales en volumen del pino. Por lo tanto, la aplicación de tratamientos silvícolas es necesaria para disminuir la proporción de estas especies.

ABSTRACT

In Mexico, most repopulation of managed temperate forests is natural and stands have different densities. Models of mortality assume a constant rate of decrease for all ages, site indexes and densities. The objective of this study was to determine mortality rates in three initial densities and construct a growth and yield system (GYS) for *Pinus patula* in the presence of hardwood species in the region of Zacualtipán, Hidalgo, México. The data used was from three inventories conducted in 2013, 2014 and 2016 at 160 sites, 400 m² each. A Hossfeld IV model based on the dominant height as anamorphic-type growth pattern described productivity. Mortality model fit generated annual decrease rates of 2.47, 1.17 and 0.81% with densities above 2000, between 1000 and 2000, and less than 1000 trees ha⁻¹, respectively. The GYS showed that the highest yields correspond to the initial density of 2000 trees ha⁻¹ and the estimated volume rotation ranging from 24 to 27 years. With hardwoods (5%) present in the site, starting at the first 5 years, estimated volume rotations were found between 20 and 23 years. In a site index (SI) 36, the volume of pine was greater than the total volume (the sum of pines and hardwoods), while at SI 18, 24 and 30, the differences were not as significant. Biomass was greater in all the sites with pines and hardwoods since these latter species concentrate a larger amount of biomass in their structure. In more productive sites (SI 30 and 36), hardwoods tend to affect final volume yield of pine. Therefore, the application of silvicultural treatments is necessary to decrease the proportion of hardwood species.

Key words: forest management, silvicultural treatment, site index, rotation, timber volume.

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.

Recibido: noviembre, 2018. Aprobado: enero, 2020.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 54: 555-573. 2020.

Palabras clave: manejo forestal, tratamientos silvícolas, índice de sitio, turno técnico, volumen maderable.

INTRODUCCIÓN

La repoblación de origen natural presenta una distribución aleatoria de árboles con densidades diferentes entre rodales. La densidad es el número de individuos por unidad de área y se considera indicadora de la ocupación del arbolado de un lugar específico en un tiempo dado (Zeide, 2004).

El efecto negativo que un árbol ejerce sobre el otro es mayor en densidades mayores (Burkhart y Tomé, 2012), lo que indudablemente reducirá la supervivencia, el crecimiento o la reproducción del individuo afectado (Pretzsch, 2009). La mortalidad es un proceso fundamental en el desarrollo forestal que ocurre a diferentes tasas, mismas que pueden variar en dependencia de las condiciones del bosque (Lugo y Scatena, 1996). Lo anterior hace que este proceso sea una de las variables más difíciles de modelar y predecir (Santiago-García *et al.*, 2013).

Dentro de un sistema de crecimiento y rendimiento (SCR), la densidad inicial es un factor determinante del rendimiento (producción en volumen) (Daniel *et al.*, 1982). Este tipo de herramientas poseen la capacidad de proyectar y simular los cambios en las variables de interés (volumen, biomasa) en el estado de la masa forestal a través del tiempo (Santiago-García *et al.*, 2013). En México el desarrollo de los SCR ha crecido en años recientes, para plantaciones forestales con fines maderables (Fierros-Mateo *et al.* 2017; Parra-Piedra *et al.*, 2017) y bosques naturales coetáneos (Santiago-García *et al.*, 2014; Santiago-García *et al.*, 2017). Dentro de estos sistemas se han incorporado modelos de mortalidad, con la edad y número de árboles como variables de predicción. Este tipo de modelos se usan en plantaciones forestales donde se conocen el espaciamiento y la densidad inicial, y la tasa de mortalidad se puede mantener constante entre edades e índices de sitio.

En los bosques de la región de Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México, hay masas de *Pinus patula* Schiede ex Schlechtendal & Chamisso, especie de interés por su crecimiento rápido y valor económico alto. *Pinus patula* crece asociada con especies de latifoliadas de abundancia menor (*Quercus excelsa* Liebm., *Q. laurina* Hump et Bonpl., *Q. rugosa* Neé, *Arbutus jalapensis* Kunth., *Prunus serótina* Ehrh., entre

INTRODUCTION

Natural repopulation presents a random distribution of trees within different densities among stands. Density is the number of individuals per unit of area; it is also an indicator of stand occupation of a specific place at a given time (Zeide, 2004).

The negative effect a tree exerts on another is greater when densities values are higher (Burkhart and Tomé, 2012); undoubtedly reducing survival, growth, or reproduction of the affected individual (Pretzsch, 2009). Mortality is a fundamental process in forest development and it occurs at different rates, which can vary depending on the conditions of the forest (Lugo and Scatena, 1996), making the process one of the most difficult variables to model and predict (Santiago-García *et al.*, 2013).

Within a growth and yield system (GYS), initial density is a determining factor of yield (timber volume production) (Daniel *et al.*, 1982). This type of tool has the capacity to project and simulate changes in the variables of interest (volume, biomass) assessing the state of the stand over time (Santiago-García *et al.*, 2013). Recently in Mexico, GYS development has grown for forest timber plantations Fierros-Mateo *et al.* 2017; Parra-Piedra *et al.*, 2017) and natural even-aged forests (Santiago-García *et al.*, 2014; Santiago-García *et al.*, 2017). There are mortality models incorporated into these systems based on age and the number of trees as predictive variables. This type of model is used in forest plantations in which spacing and initial densities are known; and mortality rate can be maintained constant among ages and site indexes.

In forests of the region of Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México, there are stands of *Pinus patula* Schiede ex Schlechtendal & Chamisso, a species of interest because of its rapid growth and high economic value. *Pinus patula* grows in association with less abundant hardwood species (*Quercus excelsa* Liebm., *Q. laurina* Hump et Bonpl., *Q. rugosa* Neé, *Arbutus jalapensis* Kunth., *Prunus serótina* Ehrh., among others) (Figueroa-Navarro *et al.*, 2010). Most of the conducted studies omit hardwoods association condition. The objective of our study was to determine mortality rates for three levels of initial density and generate a GYS integrated by models including the proportion of hardwood species as a

otras) (Figuroa-Navarro *et al.*, 2010), condición omitida en la mayoría de las investigaciones realizadas. El objetivo del presente estudio fue determinar las tasas de mortalidad para tres niveles de densidad inicial y generar un SCR integrado por modelos que incluyan la proporción de latifoliadas como un factor de competencia para determinar su efecto sobre el crecimiento y rendimiento de *Pinus patula* en bosques manejados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y datos dasométricos

El estudio se realizó en el sitio de monitoreo intensivo de carbono (SMIC) en Atopixco, Hidalgo, en una superficie de 900 ha, localizado en las coordenadas 20° 37' 49.78" y 20° 35' 18.74" N y 98° 37' 51.01" y 98° 34' 2.71" O (Soriano-Luna *et al.*, 2015). La topografía es accidentada con altitud media de 2100 m (Cruz-Leyva *et al.*, 2010). El suelo predominante es Feozem con buen drenaje, textura media y contenido alto de materia orgánica (Chávez-Aguilar *et al.*, 2016). El clima es templado húmedo (C(m)) y templado subhúmedo (C (w2)), temperatura media anual de 13.5 °C y precipitación media anual de 2050 mm (Santiago-García *et al.*, 2015).

Los datos utilizados provienen de tres inventarios (2013, 2014 y 2016), realizados en 160 sitios permanentes de 400 m². Los datos recolectados fueron: altura total (H, m), diámetro normal (DN, cm), altura dominante (HD, m), número de árboles vivos (NA) y la edad (años), obtenidos a nivel de rodal en campo y de los programas de manejo forestal. El volumen total con corteza por árbol se estimó con la ecuación 1 desarrollada por Schumacher-Hall, reportada en el Sistema Biométrico Nacional, correspondiente a la Unidad de Manejo Forestal 1302 Zacualtipán-Molango (Vargas-Larreta *et al.*, 2017) y la biomasa aérea total se estimó con la ecuación 2, ajustada por Soriano-Luna *et al.* (2015).

$$V = 0.000253 \cdot DN^{1.6939421} \cdot H^{1.4175090} + 0.0000680 \cdot DN^2 \quad (1)$$

$$B = \exp(-4.554805) \cdot (DN^2 \cdot H)^{1.047218} \quad (2)$$

Con los datos anteriores se estimaron las variables de estado del rodal siguientes: altura promedio de los árboles dominantes (HD, m), área basal (AB, m² ha⁻¹), volumen total (V, m³ ha⁻¹), biomasa aérea total (B, Mg ha⁻¹) y número de árboles vivos (NA, árboles ha⁻¹).

factor of competition to determine their effect on growth and yield of *Pinus patula* in managed forests.

MATERIALS AND METHODS

Study area and dasometric data

The study was conducted at the intensive carbon monitoring site (ICMS) in Atopixco, Hidalgo, on an area of 900 ha, located between the coordinates 20° 37' 49.78" and 20° 35' 18.74" N and 98° 37' 51.01" and 98° 34' 2.71" W (Soriano-Luna *et al.*, 2015). Topography is hilly with mean altitude of 2100 m (Cruz-Leyva *et al.*, 2010). The predominant soil is well-drained Feozem with medium texture and high organic matter content (Chávez-Aguilar *et al.*, 2016). Climate is temperate humid (C(m)) and temperate subhumid (C (w2)), mean annual temperature is 13.5 °C, and mean annual precipitation is 2050 mm (Santiago-García *et al.*, 2015).

Data proceeded from three inventories (conducted in 2013, 2014 and 2016) at 160 (400-m²) permanent sites. The collected data were total height (H, m), diameter at breast height (DN, cm) dominant height (HD, m), number of live trees (NA) and age (years) obtained at the stand level in the field and from forest management programs. The total tree volume, with bark, was estimated with equation 1 developed by Schumacher-Hall, reported in the Sistema Biométrico Nacional, corresponding to the Forest Management Unit 1302 Zacualtipán-Molango (Vargas-Larreta *et al.*, 2017). Total aerial biomass was estimated with equation 2, adjusted by Soriano-Luna *et al.* (2015).

$$V = 0.000253 \cdot DN^{1.6939421} \cdot H^{1.4175090} + 0.0000680 \cdot DN^2 \quad (1)$$

$$B = \exp(-4.554805) \cdot (DN^2 \cdot H)^{1.047218} \quad (2)$$

With the above data, the following variables of the state of the stand were estimated: average height of dominant trees (HD, m), basal area (BA, m² ha⁻¹), total volume (V, m³ ha⁻¹), total aerial biomass (B, Mg ha⁻¹) and number of live trees (NT, trees ha⁻¹).

System of explicit growth

Mortality

To estimate mortality, we used the model proposed by Torres and Magaña (2001). Based on a covariance analysis, three levels of initial repopulation (first measurement of the sites) (3) were

Sistema de crecimiento explícito

Mortalidad

Para estimar la mortalidad se empleó el modelo propuesto por Torres y Magaña (2001), y con base en un análisis de covarianza se analizaron tres niveles de repoblación inicial (primera medición de los sitios) (3), donde las densidades observadas se definieron como alta (A), mayor de 2000 árboles ha⁻¹; media (M), de 1000 a 2000 árboles ha⁻¹; y baja (B), menor de 1000 árboles ha⁻¹ (Figura 1).

La ecuación 4 corresponde a un modelo exponencial negativo donde la tasa de mortalidad media por condición está dada de manera aditiva. La estructura matemática para las ecuaciones 3 y 4 es la siguiente:

$$f(\theta_{1f} \cdot I_f) = \theta_{1A} + \theta_{1M} \cdot I_M + \theta_{1B} \cdot I_B \tag{3}$$

$$NA_2 = NA_1 \cdot \exp(f(\theta_{1f} \cdot I_f) \cdot (E_2 - E_1)) \tag{4}$$

donde NA_1 : número de árboles (árboles ha⁻¹) a la edad inicial E_1 (años), NA_2 : número de árboles (árboles ha⁻¹) a la edad de proyección E_2 (años), θ_{1A} : tasa de mortalidad para densidad inicial alta, θ_{1M} : valor de adición debido a la densidad inicial media, θ_{1B} : valor de adición debido a la densidad inicial baja, I_f : variable indicadora por densidad media y baja.

analyzed. The observed densities were defined as high (A), more than 2000 trees ha⁻¹; medium (M), 1000 to 2000 trees ha⁻¹; and low (B), fewer than 1000 trees ha⁻¹ (Figure 1).

Equation 4 is a negative exponential model, which additively renders the mean mortality rate by condition. The mathematical structure for equations 3 and 4 is the following:

$$f(\theta_{1f} \cdot I_f) = \theta_{1A} + \theta_{1M} \cdot I_M + \theta_{1B} \cdot I_B \tag{3}$$

$$NA_2 = NA_1 \cdot \exp(f(\theta_{1f} \cdot I_f) \cdot (E_2 - E_1)) \tag{4}$$

where, NA_1 : number of trees (trees ha⁻¹) at the initial age E_1 (years), NA_2 : number of trees (trees ha⁻¹) to the projection age E_2 (years), θ_{1A} : mortality rate for high initial density, θ_{1M} : value of addition due to medium initial density, θ_{1B} : value of addition due to low initial density, I_f : indicator variable due to medium and low density.

Dominant height

Site quality was determined using the site index (SI), defined as the dominant height of the stand at a reference age (Santiago-García *et al.*, 2013). Growth in HD was evaluated with the Hossfeld IV prediction model (equation 5), and a future condition was derived (equations 6 and 7) with the algebraic difference approach (ADA) (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2015).

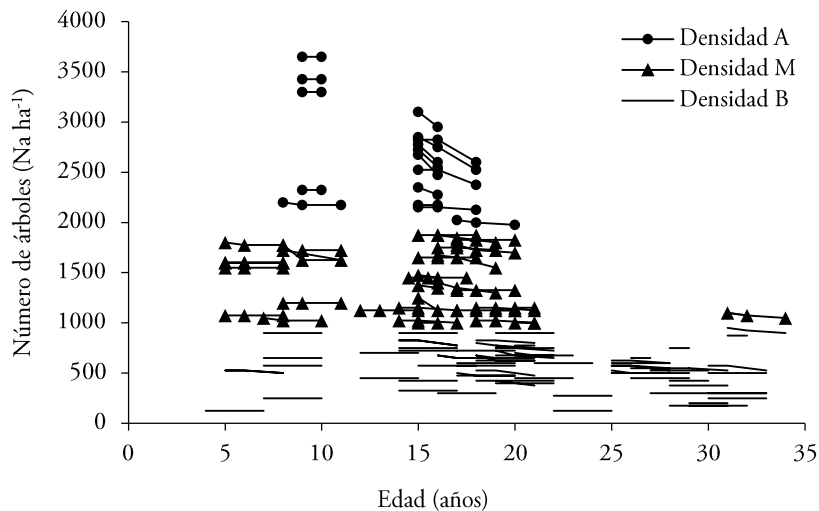


Figura 1. Densidad observada en los sitios de muestreo: A (mayor de 2000 árboles ha⁻¹); M (entre 1000 y 2000 árboles ha⁻¹) y B (menor de 1000 árboles ha⁻¹).

Figure 1. Observed density at sampling sites: A (more than 2000 trees ha⁻¹); M (between 1000 and 2000 trees ha⁻¹) and B (fewer than 1000 trees ha⁻¹).

Altura dominante

La calidad de estación del rodal se determinó a través del índice de sitio (IS), definido como la altura dominante del rodal en una edad de referencia (Santiago-García *et al.*, 2013). El crecimiento en HD se evaluó con el modelo de predicción Hossfeld IV (ecuación 5) y por medio del enfoque de diferencia algebraica (ADA) se derivó una condición futura (ecuaciones 6 y 7) (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2015). La ecuación 6 refiere un modelo de proyección anamórfico cuya hipótesis de crecimiento indica que las tasas relativas de crecimiento en HD entre sitios son constantes pero la potencialidad máxima varía. Mientras que la ecuación 7 es un modelo polimórfico (β_2), para el cual la tasa relativa de crecimiento varía entre los sitios, pero la potencialidad máxima es única (Clutter *et al.*, 1983).

$$HD_1 = \frac{\beta_0}{[1 + \exp(\beta_1) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \ln(E_1))]} \quad (5)$$

$$HD_2 = HD_1 \frac{[1 + \exp(\beta_1) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \ln(E_1))]}{[1 + \exp(\beta_1) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \ln(E_2))]} \quad (6)$$

$$HD_2 = \frac{\beta_0}{1 + \exp(\beta_1) \cdot \exp\left[\left(\frac{\ln\left(\frac{\beta_0 - HD_1}{HD_1 \cdot \exp(\beta_1)}\right)}{\ln(E_1)}\right) \cdot \ln(E_2)\right]} \quad (7)$$

donde E_1 : edad inicial (años); E_2 : edad de proyección (años); HD_1 y HD_2 : altura dominante (m) a la edad E_1 y E_2 ; exp: función exponencial; β_i : parámetros a estimar.

Modelos compatibles

Para el área basal se evaluaron dos sistemas integrados por los modelos 8 y 9 y 10 y 11, estos últimos propuestos por Pienaar *et al.* (1990). Para el volumen se probaron los modelos 12 y 13 propuestos por Santiago-García *et al.* (2013), así como las ecuaciones 14 y 15 de Parra-Piedra *et al.* (2017). La cantidad de biomasa aérea de pino almacenada en el rodal se estimó con el modelo 16 de proporción directa sobre el volumen con corteza.

$$AB_1 = \exp(\alpha_0) \cdot HD_1^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + \alpha_3 \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right) \quad (8)$$

Equation 6 is an anamorphic projection model whose growth hypothesis indicates that the relative growth rates in HD among the sites are constant, but the maximum potential varies. While equation 7 is a polymorphic (β_2) model for which the relative growth rate varies among sites, but the maximum potential is unique (Clutter *et al.*, 1983).

$$HD_1 = \frac{\beta_0}{[1 + \exp(\beta_1) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \ln(E_1))]} \quad (5)$$

$$HD_2 = HD_1 \frac{[1 + \exp(\beta_1) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \ln(E_1))]}{[1 + \exp(\beta_1) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \ln(E_2))]} \quad (6)$$

$$HD_2 = \frac{\beta_0}{1 + \exp(\beta_1) \cdot \exp\left[\left(\frac{\ln\left(\frac{\beta_0 - HD_1}{HD_1 \cdot \exp(\beta_1)}\right)}{\ln(E_1)}\right) \cdot \ln(E_2)\right]} \quad (7)$$

where, E_1 : initial age (years); E_2 : projection age (years); HD_1 and HD_2 : dominant height (m) at age E_1 and E_2 ; exp: exponential function; β_i : parameters to be estimated.

Compatible models

For basal area, two systems were evaluated, integrated by models 8 and 9 and by 10 and 11, proposed by Pienaar *et al.* (1990). For volume, we tested models 12 and 13 proposed by Santiago-García *et al.* (2013), as well as equations 14 and 15 from Parra-Piedra *et al.* (2017). Also, we estimated the quantity of pine aerial biomass stored in the stand, with model 16 of direct proportion over the volume with bark.

$$AB_1 = \exp(\alpha_0) \cdot HD_1^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + \alpha_3 \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right) \quad (8)$$

$$AB_2 = AB_1 = \frac{HD_2^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + \alpha_3 \cdot NA_2 + \alpha_4 \cdot HD_2}{E_2}\right)}{HD_1^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + \alpha_3 \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right)} \quad (9)$$

$$AB_1 = \exp(\alpha_0 + \alpha_1 \cdot E_1^{-1} + \alpha^2 \cdot \ln(NA_1) + \alpha_2 \cdot \ln(HD_1)) \quad (10)$$

$$AB_2 = AB_1 = \frac{HD_2^{\alpha_2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + \alpha_3 \cdot NA_2 + \alpha_4 \cdot HD_2}{E_2}\right)}{HD_1^{\alpha_2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + \alpha_3 \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right)} \quad (9)$$

$$AB_1 = \exp(\alpha_0 + \alpha_1 \cdot E_1 + \alpha^2 \cdot \ln(NA_1) + \alpha_2 \cdot \ln(HD_1)) \quad (10)$$

$$AB_2 = \exp\left(\ln(AB_1) + \alpha_1 \cdot (E_2 - E_1) + \alpha_2 \cdot \ln\left(\frac{NA_2}{NA_1}\right) + \alpha_3 \cdot \ln\left(\frac{HD_2}{HD_1}\right)\right) \quad (11)$$

$$V_1 = \exp\left(\gamma_0 + \gamma_1 \cdot \frac{HD_1}{AB_1} \cdot E_1^{V_2} \cdot HD_1\right) \quad (12)$$

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^{V_2} \cdot \left(\frac{HD_2}{HD_1}\right) \cdot \exp\left(\gamma_1 \left(\frac{HD_2}{AB_2} - \frac{HD_1}{AB_1}\right)\right) \quad (13)$$

$$V_1 = \gamma_0 \cdot AB_1^{\gamma_1} \cdot HD_1^{\gamma_2} \quad (14)$$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{AB_2}{AB_1}\right)^{\gamma_1} \cdot \left(\frac{HD_2}{HD_1}\right)^{\gamma_2} \quad (15)$$

$$B_1 = \delta_0 \cdot V_1 \quad (16)$$

donde AB_1, HD_1, NA_1, V_1 : área basal (m^2), altura dominante (m), número de árboles (árboles ha^{-1}), volumen total (m^3) a la edad inicial E_1 (años), $AB_2, HD_2, NA_2, V_2, B_2$: área basal (m^2), altura dominante (m), número de árboles (árboles ha^{-1}) y volumen total en (m^3) a la edad de proyección E_2 (años), B_1 biomasa aérea total en ($Mg ha^{-1}$), α, λ, δ ; parámetros por estimar.

Proyección de rendimiento maderable y biomasa aérea en niveles diferentes de densidad inicial, sin y con presencia de latifoliadas

Para proyectar el rendimiento, la estructura matemática de los modelos seleccionados para área basal, volumen y mortalidad se modificó al incorporar un análisis de covarianza para los tres niveles de repoblación inicial (ecuaciones 17, 20 y 24), así como un factor de disminución por presencia de latifoliadas, este último se obtuvo al ajustar el modelo 23 de proyección de área basal de latifoliadas, propuesto por Martin y Brister (1999). Un análisis gráfico se realizó para verificar las tendencias de las estimaciones, para esto se estableció un valor inicial dentro del intervalo de definición de los tres niveles de densidad: A de 3000 árboles ha^{-1} , M de 2000 árboles ha^{-1} y B de 1000 árboles ha^{-1} , mientras que en la proyección de la proporción de latifoliadas se usó el 5%

$$AB_2 = \exp\left(\ln(AB_1) + \alpha_1 \cdot (E_2 - E_1) + \alpha_2 \cdot \ln\left(\frac{NA_2}{NA_1}\right) + \alpha_3 \cdot \ln\left(\frac{HD_2}{HD_1}\right)\right) \quad (11)$$

$$V_1 = \exp\left(\gamma_0 + \gamma_1 \cdot \frac{HD_1}{AB_1} \cdot E_1^{V_2} \cdot HD_1\right) \quad (12)$$

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^{V_2} \cdot \left(\frac{HD_2}{HD_1}\right) \cdot \exp\left(\gamma_1 \left(\frac{HD_2}{AB_2} - \frac{HD_1}{AB_1}\right)\right) \quad (13)$$

$$V_1 = \gamma_0 \cdot AB_1^{\gamma_1} \cdot HD_1^{\gamma_2} \quad (14)$$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{AB_2}{AB_1}\right)^{\gamma_1} \cdot \left(\frac{HD_2}{HD_1}\right)^{\gamma_2} \quad (15)$$

$$B_1 = \delta_0 \cdot V_1 \quad (16)$$

where, AB_1, HD_1, NA_1, V_1 : basal area (m^2), dominant height (m), number of trees (trees ha^{-1}), total volume (m^3) at initial age E_1 (years), $AB_2, HD_2, NA_2, V_2, B_2$: basal area (m^2), dominant height (m), number of trees (trees ha^{-1}) and total volume (m^3) at the projection age E_2 (years), B_1 total aerial biomass ($Mg ha^{-1}$), and α, λ, δ ; parameters to be estimated.

Projection of timber yield and aerial biomass at different levels of initial density, with and without presence of hardwood species

To project yield, the mathematical structure of the models selected for basal area, volume and mortality was modified by incorporating an analysis of covariance for the three levels of initial repopulation (equations 17, 20 and 24), as well as a decrease factor due to presence of hardwood species. We obtained the decrease factor by fitting the hardwood basal area projection model 23 proposed by Martin and Brister (1999). A graphic analysis was performed to verify the estimation trends. To this end, an initial value was established within the interval of definition of the three density levels: A (3000 trees ha^{-1}), M (2000 trees ha^{-1}) and B (1000 trees ha^{-1}). While, in the projection of the proportion of hardwoods, 5% was used at the age of 5 years because this is the average proportion in the first 10 years at the sampled sites.

$$\alpha_3 = g(\alpha_{3i}, I_i) = \alpha_{3A} + \alpha_{3M} \cdot I_M + \alpha_{3B} \cdot I_B \quad (17)$$

$$AB_1 = \exp(\alpha_0) \cdot HD_1^{\alpha_2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right) \quad (18)$$

a la edad de 5 años, por ser esta la proporción promedio en los primeros 10 años de los sitios muestreados.

$$\alpha_3 = g(\alpha_{3i}, I_i) = \alpha_{3A} + \alpha_{3M} \cdot I_M + \alpha_{3B} \cdot I_B \quad (17)$$

$$AB_1 = \exp(\alpha_0) \cdot HD_1^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right) \quad (18)$$

$$AB_2 = AB_1 \frac{HD_2^{\alpha_2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_2 + \alpha_4 \cdot HD_2}{E_2}\right)}{HD_1^{\alpha_2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right)} \quad (19)$$

$$\gamma_1 = h(\gamma_{1i}, I_i) = \gamma_{1A} + \gamma_{1M} \cdot I_M + \gamma_{1B} \cdot I_B \quad (20)$$

$$V_1 = \gamma_0 \cdot AB_1^{h(\gamma_{1i}, I_i)} \cdot HD_1^{\gamma_2} \quad (21)$$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{AB_2}{AB_1}\right)^{h(\gamma_{1i}, I_i)} \cdot \left(\frac{HD_2}{HD_1}\right)^{\gamma_2} \quad (22)$$

$$q_2 = q_1^{\left(\frac{\theta_2}{\tau_2}\right)^{\tau_0}} \quad (23)$$

$$\omega_1 = f(\omega_{1i}, I_i) = \omega_{1A} + \omega_{1M} \cdot I_M + \omega_{1B} \cdot I_B \quad (24)$$

$$NA_2 = NA_1 \cdot \exp(f(\omega_{1i}, I_i) \cdot (E_2 - E_1)) \cdot (1 - q_2)^{\left(1 - \frac{\theta_2}{\tau_2}\right)} \quad (25)$$

$$AB_1 = \exp(\alpha_0) \cdot HD_1^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right) \quad (26)$$

$$AB_2 = AB_1 \frac{HD_2^{\alpha_2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_2 + \alpha_4 \cdot HD_2}{E_2}\right)}{HD_1^{\alpha_2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right)} \cdot (1 - q_2)^{\left(1 - \frac{\theta_2}{\tau_2}\right)} \quad (27)$$

donde θ_1, θ_2 : proporción del área basal de latifoliadas a la edad E_1 y E_2 , τ_0 : parámetro por estimar.

$$AB_2 = AB_1 \frac{HD_2^{\alpha_2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_2 + \alpha_4 \cdot HD_2}{E_2}\right)}{HD_1^{\alpha_2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right)} \quad (19)$$

$$\gamma_1 = h(\gamma_{1i}, I_i) = \gamma_{1A} + \gamma_{1M} \cdot I_M + \gamma_{1B} \cdot I_B \quad (20)$$

$$V_1 = \gamma_0 \cdot AB_1^{h(\gamma_{1i}, I_i)} \cdot HD_1^{\gamma_2} \quad (21)$$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{AB_2}{AB_1}\right)^{h(\gamma_{1i}, I_i)} \cdot \left(\frac{HD_2}{HD_1}\right)^{\gamma_2} \quad (22)$$

$$q_2 = q_1^{\left(\frac{\theta_2}{\tau_2}\right)^{\tau_0}} \quad (23)$$

$$\omega_1 = f(\omega_{1i}, I_i) = \omega_{1A} + \omega_{1M} \cdot I_M + \omega_{1B} \cdot I_B \quad (24)$$

$$NA_2 = NA_1 \cdot \exp(f(\omega_{1i}, I_i) \cdot (E_2 - E_1)) \cdot (1 - q_2)^{\left(1 - \frac{\theta_2}{\tau_2}\right)} \quad (25)$$

$$AB_1 = \exp(\alpha_0) \cdot HD_1^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right) \quad (26)$$

$$AB_2 = AB_1 \frac{HD_2^{\alpha_2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_2 + \alpha_4 \cdot HD_2}{E_2}\right)}{HD_1^{\alpha_2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right)} \cdot (1 - q_2)^{\left(1 - \frac{\theta_2}{\tau_2}\right)} \quad (27)$$

where, θ_1, θ_2 : proportion of basal area of hardwood species at ages E_1 and E_2 , τ_0 : parameter to be estimated.

To complement the GYS, the projection models fit by Palacios-Cruz *et al.* (2020) were reconsidered for the proportion of hardwoods (equation 28) and their basal area parting from the basal area of pines (equation 29), besides the factor of direct proportionality over hardwood volume for estimating aerial biomass, whose value was 0.817. We also used the ratio factor (0.433) obtained before estimating aerial biomass over outside-bark pine volume.

Para complementar el SCR se retomaron los modelos de proyección ajustados por Palacios-Cruz *et al.*, (2020) para la proporción de latifoliadas (ecuación 28) y área basal de las mismas a partir del área basal de pino (ecuación 29), además del factor de proporcionalidad directa sobre el volumen de latifoliadas para estimar la biomasa aérea, cuyo valor fue 0.817. También, se utilizó el factor obtenido antes para estimar la biomasa aérea sobre el volumen con corteza de pino que fue 0.433.

$$AB_{H2} = \frac{AB_2 \cdot q_2}{1 - q_2} \quad (28)$$

$$V_H = 6.477901 \cdot AB_{H2} \quad (29)$$

donde q_2 : proporción del área basal de latifoliadas a la edad E_1 y E_2 , AB_2 , AB_{H2} , V_H : área basal de pino, área basal de latifoliadas y volumen de latifoliadas a la edad de proyección E_2 .

Técnica y prueba de bondad de ajuste

Para el ajuste y la evaluación de los modelos de altura dominante se usaron 261 pares de datos sin traslape; para el área basal, volumen total, modelo de proporción de latifoliadas, así como para los modelos con un factor de reducción por presencia de latifoliadas se usaron 231 pares de datos sin traslape. El ajuste fue simultáneo, con regresión aparentemente no relacionada (SUR), por medio del procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS (SAS Institute, 2008). El sistema de mortalidad y el modelo de proporcionalidad de biomasa aérea se ajustaron por medio de mínimos cuadrados ordinarios (MCO). Para calificar la bondad de ajuste, los criterios fueron: el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), suma de cuadrados del error (SCE), raíz del cuadrado medio del error (RECM), sesgo promedio en la predicción (\bar{E}), criterio de información de Akaike (AIC) y el carácter significativo de los estimadores de los parámetros ($Pr>|t|$) con un valor crítico $\alpha=0.05$. Lo anterior se complementó con un análisis gráfico, en el cual se evaluó el comportamiento lógico de los modelos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las diferencias entre las tasas de mortalidad anual fueron significativas de acuerdo con la densidad inicial, con valores de 2.44, 1.17 y 0.81%, para la densidad alta, media y baja (Cuadro 1). En bosques manejados Santiago-García *et al.* (2013, 2015 y 2017) reportaron tasas de 3.3, 4.6 y 1.2% anual, respectivamente. Las tasas de mortalidad concordaron con

$$AB_{H2} = \frac{AB_2 \cdot q_2}{1 - q_2} \quad (28)$$

$$V_H = 6.477901 \cdot AB_{H2} \quad (29)$$

where, q_2 : the proportion of hardwood basal area at ages E_1 and E_2 , AB_2 , AB_{H2} , V_H : pine basal area, hardwood basal area, and hardwood volume at the projection age E_2 .

Goodness of fit technique and test

For the fit and evaluation of the dominant height models, we used 261 pairs of non-overlapping data; for basal area, total volume, hardwood proportion and the models with a reduction factor due to the presence of hardwoods, we used 231 non-overlapping pairs of data. The system fitted simultaneously with seemingly unrelated regression (SUR) with the MODEL procedure of SAS/ETS (SAS Institute, 2008). Ordinary least squares (OLS) fitted the system of mortality and the model of proportionality of aerial biomass. To rank goodness of fit, the criteria were the adjusted coefficient of determination (R^2_{adj}), sum of squared errors (SES), root mean square error (RMSE), average prediction bias (\bar{E}), Akaike information criterion (AIC), and the significant trait of the parameter estimators ($Pr>|t|$)m with a $\alpha=0.05$ critical value. A graphic analysis complemented all the above, in which the logical behavior of the models was evaluated.

RESULTS AND DISCUSSION

The differences among annual mortality rates were significant in accord with initial density, with values of 2.44, 1.17 and 0.81% for high, medium and low densities (Table 1). In managed forests, Santiago-García *et al.* (2013, 2015 and 2017) reported annual rates of 3.3, 4.6 and 1.2%, respectively. Mortality rates were in accord with density since mortality tends to decrease when the number of trees in the stand is lower, in response to the reduction of intraspecific competition.

Dominant height and site index

The fit of models 5 and 6 (anamorphic Hossfeld IV) had the best values in SSE, RMSE and AIC, while for polymorphic projection model 7, the values in SSE, RMSE and \bar{E} were higher than those obtained in the anamorphic system (Table 2). With

Cuadro 1. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados para el modelo de proyección de la mortalidad.

Table 1. Goodness-of-fit statistics and estimated parameters for the mortality projection model.

Modelo	SCE	RECM	R ² adj	Parámetro	Valor	p > t
4	266492	34.188	0.997	θ_{1A}	0.0248	<0.0001
				θ_{1M}	-0.0130	<0.0001
				θ_{1B}	-0.017	<0.0001

R²adj: coeficiente de determinación ajustado; SCE: suma de cuadrados del error; RECM: raíz del cuadrado medio del error; p>|t|= valor de p. ♦ R²adj: adjusted coefficient of determination; SCE: sum of square errors; RECM: root mean square error; p > |t|= value of p.

la densidad, ya que la mortalidad tiende a decrecer cuando el número de árboles es menor en el rodal, en respuesta a la reducción de la competencia intra-específica.

Altura dominante e índice de sitio

El ajuste de los modelos 5 y 6 de Hossfeld IV anamórfico presentaron los mejores valores en SCE, RECM y AIC, mientras que para el modelo 7 de proyección polimórfico los valores en SCE, RECM y \bar{E} , fueron mayores que los obtenidos en el sistema anamórfico (Cuadro 2). Con este modelo se obtuvo el índice de sitio (IS) (30) para evaluar la productividad de la zona, al sustituir en el modelo de proyección el IS en HD_2 , HD en HD_1 , EB (40 años) en E_2 y edad en E_1 .

$$IS = HD \frac{(1 + \exp(4.02898) \cdot \exp(-1.56604) \cdot \ln(Edad))}{1.174129} \tag{26}$$

this model, the site index (SI) (30) was obtained to evaluate the zone productivity by substituting SI in the projection model in HD_2 , HD in HD_1 , EB (40 years) in E_2 and age in E_1 .

$$IS = HD \frac{(1 + \exp(4.02898) \cdot \exp(-1.56604) \cdot \ln(Edad))}{1.174129} \tag{26}$$

The polymorphic Hossfeld IV family of curves (Figure 2A) showed an estimated horizontal asymptote of 37.24 at a base age of 40 years. While the selected system generated a family of anamorphic curves (Figure 2B) with an asymptote of 37.5 m, a height similar to that reported by Santiago-García *et al.* (2013), 38.98 m, using the anamorphic Hossfeld IV model for the same study region. Gómez-Tejero *et al.* (2009) reported the efficiency of the model for another species, at plantations of *Eucalyptus grandis*, in the state of Oaxaca.

Cuadro 2. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados de los modelos de crecimiento en HD.

Table 2. Goodness of fit and parameters estimated of the models of growth in HD.

Modelo	SCE	RECM	R ² adj	(\bar{E})	AIC	Parámetro	Valor	P > t
5	933	1.898	0.898	-0.007	339.172	β_0	37.520	<0.0001
						β_1	4.063	<0.0001
						β_2	1.477	<0.0001
6	133	0.717	0.983	-0.071	-169.017	β_0	37.239	<0.0001
						β_1	4.098	<0.0001
						β_2	1.496	<0.0001
5	929	1.894	0.898	-0.005	337.488			
7	144	0.745	0.982	0.095	-148.642			

La familia de curvas de Hossfeld IV polimórfica (Figura 2A) presentó una asíntota horizontal estimada de 37.24 en una edad base de 40 años, en tanto que el sistema seleccionado generó una familia de curvas anamórficas (Figura 2B) con una asíntota de 37.5 m, altura similar a la reportada por Santiago-García *et al.* (2013) de 38.98 m, por medio del modelo anamórfico de Hossfeld IV para la misma región de estudio. La eficiencia del modelo para otras especies la reportó Gómez-Tejero *et al.* (2009) quienes lo usaron en plantaciones de *Eucalyptus grandis*, en el estado de Oaxaca.

Los modelos de crecimiento en área basal evaluados explicaron de 71% (predicción) a 97% (proyección) de la variabilidad total observada (Cuadro 3). El modelo 8 de predicción obtuvo el sesgo promedio (\bar{E}) más bajo; a su vez, el modelo 9 evidenció los mejores estadísticos de ajuste (SCE, RECM, R^2_{adj} y AIC), en comparación con los modelos 10 y 11. Lo anterior complementado con el análisis gráfico donde se muestra que estos modelos 10 y 11 predicen un decrecimiento del área basal después de los 30 años (Figura 3A), se optó por los modelos 8 y 9 para describir el crecimiento en área basal al presentar un comportamiento lógico (Figura 3B) y valores adecuados en los estadísticos de ajuste.

Los modelos de volumen 14 y 15 presentaron los valores mejores en todos los estadísticos de ajuste, al sobresalir por el sesgo promedio bajo (\bar{E}) de -0.536 y 1.333 m³, con todos los parámetros significativos

The evaluated models of growth in basal area explained 71% (prediction) to 97% (projection) of the total observed variability (Table 3). Prediction model 8 obtained the lowest average bias (\bar{E}), while model 9 exhibited better-fitted statistics (SSE, RMSE, R^2_{adj} and AIC) than models 10 and 11. All this complemented with the graphic analysis, which shows that models 10 and 11 predict a decrease in basal area after 30 years (Figure 3A). For this reason, we chose models 8 and 9 to describe growth in basal area, due to their logical behavior (Figure 3B) and their adequate fit values.

Volume models 14 and 15 had the best values in all the fit statistics and were outstanding for their low average bias (\bar{E}) of -0.536 and 1.333 m³, all parameters significant ($p < 0.001$) (Table 4). Moreover, they had a parsimonious structure. These models made coherent estimations in modeling total volume for *P. patula* plantations in the state of Veracruz (Parra-Piedra *et al.*, 2017).

The factor of biomass proportionality (δ_0) was estimated in 0.433 (equation 16) in pine-dominated stands; in each m³ of wood there is 0.433 Mg of biomass. The study zone has been managed for more than 30 years; over this time species composition and *Pinus patula* bole conformation have been modified by silvicultural treatments (Hernández-Pérez *et al.*, 2013).

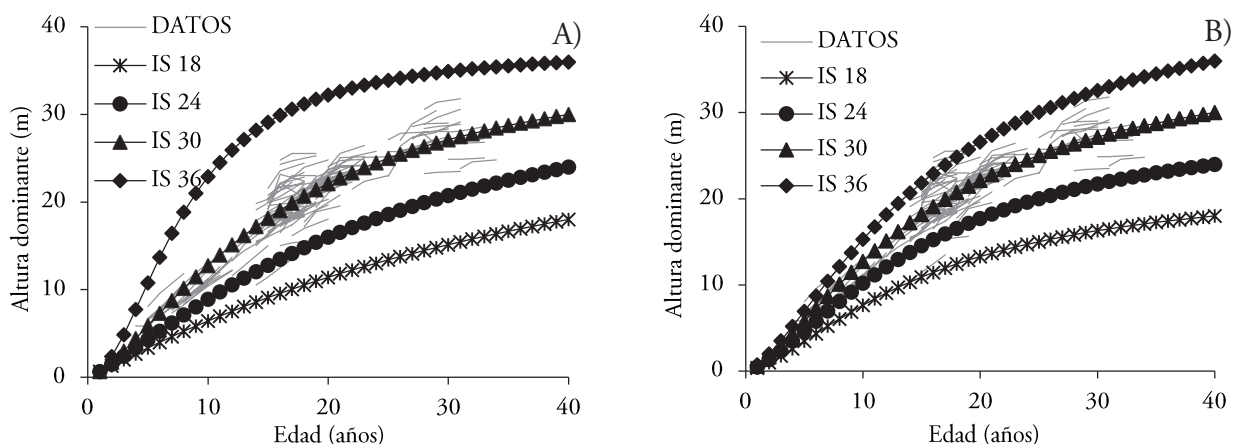


Figura 2. Curvas de índice de sitio para *Pinus patula* a la edad base de 40 años: A) Hossfeld IV polimórfico y B) Hossfeld IV anamórfico.

Figure 2. Site index curves for *Pinus patula* at the base age of 40 years: A) Hossfeld IV polymorphic and B) Hossfeld IV anamorphic.

Cuadro 3. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados de los modelos de crecimiento en área basal.
Table 3. Goodness-of-fit statistics and estimated parameters of the models of growth in basal area.

Modelo	SCE	RECM	R ² adj	(\bar{E})	AIC	Parámetro	Valor	P > t
8	5209	4.780	0.713	-0.020	727.77	α_0	2.581	<0.0001
						α_1	0.308	0.0003
9	156	0.827	0.990	0.162	-81.592	α_2	-19.328	<0.0001
						α_3	0.004	<0.0001
						α_4	0.414	<0.0001
						α_0	-0.032	<0.9021
10	4299	4.337	0.766	0.349	683.423	α_1	-15.450	<0.0001
11	373	1.276	0.978	0.784	119.218	α_2	0.408	<0.0001
						α_3	0.419	<0.0001

($p < 0.001$) (Cuadro 4); además presentan una estructura parsimoniosa. Estos modelos presentaron estimaciones coherentes al modelar el volumen total en plantaciones de *P. patula*, en el estado de Veracruz (Parra-Piedra *et al.*, 2017).

El factor de proporcionalidad de biomasa (δ_0) se estimó en 0.433 (ecuación 16) en rodales dominados por pino, para indicar que en cada m³ de madera existe 0.433 Mg de biomasa. La zona de estudio ha estado bajo manejo por más de 30 años, tiempo en el cual se ha modificado la composición de especies y conformación de los fustes de *Pinus patula*, a través de los tratamientos silvícolas (Hernández-Pérez *et al.*, 2013).

Projection of timber yield and aerial biomass at different levels of initial density, with and without presence of hardwood species

When we evaluated the effect of initial density with the analysis of covariance, in the basal area and volume models (Table 5), we found that this effect does exist in these variables since all the parameters were significant ($p < 0.01$). We expected this behavior because both variables are highly related to density, and any change in density will affect them.

During the first years of the stand, hardwood species are relatively abundant. However, they begin to decrease between 10 and 15 years (Figure 4). This

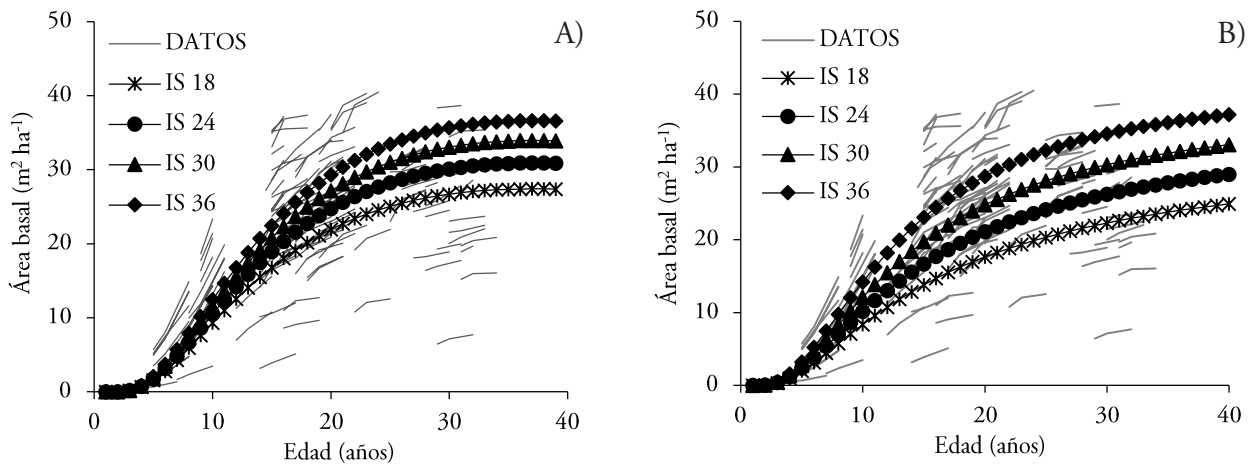


Figura 3. Curvas de área basal por índice de sitio generadas a partir de: A) los modelos 8 y 9 y B) Pienaar *et al.* (1990) para *Pinus patula*.

Figure 3. Basal area curves per site index curves generated from A) models 8 and 9, and B) Pienaar *et al.* (1990) for *Pinus patula*.

Cuadro 4. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados de los modelos de volumen total y proporcionalidad de biomasa.

Table 4. Goodness of fit statistics and estimated parameters of the models of total volume and biomass proportionality.

Modelo	SCE	RECM	R ² adj	(\bar{E})	AIC	Parámetro	Valor	P > t
12	885591	62.186	0.666	2.275	1912.118	γ_0	1.710	<0.0001
13	159017	26.294	0.944	21.586	1515.436	γ_1	-0.776	<0.0001
						γ_2	0.439	<0.0001
14	13328	7.629	0.995	-0.536	942.757	γ_0	0.347	<0.0001
15	6198	5.191	0.997	1.333	765.925	γ_1	1.041	<0.0001
						γ_2	1.023	<0.0001
16	16604	6.791	0.980	-	-	δ_0	0.433	<0.0001

Proyección de rendimiento maderable y biomasa aérea en niveles diferentes de densidad inicial, sin y con presencia de latifoliadas

Al evaluar el efecto de la densidad inicial por medio de un análisis de covarianza, dentro de los modelos de área basal y volumen (Cuadro 5), se encontró que sí existe tal efecto en estas variables al ser todos los parámetros significativos ($p < 0.01$). Dicho comportamiento se esperaba porque estas variables tienen relación alta con la densidad y cualquier cambio en esta, las afectará.

En los primeros años del rodal la presencia de latifoliadas es relativamente abundante, sin embargo, entre los 10 y 15 años comienza a disminuir (Figura 4). Esta tendencia puede atribuirse a que

trend can be attributed to the use of the “Método de Desarrollo Silvícola” (MDS, Mexico’s standardized even-aged approach) and the seed-tree repopulation method used to produce timber in the region (Torres-Rojo *et al.*, 2016), which promotes even-aged mono-specific stands. The applied prescriptions have enabled a reduction of the proportion of hardwood species before the 40-year rotation.

Projection model 23, fitted for the proportion of hardwoods (Table 6), explained 97% of the variability, where τ_0 had a significant estimated value of 0.538. In re-fitting mortality model 25, as well as models 26 and 27 for basal area, with a reduction factor due to hardwood presence, significant differences were found among the values of the estimated parameters. This means that the actual proportion of hardwood species has an effect on the initial density at site.

Cuadro 5. Parámetros estimados y estadísticos de ajuste de los modelos con variables indicadoras para los diferentes niveles de densidad.

Table 5. Estimated parameters and fit statistics of the models with indicator variables for the different density levels.

Modelo	SCE	REMC	R ² adj	Parámetro	Valor	P > t
				α_0	2.220	<0.0001
				α_1	0.432	<0.0001
18	4245	4.324	0.765	α_2	-23.242	<0.0001
19	166	0.854	0.990	α_{3A}	0.005	<0.0001
				α_{3M}	0.005	<0.0001
				α_{3B}	0.002	<0.0001
				α_4	0.372	<0.0001
				γ_0	0.306	<0.0001
21	10229	6.698	0.996	γ_{1A}	1.025	<0.0001
22	6445	5.305	0.997	γ_{1M}	-0.016	<0.0001
				γ_{1B}	-0.007	<0.0001
				γ_2	1.094	0.0051

el aprovechamiento maderable en la región se realiza por medio del método de desarrollo silvícola (MDS) y el método de repoblación de árboles padres (Torres-Rojo *et al.*, 2016), el cual propicia rodales coetáneos uniespecíficos. Con las prescripciones que el método sugiere se ha logrado reducir las proporciones de especies latifoliadas antes del turno de 40 años.

El modelo 23 de proyección, ajustado para la proporción de latifoliadas (Cuadro 6), explicó el 97% de la variabilidad donde τ_0 , tuvo un valor estimado significativo de 0.538. En el reajuste del modelo 25 de mortalidad, así como los modelos 26 y 27 para el área basal, con un factor de reducción por presencia de latifoliadas se encontraron diferencias significativas entre los valores de los parámetros estimados, y esto indica que la densidad inicial también tiene un efecto en la proporción de latifoliadas presentes.

De acuerdo con las predicciones del rendimiento en volumen de pino para los índices de sitio y densidades iniciales, estas sugieren que en los IS 24, 30 y 36 los rendimientos al final del turno con una densidad inicial media son mayores en comparación con otras densidades evaluadas. Mientras que, en el IS 18 los rendimientos son similares para las tres densidades iniciales a lo largo del periodo de proyección (Figura 5).

Estas tendencias pueden deberse a que al presentar una densidad inicial mayor de 2000 árboles ha^{-1} , la competencia por los recursos del medio (espacio físico, agua, nutrientes y luz) se intensifica, y mientras no existan recursos adicionales disponibles el crecimiento no será el óptimo. Además, en una densidad

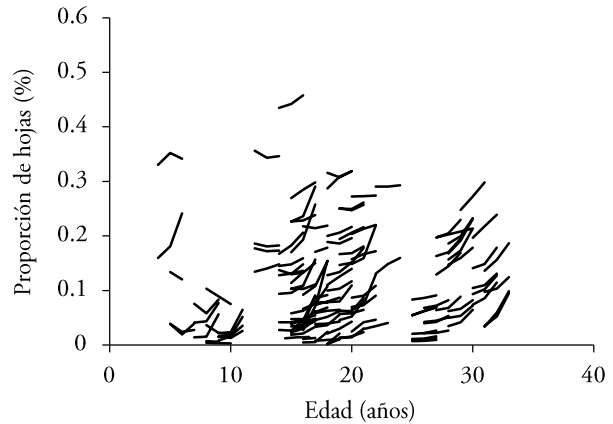


Figura 4. Proporción relativa del área basal de latifoliadas por sitio.

Figure 4. Relative proportion of hardwood basal area per site.

Yield predictions of Pine volume for site indexes and initial densities suggest that the yields at the end of the rotation, in SI 24, 30 and 36 with medium initial density are higher than other evaluated densities. In contrast, in SI 18 the yields are similar for the three initial densities over the projection period (Figure 5).

These trends may be due to the more intense competition for environmental resources (physical space, water, nutrients and light) when the initial density is more than 2000 trees ha^{-1} . Also, unless additional resources are available, pine growth will not be optimum. Moreover, at an initial density between 1000 and 2000 trees ha^{-1} , all the resources

Cuadro 6. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados del modelo de proyección de proporción de latifoliadas y de los modelos de mortalidad y área basal seleccionados.

Table 6. Goodness-of-fit statistics and estimated parameters for the projection model proportion of hardwood species and of the selected mortality and basal area models.

Modelo	SCE	RECM	R ² adj	Parámetro	Estimación	P > t
23	0.066	0.016	0.967	τ_0	0.538	<0.0001
				θ_{1A}	0.024	<0.0001
25	262970	33.9614	0.997	θ_{1M}	-0.017	<0.0001
				θ_{1B}	-0.013	<0.0001
				α_0	2.094	<0.0001
				α_1	0.469	<0.0001
26	4189	4.295	0.769	α_2	-23.110	<0.0001
				α_{3A}	0.005	<0.0001
				α_{3M}	0.006	<0.0001
27	179	0.887	0.989	α_{3B}	0.002	<0.0001
				α_4	0.374	<0.0001

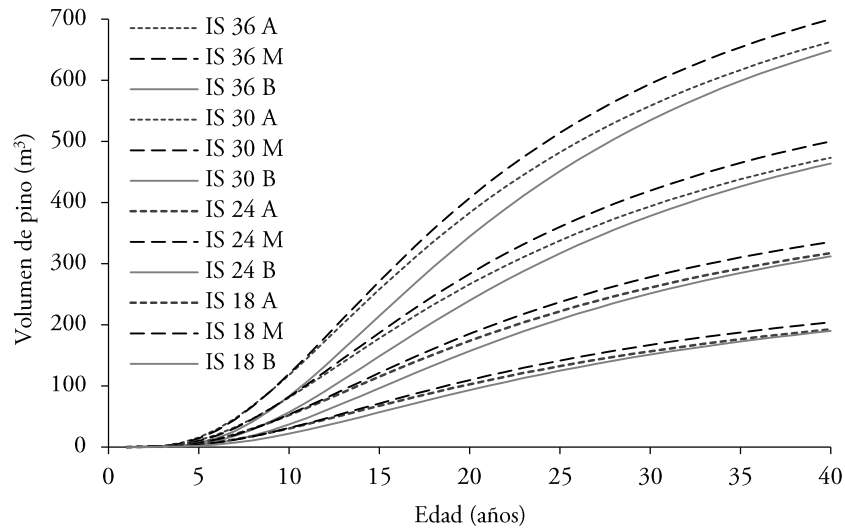


Figura 5. Volumen pino proyectado en las densidades, A (3000 árboles ha⁻¹), M (2000 árboles ha⁻¹) y B (950 árboles ha⁻¹) para los diferentes índices.

Figure 5. Pine volume projected in densities A (3000 trees ha⁻¹), M (2000 trees ha⁻¹) and B (950 trees ha⁻¹) for different indexes.

inicial entre 1000 y 2000 árboles ha⁻¹, todos los recursos del sitio se utilizan de tal forma que cada uno de los árboles asimila todo lo que su condición genética y edad le permiten. Una densidad inicial menor de 1000 árboles ha⁻¹, desaprovecha la capacidad productiva del sitio (Corral-Rivas *et al.*, 2015).

Lo observado en el IS 18 confirma la hipótesis de Langsaeter (1941) la cual establece que la producción de volumen total de un rodal, a una edad y composición determinadas, es constante y óptima en una gama amplia de densidades; en cambio los IS 24, 30 y 36 parecen no cumplir dicha hipótesis. Curtis *et al.* (1997) también reportaron este comportamiento en rodales de Douglas Fir, en los cuales observaron que el incremento del volumen total aumenta con la densidad.

Con los rendimientos dados en volumen de pino y pino más latifoliadas (proporción inicial de latifoliadas del 5% a los 5 años) en un IS 36, se destaca que en este sitio los rendimientos del volumen de pino son mayores por 57, 78 y 70 m³ que el volumen total en las densidades A, M y B, respectivamente (Figura 6). Esto indica que existe una reducción considerable del área disponible para *P. patula* en los sitios con productividad mayor y esto hace necesaria la aplicación de tratamientos silvícolas para el control de latifoliadas. Respecto a los índices de sitio de 18, 24 y 30, las diferencias en los rendimientos no fueron tan

of the site are used in such a way that each of the trees assimilates all that its genetic condition and age permit. An initial density below 1000 trees ha⁻¹ does not use all the productive capacity of the site (Corral-Rivas *et al.*, 2015).

All what was observed in SI 18 confirms the hypothesis of Langsaeter (1941), which establishes that total volume production of an even-aged stand with a given composition is constant and optimum in a broad spectrum of densities. In contrast, SI 24, 30 and 36 do not seem to comply with the hypothesis. Curtis *et al.* (1997) also reported this behavior in Douglas fir stands, where they observed that the total volume increases with density.

With the given yields in volume of pine and volume of pine plus hardwoods (5% as the initial proportion of hardwoods at an age of 5 years) in SI 36, it is outstanding that in this site pine volume yields are higher by 57, 78 and 78 m³ than the total volume, for the densities A, M and B, respectively (Figure 6). This indicates that there is a considerable reduction in area available for *P. patula* in the sites of higher productivity, making it necessary to apply silvicultural treatments to control hardwood species. Regarding site indexes 18, 24 and 30, the differences among yields were not evident; thus suggesting that in these sites, controlling growth of hardwood species or not, is irrelevant.

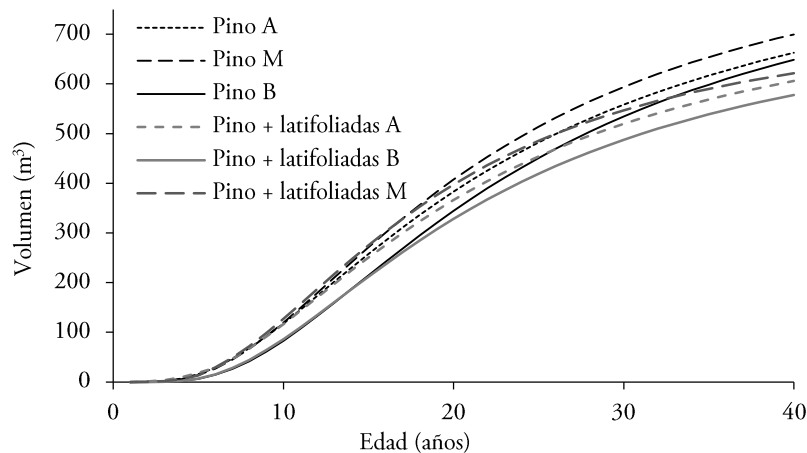


Figura 6. Volumen proyectado para las densidades, A (3000 árboles ha⁻¹), M (2000 árboles ha⁻¹) y B (950 árboles ha⁻¹) en un índice de sitio (IS) 36.

Figure 6. Projected volumes for densities A (3000 trees ha⁻¹), M (2000 trees ha⁻¹) and B (950 trees ha⁻¹) in a site index (SI) 36.

evidentes como en el caso presentado, lo cual sugiere que en esos sitios es indistinto controlar o no el crecimiento de las especies de latifoliadas.

Los valores mejores del ICA e IMA para la calidad de sitio promedio (IS 30) (Figura 7A) se obtuvieron en una densidad inicial de 2000 árboles ha⁻¹ en ambos escenarios (sin y con presencia de latifoliadas), aunque los incrementos fueron menores con la presencia de latifoliadas. Los de esta condición fueron los máximos en ese escenario, lo cual sugiere que la densidad inicial de los rodales debe estar entre 1000 y 2000 árboles ha⁻¹. Esto permitirá obtener los mejores rendimientos en volumen a la edad del turno.

La edad óptima de cosecha o turno técnico (ICA=IMA) para un IS 30 se estimó a los 24, 25 y 27 años, en la densidad de 3000, 2000 y 950 árboles ha⁻¹, respectivamente. Los turnos en volumen de pino al considerar la presencia de latifoliadas (5%) se obtuvieron a los 21, 20 y 23 años (Figura 7B). La competencia interespecífica redujo los turnos, lo cual en términos ecológicos tiene sentido porque la ocupación del espacio por las especies latifoliadas va limitando el crecimiento de *P. patula*, el cual alcanza su crecimiento máximo en edades más tempranas.

En todos los escenarios, los turnos técnicos se alcanzaron antes de los 30 años. Sánchez *et al.* (2003) mencionaron que los turnos tienden a ser más largos, cuando la calidad del sitio es cada vez más pobre y los turnos se acortan si la densidad del rodal es menor o se intensifican los aclareos.

The best values of ICA and IMA (in Spanish, current and mean annual increases) for the average site quality (SI 30) (Figure 7A) were obtained at an initial density of 2000 trees ha⁻¹ in both scenarios (with and without presence of hardwoods), although the increases were smaller with the presence of hardwood species. Sites of this condition were the highest in this scenario, suggesting that initial stand density should be between 1000 and 2000 trees ha⁻¹. This would allow the highest volume yields at the rotation age.

The optimum harvest age, or technical rotation, (CAI=MAI) for a SI 30 was estimated at 24, 25 and 27 years, at the densities of 3000, 2000 and 950 trees ha⁻¹, respectively. The pine volume rotation considering the presence of hardwoods (5%) were obtained at 21, 20 and 23 years (Figure 7B). Interspecific competition reduced rotations. This, in ecological terms, makes sense because occupation of the space by hardwood species limits growth of *P. patula*, which reaches maximum growth at earlier ages.

In all the scenarios, technical rotations were reached before 30 years. Sánchez *et al.* (2003) indicated that rotation tends to be longer when site quality is increasingly poor; but, rotations shorten if stand density is lower or thinning is intensified.

Incorporation of aerial biomass estimations in the GYS responds to the need to quantify and monitor accumulated biomass in the vegetation of forest

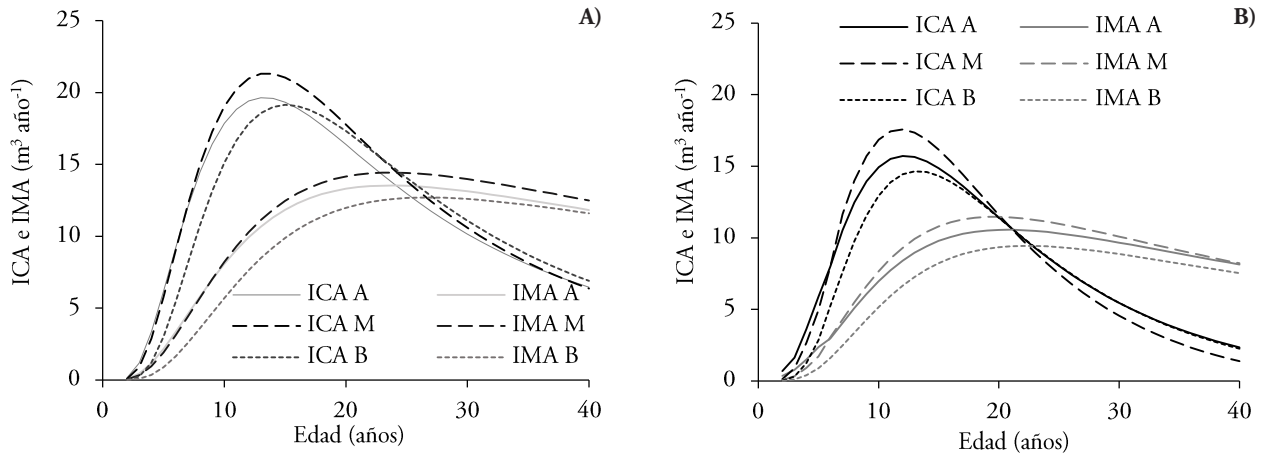


Figura 7. Curvas de incremento corriente anual en volumen total (ICA) e incremento medio anual (IMA) para las densidades, A (3000 árboles ha^{-1}), M (2000 árboles ha^{-1}) y B (950 árboles ha^{-1}) en un IS 30, donde: A) ICA e IMA sin presencia de latifoliadas; B) ICA e IMA con proporción inicial de latifoliadas del 5%.

Figure 7. Curves of current annual increment in total volume (ICA) and mean annual increment (IMA) for densities A (3000 trees ha^{-1}), M (2000 trees ha^{-1}) and B (950 trees ha^{-1}) in an SI 30, where A) ICA and IMA with no presence of hardwoods; B) ICA and IMA with an initial proportion of hardwoods of 5%.

La incorporación de estimaciones de biomasa aérea en el SCR atiende las necesidades de cuantificación y monitoreo de la biomasa acumulada en la vegetación de los ecosistemas forestales, las cuales son parte fundamental en la estimación del carbono almacenado. Tal estimación ha cobrado gran relevancia en la mitigación del cambio climático (Ramírez-Ramírez *et al.*, 2017).

La estimación de la biomasa aérea de pino acumulada al turno (Figura 8A) fue menor que la acumulación de biomasa total (pino más latifoliadas) en todas las calidades de estación. Esto es más evidente en los sitios menos productivos (IS 18 e IS 24), en los cuales la biomasa acumulada en promedio es mayor en 52 y 49 Mg ha^{-1} , respectivamente, al final del turno (40 años) para los tres niveles de densidad. El efecto tiene sentido porque la concentración de biomasa respecto al volumen de pino fue 0.43 mientras que en latifoliadas fue 0.81 Mg m^{-3} .

Las estimaciones de biomasa obtenidas en esta investigación permiten estimar los almacenes de carbono de los bosques de la región de Zacualtipán, Hidalgo, para poder ofertar bonos por captura de carbono (Ordóñez-Díaz *et al.*, 2015) y así obtener recursos para seguir con las labores de mantenimiento en las áreas destinadas a la conservación.

ecosystems, a fundamental part of estimating carbon stores, which has become highly relevant in climate change mitigation (Ramírez-Ramírez *et al.*, 2017).

Estimation of accumulated pine above-ground biomass at volume rotation age (Figure 8A) was less than total accumulated biomass (pines plus hardwoods) in all the site qualities. This is more evident in less productive sites (SI 18 and SI 24) on which average accumulated biomass is above 52 and 49 Mg ha^{-1} , respectively, at the end of the rotation (40 years) for the three density levels. The effect makes sense because the concentration of biomass, relative to pine volume, was 0.43, while in hardwoods it was 0.81 Mg m^{-3} .

The biomass estimations obtained in our study permit estimations of carbon stores of forests at the Zacualtipán region of Hidalgo, facilitating to offer carbon sequester bonds (Ordóñez-Díaz *et al.*, 2015) and to obtain resources for maintenance work in the areas destined to conservation.

CONCLUSIONS

Management of initial density is fundamental in maximizing timber yields. Mortality tends to decrease with the number of trees and is lower at initial densities

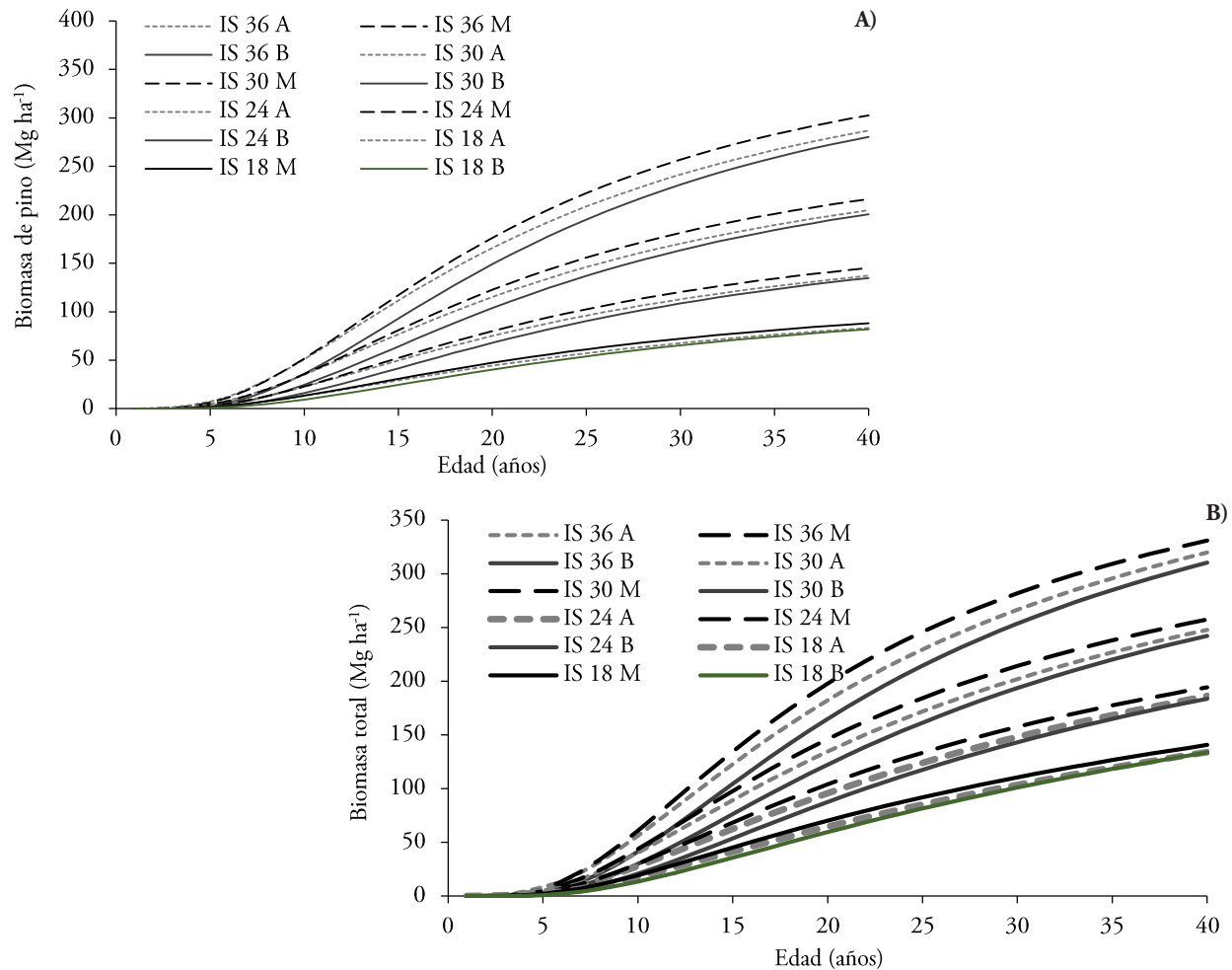


Figura 8. Biomasa aérea por índice de sitio para las densidades, A (3000 árboles ha⁻¹), M (2000 árboles ha⁻¹) y B (950 árboles ha⁻¹), donde: A) biomasa de pino sin presencia de latifoliadas, y B) biomasa total (pino más latifoliadas) con una proporción inicial del 5% de latifoliadas.

Figure 8. Above-ground biomass by site index for the densities A (3000 trees ha⁻¹), M (2000 trees ha⁻¹) and B (950 trees ha⁻¹), where A) pine biomass with no presence of hardwoods, and B) total biomass (pines plus hardwoods) with a 5% initial proportion of hardwoods.

CONCLUSIONES

El manejo de la densidad inicial es fundamental para maximizar el rendimiento maderable. La mortalidad tiende a decrecer de acuerdo con el número de árboles, y es menor en densidades iniciales menores a 1000 árboles ha⁻¹. Además, de esta densidad inicial depende la aplicación en el tiempo, y la forma de los tratamientos silvícolas prescritos en el programa de manejo. La redistribución del espaciamiento de los árboles y de la ocupación del sitio permitirá mejorar la producción total en volumen y aprovechar la productividad potencial de *Pinus patula*.

below 1000 trees ha⁻¹. In addition, the oportune and adequate application of prescribed silvicultural treatments within the management program depends on that initial density. Redistribution of tree spacing and site occupation will permit improving total volume production, thus taking advantage of the potential productivity of *Pinus patula*.

The estimated technical rotations under the different scenarios posed are shorter than the 40-year rotation used in the region. Shortening the absolute rotation and intensifying silvicultural treatments will increase stand profitability by promoting greater flows of timber in less time. Management of a mixed

Los turnos técnicos estimados bajo los diferentes escenarios planteados son menores que el turno de 40 años utilizado en la zona. El recorte del turno absoluto y la intensificación de los tratamientos silvícolas incrementarían la rentabilidad de los rodales al permitir mayores flujos de madera en menos tiempo. El manejo de un bosque mezclado producirá mayor biomasa aérea con un rendimiento en volumen de pino menor al final del turno, en tanto que si se prioriza la producción de madera es necesario disminuir la presencia de especies latifoliadas por medio de tratamientos silvícolas.

AGRADECIMIENTOS

Al Programa de Paisajes Sustentables de la Agencia para el Desarrollo Internacional de Estados Unidos de América por el financiamiento de la investigación, a través de la Oficina de Programas Internacionales del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura. A Northern Research Station, por el financiamiento a través del proyecto “Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y mejoramiento del manejo forestal en México”.

LITERATURA CITADA

- Burkhart, H. E., and M. Tomé. 2012. *Modeling Forest Trees and Stands*. Springer, New York. 457 p.
- Chávez-Aguilar, G., G. Ángeles-Pérez, M. Pérez-Suárez, M. A. López-López, E. García-Moya, y C. Wayson. 2016. Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Mad. y Bosq.* 22: 23-36.
- Clutter, J. L., J. C. Forston, L. V. Pienaar, G. H. Brister, and R. L. Bailey. 1983. *Timber Management: A Quantitative Approach*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 333 p.
- Cruz-Leyva, I. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, y H. M. de los Santos-Posadas. 2010. Modelación espacial de área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *P. teocote* en el ejido Atopixco, Hidalgo. *Mad. y Bosq.* 16:75-97.
- Corral-Rivas, S., J. G. Álvarez-González, J. J. Corral-Rivas, C. Wehenkel, y C. A. López-Sánchez. 2015. Diagramas para el manejo de la densidad en bosques mixtos e irregulares de Durango, México. *Bosque* 36: 409-421.
- Curtis, R. O., D. D. Marshall, and J. F. Bell. 1997. LOGS: A pioneering example of silvicultural research in coast Douglas-Fir. *J. For.* 95: 19-25.
- Daniel, T. W., J. A. Helms, y F. S. Baker. 1982. *Principios de Silvicultura*. McGraw-Hill. México. 442 p.
- 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. Estimación de la biomasa

forest will produce more above-ground biomass with a lower pine volume yield at the end of the rotation, while if timber production is prioritized, it is necessary to diminish the presence of hardwood species through silvicultural treatments.

—End of the English version—

-----*-----

- en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltld. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. 2010. *Rev. Mex. Cienc. For.* 106: 105-112.
- Gómez-Tejero, J., H. M. de los Santos-Posadas, A. M. Fierros-González, y J. R. Valdez-Lazalde. 2009. Modelos de crecimiento en altura dominante para *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden y *E. urophylla* S. T. Blake en Oaxaca, Mexico. *Rev. Fitotec. Mex.* 32: 161 – 169.
- Hernández-Pérez, D., H. M. de los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, J. R. Valdez-Lazalde, y V. H. Volke-Haller. 2013. Funciones de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus patula* Schltld. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Rev. Mex. Cienc. For.* 4: 34-45.
- Langsaeter, A. 1941. Omtytning I enaldret gran-og furuskog Meddelelser. Fra Det norske Skogforsøksvesen 8: 131-216.
- Lugo, A. E. and F. N. Scatena. 1996. Background and catastrophic tree mortality in tropical moist, wet, and rain forests. *Biotropica* 28: 585-599.
- 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. *Southern J. Appl. For.* 23: 179-185.
- Ordóñez-Díaz J. A. B., R. Rivera-Vázquez, M. E. Tapia-Medina, y L. R. Ahedo-Hernández. 2015. Contenido y captura potencial de carbono en la biomasa forestal de San Pedro Jacuaro, Michoacán. *Rev. Mex. Cienc. For.* 6: 7-16.
- Palacios-Cruz, D. J., H. M. De los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, A. M. Fierros-González, y W. Santiago-García. 2020. Sistema de crecimiento y rendimiento para evaluar sumideros de carbono en bosques de *Pinus patula* Schiede ex Schltld. et Cham. bajo aprovechamiento forestal. *Agrociencia* 54: 241-257.
- 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 Schltld. et Cham. *Agrociencia* 51: 455-470.
- Pienaar, L.V., H. Page, and J. W. Rheny. 1990. Yield prediction for mechanically site-prepared *Slash pine* plantations. *Southern J. Appl. For.* 14: 104–109.
- Pretzsch, H. 2009. *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model*. Springer-Verlag. Berlín, Heidelberg. Alemania. 664 p.
- Quiñonez-Barraza, G., H. M. De los Santos-Posadas, F. Cruz-Cobos, A. Velázquez-Martínez, G. Ángeles-Pérez, y G. Ramírez-Valverde. 2015. Índice de sitio con polimorfismo

- complejo para masas forestales de Durango, México. *Agrociencia* 49: 439-454.
- Ramírez-Ramírez, G., J. M. Dupuy-Rada, L. Ramírez-Avilés, y F. J. Solorio. 2017. Evaluación de ecuaciones alométricas de biomasa epigea en una selva mediana subcaducifolia de Yucatán. *Mad. y Bosq.* 23: 163-179.
- Sánchez, F., R. Rodríguez, A. Rojo, J. G. Álvarez, C. López, J. Gorgoso, y F. Castedo. 2003. Crecimiento y tablas de producción de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Inv. Agraria: Sist. y Rec. For.* 12: 65-83.
- 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.
- Santiago-García, W., H. M. De los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, J. J. Corral-Rivas, J. R. Valdez-Lazalde, y D. H. Del Valle-Paniagua. 2014. Predicción del rendimiento maderable de *Pinus patula* Schl. et Cham. a través de modelos de distribución diamétrica. *Agrociencia* 48: 87-101.
- 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*. *Mad. y Bosq.* 21: 95-110.
- Santiago-García, W., E. Pérez-López, G. Quiñonez-Barraza, G. Rodríguez-Ortiz, E. Santiago-García, F. Ruiz-Aquino, and J. C. Tamarit-Urias. 2017. A dynamic system of growth and yield equations for *Pinus patula*. *Forests* 8: 465-478.
- SAS Institute. 2008. Statistical Analysis System SAS/STAT 9.0 User's Guide. SAS Institute, Inc. Raleigh, NC. USA. 248 p.
- Soriano-Luna, M. A., G. Ángeles-Pérez, T. Martínez-Trinidad, F. O. Plascencia-Escalante, y R. Razo-Zárate. 2015. Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia* 49: 423-438.
- 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. *Rev. Chapingo Serie Cienc. For. y del Amb.* 23: 437-455.
- Torres-Rojo, J. M., R. Moreno-Sánchez, and M. A. Mendoza-Briseño. 2016. Sustainable forest management in Mexico. *Current Forestry Reports* 2: 93-105.
- Torres, J. M. y O. S. Magaña. 2001. Evaluación de Plantaciones Forestales. Limusa, México. 472 p.
- Zeide, B. 2004. Optimal stand density: a solution. *Can. J. Forest Res.* 34: 846-854.

