



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**MANEJO FORESTAL CON
ESCENARIOS DE CARBONO EN
ZACUALTIPÁN, HIDALGO**

AGUSTÍN RAMÍREZ MARTÍNEZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2018



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe, **Agustín Ramírez Martínez**, Alumno de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor **Dr. Héctor Manuel de los Santos Posadas**, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis **Manejo forestal con escenarios de carbono en Zacualtipán, Hidalgo**, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo con las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, a 07 de diciembre de 2018

Agustín Ramírez Martínez

Firma del alumno

Dr. Héctor Manuel de los Santos Posadas

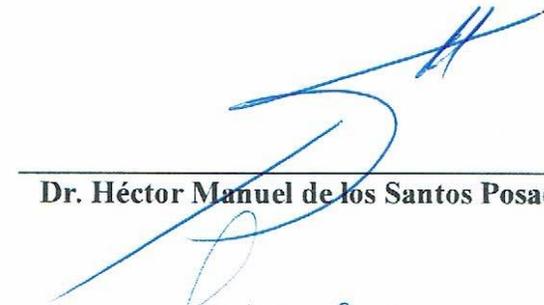
Vo. Bo. del Consejero

La presente tesis titulada: “Manejo forestal con escenarios de carbono en Zacualtipán, Hidalgo” realizada por el alumno: Agustín Ramírez Martínez bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
CIENCIAS FORESTALES**

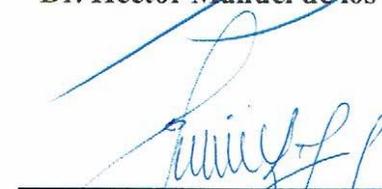
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



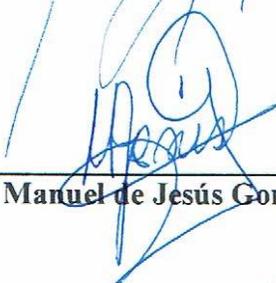
Dr. Héctor Manuel de los Santos Posadas

ASESOR



Dr. Gregorio Angeles Pérez

ASESOR



Dr. Manuel de Jesús González Guillén

ASESOR



Dr. Wenceslao Santiago García

Montecillo, Texcoco, Estado de México, diciembre de 2018

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

MANEJO FORESTAL CON ESCENARIOS DE CARBONO EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO

Agustín Ramírez Martínez, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

La planificación del manejo forestal requiere de herramientas cuantitativas que permitan comprender la dinámica del crecimiento y rendimiento del bosque, además de la incorporación y evaluación de indicadores financieros que permitan conocer la viabilidad económica de actividades alternativas al aprovechamiento maderable. El presente estudio aporta información relevante en ese sentido. En primera instancia (Capítulo I) se generó un sistema de crecimiento y rendimiento (SCR) para *Pinus patula* mezclado con latifoliadas bajo tres densidades iniciales diferentes en la región de Zacualtipán, Hidalgo. Se determinó que en los sitios con mayor productividad (IS 30, 36) el volumen de pino fue mayor que el volumen total (pino más latifoliadas), mientras que, la biomasa aérea total fue mayor en los sitios de pino con latifoliadas para las diferentes calidades de estación. En el Capítulo III se compararon dos enfoques para estimar la distribución diamétrica y el volumen por tipo de producto los resultados obtenidos indicaron que la proyección de tabla del rodal (STP) tiende a describir de mejor manera la distribución diamétrica al apearse mayor número de veces a la distribución observada. Con respecto al volumen total, la STP tiende a ser más conservador al estimar las existencias maderables, mientras que utilizar la función de distribución de probabilidades (fdp) Weibull en su forma original o definiendo un diámetro mínimo genera estimaciones similares entre sí y con el volumen observado. Por último, en el Capítulo IV, se obtuvieron los costos del aprovechamiento para una hectárea promedio, mientras que para evaluar la rentabilidad del aprovechamiento maderable y captura de carbono los indicadores empleados fueron: el VAN, TIR, RBC y VES. Los resultados indican que en zonas productivas pobres la captura de carbono solo es rentable con una tasa de descuento baja (3.5 %) y un precio por MgCO₂e alto (US \$ 100), en tanto que cuando se opta por una producción conjunta, los turnos óptimos de rotación se alargan entre 21 y 44 años.

Palabras clave: crecimiento y rendimiento, distribución diamétrica, rentabilidad financiera, volumen maderable.

FOREST MANAGEMENT WITH CARBON SCENARIOS IN ZACUALTIPÁN,

HIDALGO

Agustín Ramírez Martínez, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

The planning of forest management requires quantitative tools to describe the dynamics of forest growth and yield, as well as the incorporation and evaluation of financial indicators that allow to know the economic viability of alternative activities to timber harvesting. The present study provides relevant information about this. First, in chapter II was generated a growth and yield system (GYS) for mixed *Pinus patula* stands for three different densities in the region of the Zacualtipán, Hidalgo. It was determined that in the best site index the pine volume was greater in pure stands than total volume in mixed stands with an initial 5% broadleaves, with respect to the biomass was observed that this was higher in all mixed stands. Chapter III present two approaches were compared to estimate the diameter distribution and the volume by product type for *Pinus patula*, the results indicated that the STP describe better the diameter distribution by adhering to greater number of times to the observed distribution. For the total volume, the stand table projection (STP) tends to be more conservative when estimating timber stocks, while using the Weibull fdp in his original form or with a minimum diameter defined the estimates are like each other and to the observed volume. Finally, in Chapter IV harvesting costs were obtained for an average hectare, while to evaluate the profitability of timber harvesting and carbon capture the indicators used were: NPV, IRR, BCR and SEV. The results indicated that in poor productive areas the carbon capture is only profitable with a low discount rate (3.5%) and a high price per MgCO₂e (US \$ 100), while for a joint production the optimum rotation is extended between 21 and 44 years.

Keywords: growth and yield, diameter distribution, financial profitability, timber volume.

DEDICATORIA

Dedico esta obra al ser supremo por permitirme la vida, cuidarme y darme la fortaleza necesaria para seguir adelante en los procesos más difíciles.

A mis padres Facundo Ramírez y Juana Martínez por ser el motor que me impulsa a cumplir mis objetivos en la vida, mi ejemplo de perseverancia y superación, a ustedes les debo la vida, mi educación, mi formación profesional y ser el hombre que soy.

A mis hermanos por el cariño y todos los momentos que hemos compartido, gracias por ser los mejores amigos.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la oportunidad de ser becario. Al Colegio de Postgraduados por su excelencia académica y por aceptarme como alumno. A los investigadores y personal administrativo del Postgrado en Ciencias Forestales por todo el apoyo recibido durante mi estancia.

Al Dr. Héctor Manuel De los Santos Posadas por el cual siento una gran admiración y tuve el privilegio de que dirigiera esta investigación. Agradezco su disposición, tiempo, enseñanzas y sobre todo por ser un pilar importante en mi formación académica.

Al Dr. Manuel de Jesús González Guillén por su excelencia como profesor, por la disposición en las asesorías otorgadas, pero sobre todo por la amistad y confianza brindada.

Al Dr. Gregorio Ángeles Pérez por el apoyo y por las sugerencias, recomendaciones y aportes en la revisión del documento final.

Al Dr. Wenceslao Santiago García por las sugerencias y accesibilidad para la revisión del documento final.

Al señor Eulalio Santos y a las autoridades ejidales de Atopixco, Tzincoatlán y la Mojonera, por la autorización y facilidades en el desarrollo de la presente investigación.

A mis profesores que de alguna manera contribuyeron en mi formación académica durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados.

A los compañeros y amigos con los que coincidí en esta etapa de mi formación y con los cuales compartí agradables momentos.

Y a todas esas personas que siempre me han alentado y motivado para ser mejor cada día.

“Yo no camino solo siempre me acompaña un sueño, y no me mueve el dolo solo el fruto de mi empeño, hablo con mis ancestros cuando necesito guía por eso la victoria en realidad no es solo mía, le pertenece a todos los que me hacen avanzar, a mis vivos, a mis muertos en este juego de azar”.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE CUADROS	xii
LISTA DE FIGURA.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
SISTEMA DE CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO	1
CAMBIO CLIMÁTICO	1
IMPORTANCIA DE LOS BOSQUES.....	2
PRODUCCIÓN CONJUNTA Y RENTABILIDAD FINANCIERA	3
JUSTIFICACIÓN	4
OBJETIVOS	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos.....	4
CAPÍTULO I. DENSIDAD INICIAL EN EL RENDIMIENTO MADERABLE Y BIOMASA AÉREA DE <i>Pinus patula</i> CON ESPECIES LATIFOLIADAS	6
1.1 RESUMEN	6
1.2 ABSTRACT.....	7
1.3 INTRODUCCIÓN.....	8
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS	9
1.4.1 Área de estudio y datos dasométricos.....	9
1.4.2 Mortalidad.....	9
1.4.3 Sistema de crecimiento explícito	10
1.4.3.1 Altura dominante	10
1.4.3.2 Modelos compatibles.....	11

1.4.4	Proyección del rendimiento maderable y biomasa aérea a diferentes niveles de densidad inicial, sin y con presencia de latifoliadas	12
1.4.5	Técnica y prueba de bondad de ajuste	13
1.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
1.5.1	Altura dominante e índice de sitio	14
1.5.2	Proyección del rendimiento maderable y biomasa aérea a diferentes niveles de densidad inicial, sin y con presencia de latifoliadas	17
1.6	CONCLUSIONES	24
CAPÍTULO II. DISTRIBUCIÓN DIAMÉTRICA DE <i>Pinus patula</i> EN BOSQUES MANEJADOS: ENFOQUES PARA SU ESTIMACIÓN		25
2.1	RESUMEN	25
2.2	ABSTRACT.....	26
2.3	INTRODUCCIÓN	27
2.4	MATERIALES Y MÉTODOS	29
2.4.1	Área de estudio y datos dasométricos.....	29
2.4.2	Modelos de proyección de variables del rodal.....	29
2.4.3	Tabla de proyección de rodal.....	30
2.4.3.1	Hipótesis sobre el tamaño relativo del árbol	30
2.4.4	Sistema de crecimiento implícito.....	31
2.4.4.1	Función de distribución de probabilidades Weibull.....	31
2.4.4.2	Variables de estado por categoría diamétrica.....	32
2.4.4.3	Modelo de proyección del $p0$	33
2.4.5	Distribución diamétrica a partir de los enfoques evaluados	33
2.4.6	Evaluación de la concordancia de las distribuciones simuladas y estimación del volumen total y por tipo de producto.....	34
2.4.7	Técnica y prueba de bondad de ajuste	35

2.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
2.5.1	Proyección de tabla de rodal (STP)	37
2.5.2	Distribución Weibull de tres parámetros	37
2.5.3	Distribución diamétrica a partir de los enfoques evaluados	38
2.5.4	Evaluación de la concordancia de las distribuciones simuladas y estimación del volumen total y por tipo de producto	43
2.6	CONCLUSIONES	45
CAPÍTULO III. MANEJO FORESTAL CON ESCENARIOS DE CARBONO EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO		46
3.1	RESUMEN	46
3.2	ABSTRACT.....	47
3.3	INTRODUCCIÓN.....	48
3.4	MATERIALES Y MÉTODOS	50
3.4.1	Área de estudio y datos dasométricos.....	50
3.4.2	Información financiera y tasa de descuento.....	50
3.4.3	Sistema de crecimiento y rendimiento maderable y de carbono.....	51
3.4.4	Distribución diamétrica modelada a través de la función Weibull	52
3.4.5	Distribución y precio por tipo de producto maderable y CO ₂ e.....	52
3.4.6	Actualización de costos de producción.....	53
3.4.7	Índice de densidad de Reineke.....	54
3.4.8	Componentes de los escenarios evaluados	54
3.4.9	Escenarios para bosque de pino	55
3.4.10	Producción conjunta	56
3.4.11	Determinación de la edad óptima de cosecha	56
3.4.12	Escenarios para el bosque de pino y latifoliadas	57
3.4.13	Indicadores financieros	58

3.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
3.5.1	Caracterización financiera de la hectárea promedio	59
3.5.2	Índice de densidad de Reineke y secuela de aclareos	61
3.5.3	Escenarios para bosque de pino	63
3.5.4	Producción conjunta.....	65
3.5.5	Escenarios para bosque de pino y latifoliadas	67
3.5.6	Aprovechamiento maderable o captura de carbono.....	68
3.6	CONCLUSIONES	71
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....	72
	CONCLUSIONES	72
	RECOMENDACIONES	73
	LITERATURA CITADA.....	74

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1.1. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados para el modelo de proyección de la mortalidad.....	14
1.2. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados de los modelos de crecimiento en HD.....	15
1.3. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados de los modelos de crecimiento en área basal.....	16
1.4. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados de los modelos de volumen total y proporcionalidad de biomasa.....	17
1.5. Parámetros estimados y estadísticos de ajuste de los modelos con variables indicadoras para los diferentes niveles de densidad y presencia de latifoliadas	18
1.6. 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.....	19
2.1. Estadística descriptiva de los sitios utilizados en la comparación de los enfoques.....	34
2.2. Volumen promedio (m ³) por tipo de producto de cada categoría diamétrica.	35
2.3. Valores de $(E_1/E_2)^\beta$ para diferentes edades iniciales (E_1) y edades proyectadas (E_2) para un valor de $\beta=0.715438$	37
2.4. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros de los modelos de percentiles para la fdp Weibull.....	38
2.5. Variables de estado del sitio seleccionado a los 16 años para tres condiciones.	39
2.6. Asignación de la mortalidad predicha a la tabla de rodal basado en la supervivencia observada.....	40
2.7. Proyección de la tabla de rodal basado en el tamaño relativo.....	41
2.8. Estadísticos de ajuste y validación de los enfoques evaluados.....	43
3.1. Volumen promedio (m ³) por tipo de producto de cada categoría diamétrica...	53
3.2. Tipo de producto maderable y precio corriente en el mercado.....	53
3.3. Variables utilizadas en la generación de escenarios para evaluar la rentabilidad financiera.....	55

3.4.	Escenarios evaluados para la condición de bosque de pino y como producto final la madera.....	55
3.5.	Escenarios evaluados para la condición de bosque de pino y como producto final la captura de carbono.....	56
3.6.	Escenarios evaluados para la condición de bosque de pino y una producción conjunta (madera más carbono)	56
3.7.	Escenarios evaluados para la condición de bosque de pino latifoliadas como producto final la madera.....	57
3.8.	Escenarios evaluados para la condición de bosque de pino latifoliadas como producto final la captura de carbono.....	58
3.9.	Actividades y costo real promedio (\$ ha ⁻¹) para la etapa de establecimiento de la repoblación en el primer año.....	59
3.10.	Actividades y costo real promedio (\$ ha ⁻¹) para la etapa de mantenimiento ...	60
3.11.	Actividades y costo real promedio (\$ m ³) para la etapa de aprovechamiento forestal.....	60
3.12.	Apoyos en términos reales promedio (\$ ha ⁻¹)	61
3.13.	Secuela de aclareos y variables de estado del rodal generado con la guía de densidad relativa de Reineke.....	62
3.14.	Indicadores financieros obtenidos para los diferentes escenarios de IS 18 y 30, con madera como producto final.....	64
3.15.	Escenarios evaluados para la condición de bosque de pino latifoliadas como producto final la madera.....	67
3.16.	Escenarios evaluados para la condición de bosque de pino latifoliadas como producto final la captura de carbono.....	68

LISTA DE FIGURA

Figura	Página
1.1. Densidad observada en los sitios de muestreo: A (mayor de 2,000 árboles ha ⁻¹); M (entre 1,000 y 2,000 árboles ha ⁻¹) y B (menor de 1,000 árboles ha ⁻¹)	10
1.2. Curvas de índice de sitio para <i>Pinus patula</i> a la edad base de 40 años: (a) Hossfeld IV polimórfico y (b) Hossfeld IV anamórfico.....	15
1.3. Curvas de índice de sitio generadas a partir de los modelos: (a) (1.8) y (1.9) y (b) Pienaar <i>et al.</i> (1990) para <i>Pinus patula</i>	16
1.4. Proporción relativa del área basal de latifoliadas por sitio.....	19
1.5. Volumen pino proyectado en las densidades, A (3,000 árboles ha ⁻¹), M (2,000 árboles ha ⁻¹) y B (950 árboles ha ⁻¹) para los diferentes índices.....	20
1.6. Volumen proyectado para las densidades, A (3,000 árboles ha ⁻¹), M (2,000 árboles ha ⁻¹) y B (950 árboles ha ⁻¹) en un índice de sitio (IS) 36.....	21
1.7. Curvas de incremento corriente anual en volumen total (ICA) e incremento medio anual (IMA) para las densidades, A (3,000 árboles ha ⁻¹), M (2,000 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 %.....	22
1.8. Biomasa aérea por índice de sitio, para las densidades, A (3,000 árboles ha ⁻¹), M (2,000 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.	23
2.1. Distribución diamétrica a la edad de 15 años.....	39
2.2. Distribución diamétrica de los 1,300 árboles ha ⁻¹ observados y estimados a 19 años.....	42
2.3. Volumen total y por tipo de producto (m ³) a partir de las diferentes distribuciones.....	44
3.1. Prescripción de aclareos para <i>Pinus patula</i> , Sec. Acl: secuela de aclareos. 100 y 55 %: límite superior e inferior de la zona de auto-aclareo, 30 %: límite inferior de la zona de crecimiento constante, 20 %: límite superior del crecimiento libre sin mortalidad.....	62

3.2. Valor actual neto (VAN) para los diferentes escenarios planteados para el IS 18 y 30.....	64
3.3. (a) Tasa interna de retorno (%) y (b) Relación beneficio-costo (RBC) para los diferentes escenarios planteados para los IS 18 e IS 30.....	65
3.4. Turno óptimo de rotación en un IS 30 para una producción conjunta, precios por MgCO _{2e} ha ⁻¹ año-1 de \$1,800 y \$1,350 con una tasa de interés de: (a) 3.5 % y (b) 4.5 %.....	66
3.5. Valor esperado del suelo (VES) en el IS 30 de la producción conjunta para dos tasas de interés (3.5 y 4.5 %) y dos precios de CO _{2e} \$1,800 y \$1,350.....	67

INTRODUCCIÓN

SISTEMA DE CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO

El manejo forestal es un proceso basado en la toma de decisiones y el diseño de actividades encaminadas al aprovechamiento de los recursos forestales de manera ordenada, para satisfacer las necesidades actuales de la sociedad, sin comprometer la provisión de bienes y servicios para las generaciones futuras (Aguirre-Calderón, 2015). Para la planificación del manejo forestal es necesario contar con herramientas cuantitativas que permitan comprender la dinámica del crecimiento y rendimiento de las masas forestales, así como predecir los efectos que las actividades de manejo tendrán sobre ellas (Santiago-García *et al.*, 2013).

Dentro de las herramientas de manejo se encuentran los sistemas de crecimiento rendimiento (SCR) formados por un conjunto de modelos que describen cuantitativamente el crecimiento forestal a través de los años y permiten estimar los cambios en diversas variables de interés (Vanclay, 1994) como la altura dominante e índice de sitio, mortalidad, área basal, diámetro, volumen (Galán *et al.*, 2008) y en años recientes se ha integrado la biomasa que representa la cantidad de material acumulado en las plantas en la parte aérea y subterránea dentro del ecosistema (Figuerola, 2010), por ser extremadamente relevante en el contexto del cambio climático.

CAMBIO CLIMÁTICO

En las últimas décadas la variabilidad climática del planeta ha sido uno de los principales temas de investigación en el mundo, si bien es cierto que desde el origen de los tiempos la tierra ha estado expuesta constantemente a cambios (i.e. eras geológicas, evolución de las especies), el proceso de cambio climático actual no es atribuible a factores naturales (Rodríguez *et al.*, 2009).

El problema del cambio climático se atribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero GEI (Gupta *et al.*, 2013); dentro de estos gases se encuentran el CO₂, metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y halocarbonos (grupo de gases que contienen flúor, cloro o bromo) compuestos en gran parte generados a partir de las actividades humanas. Convencidos de que el cambio climático era grave, la comunidad internacional en 1992 desarrolló la Cumbre Mundial sobre Medio Ambiente en Río de Janeiro (Bodansky, 1993), donde se incluyeron a los GEI como tema ambiental relevante, estableciéndose la meta de alcanzar en el año 2000 los mismos niveles de gases de efecto invernadero emitidos en 1990. En el año de 1997 surgió el Protocolo de Kioto, el cual es un tratado internacional, cuyo objetivo principal fue lograr que para 2008-2012 los países desarrollados

disminuyan sus emisiones de gases de efecto invernadero a un 5% menos del nivel de emisiones de 1990 (Rodríguez, 2007).

En el 2015 en París, 195 naciones alcanzaron un acuerdo histórico para combatir el cambio climático e impulsar medidas e inversiones para un futuro bajo en emisiones de carbono, resiliente y sostenible, el Acuerdo de París tiene el objetivo principal de mantener el aumento de la temperatura en este siglo por debajo de los 2 grados centígrados, e impulsar los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura incluso más, por debajo de 1.5 grados centígrados sobre los niveles preindustriales (UNFCCC, 2015; Ollila, 2018).

Dada la problemática mencionada anteriormente, México asumió el objetivo de reducir un 30 % de las emisiones de GEI al año 2020 respecto a una línea base y un 50 % al 2050 con relación con las emitidas en el año 2000, estas metas podrán alcanzarse si se establece un régimen internacional que disponga de mecanismos de apoyo financiero y tecnológico por parte de países desarrollados hacia países en desarrollo incluyendo a México (Cámara de diputados, 2012).

IMPORTANCIA DE LOS BOSQUES

En la mayoría de estos acuerdos se resalta la importancia que tienen los bosques para disminuir las emisiones de CO₂ mediante la implementación de proyectos encaminados a la captura de carbono. De acuerdo con Jandl *et al.* (2006), los ecosistemas forestales almacenan más del 80 % de todos los reservorios de carbono (C) terrestres en el suelo. A pesar de las emisiones de CO₂ relacionadas con la deforestación, los bosques siguen funcionando como un gran sumidero global de CO₂ atmosférico, esta capacidad de funcionar puede mejorarse mediante proyectos de captura de carbono (Jones y O'Hara, 2012). La captura de carbono forestal ocurre cuando la cantidad de carbono absorbida y almacenada por el suelo, los árboles (y los productos de madera resultantes) y otra vegetación forestal es mayor que la cantidad total de dióxido de carbono emitido por la respiración, descomposición, perturbaciones (tales como cosechas o incendios) y emisiones debidas al procesamiento de la madera (Neilson *et al.*, 2006).

México cuenta con 138 millones de hectáreas (ha) con vegetación forestal, de las cuales 64.9 millones están cubiertas por bosques y selvas, 15 millones tienen potencial para el aprovechamiento comercial de recursos forestales maderables, sin embargo, solo 7.4 millones están incorporadas al manejo forestal (CONAFOR, 2013). De la gran diversidad de servicios ambientales en los bosques (protección de cuencas hidrológicas, la conservación de la biodiversidad y la captura de carbono),

la mayoría de estos servicios al no tener un mercado desarrollado no son incluidos en la valoración del bosque, aunque muchas de las actividades de manejo están orientadas a protegerlos (Pagiola *et al.*, 2003).

Los bosques que están bajo manejo forestal tienen la capacidad de soportar más individuos y de mejor conformación aprovechando de mejor manera el potencial productivo del suelo y haciendo que el manejo forestal sea una herramienta excelente para quien desee capturar carbono (Aguirre-Salado, 2007).

PRODUCCIÓN CONJUNTA Y RENTABILIDAD FINANCIERA

Cuando se considera una actividad adicional, tal como la fijación de carbono a la producción maderable, se presenta una producción conjunta (obtención de varios productos y servicios con los mismos factores de producción), y es necesario conocer el efecto de posibles cambios en el precio de un producto considerado, por ejemplo, el de la madera y sus implicaciones con respecto a la captura de carbono (Díaz-Balteiro, 2002; Telles-Mejía, 2006), esto tendrá influencia en la toma de decisiones silviculturales.

Uno de los puntos afectados en el manejo forestal ante una producción conjunta es la edad óptima de rotación, cuando el turno se alarga (más común) se pueden obtener productos estructurales de larga vida, como madera, chapa y contrachapado, utilizados en la construcción de casas y muebles, sin embargo, al quedarse de pie más tiempo, los bosques son más vulnerables a las perturbaciones naturales, tales como incendios, plagas y enfermedades (Jones y O'Hara, 2012). Cuando el turno es corto (o se reduce), el tiempo de almacenamiento del C es relativamente corto, sobre todo si se generan productos de vida corta como el papel, las astillas de madera y el aserrín, quienes se descomponen con bastante rapidez, entonces el C almacenado en estos regresa a la atmósfera y entra nuevamente en el ciclo del C en pocos años (Bhatti *et al.*, 2003).

El carbono se comercializa a través de bonos de carbono, al existir actualmente dos tipos de mercados: el mercado regulado que es utilizado por empresas y gobiernos que por ley tienen que rendir cuentas de sus emisiones de GEI, siendo regulado por regímenes obligatorios de reducción de carbono, ya sean nacionales, regionales o internacionales, este mercado aportó \$ 123,954 millones de dólares (US) en el 2010 (Peters-Stanley *et al.*, 2011). Por otro lado, está el mercado voluntario, donde se realizan todos aquellos intercambios de compensaciones de carbono que no son exigidos por ley, en el 2015 concentró US \$ 278 millones, con un precio promedio ponderado

de US \$ 3.3 MgCO₂e (Hamrick, 2016), sin embargo, a nivel mundial no se ha llegado a un consenso para establecer un precio unitario por la compra y venta de MgCO₂e.

JUSTIFICACIÓN

El bosque proporciona una gran diversidad de bienes y servicios, de los cuales la producción maderable siempre se ha considerado como el beneficio más sobresaliente que las masas forestales pueden proporcionar. En la actualidad, se ha comenzado a visualizar nuevas y diferentes alternativas tanto de productos como de servicios que del bosque se pueden obtener, entre ellos están los pagos por servicios ambientales. De estos la captura de carbono parece ser una alternativa viable dado que el valor que tiene el carbono capturado es el mismo en cualquier parte del mundo y existe un mercado que se está estructurando a partir del pago por este servicio, sin mencionar que su contribución a la reducción del cambio climático será global invariablemente del lugar donde este se fije.

Dado los distintos programas y proyectos que se han ido generando con el fin de disminuir las emisiones de GEI, es necesario estimar la cantidad de carbono que un bosque es capaz de fijar y evaluar la rentabilidad económica de la captura de carbono frente al aprovechamiento maderable con diferentes escenarios, de tal forma que sea posible generar información que permita conocer la eficiencia económica de estas dos actividades y determinar su posible inclusión en futuros programas y proyectos de manejo en determinada zona.

OBJETIVOS

Objetivo general

Generar un sistema de crecimiento y rendimiento maderable para la especie *Pinus patula* de la región de Zacualtipán, Hidalgo y evaluar la rentabilidad financiera de la producción maderable y captura de carbono con diferentes escenarios.

Objetivos específicos

- 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.

- Contrastar la distribución diamétrica generada a través de la distribución de probabilidades Weibull de tres parámetros y la obtenida mediante el enfoque de proyección de tabla de rodal.
- Cuantificar la captura de carbono de una hectárea promedio de los bosques manejados de Zacualtipán, Hidalgo, y evaluar la rentabilidad financiera de la venta de bonos de carbono *versus* el aprovechamiento maderable para determinar qué actividad dentro del manejo forestal es más rentable en términos económicos al simular diferentes escenarios.

CAPÍTULO I. DENSIDAD INICIAL EN EL RENDIMIENTO MADERABLE Y BIOMASA AÉREA DE *Pinus patula* CON ESPECIES LATIFOLIADAS

1.1 RESUMEN

En México los bosques manejados de clima templado presentan una repoblación mayormente de origen natural y niveles de densidad diferente entre rodales. Los modelos de mortalidad asumen una tasa de disminución constante para todas las edades, índices de sitio y densidades. El objetivo del presente estudio fue determinar las tasas de mortalidad para tres densidades iniciales y construir un sistema de crecimiento y rendimiento (SCR) para *Pinus patula* mezclado con latifoliadas, en la región de Zacualtipán, Hidalgo. Los datos utilizados provienen de tres inventarios (2013, 2014 y 2016) de 160 sitios permanentes de 400 m². La productividad se describió mediante un patrón de crecimiento en altura dominante de tipo anamórfico con el modelo Hossfeld IV. El ajuste de los modelos de mortalidad generó tasas de decrecimiento anuales de 2.47, 1.17 y 0.81 % para densidades: mayor que 2,000 árboles ha⁻¹, entre 1,000 y 2,000 árboles ha⁻¹ y menor de 1,000 árboles ha⁻¹. El SCR mostró que los rendimientos mejores en volumen de pino se obtuvieron con una densidad inicial de 2,000 árboles ha⁻¹, los turnos técnicos en volumen se estimaron entre los 24 y 27 años. Con una presencia del 5 % de latifoliadas a partir de los 5 años los turnos se encontraron entre los 20 y 23 años. Por otra parte, se determinó que en el IS 36 el volumen de pino fue mayor que el volumen total (pino más latifoliadas), mientras que en los IS 18, 24 y 30 las diferencias no fueron tan evidentes. Con respecto a la biomasa aérea se observó que esta fue mayor en todos los sitios de pino más latifoliadas, lo que sugiere que estas especies tienen una aportación considerable a la biomasa aérea total, mientras que en sitios ricos tienden a afectar los rendimientos finales en volumen de pino, por lo que es necesario la aplicación de tratamientos silvícolas para el control de estas especies.

PALABRAS CLAVE: Índice de sitio, manejo forestal, tratamientos silvícolas, turno técnico, volumen maderable.

1.2 ABSTRACT

In Mexico managed temperate forest are usually naturally regenerated producing varying density levels among stands. Mortality models used in these conditions generally assume a constant mortality rate for all ages, site indexes and initial density conditions. The objective of this work was centered on determine the mortality rates for three initial density conditions and then built a growth and yield system (GYS) for mixed *Pinus patula* stands in Zacualtipán, Hidalgo. Data were obtained from 160 permanent plots of 400 m² measured in 2013, 2014 and 2016. Site productivity was estimated using a Hossfeld IV anamorphic equation to model dominant-height growth. The fitted mortality models suggest that mortality annual rates vary from 2.47, 1.17 and 0.81 % for densities varying from: greater than 2,000 trees/ha, between 1,000 to 2,000 trees/ha and less than 1,000 trees/ha. The GYS show that the best pine yield is obtained using an initial density of 2,000 trees/ha and the volume rotation is estimated between 24 and 27 years. A 5% presence of broadleaves at the 5 years will reduce volume rotation between 20 to 23 years. In the best site index (IS 36 m) pine volume is greater in pure stands than total volume in mixed stands with an initial 5% broadleaves. On the other site qualities differences in yield are not noticeable. Total aerial biomass is greater on all mixed stands, suggesting that broadleaves represent a considerable biomass fraction from the total, while in rich sites tends to reduce pine yield suggesting a that a more careful control of broadleaves in these conditions is needed.

KEYWORDS: Site index, forest management, silvicultural treatments, rotation age, timber volume.

1.3 INTRODUCCIÓN

La repoblación de origen natural presenta una distribución aleatoria de los árboles con diferentes densidades entre rodales. Si la densidad es el número de individuos por unidad de área, esta se considera un indicador del grado de ocupación del arbolado de un lugar específico en un tiempo dado (Zeide, 2004). A mayor densidad en un rodal, mayor es el efecto negativo que un árbol ejerce sobre el otro (Burkhardt 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 dependiendo de las condiciones del bosque (Lugo y Scatena, 1999). 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 estado de interés (volumen, biomasa) de la masa forestal a través del tiempo (Santiago-García *et al.*, 2013).

El desarrollo de los SCR en México ha ido creciendo en los últimos años, para plantaciones forestales con fines maderables (Fierros-Mateo *et al.* 2017; Parra-Piedra *et al.*, 2017) y bosques naturales coetáneos (Santiago-García *et al.*, 2015; 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 emplean comúnmente en plantaciones forestales donde el espaciamiento y densidad inicial son conocidas 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, se tienen masas de *Pinus patula* Schiede ex Schlechtendal & Chamisso, especie de interés por ser de crecimiento rápido y de alto valor económico. Esta crece asociada con diferentes especies de latifoliadas de menor abundancia (*Quercus excelsa* Liebm., *Q. laurina* Hump et Bonpl, *Q. rugosa* Neé, *Arbutus jalapensis* Kunth., *Prunus serótina* Ehrh., entre otras) (Figuroa-Navarro *et al.*, 2010), condición que se ha omitido 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 incluyen la proporción de latifoliadas como un factor de competencia para determinar su efecto sobre el crecimiento y rendimiento de *Pinus patula* en bosques manejados.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 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, ubicado entre las coordenadas extremas 20°37'49.78" y 20°35'18.74" LN y 98°37'51.01" y 98°34'2.71" LO (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 alto contenido 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 (1.1) Schumacher-Hall, reportada en el Sistema Biométrico Forestal 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 (1.2) ajustada por Soriano-Luna *et al.*, (2015).

$$V = 0.000253 \cdot DN^{1.6939421} \cdot H^{1.4175090} + 0.0000680 \cdot DN^2 \quad (1.1)$$

$$B = \exp(-4.554805) \cdot (DN^2 \cdot H)^{1.047218} \quad (1.2)$$

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).

1.4.2 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) (1.3), donde las densidades observadas se definieron como alta (A), mayor de 2,000 árboles ha⁻¹; media (M): de 1,000 a 2,000 árboles ha⁻¹; y baja (B): menor de 1,000 árboles ha⁻¹ ([Figura 1.1](#)).

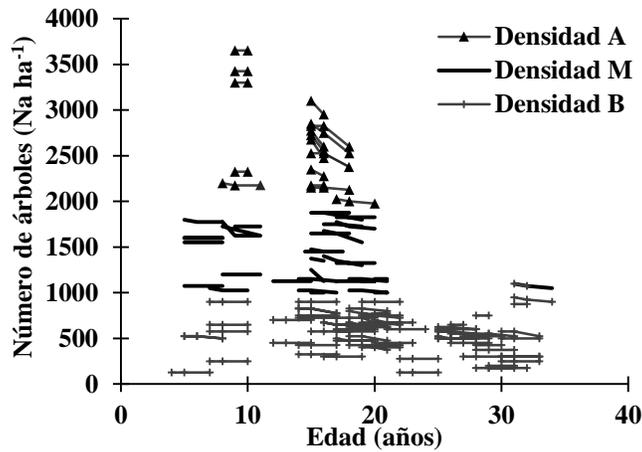


Figura 1.1 Densidad observada en los sitios de muestreo: A (mayor de 2,000 árboles ha⁻¹); M (entre 1,000 y 2,000 árboles ha⁻¹) y B (menor de 1,000 árboles ha⁻¹).

La ecuación 1.4 corresponde a un modelo exponencial negativo donde la tasa de mortalidad media por condición está dada de manera aditiva, la estructura matemática siguiente:

$$f(\theta_{1i} \cdot I_i) = \theta_{1A} + \theta_{1M} \cdot I_M + \theta_{1B} \cdot I_B \quad (1.2)$$

$$NA_2 = NA_1 \cdot \exp(f(\theta_{1i} \cdot I_i) \cdot (E_2 - E_1)) \quad (1.3)$$

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} : adicionalidad debida a la densidad inicial media, θ_{1B} : adicionalidad debida a la densidad inicial baja, I_i : variable indicadora por densidad media y baja.

1.4.3 Sistema de crecimiento explícito

1.4.3.1 Altura dominante

La calidad de estación del rodal se determinó a través del índice de sitio (IS), definido como, la altura dominante del rodal a una edad de referencia (Santiago-García *et al.*, 2013). Se evaluó el crecimiento en HD con el modelo de predicción Hossfeld IV (1.5) y mediante el enfoque de diferencia algebraica (ADA) se derivó una condición futura (1.6 y 1.7) (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2015). La ecuación 1.6 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 (1.7) 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).

$$HD_1 = \frac{\beta_0}{[1 + \exp(\beta_1) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \ln(E_1))]} \quad (1.4)$$

$$HD_2 = \frac{\beta_0}{1 + \exp(\beta_1) \cdot \exp\left[\left(\frac{\ln\left(\frac{\beta_0 - HD_1}{HD_1 \cdot \exp(\beta_1)}\right)}{\ln(E_1)}\right) \cdot \ln(E_2)\right]} \quad (1.5)$$

$$HD_2 = HD_1 \frac{[1 + \exp(\beta_1) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \ln(E_1))]}{[(1 + \exp(\beta_1) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \ln(E_2)))]} \quad (1.6)$$

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.

1.4.3.2 Modelos compatibles

Para el área basal se evaluaron dos sistemas integrados por los modelos (1.8 y 1.9) y (1.10 y 1.11), estos últimos propuestos por Pienaar *et al.* (1990). Para el volumen se probaron los modelos (1.12 y 1.13) propuestos por Santiago-García *et al.*, (2013), así como las ecuaciones (1.14 y 1.15) de Parra-Piedra *et al.* (2017). La cantidad de biomasa aérea de pino almacenada en el rodal se estimó con el modelo (1.16) de proporción directa sobre el volumen con corteza.

$$AB_1 = \exp(\alpha_0) \cdot HD_1^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + \alpha_3 \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right) \quad (1.7)$$

$$AB_2 = AB_1 \frac{HD_2^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + \alpha_3 \cdot NA_2 + \alpha_4 \cdot HD_2}{E_2}\right)}{HD_1^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + \alpha_3 \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right)} \quad (1.8)$$

$$AB_1 = \exp\left(\alpha_0 + \alpha_1 \cdot E_1^{-1} + \alpha_2 \cdot \ln(NA_1) + \alpha_3 \cdot \ln(HD_1)\right) \quad (1.9)$$

$$AB_2 = \exp\left(\ln(AB_1) + \alpha_1 \cdot (E_2^{-1} - E_1^{-1}) + \alpha_2 \cdot \ln\left(\frac{NA_2}{NA_1}\right) + \alpha_3 \cdot \ln\left(\frac{HD_2}{HD_1}\right)\right) \quad (1.10)$$

$$V_1 = \exp\left(\gamma_0 + \gamma_1 \cdot \frac{HD_1}{AB_1}\right) \cdot E^{\gamma_2} \cdot HD_1 \quad (1.11)$$

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^{\gamma_2} \cdot \left(\frac{HD_2}{HD_1}\right) \cdot \exp\left(\gamma_1 \left(\frac{HD_2}{AB_2} - \frac{HD_1}{AB_1}\right)\right) \quad (1.12)$$

$$V_1 = \gamma_0 \cdot AB_1^{\gamma_1} \cdot HD_1^{\gamma_2} \quad (1.13)$$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{AB_2}{AB_1}\right)^{\gamma_1} \cdot \left(\frac{HD_2}{HD_1}\right)^{\gamma_2} \quad (1.14)$$

$$B_t = \delta_0 \cdot V \quad (1.15)$$

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_t : biomasa aérea total en ($Mg\ ha^{-1}$), $\alpha_i, \gamma_i, \delta_i$: parámetros por estimar.

1.4.4 Proyección del rendimiento maderable y biomasa aérea a diferentes niveles 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, fue modificada al incorporar un análisis de covarianza para los tres niveles de repoblación inicial (1.17, 1.20 y 1.24), así como de un factor de disminución por presencia de latifoliadas, este último, fue obtenido al ajustar el modelo (1.23) de proyección de área basal de latifoliadas, propuesto por Martin y Brister (1999). Se realizó un análisis gráfico para verificar las tendencias de las estimaciones, para ello 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 empleó el 5% a la edad de 5 años, por ser la proporción promedio en los primeros 10 años de los sitios muestreados.

$$\alpha_3 = g(\alpha_{3i}, I_i) = \alpha_{3A} + \alpha_{3M} \cdot I_M + \alpha_{3B} \cdot I_B \quad (1.16)$$

$$AB_1 = \exp(\alpha_0) \cdot HD_1^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right) \quad (1.17)$$

$$AB_2 = AB_1 \frac{HD_2^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_2 + \alpha_4 \cdot HD_2}{E_2}\right)}{HD_1^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right)} \cdot (1 - q_2)^{\left(1 - \frac{E_1}{E_2}\right)} \quad (1.18)$$

$$\gamma_1 = h(\gamma_{1i}, I_i) = \gamma_{1A} + \gamma_{1M} \cdot I_M + \gamma_{1B} \cdot I_B \quad (1.19)$$

$$V_1 = \gamma_0 \cdot AB_1^{h(\gamma_{1i}, I_i)} \cdot HD_1^{\gamma_2} \quad (1.20)$$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{AB_2}{AB_1}\right)^{h(\gamma_{1i}, I_i)} \cdot \left(\frac{HD_2}{HD_1}\right)^{\gamma_2} \quad (1.21)$$

$$q_2 = q_1 \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{\tau_0} \quad (1.22)$$

$$\omega_1 = f(\omega_{1i}, I_i) = \omega_{1A} + \omega_{1M} \cdot I_M + \omega_{1B} \cdot I_B \quad (1.23)$$

$$NA_2 = NA_1 \cdot \exp(f(\omega_{1i}, I_i) \cdot (E_2 - E_1)) \cdot (1 - q_2)^{\left(1 - \frac{E_1}{E_2}\right)} \quad (1.24)$$

$$AB_1 = \exp(\alpha_0) \cdot HD_1^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right) \quad (1.25)$$

$$AB_2 = AB_1 \frac{HD_2^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_2 + \alpha_4 \cdot HD_2}{E_2}\right)}{HD_1^{\alpha_1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_2 + g(\alpha_{3i}, I_i) \cdot NA_1 + \alpha_4 \cdot HD_1}{E_1}\right)} \cdot (1 - q_2)^{\left(1 - \frac{E_1}{E_2}\right)} \quad (1.26)$$

Donde q_1, q_2 : proporción del área basal de latifoliadas a la edad E_1 y E_2 , τ_0 : parámetro por estimar.

Para complementar el SCR se retomaron los modelos de proyección ajustados por Palacios-Cruz (2018) para la proporción de latifoliadas (1.28) y área basal de las mismas a partir del área basal de pino (1.29), además del factor de proporcionalidad directa sobre el volumen de latifoliadas para estimar la biomasa aérea, cuyo valor fue de 0.817. También se retomó el factor obtenido anteriormente para estimar la biomasa aérea sobre el volumen con corteza de pino que fue 0.433.

$$AB_{H2} = \frac{AB_2 \cdot q_2}{1 - q_2} \quad (1.27)$$

$$V_H = 6.477901 \cdot AB_{H2} \quad (1.28)$$

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 .

1.4.5 Técnica y prueba de bondad de ajuste

Para el ajuste y evaluación de los modelos de altura dominante se emplearon 261 pares de datos no traslapados; 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 no traslapados. El ajuste fue simultáneo, con regresión aparentemente no relacionada (SUR), mediante el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS (SAS Institute, 2008). El sistema de mortalidad y el modelo de proporcionalidad de biomasa aérea se ajustaron mediante 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 significancia de los estimadores de los parámetros ($Pr > |t|$) con un valor crítico $\alpha = 0.05$. Lo anterior se complementó mediante un análisis gráfico, en el cual se evaluó el comportamiento lógico de los modelos.

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estadísticos de ajuste del modelo (1.3) de mortalidad se presentan en el [Cuadro 1.1](#), se observa diferencias significativas entre las tasas de mortalidad anual de acuerdo con la densidad inicial, con valores de 2.44, 1.17 y 0.81 %, para la densidad alta, media y baja. En bosques manejados Santiago-García *et al.* (2013, 2015; 2017) reportaron tasas de 3.3, 4.6 y 1.2% anual, respectivamente. Las tasas de mortalidad obtenidas fueron coherentes con el nivel de densidad, debido a que la mortalidad tiende a decrecer cuando el número de árboles es menor en el rodal, como consecuencia de la reducción de la competencia intraespecífica.

Cuadro 1.1. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados para el modelo de proyección de la mortalidad.

Modelo	SCE	RECM	R ² adj	Parámetro	Valor	P > t
2.4	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; \bar{E} : sesgo promedio; AIC: criterio de información de Akaike (AIC); P > |t|= valor de *p*.

1.5.1 Altura dominante e índice de sitio

El ajuste de los modelos (1.5) y (1.6) de Hossfeld IV anamórfico presentaron los mejores valores en SCE, RECM y AIC, mientras que para el modelo de proyección polimórfico (1.7) los valores en SCE, RECM y \bar{E} fueron mayores que los obtenidos en el sistema anamórfico ([Cuadro 1.2](#)). Con este modelo se obtuvo el índice de sitio (IS) (1.30) para evaluar la productividad de la zona, al sustituir en el modelo de proyección el IS en HD₂, HD en HD₁, EB (40 años) en E₂ y Edad en E₁.

Cuadro 1.2. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados de los modelos de crecimiento en HD.

Modelo	SCE	RECM	R ² adj	\bar{E}	AIC	Parámetro	Valor	P > t
						β_0	37.520	<0.0001
2.5	933	1.898	0.898	-0.007	339.172	β_1	4.063	<0.0001
2.6	133	0.717	0.983	-0.071	-169.017	β_2	1.477	<0.0001
						β_0	37.239	<0.0001
2.5	929	1.894	0.898	-0.005	337.488	β_1	4.098	<0.0001
2.7	144	0.745	0.982	0.095	-148.642	β_2	1.496	<0.0001

$$IS = HD \frac{(1 + \exp(4.02898) \cdot \exp(-1.56604) \cdot \ln(Edad))}{1.174129} \quad (1.29)$$

En la [Figura 1.2](#) se presentan las familias de curvas generadas con los sistemas evaluados para los diferentes niveles de productividad (IS). La familia de curvas de Hossfeld IV anamórfica ([Figura 1.2b](#)) presentó una asíntota horizontal estimada de 37.23 m, a una edad base de 40 años. Esta altura es similar a la reportada por Santiago-García *et al.* (2013), de 38.98 m, mediante el modelo anamórfico de Hossfeld IV para la misma región de estudio. La eficiencia del modelo para otras especies ha reportado Gómez-Tejero *et al.* (2009) quienes lo emplearon en plantaciones de *Eucalyptus grandis*, en el estado de Oaxaca.

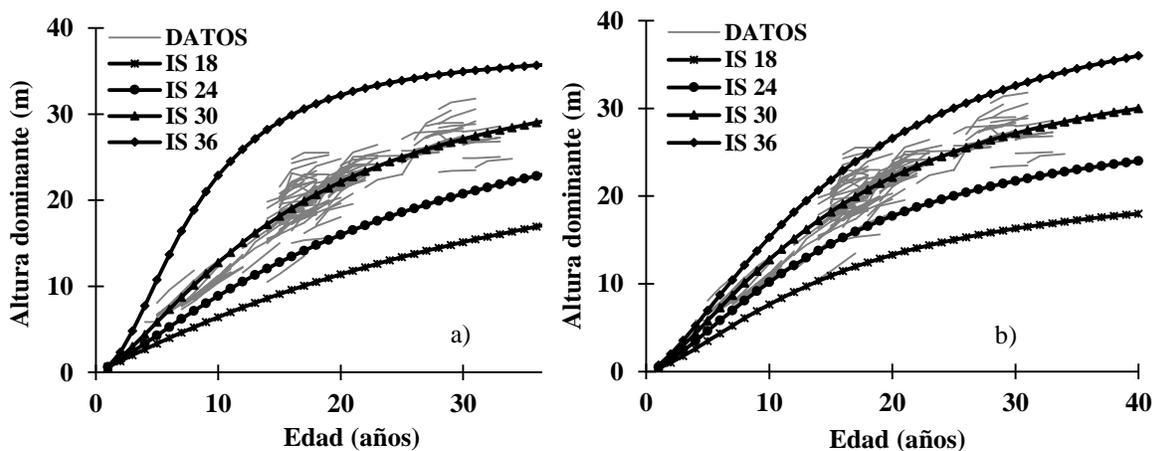


Figura 1.2. Curvas de índice de sitio para *Pinus patula* a la edad base de 40 años: (a) Hossfeld IV polimórfico y (b) Hossfeld IV anamórfico.

Los modelos de crecimiento en área basal evaluados explicaron de 71% (predicción) a 97% (proyección) a variabilidad total observada (Cuadro 1.3). El modelo de predicción (1.8) obtuvo el sesgo promedio (\bar{E}) más bajo; a su vez, el modelo (1.9) evidenció los mejores estadísticos de ajuste (SCE, RECM, R^2_{adj} y AIC), en comparación con los modelos (1.10) y (1.11). Lo anterior complementado con el análisis gráfico donde se muestra que estos modelos (1.10 y 1.11) predicen un decrecimiento del área basal después de los 30 años (Figura 1.3a), se optó por los modelos (1.8) y (1.9) para describir el crecimiento en área basal al presentar un comportamiento lógico (Figura 1.3b) y valores adecuados en los estadísticos de ajuste.

Cuadro 1.3. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados de los modelos de crecimiento en área basal.

Modelo	SCE	RECM	R^2_{adj}	\bar{E}	AIC	Parámetro	Valor	$P > t $
						α_0	2.581	<0.0001
2.8	5209	4.780	0.713	-0.020	727.77	α_1	0.308	0.0003
2.9	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
2.10	4299	4.337	0.766	0.349	683.423	α_1	-15.450	<0.0001
2.11	373	1.276	0.978	0.784	119.218	α_2	0.408	<0.0001
						α_3	0.419	<0.0001

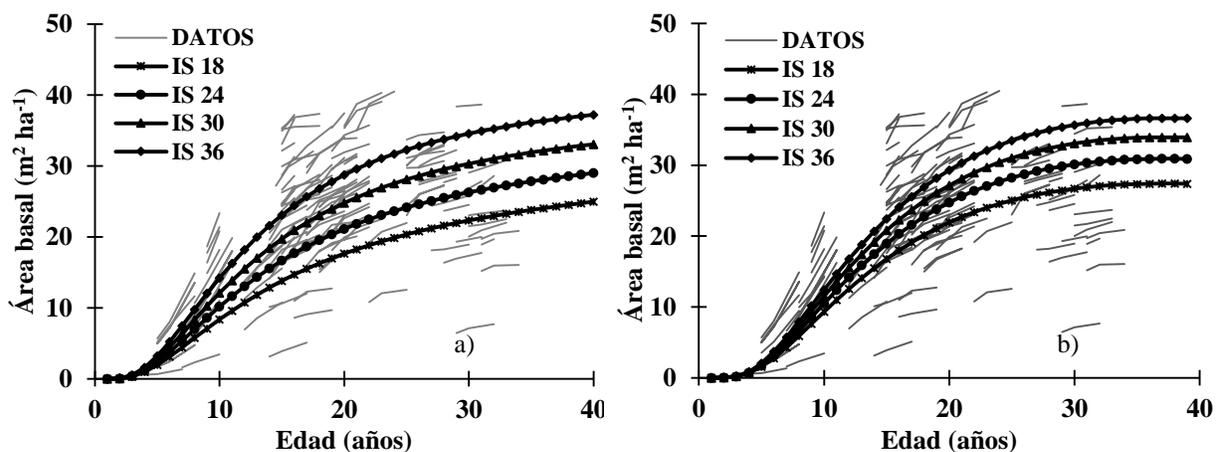


Figura 1.3. Curvas de índice de sitio generadas a partir de los modelos: (a) (1.8) y (1.9) y (b) Pienaar *et al.* (1990) para *Pinus patula*.

En el [Cuadro 1.4](#) se presentan los estadísticos de ajuste de los sistemas para modelar el crecimiento del volumen. Los modelos (1.14) y (1.15) fueron los que 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 estadísticamente significativos ($p > 0.001$); además presentan una estructura parsimoniosa. Estos modelos presentaron estimaciones coherentes al modelar el volumen total en plantaciones de *Pinus patula*, en el estado de Veracruz (Parra-Piedra *et al.*, 2017).

El factor de proporcionalidad de biomasa (δ_0) se estimó en 0.433 (1.16) para rodales mayormente dominados por pino, indicando 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).

Cuadro 1.4. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros estimados de los modelos de volumen total y proporcionalidad de biomasa.

Modelo	SCE	RECM	R ² adj	\bar{E}	AIC	Parámetro	Valor	P > t
2.12	885591	62.186	0.666	2.275	1912.118	γ_0	1.710	<0.0001
2.13	159017	26.294	0.944	21.586	1515.436	γ_1	-0.776	<0.0001
						γ_2	0.439	<0.0001
2.14	13328	7.629	0.995	-0.536	942.757	γ_0	0.347	<0.0001
2.15	6198	5.191	0.997	1.333	765.925	γ_1	1.041	<0.0001
						γ_2	1.023	<0.0001
2.16	16604	6.791	0.980	-	-	δ_0	0.433	<0.0001

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

En el [Cuadro 1.5](#) se presentan los valores obtenidos con la incorporación de variables indicadoras en los sistemas de área basal y volumen ajustados por nivel de densidad inicial.

Cuadro 1.5. Parámetros estimados y estadísticos de ajuste de los modelos con variables indicadoras para los diferentes niveles de densidad y presencia de latifoliadas.

Modelo	SCE	REMC	R ² adj	Parámetro	Valor	P > t
				α_0	2.220	<0.0001
				α_1	0.432	<0.0001
2.18	4245	4.324	0.765	α_2	-23.242	<0.0001
2.19	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
2.21	10229	6.698	0.996	γ_{1A}	1.025	<0.0001
2.22	6445	5.305	0.997	γ_{1M}	-0.016	<0.0001
				γ_{1B}	-0.007	<0.0001
				γ_2	1.094	0.0051

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 1.4](#)). Esta tendencia es atribuible a que el aprovechamiento maderable en la región se realiza mediante el método de desarrollo silvícola (MDS) bajo el método de repoblación de árboles padres (Torres-Rojo *et al.*, 2016), que propicia rodales coetáneos uniespecíficos. Mediante las prescripciones que el método sugiere se ha logrado reducir las proporciones de especies latifoliadas antes del turno de 40 años.

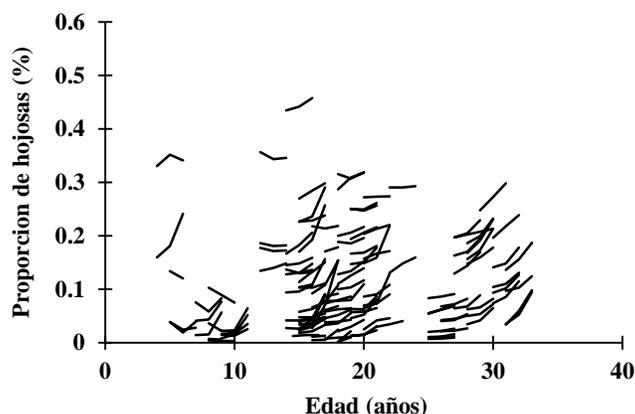


Figura 1.4. Proporción relativa del área basal de latifoliadas por sitio.

Por otra parte, el modelo (1.23) de proyección ajustado para la proporción de latifoliadas (Cuadro 1.6), explicó el 97% de la variabilidad donde τ_0 , obtuvo un valor estimado de 0.538 (estadísticamente significativo). En el reajuste del modelo (1.25) de mortalidad, así como los modelos (1.26) y (1.27) para el área basal con un factor de reducción por presencia de latifoliadas, se encontraron diferencias significativas entre los valores de los parámetros estimados, esto indica que la densidad inicial también tiene un efecto en la proporción de latifoliadas presentes.

Cuadro 1.6. 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.

Modelo	SCE	RECM	R ² adj	Parámetro	Estimación	P > t
2.23	0.066	0.016	0.967	τ_0	0.538	<0.0001
				θ_{1A}	0.024	<0.0001
2.25	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
2.26	4189	4.295	0.769	α_2	-23.110	<0.0001
				α_{3A}	0.005	<0.0001
2.27	179	0.887	0.989	α_{3M}	0.006	<0.0001
				α_{3B}	0.002	<0.0001
				α_4	0.374	<0.0001

En la [Figura 1.5](#) se presentan las predicciones del rendimiento en volumen de pino para los índices de sitio (18, 24, 30, 36) en las tres densidades iniciales definidas (A: 3,000 árboles ha⁻¹, M: 2,000 árboles ha⁻¹; y B: 950 árboles ha⁻¹). Las estimaciones en volumen obtenidas sugieren que en los IS 24, 30 y 36 los rendimientos al final del turno con una densidad inicial media son mayores en comparación a otras densidades evaluadas; en tanto, en el IS 18, los rendimientos son similares para las tres densidades iniciales a lo largo del periodo de proyección.

Estas tendencias pueden deberse a que al presentar una densidad inicial mayor de 2,000 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; por otra parte, en una densidad inicial entre 1,000 y 2,000 árboles ha⁻¹, todos los recursos del sitio son utilizados 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 1,000 árboles ha⁻¹, desaprovecha la capacidad productiva del sitio (Corral-Rivas *et al.*, 2015).

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

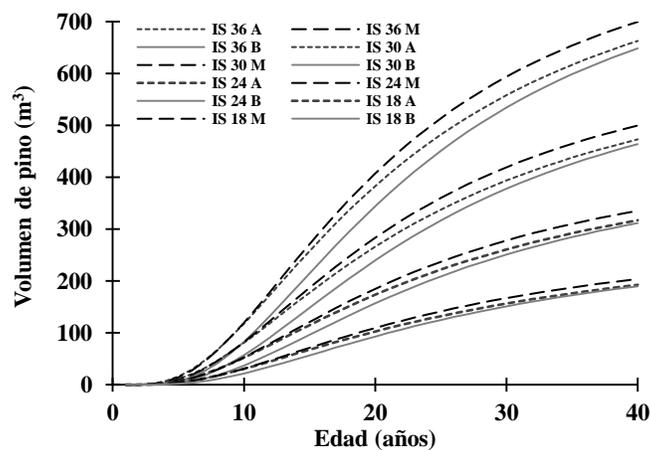


Figura 1.5. Volumen pino proyectado en las densidades, A (3,000 árboles ha⁻¹), M (2,000 árboles ha⁻¹) y B (950 árboles ha⁻¹) para los diferentes índices.

En la [Figura 1.6](#) se presentan los rendimientos en volumen de pino y pino más latifoliadas (proporción inicial de latifoliadas del 5 % a los 5 años) para un IS 36. Se destaca que en este sitio los rendimientos del volumen de pino son mayores que el volumen en 57, 78 y 70 m³ para las densidades A, M y B, respectivamente, esto indica que existe una reducción considerable del área disponible para *P. patula* en los sitios con mayor productividad, lo que hace necesario la aplicación de tratamientos silvícolas para el control de latifoliadas. En lo que respecta a los índices de sitio de 18, 24 y 30, las diferencias en los rendimientos no fueron tan evidentes como en el caso presentado, lo que sugiere que en esos sitios puede o no controlarse el crecimiento de las especies de latifoliadas.

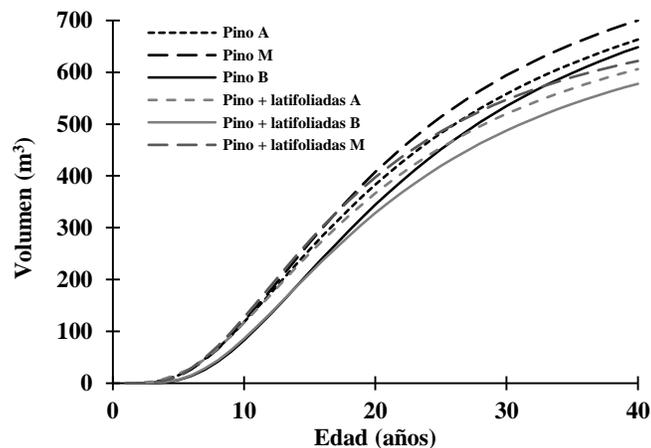


Figura 1.6. Volumen proyectado para las densidades, A (3,000 árboles ha⁻¹), M (2,000 árboles ha⁻¹) y B (950 árboles ha⁻¹) en un índice de sitio (IS) 36.

Los valores mejores del ICA e IMA para la calidad de sitio promedio (IS 30) ([Figura 1.7a](#)) se obtuvieron en una densidad inicial de 2,000 árboles ha⁻¹ para ambos escenarios (sin y con presencia de latifoliadas), aunque los incrementos fueron menores cuando hay presencia de latifoliadas, estos fueron los máximos para ese escenario, lo que sugiere que la densidad inicial de los rodales debe estar entre 1,000 y 2,000 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 3,000, 2,000 y 950 árboles ha⁻¹, respectivamente. Por otra parte, los turnos en volumen de pino considerando la presencia de latifoliadas (5 %) se obtuvieron a los 21, 20 y 23 años ([Figura 1.7b](#)). 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 *Pinus patula*, alcanzando el máximo crecimiento a edades más tempranas.

Para todos los escenarios, los turnos técnicos se alcanzan antes de los 30 años. Sánchez *et al.* (2003) mencionan 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 más baja o se intensifican los aclareos.

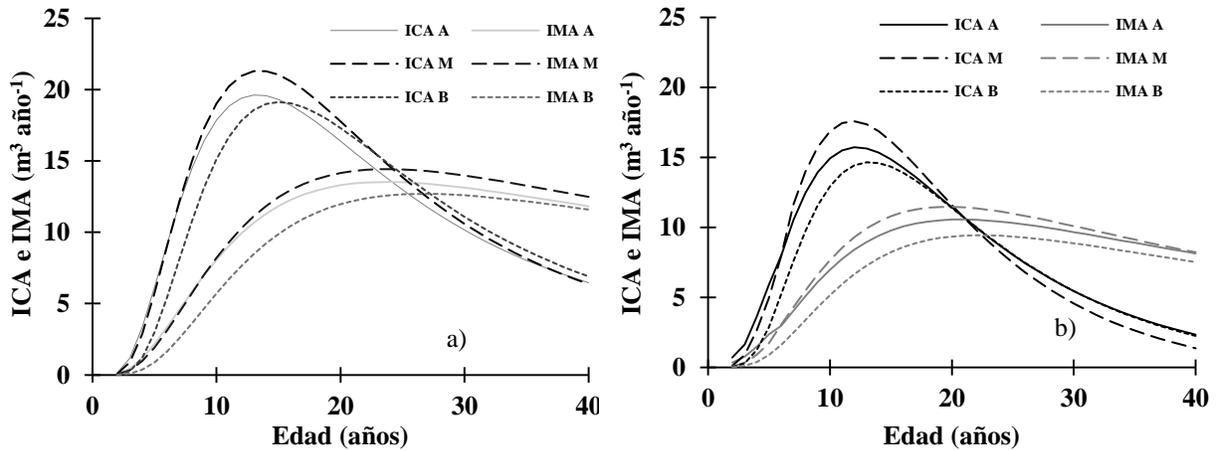


Figura 1.7. Curvas de incremento corriente anual en volumen total (ICA) e incremento medio anual (IMA) para las densidades, A (3,000 árboles ha⁻¹), M (2,000 árboles ha⁻¹) y B (950 árboles ha⁻¹) en un IS 30, donde: (a) ICA e IMA sin presencia de latifoliadas; (b) ICA e IMA con proporción inicial de latifoliadas del 5 %.

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

En la [Figura 1.8](#) se muestran las estimaciones por índice de sitio y niveles de densidad de la acumulación en biomasa, con una proporción del 5 % de latifoliadas a la edad de 5 años y proyectada a la edad del turno (40 años). En la [Figura 1.8b](#), se muestra la acumulación de biomasa total (pino más latifoliadas) misma que es mayor que la biomasa de pino ([Figura 1.8a](#)) 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 h⁻¹ respectivamente, al final del turno (40 años) para los tres niveles de densidad.

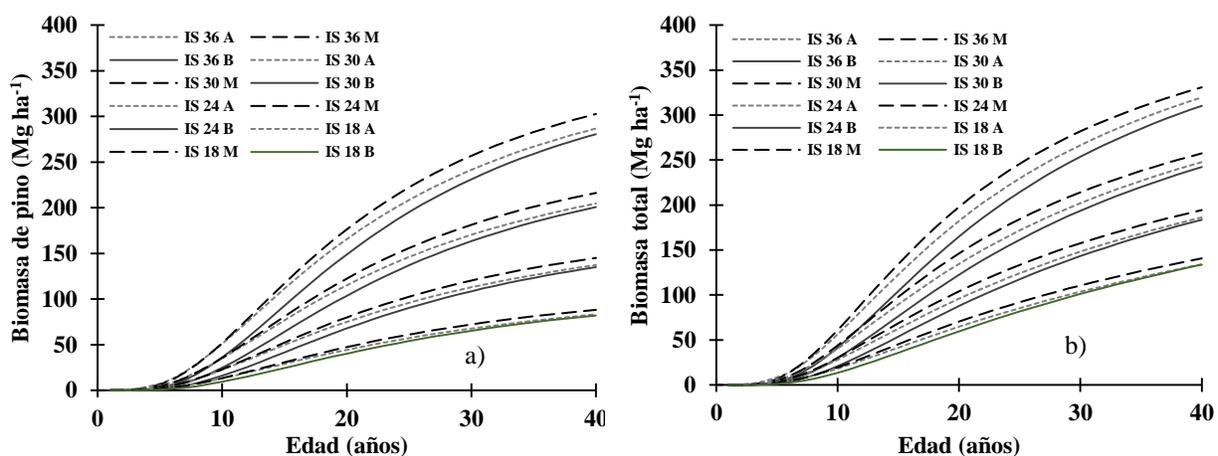


Figura 1.8 Biomasa aérea por índice de sitio, para las densidades, A (3,000 árboles ha⁻¹), M (2,000 árboles ha⁻¹) y B (950 árboles ha⁻¹), donde: (a) biomasa de pino sin presencia de latifoliadas y (b) biomasa total (pino más latifoliadas) con una proporción inicial del 5 % de latifoliadas.

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 a las áreas destinadas a la conservación.

1.6 CONCLUSIONES

El manejo de la densidad inicial es fundamental para maximizar el rendimiento maderable. De esta densidad inicial dependen fuertemente la aplicación en tiempo y la forma de los tratamientos silvícolas prescritos en el programa de manejo. Lograr redistribuir el espaciamiento de los árboles y la adecuada ocupación del sitio permitirá mejorar la producción total en volumen y aprovechar la productividad potencial de *Pinus patula*.

Los turnos técnicos estimados bajo los diferentes escenarios planteados son menores que el turno de 40 años utilizado en la zona, lo cual, sin duda aviva el debate del ¿por qué seguir utilizando turnos largos, pudiendo recortar el turno absoluto e intensificar los tratamientos silvícolas?. Esto incrementaría la rentabilidad de los rodales al permitir mayores flujos de madera en menos tiempo. Para lograr esto se requiere una desregulación de las actividades de cultivo que permita al silvicultor tener la libertad para aplicar los tratamientos cuando estos sean silvícola y financieramente viables.

CAPÍTULO II. DISTRIBUCIÓN DIAMÉTRICA DE *Pinus patula* EN BOSQUES MANEJADOS: ENFOQUES PARA SU ESTIMACIÓN

2.1 RESUMEN

La estructura de una masa forestal proporciona información relevante sobre el número de árboles por clase diamétrica, tipo de productos a obtener y el valor económico, con lo cual el administrador forestal puede definir la rotación económica óptima para los rodales y detectar el exceso o la falta de productos específicos. Se utilizaron y compararon dos enfoques para estimar la distribución diamétrica de *Pinus patula* en bosques manejados. Los datos utilizados en el ajuste corresponden a 309 distribuciones diamétricas, provenientes de tres inventarios (2013, 2014 y 2016) realizados en sitios permanentes de 400 m², en el Sitio de Monitoreo Intensivo de Carbono (SMIC) en Hidalgo. La distribución diamétrica de 43 sitios se estimó mediante el enfoque de proyección de tabla de rodal (STP), la función de densidad de probabilidad (fdp) Weibull en su forma original y definiendo el diámetro mínimo del sitio (percentil 0) (fdp Weibull p0D). Para evaluar la concordancia de la distribución observada con la teórica, se utilizó el estadístico de Kolmogorov-Smirnov (KS) a un $\alpha=0.05$ y el Índice de Error (IE). Los resultados obtenidos para KS indicaron que 31 de 43 distribuciones obtenidas con STP siguieron la misma distribución que la observada, 8 de los obtenidos con la fdp Weibull en su forma original y 18 de la fdp Weibull p0D. En lo que respecta al volumen total (celulósicos + secundario + primario) los resultados indicaron que el STP tiende a ser más conservador al estimar las existencias maderables, mientras que utilizar la fdp Weibull en su forma original o definiendo un diámetro mínimo genera estimaciones similares entre sí y con el volumen observado.

Palabras clave: diámetro mínimo, distribución de productos maderables, tabla del rodal, Weibull.

2.2 ABSTRACT

The structure of a nature forest provides relevant information on the number of trees per diameter class, type of products to obtain and their economic value, with this information the forester can define the optimal economic rotation for the stands and detect the excess or lack of specific products. The aim was test and compare two approaches to estimate the diametric distribution of *Pinus patula* in managed forests. The data used for the model fit correspond to 309 diameter distributions from three inventories (2013, 2014 and 2016) in permanent sites of 400 m², at the Intensive Carbon Monitoring Site (SMIC) in Hidalgo. The diameter distribution of 43 plots was estimate using the stand table projection approach (STP), the probability density function (fdp) Weibull in his original form and defining the minimum site diameter (percentile 0) (fdp Weibull p0D), the concordance from the observed distribution with the theory distribution was evaluated with the Kolmogorov-Smirnov statistic (KS) with $\alpha= 0.05$ and the Error Index (IE). The results obtained for KS indicated that 31 of 43 distributions obtained with STP followed the same distribution as that observed, while the Weibull distribution in his original form only 8 and with of the Weibull distribution p0D were 18 sites. Regarding the total volume (cellulosic + secondary + primary) the results indicated that the STP tends to be more conservative when estimating timber stocks, while using the Weibull distribution in his original form or with a minimum diameter defined both approaches generated estimates like each other and with the observed volume.

Keywords: minimum diameter, distribution of timber products, stand table, Weibull

2.3 INTRODUCCIÓN

Describir el crecimiento y el rendimiento del bosque, así como la respuesta a tratamientos silviculturales son parte de los objetivos principales de la investigación forestal. Los modelos de predicción y proyección son herramientas esenciales que los silvicultores utilizan para pronosticar el crecimiento de las masas forestales y facilitar la selección de las mejores alternativas de manejo en función de los objetivos establecidos (De la Fuente *et al.*, 1998; Gómez-García, 2013).

Con base en el nivel de detalle de la información, estos modelos pueden clasificarse como de totalidad del rodal, donde la unidad mínima de modelaje es el rodal, y modelos para árbol individual (dependientes o independientes de la distancia), cuyo enfoque es el más detallado, porque emplea al árbol como unidad básica para el modelado (Peng, 2000).

En el centro de la clasificación están los modelos de distribución por clases de tamaño que forman un puente entre la generalización a nivel de rodal y modelos de árbol individual (Nord-Larsen y Cao, 2006) y tienen como unidad básica la clase diamétrica. El número de árboles por clase se estima en función del tamaño relativo (área basal del árbol sobre el área basal promedio por árbol), y el crecimiento del diámetro es proyectado para cada clase de diámetro. Este método es conocido como proyección de tabla del rodal (stand table projection, STP) (Clutter y Jones, 1980; Pienaar y Harrison, 1988), o bien mediante una función de distribución de probabilidades (fdp) (Hafley y Schreuder, 1977).

El enfoque de STP utiliza datos de inventario donde se tienen frecuencias diamétricas como datos de entrada, además de datos generales de estado del rodal (IS, NA, HD, AB). Sin embargo, es frecuente que solo se cuente con estos últimos, optando por “recuperar” la estructura diamétrica a partir de estas medidas y una función de distribución de probabilidades (fdp). La fiabilidad de este enfoque para reproducir la distribución diamétrica de los rodales dependerá de cómo la fdp se ajusta a la distribución diamétrica observada y con qué precisión se pueden estimar los parámetros para predecir la frecuencia de los árboles por categorías diamétricas (Merganič and Sterba, 2006).

Conocer el número de árboles por categoría diamétrica en un rodal proporciona información detallada sobre su estructura, la mezcla de productos y su valor (Cao 2004; Nord-Larsen y Cao, 2006), con esto el administrador forestal puede definir la rotación económica óptima de los rodales y detectar el exceso o la falta de productos específicos (Bueno-López, 2011). En el último caso,

definir los tratamientos necesarios en aras de realizar la redistribución y manipulación del espaciamiento de los árboles, para favorecer el crecimiento de las especies de interés (Mead, 2005).

En la literatura forestal es posible encontrar un gran número de fdp empleadas para describir las distribuciones diamétricas, las más comunes se basan en la distribución Normal, Weibull, Gamma, Log-Normal, SB de Johnson, Weibull inversa y la distribución Burr tipo III (Vanclay, 1994).

De todas las anteriores, la distribución Weibull (Weibull, 1951) ha sido de gran utilidad en diversas ramas de la ciencia y en especial dentro de la dasonomía, esto dada su simplicidad y flexibilidad para representar diferentes tendencias de distribución, además de que sus parámetros se correlacionan fácilmente con las variables de estado del rodal, lo que permite realizar proyecciones para edades futuras (Duan *et al.*, 2013; Miranda *et al.*, 2018); el ajuste ha sido realizado mediante diferentes métodos (Torres-Rojo *et al.*, 2000) y donde el enfoque de estimación de parámetros a través de percentiles ha sido uno de los más empleados.

La proyección de tabla de rodal (STP) ha sido empleada por distintos autores bajo diferentes métodos para asignar la mortalidad a las clases diamétricas y proyectar el crecimiento; Clutter y Jones (1980) y Pienaar y Harrison (1988) usaron el tamaño relativo, Nepal y Somers (1992) se basaron en un modelo de crecimiento de diámetro implícito desarrollado a partir de la distribución de Weibull, Borders *et al.* (2004) emplearon un algoritmo bayesiano y Cao (2007) empleó modelos de crecimiento de diámetro y supervivencia de árbol individual.

En México no se tiene reportes del uso de este enfoque, por lo cual el objetivo de este trabajo fue contrastar la distribución diamétrica generada a través de la distribución de probabilidades Weibull de tres parámetros y la obtenida mediante el enfoque de proyección de tabla del rodal empleando el tamaño relativo.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Área de estudio y datos dasométricos

Los datos utilizados corresponden a 309 distribuciones diamétricas, provenientes de tres inventarios (2013, 2014 y 2016) realizados en sitios permanentes de 400 m², dentro del sitio de monitoreo intensivo de carbono (SMIC) en Atopixco, Hidalgo. Los datos recolectados fueron: altura total (H, m), diámetro normal (DN, cm), número de árboles vivos (NA) y la edad (años) fue obtenida a nivel rodal en campo y de los programas de manejo forestal.

Las variables de estado empleadas fueron: altura promedio de los árboles dominantes (HD, m), área basal (AB, m² ha⁻¹), número de árboles vivos (NA, ha⁻¹), el diámetro cuadrático (Dq), que corresponde al diámetro promedio dado por: $Dq = \sqrt{\frac{40000}{\pi} \cdot \frac{AB}{NA}}$ y el volumen con corteza por tipo de producto estimado con la ecuación 2.1 (Fang *et al.*, 2000) reportada en el Sistema Biométrico Forestal correspondiente a la Unidad de Manejo Forestal 1302 Zacualtipán-Molango (Vargas-Larreta *et al.*, 2017):

$$\begin{aligned}
 V_{icc} &= c_1^2 H^{(k/b_1)} [b_1 r_0 + (I_1 + I_2)(b_2 - b_1)r_1 + I_2(b_3 - b_2)\alpha_1 r_2 - \beta(1 - q)^{k/B} \alpha_1^{I_1+I_2} \alpha_2^{I_2}] \\
 c_1 &= (\alpha_0 D^{\alpha_1} H^{(\alpha_2 - K)/b_1} / [b_1(r_0 - r_1) + b_2(r_1 - \alpha_1 r_2) + \beta_3 \alpha_1 r_2])^{0.5} \\
 \beta &= b_1^{1-(I_1+I_2)} b_2^{I_1} b_3^{I_2} \\
 \alpha_1 &= (1 - p_1)^{\frac{(b_2 - b_1)k}{b_1 b_2}}, \alpha_2 = (1 - p_2)^{\frac{(b_3 - b_2)k}{b_2 b_3}} \\
 r_0 &= \left(1 - \frac{hst}{H}\right)^{k/b_1}, r_1 = (1 - p_1)^{k/b_1}, r_2 = (1 - p_2)^{k/b_2} \\
 I_1 &= \begin{cases} 1 & \text{si } p_1 \leq q \leq p_2 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}, I_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } p_2 \leq q \leq 1 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}, p_1 = \frac{b_1}{H} \text{ y } p_2 = \frac{b_2}{H}, k = \frac{\pi}{40000}
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

Donde α_0 : 0.0000253, α_1 : 1.6939421, α_2 : 1.4175090, b_1 : 0.0000039, b_2 : 0.0000314, b_3 : 0.0000253, p_1 : 0.0314903, p_2 : 0.5202440.

2.4.2 Modelos de proyección de variables del rodal

Los modelos de proyección para las variables HD, AB, V, se retomaron del sistema de crecimiento y rendimiento generado en el capítulo anterior (ver capítulo I).

$$HD_2 = HD_1 \frac{[1 + \exp(4.098618) \cdot \exp(-1.496481 \cdot \ln(E_1))]}{[(1 + \exp(4.098618) \cdot \exp(-1.496481 \cdot \ln(E_2)))]} \tag{2.31}$$

$$AB_2 = AB_1 \frac{HD_2^{0.308058} \cdot \exp\left(\frac{-19.5276 + 0.003957 \cdot NA_2 + 0.413573 \cdot HD_2}{E_2}\right)}{HD_1^{0.308058} \cdot \exp\left(\frac{-19.5276 + 0.003957 \cdot NA_1 + 0.413573 \cdot HD_1}{E_1}\right)} \quad (2.32)$$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{AB_2}{AB_1}\right)^{1.041085} \cdot \left(\frac{HD_2}{HD_1}\right)^{1.023312} \quad (2.33)$$

Para estimar la mortalidad se usaron los modelos siguientes:

$$NA_1 = 1889.294 \cdot \exp(0.011 \cdot (E_2 - E_1)) \quad (2.34)$$

$$NA_2 = NA_1 \cdot \exp(0.011 \cdot (E_2 - E_1)) \quad (2.35)$$

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).

2.4.3 Tabla de proyección de rodal

2.4.3.1 Hipótesis sobre el tamaño relativo del árbol

Al contar con un inventario de diámetros de árboles obtenido a partir de las mediciones de una parcela, el tamaño relativo del i -ésimo árbol se define como b_i/\bar{b}_i donde b_i es el área basal del i -ésimo árbol y \bar{b}_i es el área basal promedio por árbol. Si n árboles sobrevivieron de la edad E_1 a la E_2 , y tanto b_{i1} como b_{i2} fueron las áreas basales del i -ésimo árbol sobreviviente, \bar{b}_1 y \bar{b}_2 representan el área basal promedio por árbol de los n sobrevivientes a las edades E_1 y E_2 respectivamente.

Como hipótesis inicial se establece que el tamaño relativo de los árboles sobrevivientes permanece constante a lo largo del tiempo, lo que se expresa como:

$$\frac{b_{2i}}{\bar{b}_2} = \frac{b_{1i}}{\bar{b}_1} \quad (2.36)$$

Clutter y Jones (1980) formularon el modelo siguiente:

$$\frac{b_{2i}}{\bar{b}_2} = \left(\frac{b_{1i}}{\bar{b}_1}\right)^{\left(\frac{E_2}{E_1}\right)^{\beta_0}} \quad (2.37)$$

Donde E_1, E_2 : edad del rodal al inicio y fin del periodo, b_{1i}, b_{2i} : área basal del i -ésimo árbol sobreviviente a la edad E_1 y E_2 ; $\bar{b}_{1i}, \bar{b}_{2i}$: promedio del área basal de los sobrevivientes a la edad E_1 y E_2 ; β_0 : parámetro a estimar a partir de la remediación.

La mortalidad total se identifica en la tabla de rodal inicial, para este propósito se supone que la probabilidad de que un árbol dado muera durante el intervalo de proyección es inversamente proporcional a su tamaño relativo. Al morir un árbol, es posible calcular una probabilidad para su tamaño relativo particular y estas probabilidades se utilizan para asignar la mortalidad total observada o prevista a la lista inicial de árboles o a la tabla de rodal.

2.4.4 Sistema de crecimiento implícito

2.4.4.1 Función de distribución de probabilidades Weibull

La función de densidad de probabilidad que define a la distribución Weibull de tres parámetros es la siguiente (Bailey y Dell, 1973; Cao, 2004):

$$f(x) = \frac{a}{b} \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} \quad (a \leq x < \infty); = 0, \text{ de otra forma} \quad (2.938)$$

Donde a : es el parámetro de localización, b : de escala, c : de forma.

La distribución por categoría diamétrica se estima mediante la distribución acumulada de forma cerrada siguiente (Bailey y Dell, 1973; Clutter *et al.*, 1983):

$$f(x) = \frac{a}{b} \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} \quad (a \leq x < \infty); = 0, \text{ de otra forma} \quad (2.390)$$

Las variables de predicción utilizadas con frecuencia son: la altura total (H , m), diámetro normal (DN , cm), área basal por hectárea (AB , $m^2 \text{ ha}^{-1}$) y diámetro cuadrático (Dq), mientras que los percentiles de la distribución diamétrica que han presentado gran eficiencia son:

$$\rho_0 = \alpha_0 \cdot Dq^{\alpha_1} \cdot HD^{\alpha_2} E^{\alpha_3} \quad (2.11)$$

$$\rho_{65} = \gamma_0 \cdot Dq^{\gamma_1} \quad (2.12)$$

$$\rho_{93} = \tau_0 \cdot Dq^{\tau_1} \quad (2.13)$$

Donde ρ_0, ρ_{63} y ρ_{93} corresponden al percentil cero, 63 y 93, $\alpha_i, \gamma_i, \tau_i$: parámetros a estimar en el sistema de percentiles.

De acuerdo con Clutter *et al.* (1983) para modelar la distribución de clases diamétricas, el parámetro a debe ser positivo, la función de densidad para un intervalo está dada por:

$$P(L < X < U) = e \left[-\left(\frac{L-a}{b}\right)^c - \left(\frac{U-a}{b}\right)^c \right] \quad (2.404)$$

Donde P : es la proporción de árboles de la clase diamétrica asignada, L, U : límite inferior y superior, e : función exponencial, X : centro de la categoría diamétrica.

Los parámetros de la fdp Weibull fueron estimados mediante el enfoque de momentos (Pienaar y Rheney, 1993), y esta metodología ha sido evaluada generando resultados satisfactorios (Santiago-García *et al.*, 2014; Quiñonez-Barraza *et al.*, 2015; Parra-Piedra *et al.*, 2017). Las ecuaciones utilizadas para obtener los parámetros fueron las siguientes:

El parámetro de localización a :

$$a = \begin{cases} p_0 - 2.5 \text{ si } P_0 \geq 5 \text{ cm} \\ \frac{p_0}{2} \text{ de otra forma} \end{cases} \quad (2.41)$$

Parámetro c :

$$c = \ln \left[\frac{(-\ln(1 - 0.93))}{(-\ln(1 - 0.65))} \right] / \ln \left[\frac{(p93 - a)}{(p65 - a)} \right] \quad (2.426)$$

El Parámetro b se estimó mediante la expresión del segundo momento de la distribución Weibull:

$$b = a \times \frac{\Gamma_1}{\Gamma_2} + \left[\left(\frac{a}{\Gamma_2} \right)^2 \times (\Gamma_1^2 - \Gamma_2) + \frac{Dq^2}{\Gamma_2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

Donde $\Gamma_1 = \Gamma \left(1 + \frac{1}{c} \right)$, $\Gamma_2 = \Gamma \left(1 + \frac{2}{c} \right)$, $\Gamma(\cdot)$ es la función Gamma.

2.4.4.2 Variables de estado por categoría diamétrica

El número de árboles por categoría diamétrica fue estimado mediante la ecuación siguiente:

$$NA_{(CD)} = P(L < X < U) \times NAHA \quad (2.438)$$

Donde $NA_{(CD)}$: representa la distribución diamétrica por hectárea, $P(L < X < U)$: función de densidad de probabilidad para el intervalo de esa misma categoría, $NAHA$: número de árboles por hectárea residuales a una edad dada.

2.4.4.3 Modelo de proyección del $p0$

Para comparar los dos enfoques en condiciones similares se optó por generar un modelo de proyección del percentil cero ($p0$) con el enfoque de diferencia algebraica (ADA), que remplaza un parámetro arbitrario del modelo base con la solución de la condición inicial. De acuerdo con Santiago-García *et al.* (2014) este percentil refleja el diámetro mínimo del rodal, y en este estudio es conocido porque se cuenta con los inventarios de las tres mediciones

La ecuación de diferencia algebraica que definió la proyección del diámetro mínimo ($p0_2$) presentó la forma siguiente:

$$p0_2 = f(p0_1, Dq_1, Dq_2, HD_1, HD_2, E_1, E_2, \bar{\alpha}_1) \quad (2.1944)$$

Donde $p0_2, Dq_2, HD_2$: el diámetro mínimo, diámetro cuadrático y altura dominante a la E_2 (edad de proyección), $p0_1, Dq_1, HD_1$: diámetro mínimo, diámetro cuadrático y altura dominante a la E_1 (edad inicial), $\bar{\alpha}_1$: vector de parámetros de regresión.

Para definir la ecuación de diferencia algebraica se retomó la ecuación (2.11) y fue reescrita (2.20), de esta ecuación se despejó el parámetro α_0 (2.21) y se sustituyó en la ecuación original (2.22).

$$\rho0_1 = \omega_0 \cdot Dq_1^{\omega_1} \cdot HD_1^{\omega_2} \cdot E_1^{\omega_3} \quad (2.20)$$

$$\alpha_0 = \frac{\rho0_1}{Dq_1^{\omega_1} \cdot HD_1^{\omega_2} \cdot E_1^{\omega_3}} \quad (2.21)$$

$$\rho0_2 = p0_1 \cdot \left(\frac{Dq_2}{Dq_1}\right)^{\omega_1} \cdot \left(\frac{HD_2}{HD_1}\right)^{\omega_2} \cdot \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^{\omega_3} \quad (2.452)$$

El valor de $\rho0_1$ se definió como el valor de la categoría mínima con presencia de árboles en la distribución inicial y $\rho0_2$ se obtuvo al proyectar el valor del diámetro mínimo ($\rho0_1$) con la ecuación (2.22), para fines de diferenciación este procedimiento se nombró fdp Weibull $p0D$.

2.4.5 Distribución diamétrica a partir de los enfoques evaluados

Para ejemplificar el enfoque de proyección de tabla de rodal y la fdp Weibull se seleccionó un sitio de 16 años con una densidad inicial de 1,400 árboles ha^{-1} , se utilizó el inventario de árboles ha^{-1} en categorías diamétricas (CD) de 5 cm presentes en la primera y tercera medición, lo que generó dos condiciones: la inicial y observada (final). Por otra parte, las variables de estado de la condición inicial AB_1, DQ_1 y HD_1 se proyectaron tres años con los modelos (2.2, 2.3 y 2.4) y el

número de árboles (NA_2) se retomó de la tercera medición, con esta información se aplicó la fdp Weibull para obtener el número de árboles por categoría diamétrica, mientras que el enfoque STP utilizó el inventario inicial, ambas distribuciones fueron contrastadas con la observada (tercera medición).

2.4.6 Evaluación de la concordancia de las distribuciones simuladas y estimación del volumen total y por tipo de producto

En la comparación de los enfoques se eligieron 43 sitios que presentaron mortalidad durante el periodo de tres años, las estadísticas descriptivas de estos se muestran en el [Cuadro 2.1](#). La distribución diamétrica de cada uno de los sitios se obtuvo con el procedimiento descrito en el apartado anterior.

Cuadro 2.1. Estadística descriptiva de los sitios utilizados en la comparación de los enfoques.

Variable	n	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
E_1		16.976	5.561	5	31
E_2		19.976	5.561	8	34
HD_1		18.246	4.885	6.15	27.125
DQ_1	43	16.327	5.536	6.349	26.854
AB_1		21.784	8.460	1.693	35.615
NA_1		1211.046	679.576	425	2850
NA_2		1145.348	633.660	375	2625

Donde E_1 : edad inicial, E_2 : edad observada después de tres años, HD_1 : altura dominante inicial, DQ_1 : diámetro cuadrático inicial, AB_1 : área basal inicial, NA_1 : número de árboles inicial, NA_2 : número de árboles observados después de tres años.

En la comparación de las estimaciones de volumen se utilizó el modelo de Fang *et al.* (2000) ajustado para la región por Vargas-Larreta *et al.* (2017), el volumen promedio por tipo de producto de cada una de las categorías diamétricas se muestra en el [Cuadro 2.2](#).

Cuadro 2.2. Volumen promedio (m³) por tipo de producto de cada categoría diamétrica.

CD (cm)	Celulósico		Secundario	Primario
	≥10	<20 cm	> 20 < 25 cm	> 25 cm
5	0		0	0
10	0.028		0	0
15	0.129		0	0
20	0.163		0.160	0
25	0.150		0.160	0.246
30	0.140		0.150	0.581
35	0.124		0.132	0.884
40	0.1278		0.136	1.539

2.4.7 Técnica y prueba de bondad de ajuste

Para el ajuste de la ecuación (2.8) se emplearon 10,201 pares de datos no traslapados con el método de mínimos cuadrados ordinarios; los parámetros de la fdp Weibull fueron estimados mediante el método de momentos (Pienaar y Rheney, 1993). Para evaluar la bondad de ajuste se estimó el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y se verificó la significancia de los estimadores de los parámetros ($Pr>|t|$) con un valor crítico $\alpha=0.05$.

En la evaluación y comparación entre distribuciones diamétricas se empleó el estadístico de Kolmogorov-Smirnov (KS), que de acuerdo con Hassani y Sirimal (2015) compara las frecuencias acumuladas teóricas con las observadas y calcula un valor de diferencia máxima entre ambas distribuciones dada por la ecuación siguiente:

$$D_n = \max_x |F_n(x) - F(x)| \quad (2.463)$$

Donde D_n : es el valor del estadístico KS, $F_n(x)$: distribución de la frecuencia acumulada observada, $F(x)$: probabilidad de la frecuencia acumulada teórica para el sitio, bajo un nivel de significancia de 5%.

Además, se estimó el índice de error (IE) ponderado por el área basal (AB) de las categorías diamétricas por sitio (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2015), que indica el número de árboles mal

estimados en las clases diamétricas (Reynolds *et al.*, 1988; Vallejos-Barra *et al.*, 2009), el enfoque de estimación mejor presentará el menor índice de error.

$$IE = \frac{\sum_i \sum_j |AB_{ij}(n_{ij} - \hat{n}_{ij})|}{m} \quad (2.474)$$

Donde n_{ij} , \hat{n}_{ij} : número de árboles observado y predicho en las clases diamétricas para la parcela i , AB_{ij} : área basal de la clase diamétrica j para la parcela i y m es el número de sitios.

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1 Proyección de tabla de rodal (STP)

El modelo que define el cambio en el tamaño relativo del árbol (2.8) mostró buen ajuste ($R^2_{adj} = 0.856$), el parámetro estimado β_0 fue estadísticamente significativo con un valor de 0.715, similar al obtenido por Eros y Von Gadow (1996) en plantaciones sin aclareo de *Acacia mangium* (0.785). El valor positivo obtenido, indica que la contribución relativa del área basal en la posición futura aumentará para árboles más grandes que el tamaño relativo promedio y disminuirá para árboles más pequeños que el tamaño relativo promedio (Knowe, 1997). Para ejemplificar lo anterior se eligieron dos tamaños relativos iniciales de 0.2 y 1.2, mismos que fueron proyectados en diferentes periodos de tiempo, el tamaño relativo del primero va disminuyendo a lo largo del tiempo, mientras que el del segundo es creciente ([Cuadro 2.3](#)).

Cuadro 2.3. Valores de $(E_1/E_2)^\beta$ para diferentes edades iniciales (E_1) y edades proyectadas (E_2) para un valor de $\beta=0.715438$.

E_1	E_2	$(E_1/E_2)^\beta$	TR ₁	TR ₂
4	10	0.519	0.2	0.434
8	18	0.560	0.2	0.406
12	26	0.575	0.2	0.396
16	34	0.583	0.2	0.391
4	10	0.519	1.2	1.099
8	18	0.560	1.2	1.107
12	26	0.575	1.2	1.111
16	34	0.583	1.2	1.112

Donde TR₁: tamaño relativo inicial, TR₂: tamaño relativo proyectado.

2.5.2 Distribución Weibull de tres parámetros

Los estadísticos de bondad de ajuste para los percentiles p_0 , p_{65} y p_{93} empleados en la caracterización de la fdp Weibull resultaron adecuados, con valores para el R^2_{adj} de 0.91 a 0.97 con la significancia estadística de todos los parámetros estimados, en tanto que los modelos de predicción y proyección para el percentil p_0 explicaron del 90 al 98 % de la variabilidad del

diámetro mínimo, además de que todos los parámetros fueron estadísticamente significativos (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros de los modelos de percentiles para la fdp Weibull

Modelo	SCE	CME	R ² _{adj}	Parámetro	Valor	EE	Valor t	Pr > t
(12) <i>p</i> 0	878.1	2.879	0.911	α_0	0.320	0.032	9.98	<.0001
				α_1	1.716	0.051	33.18	<.0001
				α_2	-0.609	0.069	-8.73	<.0001
				α_3	0.174	0.045	3.85	0.0001
(13) <i>p</i> 65	334.9	1.0908	0.974	γ_0	1.006	0.031	32.34	<.0001
				γ_1	1.030	0.010	0.01	<.0001
(14) <i>p</i> 93	1352.7	4.406	0.921	τ_0	1.866	0.090	20.66	<.0001
				τ_1	0.896	0.016	55.43	<.0001
(21) <i>p</i> 0 ₁	529.8	2.795	0.901	ω_0	0.34542	0.0290	11.89	<.0001
				ω_1	1.634179	0.0578	28.27	<.0001
(23) <i>p</i> 0 ₂	55.7	0.292	0.989	ω_2	-0.5136	0.0668	-7.69	<.0001
				ω_3	0.131552	0.0447	2.94	0.0037

Donde SCE: suma de cuadrados del error, CME: cuadrado medio del error, R²_{adj}: coeficiente de determinación ajustado, EE: error estándar, *p*0, *p*65, *p*93: percentil cero, 65 y 93, $\alpha_i, \gamma_i, \tau_i$: parámetros estimados mediante regresión no lineal.

2.5.3 Distribución diamétrica a partir de los enfoques evaluados

La estructura inicial del sitio de 15 años empleado para la generación y comparación de las distribuciones se presenta en la [Figura 2.1](#), en la que se muestra una concentración unimodal de individuos en las categorías diamétricas de 10 y 15 cm, con un ligero sesgo hacia las categorías menores de 5 cm.

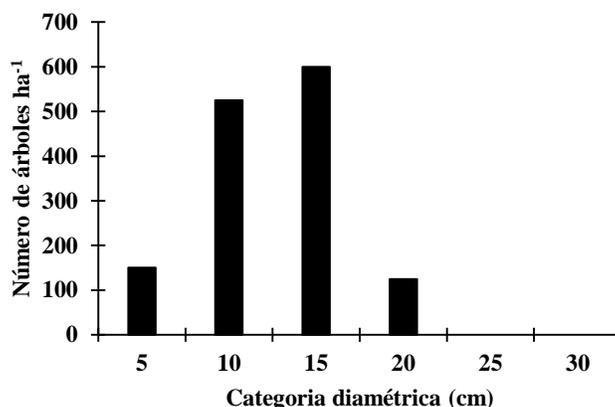


Figura 2.1. Distribución diamétrica a la edad de 15 años.

Las estimaciones realizadas mediante los modelos de proyección para las variables de estado (HD, AB) para un periodo de tres años se muestran en el [Cuadro 2.5](#), se destaca la eficiencia de los modelos de proyección al estimar valores similares a los observados.

Cuadro 2.5. Variables de estado del sitio seleccionado a los 16 años para tres condiciones.

Variables	Inicial	Observada (final)	Proyectada
E (años)	16	19	19
HD (m)	16.475	19.675	18.522
Dq (cm ²)	12.938	15.414	14.333
AB (m ²)	18.406	24.260	20.974
NA (árboles ha ⁻¹)	1400	1300	1354

La aplicación del enfoque STP se ejemplifica en el [Cuadro 2.6](#), el cual partió de un inventario en categorías diamétricas de 5 cm (0.05 m), se estimó el área basal de cada una, por hectárea y el área basal promedio, posteriormente se estimó el tamaño relativo por categoría diamétrica y se realizaron operaciones aritméticas que se indican en las columnas, hasta obtener el porcentaje de mortalidad de cada categoría diamétrica y realizar los ajustes respectivos por mortalidad. Mientras que el [Cuadro 2.7](#) muestra la proyección de la tabla del rodal, las operaciones se indican en cada columna, el crecimiento en diámetro no fue significativo para que los árboles cambiaran de categoría diamétrica. El enfoque de STP será adecuado para determinar el número de árboles que mueren durante ese intervalo de tiempo con estimaciones biológicamente coherentes.

Cuadro 2.6. Asignación de la mortalidad predicha a la tabla de rodal basado en la supervivencia observada.

CD (m) (1)	Na árboles ha ⁻¹ (2)	Ab por CD (m ²) (3)	Ab ₁ (m ² ha ⁻¹) (4)	Ab ₁ /Āb ₁ (5)	(5) / Σ (5) (6)	(2) / Σ (2) (7)	(6·7) (8)	(8) / Σ (6·7) (9)	Mortalidad (125*(9)) (10)	Supervivientes árboles ha ⁻¹ (2)-(10)
0.05	150	0.002	0.295	6.893	0.645	0.107	0.069	0.422	42	108
0.10	525	0.008	4.123	1.723	0.161	0.375	0.060	0.369	37	488
0.15	600	0.018	10.603	0.766	0.072	0.429	0.031	0.187	19	581
0.20	125	0.031	3.927	0.431	0.040	0.089	0.004	0.022	2	123
0.25	0	0.049	0	0.276	0.026	0	0.000	0.000	0	0
0.30	0	0.071	0	0.191	0.018	0	0.000	0.000	0	0
Total	1400		18.682						100	1300
	Āb ₁	0.014								

Cuadro 2.7. Proyección de la tabla de rodal basado en el tamaño relativo.

Clases m ²	Na (árboles ha ⁻¹)	Ab por CD (m ²)	Ab ₂ (m ² ha ⁻¹)	$(2) \cdot \left(\frac{(3)}{\bar{Ab}_1} \right)^{\left(\frac{E_2}{E_1} \right)^{\beta_0}}$	$\frac{(2)}{\bar{Ab}_1}$	$(\Sigma (4)) \cdot \frac{(6)}{(2)}$	DN (m) $\left(\frac{(7) \cdot (4)}{\pi} \right)^{0.5}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
0.05	108	0.002	0.212	12.152	0.008	0.001	0.046
0.10	488	0.01	3.834	263.787	0.191	0.008	0.102
0.15	581	0.02	10.272	785.901	0.569	0.020	0.161
0.20	123	0.03	3.858	318.257	0.230	0.039	0.223
Total	1300		18.175				
	\bar{Ab}_1	0.014					

Para la comparación del enfoque de proyección de tabla de rodal (STP) y la fdp Weibull en sus dos versiones, se retomaron los datos presentados anteriormente, que corresponden a la distribución diamétrica de la condición inicial, así como las variables de estado de la condición inicial y proyectada, además del número de árboles ha^{-1} de la condición observada.

La [Figura 2.2](#) muestra la distribución por categorías diamétricas de los 1300 árboles ha^{-1} observados y estimados a la edad de 19 años. Al contrastar la distribución observada, con la obtenida mediante el enfoque de STP, la fdp Weibull y la fdp Weibull p0D, se observó para el primer caso, que el enfoque STP se apegó a la forma de la distribución observada, sin embargo, estimó una cantidad mayor de individuos en las categorías de 5, 10 y 15 cm, mientras que en la categoría de 25 y 30 cm predijo menos de los observados.

La fdp Weibull estimó la existencia de 16 árboles ha^{-1} en la categoría de 5 cm, cuando la condición observada indica la existencia de 75, en tanto que para las categorías siguientes el comportamiento fue similar al mostrado por la STP. Por último, la Weibull p0D mostró la presencia de 66 árboles en la categoría de 5 cm, valor cercano al observado (75), y para las categorías de 15 y 20 cm fue más conservadora que las dos distribuciones anteriores. El definir la categoría mínima para la fdp Weibull mejoró considerablemente las predicciones de número de árboles por categoría diamétrica, porque condicionó a la función a retomar un estado inicial específico. El uso de la fdp Weibull ayuda a generar diferentes estructuras diamétricas de acuerdo con la calidad de los sitios (IS) y con las diferentes tasas de mortalidad, algo que es importante para generar escenarios de productividad y aprovechamiento maderable.

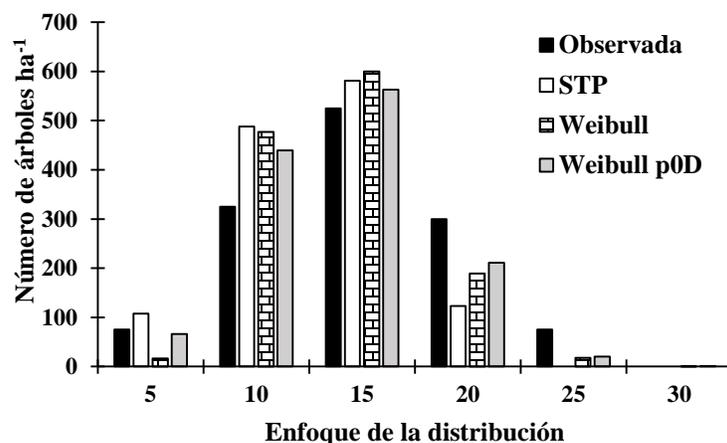


Figura 2.2. Distribución diamétrica de los 1,300 árboles ha^{-1} observados y estimados a 19 años.

2.5.4 Evaluación de la concordancia de las distribuciones simuladas y estimación del volumen total y por tipo de producto

Los valores obtenidos al aplicar los estadísticos para evaluar la capacidad que los enfoques poseen para estimar una distribución que se apegue a la observada (real) se muestran en el [Cuadro 2.8](#). La prueba KS con un $\alpha=0.05$ indicó que el enfoque STP generó una distribución que tiende a presentar una forma similar a la observada en 31 de los 43 sitios (72 %), para la fdp Weibull se rechazaron 35 de las 43 parcelas, en tanto que para la fdp Weibull p0D el rechazo fue de 25 sitios que corresponden al 59.52 %, este porcentaje es menor al obtenido al estimar la fdp Weibull en su forma original (83.33 %).

El valor para el índice de error (IE) ponderado obtenido ([Cuadro 2.8](#)) para STP y la fdp Weibull indicó que estos enfoques fueron menos eficientes para estimar la cantidad de árboles totales por categoría diamétrica (11.287 y 10.366), en tanto que el valor IE para la fdp Weibull p0D fue 8.3, lo que sugiere que la fdp Weibull con la definición del diámetro mínimo posee la mejor capacidad de predicción. En el caso de la STP, el valor de IE obtenido puede ser explicado en el sentido de que al realizar la proyección de la tabla de rodal algunos árboles cambiaron de categoría diamétrica, en tanto que el valor de IE obtenido para la fdp Weibull refleja el comportamiento medio esperado para la condición por lo cual se optó por definir el diámetro mínimo (percentil 0).

Cuadro 2.8. Estadísticos de ajuste y validación de los enfoques evaluados.

Enfoque	KS	IE
STP	31, 12	11.287
Weibull	8, 35	10.366
Weibull p0D	18, 23	8.300

Donde KS: Kolmogorov-Smirnov, IE: Índice de error ponderado por el área basal.

Las existencias maderables por tipo de producto para la distribución observada y las generadas mediante los diferentes enfoques se muestran en la [Figura 2.3](#). El volumen total observado fue de 10,195 m³, con la distribución obtenida a partir de la STP se estimó un total de 8,843 m³, 10,044 con fdp Weibull y 10,056 m³ con Weibull p0D. El sesgo promedio absoluto por sitio fue de 40, 17 y 16 m³ para STP, Weibull y Weibull p0D, respectivamente.

Con respecto al volumen por tipo de producto, la STP suele ser más conservador al estimar la cantidad de celulósicos y productos secundarios a obtener, en tanto que la fdp Weibull y Weibull p0D tienden a sobreestimar ligeramente los primeros.

Esto es una primera aproximación al uso de la STP en México, si bien es cierto que los resultados indican que la STP tiende a presentar estimaciones más conservadoras con respecto al volumen, estas pueden mejorar al incorporar un mayor número de datos obtenidos a partir remediciones de los sitios en la zona de estudio, lo que indudablemente hará mejorar el ajuste del modelo utilizado en la proyección del tamaño relativo y por ende las estimaciones de las variables de interés (volumen, carbono).

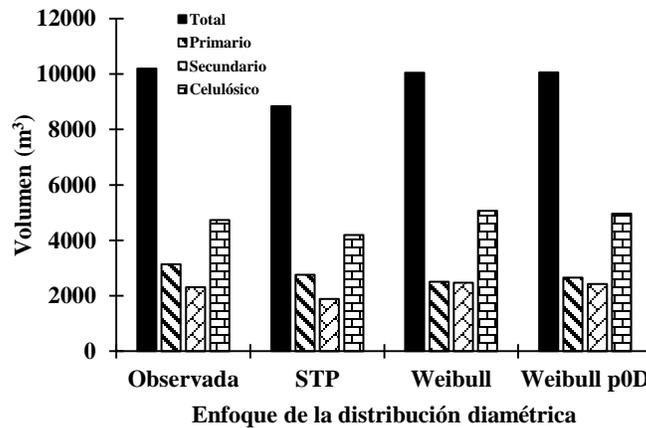


Figura 2.3. Volumen total y por tipo de producto (m^3) a partir de las diferentes distribuciones.

Una distribución observada ofrece la ventaja de conocer la estructura de diámetros previa y hacer predicciones a partir de ella sin considerar una distribución Weibull *a priori*. Por otra parte, partir de un diámetro mínimo y proyectarlo mejora considerablemente las estimaciones de árboles por categoría diamétrica, pero estima un volumen total similar al generado a partir de la fdp Weibull que no lo considera. En muchos casos es difícil contar con un inventario de categorías diamétricas en especial en los bosques naturales, pudiéndose aplicar el enfoque de STP en plantaciones forestales, aunque no de manera exclusiva como se ha visto es este estudio.

2.6 CONCLUSIONES

Los enfoques probados resultan fáciles de implementar y proporcionan información detallada sobre la estructura diamétrica del rodal, además, facilitan la caracterización de la distribución de productos maderables a obtener en un momento dado, pudiendo estimar el volumen obtenido después de aplicar algún tratamiento silvícola. Por sus características, es más factible el uso del enfoque STP en plantaciones forestales, mientras que sería adecuado seguir evaluando las diferentes funciones de distribución de probabilidades en bosques naturales. Sin embargo, el uso de uno u otro enfoque va a estar en función de la información con la que se cuente.

Estos enfoques permiten observar el cambio en la estructura de un rodal a través del tiempo, además de ser un complemento necesario del sistema explícito al permitir desagregar la producción maderable por tipo de productos. Es evidente que la precisión va a estar en función de los datos con los que se cuente, pudiéndose mejorar al alimentar los modelos con un mayor número de mediciones de las unidades de muestro empleadas.

CAPÍTULO III. MANEJO FORESTAL CON ESCENARIOS DE CARBONO EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO

3.1 RESUMEN

La búsqueda de mecanismos para mitigar el calentamiento global ha generado una serie de proyectos que buscan fomentar la disminución de la deforestación y la conservación de los bosques como almacenes de carbono mediante apoyos económicos y en especie. Sin embargo, las implicaciones económicas que tendría el dejar de cosechar los bosques no ha sido abordada, por lo cual, el objetivo del presente estudio fue cuantificar la captura de carbono dentro de una hectárea promedio en la región de Zacualtipán, Hidalgo, así como evaluar la rentabilidad financiera de la venta de bonos de carbono y aprovechamiento maderable para determinar qué actividad es más rentable dentro del manejo forestal, al simular diferentes escenarios. Los datos utilizados provienen de tres inventarios (2013, 2014 y 2016) realizados en 160 sitios permanentes de 400 m². La caracterización de los costos del aprovechamiento para una hectárea promedio se obtuvo mediante entrevistas, mientras que para evaluar la rentabilidad los indicadores empleados fueron: VAN, TIR, RBC y VES. Los resultados obtenidos indican que en zonas productivas pobres la captura de carbono solo es rentable con una tasa de descuento baja (3.5 %) y un precio por MgCO_{2e} alto (US \$ 100), en tanto que optar por una producción conjunta, aprovechamiento maderable con captura de carbono, los turnos óptimos de rotación se alargan entre 21 y 44 años, en función de la tasa de descuento y el precio de MgCO_{2e} capturada. El aprovechamiento maderable seguirá siendo la principal actividad económica mientras no se flexibilicen las reglas de operación de los diferentes mecanismos creados y los mercados de carbono ofrezcan pagos justos.

Palabras clave: captura de carbono, manejo forestal, MDL, rentabilidad financiera, rotación.

3.2 ABSTRACT

The search for mechanisms to mitigate global warming has generated a series of projects that seek to encourage the reduction of deforestation and the conservation of forests as carbon stores through economic and in-kind support. However, the economic implications of stopping timber harvesting of forests have not been sufficiently clarified, therefore, the objective of this study was to quantify carbon capture within an average hectare in the region of Zacualtipán, Hidalgo, and to evaluate the financial profitability of the sale of carbon credits and timber harvesting, and to determine which activity is more profitable within forest management, under different scenarios simulations. The data used come from three inventories (2013, 2014 and 2016) in 160 permanent sites of 400 m². The characterization of harvesting costs for an average hectare was obtained through interviews, while profitability was evaluated with the following indicators: NPV, IRR, BCR and SVE. The results indicate that in poor productive areas the carbon capture is only profitable with a low discount rate (3.5%) and a high price per MgCO_{2e} (US \$ 100), while the option for a joint production, timber harvesting and carbon capture, the optimal rotation was extended between 21 and 44 years, depending on the discount rate and the price of MgCO_{2e} captured. Timber harvesting will remain the economic activity more important until the operating rules of the different mechanisms created are more flexible and carbon markets offer fair payments.

Key words: carbon capture, forest management, CDM, financial profitability, rotation.

3.3 INTRODUCCIÓN

El cambio climático definido por el IPCC (2001) como una variación estadística en el estado medio del clima que persiste durante un período prolongado producido por procesos naturales o bien a cambios antropogénicos persistentes, es uno de los temas de mayor interés hoy en día; es inequívoco y continuará en las próximas décadas. Lo anterior ha dado lugar a la búsqueda y desarrollo de mecanismos para tratar de equilibrar las concentraciones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera con el fin de detener el calentamiento global.

En 1997 se formuló el Protocolo de Kyoto donde países desarrollados se comprometieron a reducir sus emisiones de GEI en al menos un 5.2% para el período 2008-2012 con respecto a las de 1990 entrando en vigor en el año 2005. Como una manera de facilitar el cumplimiento de los compromisos se desarrollaron tres Mecanismos de Flexibilidad: 1) Aplicación Conjunta, 2) Mecanismos de Desarrollo Limpio (DLM) y 3) Comercio de Derechos de Emisión (Shin y Suh, 2003). A partir de estos mecanismos surge el mercado del carbono, en el que se comercializan las emisiones reducidas en forma de bonos de carbono, su precio está regido por la ley de la oferta y la demanda; hoy en día no se ha definido un precio promedio, por lo cual este varía de acuerdo a con la iniciativa y va de 1-139 dólares (US) por tCO₂e (tonelada de carbono equivalente), aunque el 46% de las emisiones cubiertas son con precios menores US \$ 10 / tCO₂e (World Bank and Ecofys, 2018).

A pesar de la importancia que los bosques tienen en la mitigación del cambio climático, los procesos de deforestación y degradación han ido incrementando por ello en 2007 se acordó un plan de Reducción de Emisiones por la Deforestación y la Degradación de los bosques (REDD) como un mecanismo válido en la lucha contra el cambio climático. El plan incluía además esfuerzos de conservación de bosques, el aumento en la cantidad de carbono almacenado en los bosques (stock de carbono) y el manejo forestal sostenible como actividades que contribuyen en la lucha contra el cambio climático, dando lugar a (REDD+) a fin de hacer notar que existen otras actividades que forman parte de esta iniciativa (Rakatamaa *et al.*, 2017).

México tiene potencial para participar activamente dentro de estas estrategias, al contar con 138 millones de hectáreas (ha) con vegetación forestal, de las cuales 64.9 millones están cubiertas por bosques y selvas, 15 millones tienen potencial para el aprovechamiento comercial de recursos

forestales maderables y solo 7.4 millones están incorporadas al manejo forestal (CONAFOR, 2013).

A pesar de los beneficios ambientales y sociales que las diferentes actividades tienen contra el cambio climático, y en especial la captura de carbono, es necesario realizar un análisis económico de la incorporación de esta dentro del manejo forestal donde la principal actividad durante años ha sido el aprovechamiento maderable.

Esto es posible mediante el uso de indicadores financieros, los cuales son medidas de valor de la rentabilidad económica para los proyectos de inversión utilizados en la conversión de cantidades monetarias que ocurren en alguna secuencia de puntos futuros en criterios económicos evaluables (Zamudio-Sánchez *et al.*, 2010). De acuerdo con García-Cuevas *et al.* (2011), estos no son excluyentes entre sí y pueden usarse en forma complementaria para tomar decisiones. Por lo cual, el objetivo del presente estudio fue cuantificar la captura de carbono de una hectárea promedio en los bosques manejados de Zacualtipán, Hidalgo, y evaluar la rentabilidad financiera de la venta de bonos de carbono *versus* el aprovechamiento maderable para determinar qué actividad dentro del manejo forestal es más rentable en términos económicos, simulando diferentes escenarios.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Área de estudio y datos dasométricos

El estudio se realizó en el Sitio de Monitoreo Intensivo de Carbono (SMIC) localizado en los ejidos Atopixco, La Mojonera, El Reparo, Tzincuatlán, Zahuastipán, Santo Domingo y pequeña propiedad en el Municipio de Zacualtipán de Ángeles, en una superficie de 900 ha. Su topografía es accidentada con altitud media de 2100 m. (Cruz-Leyva *et al.*, 2010). El suelo predominante es Feozem con buen drenaje (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. Las variables recolectadas fueron: altura total (H, m), diámetro normal (DN, cm), altura dominante (HD, m), número de árboles vivos (NA) y edad (años) obtenida a nivel de rodal en campo y de los programas de manejo forestal.

3.4.2 Información financiera y tasa de descuento

Para realizar la caracterización de una hectárea tipo de la zona se llevaron a cabo entrevistas con personas involucradas directamente en la actividad forestal (comisariado ejidal, administrador forestal y trabajadores). De esta forma fue posible obtener los costos promedios para las etapas de: establecimiento, mantenimiento y aprovechamiento maderable, que involucran las principales actividades dentro del manejo forestal. En las etapas de establecimiento y mantenimiento se ubicaron a los costos fijos, en tanto que los costos variables estuvieron en función de la producción maderable.

La definición de una tasa de descuento para la actividad forestal está sujeta aún a mucha discusión dado que esta puede variar de acuerdo con la escala del proyecto, la duración, el riesgo y algunos factores más. En lo que si han coincidido diferentes autores es que tiene tres componentes: la tasa de interés pura o libre de riesgo, la tasa de riesgo y la inflación (Klemperer *et al.*, 1994; Grege-Staltmane y Tuherm, 2013). Para esta investigación se optó por emplear dos tasas de descuento reales, es decir, sin considerar la inflación y el riesgo, las cuales fueron de 3.5 y 4.5%.

3.4.3 Sistema de crecimiento y rendimiento maderable y de carbono

La información correspondiente al crecimiento de las variables de interés se obtuvo con los modelos de predicción y proyección siguientes (ver Capítulo I):

$$HD_1 = \frac{37.23984}{[1 + \exp(4.0986618) \cdot \exp(-1.496481 \cdot \ln(E_1))]} \quad (3.48)$$

$$HD_2 = HD_1 \frac{[1 + \exp(4.0986618) \cdot \exp(-1.496481 \cdot \ln(E_1))]}{[(1 + \exp(4.0986618) \cdot \exp(-1.496481 \cdot \ln(E_2)))]} \quad (3.49)$$

$$AB_1 = \exp(-3.81374) \cdot HD_1^{0.003957} \cdot \exp\left(\left(\frac{(-19.5276 + 0.003957 \cdot NA_1 + 0.413573)}{E_1}\right)\right) \quad (3.3)$$

$$AB_2 = AB_1 \frac{HD_2^{0.308058} \cdot \exp\left(\frac{(-19.5276 + 0.003957 \cdot NA_2 + 0.413573 \cdot HD_2)}{E_2}\right)}{HD_1^{0.308058} \cdot \exp\left(\frac{(-19.5276 + 0.003957 \cdot NA_1 + 0.413573 \cdot HD_1)}{E_1}\right)} \quad (3.4)$$

$$V_1 = 0.346727 \cdot AB_1^{1.041085} \cdot HD_1^{1.023312} \quad (3.5)$$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{AB_2}{AB_1}\right)^{1.041085} \cdot \left(\frac{HD_2}{HD_1}\right)^{1.023312} \quad (3.6)$$

$$NA_2 = NA_1 \cdot \exp(0.0011 \cdot (E_2 - E_1)) \quad (3.7)$$

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).

La biomasa aérea por hectárea se estimó a partir del volumen maderable de *Pinus patula* y especies de latifoliadas con un factor de proporcionalidad directa de 0.433 y 0.817 reportados por Ramírez-Martínez *et al.* (2018) y Palacios-Cruz *et al.* (2018), respectivamente. Para obtener el contenido de carbono en *Pinus patula* se utilizó el valor de 0.507 (Figuroa, 2010), en tanto que para latifoliadas 0.494 (Figuroa *et al.*, 2005). En el entendido de que los mercados de carbono operan en toneladas métricas de carbono equivalente ($MgCO_2e$), las estimaciones de carbono dadas en $MgC ha^{-1}$ se multiplicaron por 3.67 (relación entre los pesos moleculares del CO_2 y el carbono, 44/12) (Rügnitz *et al.*, 2009).

3.4.4 Distribución diamétrica modelada a través de la función Weibull

Las variables de estado propuestas fueron: Altura dominante (HD , m), área basal por hectárea (AB , $m^2 ha^{-1}$), número de árboles por hectárea (NA) y diámetro cuadrático (Dq , cm). Éste último corresponde a la expresión $Dq = \sqrt{\frac{40,000}{\pi} \cdot \frac{AB}{NA}}$. La altura por clase diamétrica se obtuvo con la ecuación (3.8), el crecimiento promedio en diámetro cuadrático se estimó con la ecuación (3.9) mientras que el volumen total con la ecuación 3.10.

$$H = 1.3 + 0.241315 \cdot HD^{1.085389} DN^{(0.711527 \cdot HD^{-0.26345})} \quad (3.8)$$

$$Dq = 5.663274 \cdot \exp\left(\frac{-14.54899}{Edad}\right) * IS^{0.572138} \quad (3.950)$$

$$Vt = 0.0000253 \cdot DN^{1.6939421} H^{1.4175090} \quad (3.510)$$

Los percentiles que forman parte de la función Weibull de tres parámetros, se obtuvieron con el método de momentos (Piennar y Rhenev, 1993), y se presentan a continuación:

$$p_0 = 0.319277 \cdot Dq^{1.715867} \cdot HD^{-0.60877} E^{0.173854} \quad (3.52)$$

$$p_{65} = 1.006196 \cdot Dq^{1.029508} \quad (3.53)$$

$$p_{93} = 1.865844 \cdot Dq^{0.89569} \quad (3.54)$$

El parámetro de localización a se estimó con la ecuación siguiente:

$$a = \begin{cases} p_0 - 2.5 \text{ si } P_0 \geq 5 \text{ cm} \\ \frac{p_0}{2} \text{ de otra forma} \end{cases} \quad (3.55)$$

Parámetro c :

$$c = \ln\left[\frac{(-\ln(1 - 0.93))}{(-\ln(1 - 0.65))}\right] / \ln\left[\frac{(p_{93} - a)}{(p_{65} - a)}\right] \quad (3.56)$$

Parámetro b se estimó mediante la expresión del segundo momento de la distribución Weibull:

$$b = a \times \frac{\Gamma_1}{\Gamma_2} + \left[\left(\frac{a}{\Gamma_2} \right)^2 \times (\Gamma_1^2 - \Gamma_2) + \frac{Dq^2}{\Gamma_2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

Donde $\Gamma_1 = \Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right)$, $\Gamma_2 = \Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right)$, $\Gamma(\cdot)$ es la función Gamma.

3.4.5 Distribución y precio por tipo de producto maderable y Mg CO₂e

La distribución de productos se realizó con la ecuación Fang *et al.* (2000) reportada en el Sistema Biométrico Forestal correspondiente a la Unidad de Manejo Forestal 1302 Zacualtipán-

Molango (Vargas-Larreta *et al.*, 2017), la implementación generó el [Cuadro 3.1](#) que muestra el volumen promedio (m³) de cada producto maderable por categoría diamétrica.

Cuadro 3.1. Volumen promedio (m³) por tipo de producto de cada categoría diamétrica.

CD (cm)	Celulósico ≥10 a <20 cm	Secundario > 20 y < 25 cm	Primario > 25 cm
5	0	0	0
10	0.028	0	0
15	0.129	0	0
20	0.163	0.160	0
25	0.150	0.160	0.246
30	0.140	0.150	0.581
35	0.124	0.132	0.884
40	0.1278	0.136	1.539

La definición de los precios para cada uno de los productos se realizó con base en la información reunida en la zona de estudio de estudio y se presentan en el [Cuadro 3.2](#).

Cuadro 3.2. Tipo de producto maderable y precio corriente en el mercado.

Producto	Dimensiones de la trocería	Precio corriente (\$ m³)
Celulósico	Brazuelo de diámetro entre 10 y 20 cm	300
Secundario	1.25 m de largo y diámetro entre 20 y 25 cm	800
Primario	2.55 m de largo y diámetro mayor de 25 cm	1,600

Los precios por MgCO₂e ha⁻¹ año⁻¹ capturado son variables, Lobos *et al.* (2006) indican que los precios empleados en diversos estudios van de US \$1 a US \$100, razón por la cual en este estudio se optó por definir dos: un precio de US \$75 y otro aún más optimista de US \$100 por MgCO₂e ha⁻¹ año⁻¹ capturada, con una tasa de cambio dólar-peso de \$18.00.

3.4.6 Actualización de costos de producción

El precio de la madera, CO₂e capturado y los costos (fijos y variables) del aprovechamiento maderable fueron deflactados con la ecuación 3.17 y 3.18, posteriormente actualizados (3.19), en tanto que el valor presente (*VP*) de la producción se estimó por tipo de producto con la ecuación 3.20.

$$P_r = \frac{P_c}{INPP} \times 100 \quad (3.577)$$

$$C_r = \frac{C_c}{INPP} \times 100 \quad (3.1858)$$

$$C_a = \frac{C_r}{(1+i)^t} \quad (3.19)$$

$$VP = \frac{P_r * Q}{(1+i)^t} \quad (3.20)$$

Donde P_r : es el precio de la madera deflactado, P_c : precio de la madera a valor nominal, $INPP$: Índice Nacional de Precios al Productor con año base 2012, C_r : costo del insumo (fijo o variable) real. C_c : costo (fijo o variable) corriente, C_a : costo actualizado, C_r : costo real, VP : valor de la producción descontado, P_r : precio real por tipo de producto (\$ m³ rollo), Q : cantidad de producción (m³ rollo) en primario, secundario o celulósicos, i : tasa de interés (3.5 y 4.5 %), t : número de años a partir del presente en que se registra la producción.

3.4.7 Índice de densidad de Reineke

Para generar los escenarios con la inclusión de aclareos fue necesario evaluar el comportamiento de la densidad del bosque a lo largo del tiempo mediante el índice de densidad de Reineke (IDR). (3.21) y un Dq de 19 cm, valor promedio observado en los sitios de muestreo.

$$IDR = NA \cdot \left(\frac{19}{Dq}\right)^{-1.605} \quad (3.21)$$

Una vez estimado el IDR , se seleccionó un conjunto de datos de los sitios con mayor ocupación en términos del IDR , que constó de 26 sitios equivalentes al 20 % del total de sitios de la base de datos (130 sitios). Este conjunto se empleó para ajustar mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios, el modelo siguiente:

$$NA = \alpha_0 \times Dq^{\alpha_1} \quad (3.22)$$

Donde NA : número de árboles por hectárea, Dq : diámetro cuadrático por hectárea, α_i : parámetros a estimar.

3.4.8 Componentes de los escenarios evaluados

Los diferentes escenarios se formaron con las variables siguientes: productividad dada por el índice de sitio (IS), tratamientos silviculturales, producto final, tasa de interés y precio de Co_2e

(Mg ha⁻¹) cada una de ellas expresada en dos o más condiciones/valores diferentes ([Cuadro 3.3](#)), la combinación de estas dio origen a diferentes escenarios.

Cuadro 3.3. Variables utilizadas en la generación de escenarios para evaluar la rentabilidad financiera.

Variables	Condición/valor			
	IS 18	IS 24	IS 30	IS 36
Productividad (IS)	IS 18	IS 24	IS 30	IS 36
Tratamientos silviculturales	Con aclareo ^δ		Sin Aclareo ^γ	
Producto final	Madera	Carbono	Madera + carbono	
Tasa de interés	3.5 %		4.5 %	
(\$ Co _{2e} (Mg ha ⁻¹))	\$ 1,350.00		\$ 1,800.00	

Donde, ^δ dos aclareos y una corta de regeneración al turno (40 años), ^γ corta de regeneración al turno (40 años), US \$ 75: \$ 1,350.00 y US \$ 100: \$1,800.00.

3.4.9 Escenarios para bosque de pino

Los escenarios generados fueron evaluados de acuerdo con el producto final siendo esta: madera ([Cuadro 3.4](#)) y captura de carbono ([Cuadro 3.5](#)).

Cuadro 3.4. Escenarios evaluados para la condición de bosque de pino y como producto final la madera.

Escenario	IS	Tratamiento silvícola	Tasa de interés (%)
Esc 1	IS 18	Corta de regeneración (CR)	3.5
Esc 2	IS 18	Corta de regeneración (CR)	4.5
Esc 3	IS 30	Corta de regeneración (CR)	3.5
Esc 4	IS 30	Corta de regeneración (CR)	4.5
Esc 5	IS 18	Dos aclareos y CR	3.5
Esc 6	IS 18	Dos aclareos y CR	4.5
Esc 7	IS 30	Dos aclareos y CR	3.5
Esc 8	IS 30	Dos aclareos y CR	4.5

Cuadro 3.5. Escenarios evaluados para la condición de bosque de pino y como producto final la captura de carbono.

Escenario	IS	Tratamiento silvícola	Tasa de interés (%)	(\$ Mg Co ₂ e
Esc 9	IS 18	Corta de regeneración (CR)	3.5 %	1800.00
Esc 10	IS 18	Corta de regeneración (CR)	4.5 %	1350.00
Esc 11	IS 30	Corta de regeneración (CR)	3.5 %	1800.00
Esc 12	IS 30	Corta de regeneración (CR)	4.5 %	1350.00
Esc 13	IS 18	Dos aclareos y CR	3.5 %	1800.00
Esc 14	IS 18	Dos aclareos y CR	4.5 %	1350.00
Esc 15	IS 30	Dos aclareos y CR	3.5 %	1800.00
Esc 16	IS 30	Dos aclareos y CR	4.5 %	1350.00

3.4.10 Producción conjunta

En el [Cuadro 3.6](#) se muestran los escenarios evaluados cuando se opta por una de producción conjunta.

Cuadro 3.6. Escenarios evaluados para la condición de bosque de pino y una producción conjunta (madera más carbono).

Escenario	IS	Tratamiento silvícola	Tasa de interés (%)	(\$ MgCo ₂ e
Esc 17	IS 30	Corta de regeneración (CR)	4.5	1,350.00
Esc 18	IS 30	Corta de regeneración (CR)	4.5	1,800.00
Esc 19	IS 30	Corta de regeneración (CR)	3.5	1,350.00
Esc 20	IS 30	Corta de regeneración (CR)	3.5	1,800.00

3.4.11 Determinación de la edad óptima de cosecha

Para poder determinar la edad óptima de rotación cuando se trata de una producción conjunta se utilizó el criterio de equimarginalidad obtenido cuando el beneficio marginal (BM) y costo marginal (CM) asociados a la decisión de cosecha son iguales. Sus expresiones matemáticas se presentan a continuación:

$$BM = (p_{ce} \cdot V'_{cel}(T) + p_{se} \cdot V'_{se}(T) + p_{pr} \cdot V'_{pr}(T)) + (pc \cdot \alpha \cdot V'(T)) \cdot \quad (3.593)$$

$$CM = r \cdot (p_{ce} \cdot V_{ce}(T) + p_{se} \cdot V_{se}(T) + p_{pr} \cdot V_{pr}(T)) + r \cdot (VES) \cdot \quad (3.24)$$

Donde, p_{ce}, p_{se}, p_{pr} : precio de celulósicos, productos secundarios y primarios, $V'_{ce}(T), V'_{se}(T), V'_{pr}(T)$: incrementos marginales del volumen de celulósicos, secundarios y primarios, $V_{ce}(T), V_{se}(T), V_{pr}(T)$: volumen de celulósicos, secundarios y primarios al final del horizonte de planeación, $V'(T)$: incremento del volumen total, pc : precio del carbono, α : constante que expresa la proporción de CO_{2e} por m³ de madera

3.4.12 Escenarios para el bosque de pino y latifoliadas

A pesar de que *Pinus patula* es la especie dominante en la zona de estudio, se ha documentado que en algunos rodales crece mezclada con especies de latifoliadas (Figuroa-Navarro *et al.*, 2010), razón por la cual el análisis de rentabilidad financiera se realizó también considerando un bosque mezclado con una proporción inicial de latifoliadas del 0.05% a la edad de 5 años.

Los escenarios propuestos se presentan en el [Cuadro 3.7](#) y [Cuadro 3.8](#), de acuerdo con el producto final.

Cuadro 3.7. Escenarios evaluados para la condición de bosque de pino latifoliadas como producto final la madera.

Escenario	IS	Tratamiento silvícola	Tasa de interés (%)
Esc 1	IS 18	Corta de regeneración (CR)	3.5
Esc 2	IS 18	Corta de regeneración (CR)	4.5
Esc 3	IS 30	Corta de regeneración (CR)	3.5
Esc 4	IS 30	Corta de regeneración (CR)	4.5

Cuadro 3.8. Escenarios evaluados para la condición de bosque de pino latifoliadas como producto final la captura de carbono

Escenario	IS	Tratamiento silvícola	Tasa de interés (%)	(\$) Mg Co ₂ e
Esc 5	IS 18	Corta de regeneración (CR)	3.5	1,800.00
Esc 6	IS 18	Corta de regeneración (CR)	4.5	1,800.00
Esc 7	IS 18	Corta de regeneración (CR)	3.5	1,350.00
Esc 8	IS 18	Corta de regeneración (CR)	4.5	1,350.00
Esc 9	IS 30	Corta de regeneración (CR)	3.5	1,800.00
Esc 10	IS 30	Corta de regeneración (CR)	4.5	1,800.00
Esc 11	IS 30	Corta de regeneración (CR)	3.5	1,350.00
Esc 12	IS 30	Corta de regeneración (CR)	4.5	1,350.00

3.4.13 Indicadores financieros

Los indicadores financieros empleados fueron: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR), Relación Beneficio-Costo (RBC), Periodo de Retorno (PR) y Valor Esperado del Suelo (VES); las respectivas expresiones algebraicas son las siguientes:

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} \quad (3.25)$$

$$TIR = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i^*)^t} = 0 \quad (3.26)$$

$$RBC = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}} \quad (3.607)$$

$$VES = \frac{PVc + PVf - A \cdot \delta - Cm \cdot \delta - Pr \cdot e^{-r \cdot T} - M \cdot e^{-r \cdot T}}{(1-r)^{-r \cdot T}} + Subsidios \quad (3.618)$$

Donde B_t, C_t : beneficios y costos en el período de tiempo t (\$ ha⁻¹), t : tiempo en años, i : tasa de interés, i^* : tasa que iguala a cero el flujo de efectivo, VES : valor esperado del suelo, PVf, PVc : valor neto presente de los beneficios de carbono y madera, A, Cm, Pr, M : Costos de administración, mantenimiento de caminos, de protección y mantenimiento de la repoblación (\$ ha⁻¹), $Subsidios$: apoyos otorgados al ejido (\$ ha⁻¹), $e^{-r \cdot T}$: factor de descuento en tiempo continuo, δ : parámetro que expresa el descuento de los costos anuales.

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1 Caracterización financiera de la hectárea promedio

En el [Cuadro 3.9](#) se muestran las actividades llevadas a cabo durante el establecimiento (año 1) de la repoblación, donde la apertura de brechas cortafuego fue la acción de mayor costo (\$ 1,583.427) debido a que estas se realizan en sentido perimetral del área de regeneración con un ancho mínimo de 3 m, seguido de la compra de la planta (\$ 1,266.622) y la compra de equipo (\$ 967.082) (machetes, hachas, azadones, rastrillos y palas) para poder llevar acabo las diferentes actividades. De esta forma el costo total promedio para establecimiento fue de \$ 7,051.122.

Cuadro 3.9. Actividades y costo real promedio (\$ ha⁻¹) para la etapa de establecimiento de la repoblación en el primer año.

Establecimiento	Total (\$ ha ⁻¹)
Materiales para el cercado	598.620
Mano de obra para la realización del cercado	558.905
Costo de la planta	1,266.622
Flete por el traslado de la planta	1,05.675
Mano de obra para el establecimiento de la repoblación	1,083.982
Apertura de caminos	886.805
Apertura de brechas cortafuego	1,583.427
Equipamiento	967.082
Total	7,051.122

En la etapa de mantenimiento se contemplaron seis actividades ([Cuadro 3.10](#)). El pago por renta de la tierra y la protección contra plagas e incendios son realizados durante los años que dura el turno (40 años) con un costo anual de \$ 2,039.811. El chapeo, podas y cortas de liberación son realizadas durante los primeros 8 años de la masa, con un costo anual de \$2,409.785. En tanto que el mantenimiento a brechas corta fuego y caminos tiene un costo para el segundo año de \$ 2,668.110 y del tercero en adelante de \$1,332.054 por año.

Cuadro 3.10. Actividades y costo real promedio (\$ ha⁻¹) para la etapa de mantenimiento.

Mantenimiento	Total (\$ ha⁻¹)	Periodicidad
Renta de la tierra	1,313.155	Cada año
Protección contra plagas	564.806	Cada año
Protección contra incendios	161.850	
Limpia del terreno plantado (chapeo)	1,388.734	Hasta los 8 años
Podas y cortas de liberación	1,021.051	
Mantenimiento de brechas cortafuego	1,747.047	Solo el segundo año
Mantenimiento de caminos	921.063	
Mantenimiento de brechas cortafuego	871.523	A partir del tercer año
Mantenimiento de caminos	460.531	
Total	8,144.760	

En la etapa del aprovechamiento maderable ([Cuadro 3.11](#)) se ubicaron los costos variables en función de la producción (m³), los servicios técnicos forestales tuvieron un costo de \$ 29.478, el costo de elaboración (derribo, desrame, troceo y arrime al carril de arrastre) fue \$ 161. 507 tanto para la corta final y aclareos (sin importar el tipo de producto). Por último, los costos por administración fueron de \$ 53.767, lo que hace un total de \$ 244.752 por m³ extraído.

Cuadro 3.11. Actividades y costo real promedio (\$ m³) para la etapa de aprovechamiento forestal.

Aprovechamiento	Total (\$ m³)
Servicios Técnicos Forestales	29.478
Costo de elaboración (m3)	161.507
Administración	53.767
Total	244.752

Durante el periodo que comprende el turno (40 años), los ejidos reciben diversos apoyos por parte de CONAFOR para realizar las diferentes actividades planteadas en cada una de las etapas del aprovechamiento maderable, así como por la conservación de ciertas áreas. Se optó por considerar el pago por servicios ambientales, aunque está enfocado a áreas en las cuales no existe aprovechamiento maderable debido a que en la etapa de mantenimiento no fue posible diferenciar excluir los costos para estas áreas. El apoyo promedio por hectárea obtenido se muestra en el [Cuadro 3.12](#).

Cuadro 3.12. Apoyos promedio en términos reales (\$ ha⁻¹).

Apoyos	Total (\$ ha ⁻¹)
Establecimiento del cercado	993.794
Repoblación	1,465.352
Mantenimiento de caminos	694.453
Limpia del terreno plantado (chapeo) y poda	884.841
Pago por servicios ambientales	1,564.874

Los resultados presentados dan un panorama general de lo que el manejo forestal implica en la región de Zacualtipán, Hidalgo, sobre todo acerca del aprovechamiento maderable y los costos promedios asociados. Una de las primeras problemáticas observadas fueron los altos costos de administración, cada m³ de madera extraída tiene un costo de \$53.00, aunado a los costos de elaboración y STF hacen un total de \$244.00 por m³. Pensar en reducirlos luce complicado, debido a que en la zona y en general tanto en comunidades como ejidos, se valora más la parte social y que las personas cuenten con empleo.

3.5.2 Índice de densidad de Reineke y secuela de aclareos

El ajuste del modelo de índice de densidad de Reineke presentó un R²adj de 0.96, así como la significancia estadística de sus parámetros. El modelo final se presenta a continuación:

$$NA = 198260.27 \cdot Dq^{-1.74} \quad (3.2962)$$

Donde *NA*: número de árboles por hectárea; *Dq*: diámetro cuadrático promedio (cm).

La guía de densidad generada sugiere la aplicación de dos aclareos antes de la corta de regeneración (40 años) ([Figura 3.1](#)). La guía de densidad constituye uno de los métodos más eficientes de planificación y manejo silvicultural de la densidad en bosques coetáneos (Müller-Using *et al.*, 2013), define el número de árboles por unidad de superficie en un rodal, al proporcionar información sobre las densidades mínimas y máximas, porcentaje de árboles a remover en cada etapa de desarrollo del arbolado con el fin de obtener la mayor productividad de los bosques (Hernández-Ramos *et al.*, 2012), estas han sido utilizadas para diferentes especies, calidades de sitio y objetivos de manejo (Dean y Baldwin 1993).

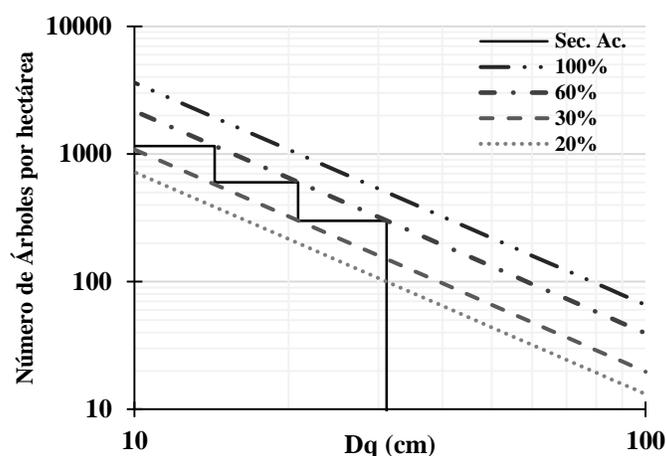


Figura 3.1. Prescripción de aclareos para *Pinus patula*, Sec. Acl: secuela de aclareos. 100 y 55 %: límite superior e inferior de la zona de auto-aclareo, 30 %: límite inferior de la zona de crecimiento constante, 20 %: límite superior del crecimiento libre sin mortalidad.

Los aclareos ocurren a un Dq de 18.66 y 20.90 cm, mientras que la corta final con un Dq de 31.5 cm, a la edad de 10, 20 y 40 años, respectivamente, en tanto que la intensidad de corta sugerida es del 48% para el primer y 50% en el segundo aclareo (Cuadro 3.13).

Cuadro 3.13. Secuela de aclareos y variables de estado del rodal generado con la guía de densidad relativa de Reineke.

N	AB	Intervención	IC
1200	1.1	0.10	
1156	14.34	18.66	1A 48 %
600	14.34	9.69	
600	20.90	20.59	2A 50 %
300	20.90	10.29	
300	31.13	22.83	CR 100

NA: número de árboles promedio por hectárea, Dq : diámetro cuadrático promedio en cm, AB: área basal promedio por hectárea ($m^2 ha^{-1}$), Intervención: número de corta, aclareos y cosecha final, IC: la intensidad de corta en porcentaje.

3.5.3 Escenarios para bosque de pino

En el [Cuadro 3.14](#) se muestran los indicadores financieros obtenidos para los escenarios planteados donde el producto final fue la producción maderable. En los escenarios 1 y 2 en los que se realizó una corta de regeneración al final del turno (40 años) presentaron valores negativos para el VAN; la TIR fue menor a la tasa de interés (3.5 y 4.5) y la RBC menor a 1. Lo anterior sugiere que en un IS 18 bajo las condiciones planteadas la producción de madera no es rentable, dado que implica costos mayores a los ingresos obtenidos. En tanto que en un IS 30 (Escenarios. 3 y 4), los indicadores obtenidos con la aplicación de los mismos tratamientos silvícolas sugieren que es viable realizar el aprovechamiento maderable obteniendo una utilidad al final del turno de \$2,7551.31y \$11,930.80 ha⁻¹, respectivamente. Lo anterior tiene coherencia, pues en un sitio de calidad promedio (IS 30) el crecimiento y rendimiento de la masa forestal es mejor que en un sitio pobre.

Para los escenarios 5, 6, 7 y 8, en los que se consideró aclareos y una corta de regeneración, los resultados muestran que el aprovechamiento maderable es rentable, al obtenerse valores para el VAN de \$1,4781 a \$3,6838.04 ha⁻¹, TIR de 6.10 a 6.52 %, así como RBC mayores a uno y valores en el VES positivos. Indudablemente, en los escenarios planteados en un IS 30, se obtuvieron los mejores resultados, siendo mejores aun cuando la tasa de interés fue mayor (4.5 %). La aplicación de aclareos en el manejo forestal es de gran importancia debido a que al realizar la redistribución y manipulación del espaciamiento de los árboles se favorece el crecimiento de la especie de interés (Mead, 2005).

Cuadro 3.14. Indicadores financieros obtenidos para los diferentes escenarios de IS 18 y 30, con madera como producto final.

Escenario	IS	Tasa de interés (%)	VAN	TIR (%)	RBC	TF	TT	VES (\$)
Esc 1	IS 18	3.5	-13,821.247	1.22	0.85	38	29	-29,598.55
Esc 2	IS 18	4.5	-16,231.92	1.22	0.80	33	29	-19,926.12
Esc 3	IS 30	3.5	27,551.31	5.72	1.24	35	27	47,006.69
Esc 4	IS 30	4.5	11,930.80	5.72	1.12	31	27	26,422.52
Esc 5	IS 18	3.5	30,322.68	6.10	1.12	-	29	13,003.37
Esc 6	IS 18	4.5	14,781.64	6.10	1.11	-	29	22,89.41
Esc 7	IS 30	3.5	36,838.04	6.52	1.28	-	27	18,414.88
Esc 8	IS 30	4.5	19,482.70	6.52	1.18	-	27	1,035.21

Si se opta por no cosechar la madera a la edad del turno y se pretende ingresar al mercado de bonos de carbono para comercializar el CO₂e capturado y almacenado en la masa forestal, los indicadores financieros estimados son optimistas bajo ciertas condiciones. En la [Figura 3.2](#), se muestran los valores de VAN obtenidos para los diferentes escenarios, donde el mejor valor se obtiene en el IS 30 que presenta dos aclareos y la corta de regeneración, una tasa de interés del 3.5 % y un precio de \$1,800 MgCO₂e ha⁻¹ año⁻¹ (Escenario 15), mientras el peor fue en el IS 18 que incluye una corta de regeneración, una tasa de interés del 4.5 % y un precio de \$1,350 (Escenario 10).

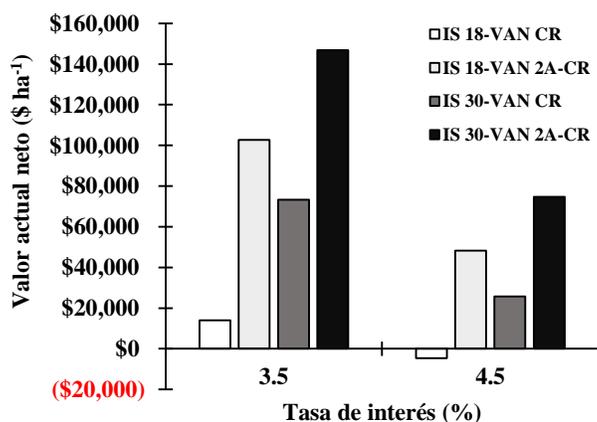


Figura 3.2. Valor actual neto (VAN) para los diferentes escenarios planteados para el IS 18 y 30.

En la [Figura 3.3a](#) se presentan los valores obtenidos para la TIR, este indicador respalda lo observado anteriormente, los escenarios incluyen dos aclareos y una corta de regeneración tanto en el IS 18 e IS 30 presentaron una tasa interna de retorno superior al 10 %. Es decir, bajo las condiciones establecidas, la tasa de descuento utilizada puede aumentar a 10% y aun así el proyecto seguiría siendo rentable, en tanto que cuando solo se realiza la corta de regeneración en IS 18 al turno (40 años) y se emplea una tasa de descuento de 4.5 con precio de $\text{MgCO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ capturada de \$1,350 (Esc 10) la actividad deja de serlo.

Por otra parte, en la [Figura 3.3b](#) se muestran los valores de RBC obtenidos para los diferentes planteamientos, donde el mejor valor se obtuvo en el escenario 13 en el que se obtiene una utilidad de \$1.77 por cada peso invertido, mientras que, en el peor, la relación es negativa, pues por cada peso invertido únicamente se recupera \$0.97.

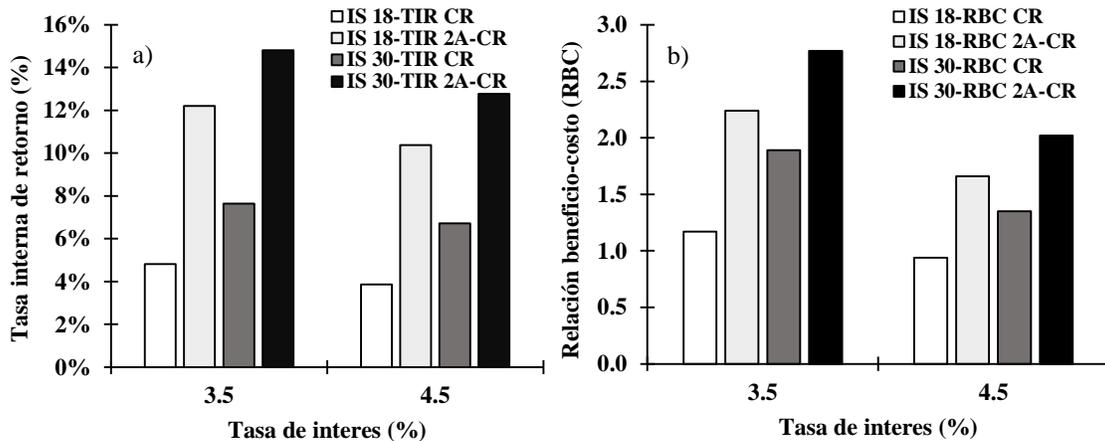


Figura 3.3. (a) Tasa interna de retorno (%) y (b) Relación beneficio-costo (RBC) para los diferentes escenarios planteados para los IS 18 e IS 30.

3.5.4 Producción conjunta

El turno técnico determinado para el IS 30 fue de 27 años, pero al optar por una producción conjunta, es decir madera más captura de carbono, el turno óptimo de rotación donde el beneficio marginal y el costo marginal se igualan ($\text{BM}=\text{CM}$), se alarga. Con una tasa de interés de 3.5 % y un precio de \$1,800 por $\text{MgCO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ capturado, el turno óptimo es mayor a 75 años, en tanto que, para la misma tasa de interés, pero con un precio de \$1,350, ocurre a los 63 años ([Figura 3a](#)). Al emplear una tasa de interés del 4.5 % con un precio de \$1,800 y \$1,350 por $\text{MgCO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ capturado, los turnos óptimos se alcanzan a los 73 y 58 años, respectivamente ([Figura 3b](#)). Considerar la captura de Carbono como una actividad adicional a la producción maderable, tendrá

implicaciones que modificarán en el manejo de la masa forestal donde uno de los factores afectados será el turno, mismo que tenderá a ser mayor (Díaz-Balteiro, 2002; Telles-Mejía *et al.*, 2008).

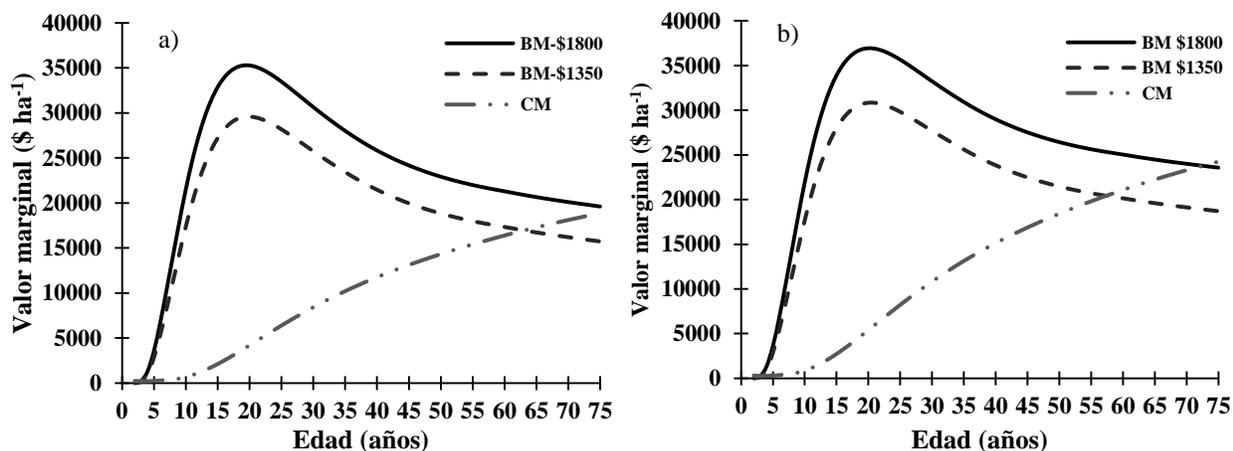


Figura 3.4. Turno óptimo de rotación en un IS 30 para una producción conjunta, precios por MgCO₂e ha⁻¹ año⁻¹ de \$1,800 y \$1,350 con una tasa de interés de: (a) 3.5 % y (b) 4.5 %.

Caparrós *et al.* (2003) encontraron que una rotación larga no es rentable a no ser que las tasas de descuento sean bajas; por su parte Gutricha y Howarthb, (2006) mostraron que promover el almacenamiento de carbono en los bosques hace que los períodos de rotación óptimos se extiendan, dependiendo del tipo de bosque que se esté considerando.

Como complemento a lo anterior se muestran los resultados obtenidos para el valor esperado del suelo (VES) en el IS 30 en la [Figura 3.5](#), la tendencia observada indica que a medida que la tasa de descuento decrece y el precio de MgCO₂e ha⁻¹ año⁻¹ aumenta, el valor esperado del suelo de la captura de carbono, así como de la producción conjunta (VES) se incrementan; por lo cual, los valores mejores se obtuvieron con una tasa de 3.5 % de interés y \$ 1,800.00.

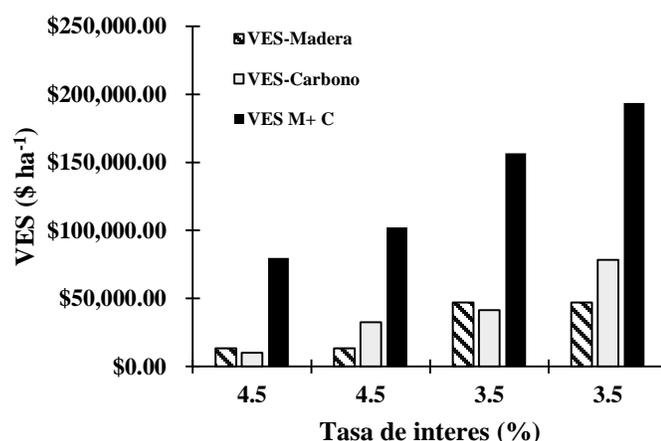


Figura 3. 5. Valor esperado del suelo (VES) en el IS 30 de la producción conjunta para dos tasas de interés (3.5 y 4.5 %) y dos precios de CO₂e \$1,800 y \$,1350.

Stainback y Alavalapati (2002) encontraron en una plantación de *Pinus elliottii* que la incorporación del carbono a la actividad maderable no solo aumenta la edad óptima de rotación, sino también el valor esperado del suelo, lo que propiciaría que más tierra se dedicara a la silvicultura en lugar de tener otros usos, como la agricultura y el desarrollo urbano.

3.5.5 Escenarios para bosque de pino y latifoliadas

Los resultados obtenidos de los escenarios planteados indican que el aprovechamiento maderable en el IS 18 no es rentable (Cuadro 3.15). Es decir, de realizarse el aprovechamiento a la edad del turno no será posible recuperar la inversión realizada a lo largo de los años. En tanto que en el IS 30, el aprovechamiento maderable si es factible, debido a que además de recuperar la inversión obtendrá una ganancia de \$ 23,783 y \$ 9,366 ha⁻¹ bajo una tasa de interés de 3.5 y 4.5 %, respectivamente.

Cuadro 3.15. Escenarios evaluados para la condición de bosque de pino latifoliadas como producto final la madera.

Escenario	IS	Tasa de interés (%)	VAN	TIR (%)	RBC	VES (\$)
Esc 1	18	3.5	-13,248.43	1.36	0.847	-4,0818.33
Esc 2	18	4.5	-15,842.00	1.36	0.792	-26,714.45
Esc 3	30	3.5	23,783.81	5.50	1.23	25,255.83
Esc 4	30	4.5	9,366.22	5.50	1.11	13,262.54

Al destinar la masa forestal a la fijación de carbono ([Cuadro 3.16](#)) en sitio pobre (IS 18) únicamente es rentable con una tasa de interés del 3.5 % y un precio de \$1,800 por tonelada de CO_{2e}, mientras que en un IS 30 todos los escenarios planteados fueron económicamente rentables, sobresaliendo el que presentó una tasa de descuento de 3.5 % y un valor de \$1,800 por tonelada de CO_{2e} (Escenario 5), pues al final del turno se obtendrá una utilidad de \$52,059 ha⁻¹.

Cuadro 3.16. Escenarios evaluados para la condición de bosque de pino latifoliadas como producto final la captura de carbono.

Escenario	IS	Tasa de interés (%)	VAN	TIR (%)	RBC	VES (\$)
Esc 1	18	3.5	99,330.44	4.44	1.11	-5,876.36
Esc 2	18	4.5	-4,72.34	4.44	0.99	-5,594.51
Esc 3	18	3.5	-223.04	3.47	0.99	-21,685.65
Esc 4	18	4.5	-6,975.49	3.47	0.90	-15,177.74
Esc 5	30	3.5	52,059.50	6.90	1.63	50,502.02
Esc 6	30	4.5	28,613.78	6.90	1.39	28,563.60
Esc 7	30	3.5	31,823.76	5.96	1.38	20,522.84
Esc 8	30	4.5	14,839.10	5.96	1.20	10,384.33

3.5.6 Aprovechamiento maderable o captura de carbono

En general el aprovechamiento maderable implica una serie de costos altos en lo que se refiere al establecimiento y mantenimiento por la larga duración del proyecto (40 años): En zonas productivas con un índice de sitio de 24, 30 y 36 esta actividad es rentable al ser posible recuperar la inversión, sin embargo, en las zonas pobres (IS 18) no los es. Por tanto, el aprovechamiento se realiza por lo regular en superficies relativamente grandes que no hacen evidente lo anterior.

A lo largo de las últimas décadas han existido esfuerzos por parte del gobierno para incentivar a las comunidades y ejidos a conservar sus bosques mediante una serie de programas, sin embargo, estos esfuerzos no han tenido los resultados esperados; por lo cual es necesario reconocer que los fondos del gobierno no alcanzan para cubrir toda la demanda (Chagoya e Iglesias, 2009).

A nivel internacional, se han puesto en marcha algunas estrategias y programas con la misma intención, combatir el cambio climático, esto mediante la captura de carbono siendo REDD+ y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) dos de las más importantes; complementados con la

creación de mercados de compensación, lo que ha dado a los poseedores de los bosques una nueva posibilidad para obtener incentivos financieros diferentes al aprovechamiento forestal.

Sin embargo, las condiciones y requisitos para poder acceder a alguno de ellos han sido los principales problemas. Por ejemplo, para incorporar un proyecto en la modalidad MDL es necesario demostrar la adicionalidad (Argüello *et al.*, 2007; Lima *et al.*, 2011), es decir, que las absorciones o la reducción de emisiones de CO₂ de un proyecto nuevo sean mayores a las que hubiesen ocurrido si no existiera dicho proyecto; además de abordar los problemas de la línea de base del proyecto y las fugas, por si fuera poco, las compensaciones siguen siendo las mismas, lo cual ha influido a que los poseedores de los bosques no incluyan la captura de carbono como una alternativa viable (Foley, 2009).

Con respecto a REDD+, Stern (2006) menciona que el costo por disminuir un 50% las emisiones por degradación y deforestación en los países en desarrollo al 2030, podría oscilar entre 15 mil y 33 mil millones de dólares anuales, llevar a cabo estas actividades en el corto plazo sería rentable sobre todo cuando se contrasta con los enormes costos ambientales y económicos de la inacción; este último pone especial énfasis en las consecuencias negativas que trae no seguir con la acción apropiada, aclarando que no todos los eventos negativos sean consecuencia de costos de inacción (Anand *et al.*, 2012).

Una alternativa al MDL son los mercados voluntarios, donde el intercambio de certificados de emisiones no está regulado por una normatividad jurídica específica y que han sido hasta la fecha la única fuente de financiación para proyectos de reducción de emisiones resultantes de la deforestación y degradación de bosques (REDD+) (Sabogal-Aguilar *et al.*, 2009). Bajo este panorama, formar parte de un mercado voluntario pudiera ser la mejor opción, sin embargo, el precio por MgCO₂e promedio es de \$US\$ 10 (Lobos *et al.*, 2005) y que de acuerdo con los resultados obtenidos no es suficiente para cubrir los costos de mantenimiento, por lo cual pasar del aprovechamiento maderable a la captura de carbono aún es muy complicado.

Por último, incluir la captura de carbono al aprovechamiento maderable implica extender la edad de rotación de los bosques y también posponer la obtención de ingresos por madera. Si bien el volumen de madera a extraer probablemente será mayor por el periodo de crecimiento adicional, la tasa de descuento podría llevar a una reducción en el valor presente neto de esa madera (Foley, 2009).

Un escenario en el que es rentable posponer la cosecha se da cuando la tasa de crecimiento del bosque es mayor que la tasa de descuento definida, en dicho caso es pertinente permitir al bosque continuar con su crecimiento; contrariamente, si la tasa de descuento supera la tasa de crecimiento forestal, es más rentable cosechar y vender ahora (Ackerman, 1993).

3.6 CONCLUSIONES

El aprovechamiento maderable por décadas ha sido la principal actividad económica de comunidades y ejidos, sin embargo, en la mayoría de ellas los costos de producción no son conocidos por lo cual no ha sido posible hacer aún más eficiente la actividad forestal. Por otra parte, la reciente relevancia que ha tenido el cambio climático ha provocado la creación de diferentes mecanismos y programas que buscan combatirlo, basados mayormente en apoyos económicos y en especie de tal forma que las comunidades y ejidos sean incentivadas y opten por reducir la deforestación y conserven sus bosques como almacenes de carbono.

Contrario a lo que se esperaba, destinar las zonas con baja productividad a la captura de carbono es rentable solo con tasas de descuento bajas y con un precio por MgCO_2e capturado alto. Por lo cual, la captura de carbono aún no es una actividad rentable, debido a que no están establecidos adecuadamente los mercados de carbono y los criterios de elegibilidad como proyectos del MDL son difíciles de cumplir, esto hace difícil formar parte de estas iniciativas; aunado a lo anterior, los costos por MgCO_2e almacenado es demasiado variable lo cual causa incertidumbre, esto provoca que el aprovechamiento forestal siga siendo una de las principales actividades económicas, mientras no se den las condiciones para fomentar el establecimiento de proyectos para la captura de CO_2 . Optar por una producción conjunta, genera que los turnos óptimos de rotación se alarguen, esto se traduce en que el CO_2 almacenado en la masa forestal a intervenir se mantenga más tiempo y los beneficios que esto genera sean de índole social más que privados o individuales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

CONCLUSIONES

Conducir una densidad inicial de entre 1,000 y 2,000 árboles ha⁻¹, complementado con la aplicación en tiempo y la forma de los tratamientos silvícolas prescritos en el programa de manejo permitirá mejorar la producción total en volumen y aprovechar la productividad potencial de *Pinus patula*.

Una desregulación de actividad forestal la cual permita al silvicultor tener la libertad para aplicar los tratamientos cuando estos sean silvícola y financieramente viables, incrementaría la rentabilidad de los rodales al permitir mayores flujos de madera en menos tiempo.

La distribución Weibull resultó ser más adecuada para realizar la caracterización de la distribución diamétrica con lo cual es posible determinar los productos maderables a obtener en un momento determinado en un bosque bajo manejo, mientras que, por sus características, el enfoque que de proyección de tabla de rodal (STP) su uso es más factible en plantaciones forestales.

Los costos que el aprovechamiento forestal conlleva en la mayoría de los ejidos visitados no son conocidos, esto ha impedido alcanzar una mayor eficiencia en la actividad forestal. Por otra parte, mejores incentivos podrían influir de mejor manera en la reducción de la deforestación y degradación forestal.

Optar por una producción conjunta de madera y carbono tiende a alargar los turnos de rotación, lo que implica que el CO₂ almacenado en la masa forestal a intervenir se mantenga más tiempo, sin embargo, los dueños de los bosques en la mayoría de los casos no son compensados cabalmente por ese costo de oportunidad.

RECOMENDACIONES

Es necesario realizar remediciones periódicas de los sitios establecidos dentro de Sistema de Monitoreo Intensivo de Carbono, esta información será útil para reajustar los modelos generados y mejorar los intervalos de proyección de estos.

Sería muy importante recolectar datos en los sitios en los cuales se han practicado aclareos, dado que no se tiene información respecto a la respuesta a estos tratamientos silvícolas, misma que permitirá realizar una redistribución de los árboles y de esta forma potencializar el crecimiento del arbolado residual.

Conocer los costos fijos y variables que implica el aprovechamiento maderable es necesario para cualquier empresa forestal, porque mediante ellos es posible detectar las actividades que generan los mayores gastos y buscar las posibles soluciones, de tal manera que el aprovechamiento forestal sea más eficiente y genere mejores beneficios económicos.

El análisis económico realizado en este estudio es una primera aproximación, por lo cual se recomienda realizar un análisis de rentabilidad más detallado en el cual se incluyan los diferentes tipos de externalidades, lo que permitirá tener un panorama más amplio de lo implica que el aprovechamiento maderable y la captura de carbono conjuntamente.

Es necesario buscar nuevas opciones para comercializar bonos de carbono lo que permitiría tener nuevas fuentes de ingresos de zonas con baja productividad y donde el aprovechamiento maderable no es rentable.

LITERATURA CITADA

- Ackerman, F. 1993. The natural interest rate of the forest: Macroeconomic requirements for sustainable development. *Ecological Economics* 10: 21-26.
- Aguirre-Calderón, O. A. 2015. Manejo Forestal en el Siglo XXI. *Madera y Bosques* 21: 17-28.
- Aguirre-Salado, C. A. 2007. Almacenamiento de Carbono en bosques manejados de *Pinus patula*: Estimación mediante percepción remota. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 98 p.
- Anand, S., C. Desmond, N. Marques, and H. Fuge. 2012. The cost of inaction: case studies from Rwanda and Angola. Harvard University Press. Boston. 348 p.
- Argüello, R., B. Locatelli, G. Navarro, M. Piedra y Z. Salinas. 2007. Potencial del mecanismo de desarrollo limpio en las plantaciones forestales de Panamá. *Tierra Tropical* 1: 27-36.
- Bailey, R. L., and T. R. Dell. 1973. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. *Forest Science*. 19: 97-104.
- Bhatti J.S., G. C. Van Kooten, M. J. Apps L. D. Laird, I. D. Campbell, C. Campbell, M. R. Turetsky, Z. Yu and E. Banfield. 2003. Carbon balance and climate change in boreal forests' Chapter 20. In: Barton PJ, Messier C, Smith DW, Adamowicz WL (eds) Towards sustainable management of the Boreal forest. NRC Research Press, Ottawa, Ontario. 799-855 pp.
- Borders, B. E., W. M. Harrison, F. Y. Zhang, B. D. Shiver, M. Clutter, C. Cieszewski, and R. F. Daniels. 2004. Growth and yield models for second rotation loblolly pine plantations in the Piedmont/Upper Coastal Plain and Lower Coastal Plain of the southeastern U.S. PMRC Technical Paper School of Forest Resources, University of Georgia, Athens, GA. 64.
- Bueno-López, S. W. y E. Bevilacqua. 2011. Desarrollando un sistema de predicción de distribuciones diamétricas para *Pinus occidentalis*, sw. en la Sierra, República Dominicana. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17: 115-132.
- Burkhart, H. E., and M. Tomé. 2012. Modeling Forest Trees and Stands. Springer, New York. 457 p.
- Cao, Q. V. 2004. Predicting parameters of Weibull function for modeling diameter distribution. *Forest Science* 50:682- 685.
- Cao, Q.V. 2007. Incorporating whole-stand and individual-tree models in a stand-table projection system. *Forest Science* 53:45-49.

- Caparrós A, P. Campos, D Martín. 2003. Influence of carbon dioxide abatement and recreational services on optimal forest rotation. *International Journal of Sustainable Development* 6:345-358.
- Chagoya, J.L. y L. Iglesias G. 2009. Esquema de pago por servicios ambientales de la Comisión Nacional Forestal, México. Pp-291-292, En: Sepúlveda C.J.L. y M. Ibrahim. Políticas públicas y sistemas de incentivos para el fomento y adopción de buenas prácticas agrícolas: como medida de adaptación al cambio climático en América Central. Primera Edición. Turrialba, CATIE, Costa Rica.
- 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. *Madera y Bosques* 22: 23-36.
- Clutter, J.L., and E.P. Jones, Jr. 1980. Prediction of growth after thinning in old-field slash pine plantations. USDA Forest Service Research Paper SE-217. 14 p.
- 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.
- Clutter, J. L. and E. Jones. 1980. Prediction of Growth after Thinning in Old-field Slash Pine Plantations. USDA Forest Service Research Paper SE-217. 19 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2013. Pronafor-Programa Nacional Forestal 2013-2018. México, D. F., México. 144 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. *Madera y Bosque* 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* 26: 409-421.
- Curtis, R. O., D. D. Marshall, and J. F. Bell. 1997. LOGS: A pioneering example of silvicultural research in coast Douglas-Fir. *Journal of Forestry* 95: 19-25.
- Daniel, T. W., J. A. Helms, y F. S. Baker. 1982. *Principios de silvicultura*. McGraw-Hill. México. 442 p.

- Dean, T. J. and V. C. Baldwin. 1993. Using a density-management diagram to develop thinning schedules for loblolly pine plantations. New Orleans, LA, U.S. Res. Pap. SO-275. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 12 p
- De la Fuente, A., A. Velázquez-Martínez, J. M. Torres-Rojo, H. Ramírez-Maldonado, C. Rodríguez-Franco, y A. Trinidad-Santos. 1998. Predicción del crecimiento y rendimiento de *Pinus rudis* Endl., en Pueblos Mancomunados, Ixtlán, Oaxaca. Revista Forestal de México 23: 3-8.
- Díaz-Balteiro, L. 2002. Los sistemas forestales y la provisión de bienes ambientales. Jornada Temática “Aspectos medioambientales de la agricultura”. Libro Blanco de Agricultura. Madrid, España. 12 p.
- Cámara de diputados. 2012. Decreto por el que se expide la Ley General de Cambio Climático. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 2012. Recuperado de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_130718.pdf.
- Duan A. G, J. G. Zhang, X. Q. Zhang and C. Y. He. 2013. Stand diameter distribution modelling and prediction based on Richards function. PLoS One 8:1-12.
- Fang, Z., B. E. Borders, and R. L. Bailey. 2000. Compatible volume-taper models for Loblolly and Slash pine based on a system with segmented-stem form factors. Forest Science 46: 1-12.
- 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.
- Figueroa N., C., J. D. Etchevers B., A. Velázquez M., y M. Acosta M. 2005. Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra norte de Oaxaca. Terra 2: 57-64.
- Figueroa-Navarro, C. M. G. Ángeles-Pérez, A. Velázquez-Martínez y H. M. de los Santos-Posadas. Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 106: 105-112.
- Figueroa N., C. 2010. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en el Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 82 p.
- Foley, T. 2009. Extending Forest Rotation Age for Carbon Sequestration: A Cross-Protocol Comparison of Carbon Offsets of North American Forests. Masters Project. Nicholas School of the Environment of Duke University. Durham. North Carolina, U.S. 51 p.

- Forss, E. and K. Gadow. 1996. Growth models for unthinned *Acacia mangium* plantations in South Kalimantan, Indonesia. *Journal of Tropical Forest Science* 8: 449-462.
- Galán, L. R., H. M. de los Santos, y J. I. Valdez H. 2008. Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnel-smithii* Rose en San José Chapala, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosques*. 14: 65-82.
- García-Cuevas, X., B. Rodríguez-Santiago, y J. Islas-Gutiérrez. 2011. Evaluación financiera de plantaciones forestales de caoba en Quintana Roo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2: 7-26.
- Gómez-García, E. 2013. Modelos dinámicos de crecimiento para rodales regulares y su desagregación para la estimación de volúmenes y biomasa. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19: 337-350.
- 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. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32: 161-169.
- Grege-Staltmane, E. and Tuhern, H. 2010. Importance of Discount Rate in Latvian Forest Valuation. *Baltic Forestry* 16: 303-311.
- Gupta, J., X. Olsthoorn and E. Rotenberg. 2003. The role of scientific uncertainty in compliance with the Kyoto Protocol to the Climate Change Convention. *Environmental Science & Policy* 6: 475-486.
- Gutricha, J. R. B. Howarth. 2006. Carbon sequestration and the optimal management of New Hampshire timber stands. *Ecological Economics* 62: 441-450.
- Hafley W., L. and H. Schreuder T. 1977. Statistical distributions for fitting diameter and height data in even aged stands. *Canadian Journal of Forest Research* 7: 481-487.
- Hamrick, K. 2016. Raising Ambition State of the Voluntary Carbon Markets. *Forest Trends' Ecosystem Marketplace*. Washington, DC, USA. 58 p
- Hassani, H. and E. Sirimal S. 2015. A Kolmogorov-Smirnov Based Test for Comparing the Predictive Accuracy of Two Sets of Forecasts. *Econometrics* 3: 590-609.
- 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* schltl. et cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4: 34-45.

- Hernández-Ramos, J., García-Magaña, J., Muñoz-Flores, H., García-Cuevas, X., Sáenz-Reyes, T., Flores-López, C., y Hernández-Ramos, A. 2013. Guía de densidad para manejo de bosques naturales de *Pinus teocote* schlecht. et cham. en Hidalgo. Revista Mexicana De Ciencias Forestales 4: 62-77.
- Hui, G. and K. Gadow. 1993. Zur Modellierung der Bestandesgrundflächentwicklung dargestellt am Beispiel der Baumart *Cunninghamia lanceolata*. Allgemeine Forst-und Jagdzeitung. 164: 144-145.
- IPCC, 2001. Cambio Climático 2001. Informe de Síntesis. Anexo B. Glosario de Términos. En: www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf
- Jandl, R., M. Lindner., L. Vesterdal., B. Bauwens., R. Baritz., F. Hagedorn and A. B. Kenneth, (2006) How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?. Geoderma 137:253-268.
- Jones D. A. and K. L. O'Hara. 2012. Carbon density in managed coast redwood stands: implications for forest carbon estimation. Forestry 85: 99-110.
- Jordan, L. R. Souter, B. Parresol, and R. F. Daniels. 2006. Application of the Algebraic Difference Approach for Developing Self-Referencing Specific Gravity and Biomass Equations. Forest Science 52: 81-92.
- Klemperer, W. D. 1996. Forest resource economics and finance. McGraw Hill, New York. 551 p.
- Lima P. O. F., C. Funcia L., and R. P. C. Leal. 2011. Cost of Equity Capital and Additionality of Brazilian Renewable Energy Projects Under the Clean Development Mechanism. Latin American Business Review, 12:233-253.
- Langsaeter, A. 1941. Omtynning I enaldret gran-og furuskog Meddelelser. Fra Det norske Skogforsøksvesen 8: 131-216.
- Larsen, T. N. and Q.V. Cao. 2006. A diameter distribution model for even-aged beech in Denmark. Forest Ecology and Management 231. 218–225.
- Lobos, A. G. O. Vallejos, C. Caroca, y C. Marchant. 2006. El Mercado de los Bonos de Carbono (“bonos verdes”): Una Revisión. Revista Interamericana de Ambiente y Turismo 1: 42-52.
- 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 Journal of Applied Forestry* 23: 179-185.
- Mead, J. D. 2005. Opportunities for improving plantation productivity. How much? How quickly? How realistic?. *Biomass and Bioenergy* 28: 249-266.
- Miranda R., L. Fiorentin, S. Péllico, R. Juvanhol, y A. D. Corte. 2018. Prediction System for Diameter Distribution and Wood Production of Eucalyptus. *Floresta e Ambiente* 25: 1-12.
- Müller-Using, B., R. Rodríguez, y P. Gajardo. 2013. Desarrollo de una guía de manejo de la densidad en bosques de segundo crecimiento de roble (*Nothofagus obliqua*) en la región del Biobío. *Bosque* 34: 201-209.
- Nepal, S.K., and G.L. Somers. 1992. A generalized approach to stand table projection. *For. Sci.* 38:120-133. Pienaar L.V., and W.M. Harrison. 1988. A stand table projection approach to yield prediction in unthinned even-aged stands. *Forest Science* 34:804-808.
- Neilson, E.T., D. A. Maclean., P. A. Arp., F. R. Meng and J.S. Bhatti. 2006 Modeling carbon sequestration with CO2 Fix and a timber supply model for use in forest management planning. *Canadian Journal of Soil Science* 86: 219-233.
- Nord-Larsen, T. and Q. V. Cao. 2006. A diameter distribution model for even-aged beech in Denmark. *Forest Ecology and Management* 231: 218–225.
- Ollila, Antero. 2018. Challenging the scientific basis of the Paris climate agreement. *International Journal of Climate Change Strategies and Management* 10: 5-26.
- 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. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6: 7-16.
- Pagiola, S., J. Bishop, y N. Landel-Mills. 2003. La venta de servicios ambientales forestales. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Comisión Nacional Forestal. México, D.F. 459 p.
- Palacios-Cruz, D. J. 2018. Sistemas de crecimiento para evaluar sumideros de carbono en bosques de *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Postgrado Forestal. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 70 p.
- 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.
- Peng, C. 2000. Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. *Forest Ecology Management* 132: 259-279.
- Peters-Stanley, M., K. Hamilton, T. Marcello, and M. Sjardin. 2011. State of the voluntary carbon markets 2011: back to the future, Ecosystem Marketplace & Bloomberg New Energy Finance, Washington, D.C., 93 p.
- Pienaar, L. V., and J. W. Rheney. 1993. Yield prediction for mechanically site-prepared slash pine plantations in the southeastern coastal plain. *Southern Journal of Applied Forestry* 17: 163-173.
- Pienaar, L.V., W. M. Harrison, and J. W. Rheney. 1990. PMRC Yield Prediction System for Slash Pine Plantations in the Atlantic Coast Flatwoods. PMRC Technical Report 1990-3. 31 p.
- Pienaar, L. V., and J. W. Rheney. 1993. Yield prediction for mechanically site-prepared slash pine plantations in the southeastern coastal plain. *Southern Journal of Applied Forestry* 17: 163-173.
- Pretzsch, H. 2009. Forest dynamics, growth and yield: From measurement to model. Springer-Verlag. Berlín, Heidelberg. Alemania. 664 p.
- Quiñones-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.
- Rakatamaa, A., R. Pandita, C. Maa, y S. Iftekhar. 2017. The costs and benefits of REDD+: A review of the literatura. *Forest Policy and Economics* 77: 103-111.
- 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. *Madera y Bosques* 23: 163-179.
- Reynolds, M.R., T.E. Burk and W. Huang. 1988. Goodness-of-fit test and model selection procedures for diameter distribution models. *Forest Science* 34: 373-399.
- Rodríguez, S. L. 2007. Protocolo de Kyoto: Debate sobre ambiente y desarrollo en las discusiones sobre cambio climático. *Gestión y Ambiente* 10: 119-128.
- Rodríguez, B. M., H. Mance, X. R. Barrera y A. C. García. 2009. Cambio climático: lo que está en juego. El Bando Creativo. Bogotá, Colombia. 102 pp.

- Rügnitz, M. T., M. Chacón L. y R. Porro. 2009. Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. 1a. Ed. Lima: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA).
- Sabogal-Aguilar, J. E. Moreno-Castillo, G. A. Ortega-Guerrero. 2009. Procesos de certificación de proyectos de captura de gases de efecto invernadero (GEI). 12: 7-20.
- 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. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 12: 65–83.
- 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.
- Santiago-García, W., H. M. de los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, J. R. Valdez-Lazalde, y G. Ramírez-Valverde. 2013. Sistema compatible de crecimiento y rendimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula*. Revista Fitotecnia Mexicana 36: 163-172.
- 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.
- SAS (Statistical Analysis System). 2008. SAS/STAT 9.0 User's Guide. SAS Institute Inc. Raleigh, NC USA. 248 p.
- Shin, S., and S. C. Suh. 2003. Flexibility mechanisms and credit discounting. Environment and Development Economics. 13: 247-260.
- Stainback, G. A. and J. R. R. Alavalapati. 2002. Economic analysis of slash pine forest carbon sequestration in the southern U. S. Journal Forest Economics 8: 105–117.
- 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.
- Steven A. Knowe, A. S., A. R. Glenn and D. S. DeBell. 1997. Comparison of diameter-distribution-prediction, stand-table-projection, and individual-tree-growth modeling approaches for young red alder plantations Forest Ecology and Management 98: 49-60.
- Telles-Mejía, E. M. J. González-Guillén, H. M. De los Santos-Posadas, A. M. Fierros-González; R. J. Lilieholm y A. Gómez-Guerrero. 2008. Rotación óptima en plantaciones de eucalipto

- al incluir ingresos por captura de carbono en Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31: 173-182.
- Torres, J. M. y O. S. Magaña. 2001. *Evaluación de Plantaciones Forestales*. Limusa, México. 472 p.
- Torres-Rojo, J. M., O. S. Magaña-Torres, y M. Acosta-Mireles. 2000. Metodología para mejorar la predicción de parámetros de las distribuciones diamétricas (Ensayo). *Agrociencia* 34: 627-637.
- Torres-Rojo, J. M., R. Moreno-Sánchez, and M. A. Mendoza-Briseño. 2016. Sustainable forest management in Mexico. *Current Forestry Reports* 2: 93-105.
- UNFCCC. 2015. Acuerdo de París. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/109s.pdf>. Consultada, 11-noviembre-2018.
- Vallejos-Barra, O. S., D. Aedo-Ortiz, P. N. Izquierdo-Ossandon y M. A. Vásquez-Sandoval. 2009. Evaluación de procedimientos de ajuste óptimo de todos los parámetros de Weibull 3p para modelar la estructura horizontal en plantaciones de *Pinus taeda*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15: 101-108.
- Vanclay, J. K. 1994. *Modeling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests*. CAB International. Denmark. 312 p.
- 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. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 23: 437-455.
- Weibull, W. 1939. The phenomenon of rupture in solids. *Proc. Royal Swedish Institute of Engineering Research (Ingeniorvetenskaps Akademiens Handlingar)* 153:1-55.
- World Bank and Ecofys. 2018. *State and Trends of Carbon Pricing 2018 (May)*. Washington, DC. 62 p.
- Zamudio-Sánchez, F. J., J. L. Romo-Lozano y J. O. A. Cervantes-Carrillo. 2010. Evaluación financiera y de riesgo de una plantación forestal comercial en Zihuateutla, Puebla. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16: 69-78.
- Zeide, B. 2004. Optimal stand density: a solution. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 846-854.