

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**Crecimiento en plantaciones de *Pinus chiapensis* (Martínez)
Andresen en Tlatlauquitepec, Puebla.**

Reynol Fierros Mateo

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2016

La presente tesis titulada: “Crecimiento en plantaciones de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en Tlatlauquitepec, Puebla”, realizada por el alumno: Reynol Fierros Mateo, 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 Forestales

CONSEJO PARTICULAR

Consejero:



Dr. Héctor Manuel De Los Santos Posadas

Asesor:



Dr. Aurelio Manuel Fierros González

Asesor:



Dr. Francisco Cruz Cobos

Montecillo, Texcoco, México, 19 de Febrero del 2016

CRECIMIENTO EN PLANTACIONES DE *Pinus chiapensis* (MARTÍNEZ) ANDRESEN
EN TLATLAUQUITEPEC, PUEBLA.

Reynol Fierros Mateo, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2016.

RESUMEN

En 2007 se iniciaron labores para convertir terrenos agrícolas en plantaciones forestales comerciales de *Pinus chiapensis* en el predio El Campanario, ubicado en Tltilauquitepec, Puebla. A la fecha, aun contando con varias edades se desconocen diversos aspectos sobre su desarrollo, entre ellos, el volumen maderable existente en las aproximadamente 100 ha plantadas. Las labores silvícolas se han hecho de forma empírica, ya que se carece de información que permita optimizar el manejo de estas plantaciones. Con estos antecedentes, los objetivos del presente trabajo fueron; estimar el inventario forestal de las plantaciones de *Pinus chiapensis* y determinar un esquema óptimo de muestreo, además de generar un sistema de crecimiento y rendimiento para describir adecuadamente el crecimiento y proyección de las existencias volumétricas totales. Para el inventario se aplicaron varios estimadores de muestreo que fueron Muestreo Simple al Azar, Estratificado y estimadores de Razón y Regresión. Para el sistema de crecimiento se ajustaron modelos de altura dominante, área basal, mortalidad y volumen. Los resultados del inventario muestran que los estimadores de regresión fueron los más eficientes. En el sistema de crecimiento el índice de sitio se describe mejor con las familias polimórficas del modelo de Hossfeld IV. La tabla de rendimiento generada estima que el turno técnico en volumen, para índices de sitio promedio, sucede a la edad de 20 años, con rendimientos de 454 m³ ha⁻¹. El sistema de crecimiento generado es 100% compatible con el inventario.

Palabras clave: Inventario forestal, sistema de crecimiento y rendimiento, muestreo simple al azar, muestreo estratificado, índice de sitio.

GROWTH AND YIELD OF *Pinus chapiensis* (MARTINEZ) ANDRESEN AT
TLATLAUQUITEPEC, PUEBLA.

Reynol Fierros Mateo, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2016.

ABSTRACT

At 2007 “El Campanario” agriculture fields started a conversion into a *Pinus chapiensis* forest plantation at Tlatlauquitepec, Puebla. To date, and despite having several stands of different ages planted at “El Campanario” the general growing pattern and basic biometrics of this project are still unknown, among these, the total yield of the approximately 100 ha planted. Silviculture was empirically applied, since there is no information to guide the required forestry operations. With this background, the main targets of this work are: Estimate total forest inventory and define and optimal sampling approach, also generating a growth and yield inventory-compatible system to accurately forecast and project forest stock. For the inventory several sampling estimators were applied among Complete Randomized sampling, Stratified sampling and Ratio/Regression estimators. For the growth and yield system dominant height model were fitted, basal area, mortality and total volume. The sampling estimators used suggests that regression estimators are the most efficient. In the growth and yield system site index was better described with polymorphic curves derived from the Hossfeld IV model. At the average site index a yield of $454 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ table is estimated at the rotation age of 20 years.

Key words: Forest inventory, growth and yield system, Complete Randomized sampling, Site index, Regression estimators.

DEDICATORIA

Al creador de todo lo existente, el que me da la fortaleza para continuar cuando estoy a punto de caer, por ello, con toda la humildad que mi corazón puede emanar, dedico este trabajo a DIOS.

Especialmente, dedico este trabajo a mi MADRE, la Sra. Silvia Mateo Romero, porque ha sabido formarme con excelentes y extraordinarios sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha permitido salir adelante en los momentos más difíciles de la vida. Por ser la mujer que me trajo al mundo y por darme su amor, apoyo y cariño incondicional. Te amo mamá.

"Tus brazos siempre se abren cuando necesito un abrazo. Tu corazón sabe comprender cuándo necesito una amiga. Tus ojos sensibles se endurecen cuando necesito una lección. Tu fuerza y tu amor me han dirigido por la vida y me han dado las alas que necesitaba para volar".

A mis hermanos Reyna Sayuri y Omar, con quienes crecí divirtiéndonos, llorando, riendo y amándonos. Por ser personas muy importantes en mi vida y formar parte de mí. Los amo y adoro, y siempre estaré con ustedes para apoyarlos en todo momento.

Al Sr. Donaciano Mateo Martínez, porque aparte de ser mi abuelo y padre, fuiste mi consejero y mi mejor amigo. Sé que sigues y guías mis pasos desde allá arriba. Aún recuerdo que me dijiste "Cuando empieces algo, siempre terminalo, sino, mejor no lo empieces", sin duda alguna, palabras que siempre recordaré y que me han ayudado a cumplir metas y sueños. Gracias abuelito.

A Rachel Yerith Zarate Moreno, esa maravillosa persona que me ha dejado compartir parte de mi vida a su lado, por ser paciente, brindarme su amor y apoyo durante mi formación académica. Gracias por darme confianza y no dejarme caer cuando ya no tenía las fuerzas para seguir avanzando. Tú eres ese rayo de luz que me guía cuando siento que estoy perdido, te amo.

Reynol Fierros Mateo.

AGRADECIMIENTOS

Mis sincero reconocimiento y agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme brindado el apoyo económico de una beca durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados para la realización de mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados y su programa en Ciencias Forestales, por su gran excelencia como institución académica y por haberme permitido realizar mis estudios de maestría.

Al Ingeniero Oscar Lemini, por haberme permitido realizar este trabajo en sus plantaciones, estar atento a las necesidades que surgieron y brindarme su apoyo en la toma de datos. De igual forma, mis sinceros agradecimientos al ingeniero Lauro Tonacatl, por haber participado como supervisor en las labores de levantamiento de datos, y ser el contacto con el dueño de la plantación, lo cual hizo posible la realización de este trabajo

Al Dr. Héctor Manuel De Los Santos Posadas, por su excelencia como profesor y por compartir sus amplios conocimientos, su disponibilidad en todo momento para aclarar dudas y preguntas, ser director y revisor del presente trabajo de investigación. Le agradezco sus atinadas sugerencias, que hicieron posible la culminación este trabajo. Gracias por permitirme ser uno más de sus alumnos asesorados, por su invaluable amistad y todo el apoyo brindado durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados.

Al Dr. Aurelio Manuel Fierros González, le agradezco el haber aceptado ser parte mi consejo particular, así como sus valiosos comentarios y sugerencias para mejorar este trabajo; gracias por su disponibilidad, durante esta etapa de mi formación, para solucionar dudas en todo momento.

Al Dr. Francisco Cruz Cobos, por su grandiosa amistad durante años, sus interesantes pláticas, consejos y recomendaciones, que me han ayudado durante mi formación académica. Muchas gracias por confiar en mí y recomendarme para realizar mis estudios de maestría. Le agradezco que haya aceptado ser parte de mi consejo particular y brindarme sugerencias que enriquecieron e hicieron posible mejorar esta investigación.

Al Dr. Javier López Upton, por fungir como sinodal en la presentación de este trabajo.

Quiero agradecer a todos mis profesores del Colegio de Postgraduados, quienes me brindaron sus conocimientos sin recelo alguno. Un especial agradecimiento al personal administrativo del postgrado en Ciencias Forestales, que siempre atendieron mis inquietudes de una forma muy amable.

A mis apreciables amigos y compañeros con quienes compartimos momentos agradables: Martín, Luis, Esteban, Fabiola, Gerónimo, Efraín, Rolando, Joel, César, Constantino, Adrián y Jonathan. A todas las personas que me proporcionaron su apoyo en la toma de datos para realizar este trabajo.

Hago mención especial al Licenciado Oscar Zárate y a la Sra. Columba Moreno, por darme aliento para culminar esta etapa de mi formación y patrocinar la impresión del presente trabajo.

CONTENIDO

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS	v
CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE CUADROS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
CAPÍTULO I	2
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	2
1.1. Generalidades	2
1.2. Descripción general de área de estudio	2
1.2.1. Ubicación geográfica	2
1.2.2. Orografía	4
1.2.3. Hidrografía.....	4
1.2.4. Clima	5
1.2.5. Principales ecosistemas	5
1.2.6. Recursos naturales y edafología	6
1.3. Descripción de la especie	6
1.3.1. Descripción botánica	6
1.3.2. Antecedentes	7
1.3.3. Distribución y características.....	7
1.3.4. Importancia de la especie.....	9

1.3.5. Vegetación asociada	9
1.3.6. Suelos	9
1.4. Datos específicos de la plantación	10
1.4.1. Procedencia de las plantas	10
1.4.2. Establecimiento y plantación de la especie	10
1.4.3. Estrategia del inventario	11
1.5. Modelos de crecimiento y rendimiento	12
1.5.1. La curva sigmoide relacionada al crecimiento	13
1.5.2. Cualidades de un modelo de crecimiento.....	13
1.5.3. Clasificación de los modelos crecimiento	14
1.5.4. Importancia de los modelos de crecimiento	16
1.6. Sistemas de crecimiento y rendimiento maderable	17
1.6.1. Componentes del sistema de crecimiento y rendimiento maderable.....	17
1.6.1.1. Altura dominante	17
1.6.1.2. Calidad de estación.....	18
1.6.1.3. Índice de sitio	19
1.6.1.3.1. Curvas anamórficas	19
1.6.1.3.2. Curvas polimórficas	20
1.6.1.3.3. Métodos de construcción de curvas de índice de sitio	20
1.6.2. Área basal	21
1.6.3. Número de árboles	22
1.6.4. Volumen	23
1.7. Objetivos.....	23
1.7.1. General.....	23
1.7.2. Específicos	23

1.8. Literatura citada	23
CAPÍTULO II	28
2. ESTIMADORES DE MUESTRO PARA INVENTARIO DE PLANTACIONES DE <i>Pinus chiapensis</i> (MARTÍNEZ) ANDRESEN EN TLATLAUQUITEPEC, PUEBLA.....	28
2.1. RESUMEN.....	28
2.2. ABSTRACT.....	29
2.3. Introducción	30
2.4. Materiales y métodos.....	31
2.4.1. Obtención de variables.....	31
2.4.2. Estimadores muestrales	32
2.4.2.1. Muestreo Simple Aleatorio	33
2.4.2.2. Muestreo Simple Estratificado.....	34
2.4.2.3. Estimadores de Razón y de Regresión.....	35
2.5. Resultados y Discusión	37
2.5.1. Modelos de altura total	37
2.5.1.1. Correlaciones de las variables	39
2.5.2. Resultados de los muestreos implementados	40
2.5.2.1. Inventario 2014	42
2.5.2.2. Inventario 2015	43
2.6. Conclusiones	44
2.7. Literatura citada.....	45
CAPÍTULO III	48
3. Sistema de crecimiento y rendimiento para plantaciones de <i>Pinus chiapensis</i> (Martinez) Andresen enTlatlauquitepec, Puebla.	48
3.1. RESUMEN.....	48
3.2. ABSTRACT.....	49

3.3. Introducción	50
3.4. Materiales y métodos.....	51
3.4.1. Sistema de rendimiento maderable	52
3.4.2. Altura dominante	52
3.4.3. Crecimiento en área basal.....	54
3.4.4. Mortalidad.....	54
3.4.5. Volumen total con corteza	55
3.4.6. Ajuste del SCRM	55
3.5. Resultados y discusión	56
3.5.1. Modelos de área basal, mortalidad y volumen	66
3.5.2. Uso del SCRM.....	69
3.6. Conclusiones	72
3.7. Literatura citada	73
CAPÍTULO IV	77
4. CONCLUSIONES GENERALES	77
4.1. Inventario forestal	77
4.2. Sistema de crecimiento y rendimiento explícito	77

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.4.1. Estimadores del Muestreo Simple al Azar	33
Cuadro 2.4.2. Estimadores del Muestreo Simple Estratificado	35
Cuadro 2.4.3. Estimadores de Razón (R) y Regresión (Rg).....	37
Cuadro 2.5.1. Estadísticos obtenidos, parámetros estimados y significancia de los modelos de altura en función del diámetro normal.....	38
Cuadro 2.5.2. Resultados de los estimadores del MSA 2014.	40
Cuadro 2.5.3. Resultados de los estimadores del MSE 2014.	40
Cuadro 2.5.4. Resultados de los estimadores de R y Rg 2014.....	41
Cuadro 2.5.5. Resultados de los estimadores del MSA 2015.	41
Cuadro 2.5.6. Resultados de los estimadores del MSE 2015.	41
Cuadro 2.5.7. Resultados de los estimadores de R y Rg 2015.....	41
Cuadro 2.5.8. Resultados de los estimadores de R y Rg 2014 y 2015.	42
Cuadro 3.4.1. Estructuras de los modelos ajustados en altura dominante.	53
Cuadro 3.5.1. Estadísticos obtenidos de los modelos ajustados en diferencia algebraica para altura dominante.....	56
Cuadro 3.5.2. Parámetros estimados, error estándar y significancia de los modelos ajustados en diferencia algebraica para altura dominante.....	57
Cuadro 3.5.3. Comparación en la estimación de las alturas dominantes de los modelos promedio ajustados respecto a las alturas verdaderas.	63
Cuadro 3.5.4. Suma de cuadrados de las diferencias por edad de los modelos promedio ajustados.	63
Cuadro 3.5.5. Estadísticos obtenidos de los modelos ajustados en diferencia algebraica para área basal, mortalidad y volumen.....	66
Cuadro 3.5.6. Parámetros estimados, error estándar y significancia de los modelos de predicción y proyección en área basal, mortalidad y volumen.	66
Cuadro 3.5.7. Predicción del crecimiento y rendimiento maderable para los IS =10, 14 y 18 m considerando una densidad inicial de 1100 árboles ha ⁻¹	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación del Municipio de Tlatlauquitepec, Puebla.	3
Figura 2.5.1. Curva diámetro-altura.....	38
Figura 2.5.2. Relación de las variables principales respecto a las auxiliares para las mediciones 1 y 2.....	39
Figura 3.5.1. Curvas promedio de crecimiento en altura dominante para <i>Pinus chiapensis</i>	58
Figura 3.5.2. Familias de curvas de crecimiento en altura dominante para categorías de índice de sitio de 18, 14 y 10 m a una edad base de 8 años para los modelos: a) Bass anamórfico b) Hossfeld IV anamórfico c) Hossfeld IV polimórfico d) Weibull anamórfico e) Weibull polimórfico y f) Shumacher anamórfico.	59
Figura 3.5.3. Residuales contra predichos y la edad de los modelos ajustados, a), a1) Bass anamórfico; b), b1) Hossfeld IV anamórfico y c), c1) Hossfeld IV polimórfico.	61
Figura 3.5.4. Residuales contra predichos y la edad de los modelos ajustados. d), d1) Weibull anamórfico e), e1) Weibull polimórfico y f), f1) Shumacher anamórfico	62
Figura 3.5.5. Turnos técnicos de Incremento en altura dominante en tres índices de sitio para el sistema Hossfeld IV-Polimórfico.	65
Figura 3.5.6. Curvas de crecimiento en área basal en tres índices de sitio para <i>Pinus chiapensis</i>	67
Figura 3.5.7. Curvas crecimiento en Volumen en tres índices de sitio para <i>Pinus chiapensis</i>	69
Figura 3.5.8. Curvas del incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) por índice de sitio, a una edad base de 10 años.	71

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La demanda creciente de productos maderables a nivel mundial, ha despertado gran interés en varios países por recurrir a las plantaciones forestales como política de estado que permita lograr el abastecimiento seguro de madera. Las plantaciones forestales comerciales, que representan únicamente el 4% de la cubierta forestal mundial, abastecen aproximadamente el 40% de la demanda mundial de madera (FAO, 2011). Las tasas de crecimiento de un bosque natural no cultivado son inferiores a las tasas de crecimiento de una plantación forestal comercial.

En México se ha considerado el establecimiento y desarrollo de plantaciones forestales comerciales, se han creado distintas modalidades para lograr estos propósitos tales como el Programa para el Desarrollo de Plantaciones Comerciales (PRODEPLAN) en 1977, y en 1997 se constituye el Fideicomiso de Plantaciones Forestales Comerciales (FIDEPLAN), el cual se encargaría de administrar los recursos asignados al PRODEPLAN.

Las plantaciones forestales como proyectos a largo plazo, requieren de evaluaciones precisas que permitan su adecuado manejo. Una forma es a partir de los inventarios forestales, que se definen como el conjunto de procedimientos aplicados para determinar el estado actual de un bosque. Estos recaban información precisa de las variables de interés a través de su identificación y caracterización. La interpretación de la expresión “estado actual” varía de una situación a otra, conforme varía el objetivo perseguido por el inventario. A partir de los inventarios se obtiene información dasométrica que requiere ser actualizada constantemente, esta puede ser complementada con los sistemas de crecimiento y rendimiento maderable (SCRM), en conjunto se pueden obtener proyecciones confiables para planificar el manejo de la plantación.

Los modelos de crecimiento son una herramienta importante para los silvicultores, estos permiten predecir la evolución dasométrica de las masas, facilitan la toma de decisiones y planifican el manejo forestal a mediano y largo plazo (Cruz, 2007).

El cálculo de existencias maderables, identificación de la productividad de áreas forestales, obtención de incrementos maderables, conocimiento sobre los periodos de

máxima producción y la caracterización del área basal, representan una herramienta muy importante en el desarrollo de los SCRM, pues ayudan en la planeación y formulación de regímenes de manejo forestal.

1.1. Generalidades

El presente trabajo de investigación se compone por tres capítulos, en el capítulo 1 se menciona la descripción general de las metodologías utilizadas, una revisión general del marco de referencia, descripción del área de estudio y objetivos; en el capítulo 2 se obtiene el inventario forestal en las plantaciones de *Pinus chiapensis* aplicando tres estimadores de muestreo: aleatorio simple, estratificado y estimadores de razón y regresión, para determinar una estrategia óptima de muestreo; en el capítulo 3 se presenta el desarrollo en un sistema de crecimiento y rendimiento maderable para plantaciones de *Pinus chiapensis*; por último en el Capítulo 4, se presentan las conclusiones y recomendaciones generales del trabajo realizado.

1.2. Descripción general de área de estudio

1.2.1. Ubicación geográfica

El Municipio de Tlatlauquitepec se localiza entre los 19° 36' 24" de latitud norte y 97° 14' 42" de latitud oeste; la altura sobre el nivel del mar varía entre 300 y 3,000 metros. Colinda al norte con los municipios de Zacapoaxtla, Cuetzalan del Progreso y Ayotoxco de Guerrero; al este con los municipios de Ayotoxco de Guerrero, Hueyapan, Yaonáhuac, Teteles de Avila Castillo y Atempán; al sur con los municipios de Atempán, Chignautla, Cuyoaco, Zautla y Zaragoza; al oeste con los municipios de Cuyoaco, Zautla, Zaragoza y Zacapoaxtla (Figuras 1.1 y 1.2). Ocupa el 0.9% de la superficie del Estado de Puebla, cuenta con 91 localidades y una población cercana a los 60,000 habitantes.

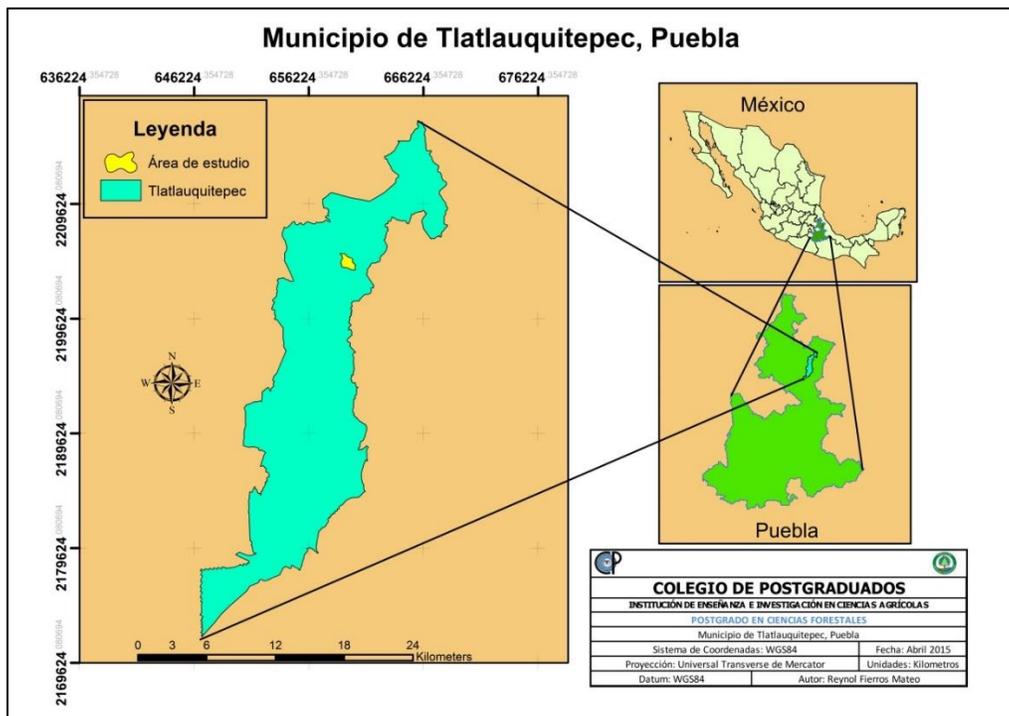


Figura 1.1. Ubicación del Municipio de Tlatlauquitepec, Puebla.

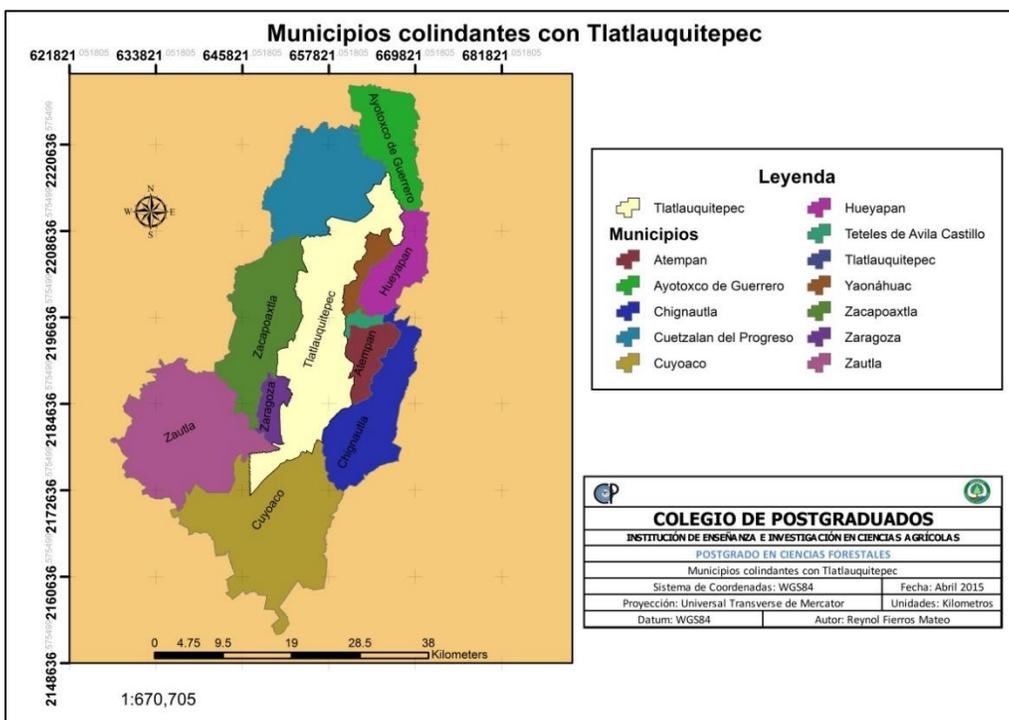


Figura 1.2 Municipios.

1.2.2. Orografía

En el municipio confluyen tres regiones morfológicas: el extremo noreste se ubica en la porción sur oriental del declive del Golfo; la parte central de la Sierra Norte y el declive austral de la Sierra de Puebla (SEDESOL, 2014).

La Sierra Norte o Sierra de Puebla está formada por sierras más o menos individuales, paralelas, comprimidas las unas contra las otras, formando pequeñas montañas elevadas que aparecen frecuentemente escalonadas hacia la costa; el declive del Golfo es septentrional de la Sierra Norte hacia la llanura costera del Golfo de México y se caracteriza por sus chimeneas volcánicas y lomas aisladas; el declive austral de la Sierra Norte es en descenso hacia los llanos de San Juan.

Los picos más importantes de esta sierra son: Las Animas, El Cabezón, Acamalotla, Coatetzin, Punta la Bandera, la Cumbre del Mirador y el cerro Tepequez. Destacan también, los cerros: Hueytepec y el Jilotépetl además del cerro de san Antonio ubicado en Oyameles (SEDESOL, 2014).

De la sierra hacia el norte y el noroeste, el relieve desciende, aunque presenta algunos cerros aislados como el campanario. El relieve del municipio es accidentado como característica topográfica principal, presenta un suave y después pronunciado declive de más de 25 kilómetros de largo que se inicia al sur en la zona montañosa de los oyameles, y culmina en la riera del río Apulco, a menos de 800 metros de altura.

1.2.3. Hidrografía

El municipio presenta gran cantidad de ríos que se originan al sur, lo recorren de sur a norte y desembocan finalmente en el Apulco, que es una caudalosa corriente que tiene un largo recorrido por la sierra nororiental. Su caudalosa corriente abastece al complejo hidroeléctrico "Adolfo Ruiz Cortines", conformado por la presa hidroeléctrica "La Soledad" y la planta generadora de electricidad "Mazatepec. Al cambiar de dirección hacia el norte, sirve de límite con Ayotoxco, asimismo, cuenta con algunos arroyos que desembocan en el Apulco; destacan el Chalchihuapan, Coxolesco, Mina de Guadalupe, Xocololoyaco y Agua Santa (SEDESOL, 2014).

Un buen número de manantiales y un complejo sistema de acueductos van de Zaragoza a Tlatlauquitepec, de Gómez Poniente a Tzinacatepec, de Tepeteno a Yaonáhuac, de la presa a Mazatepec.

Los ríos que se originan en la parte sur del municipio, lo recorren de sur a norte hasta topar con la sierra que se levanta en la parte central entre san Agustín Chagchaltzin y el Progreso; se desvían hacia el oriente y se concentran en el Xucayucan, ya fuera del municipio, los ríos que forman el Xucayucan son: el Atemeza, Xochihuatzaloyan, Atemochicha, Jardín, Acongo, Balastrera, Tochimpa, Ajocotzingo, Comalco y Santiago (SEDESOL, 2014).

1.2.4. Clima

Por su localización y extensión, presenta una gran variedad de climas, que señala la transición entre los climas templados de la sierra norte y los cálidos del declive del golfo. Se identifican los siguientes climas (SEDESOL, 2014):

- ✚ Templado húmedo con abundantes lluvias en verano (34%).
- ✚ Semicálido húmedo con lluvias todo el año (29%).
- ✚ Templado húmedo con lluvias todo el año (13%).
- ✚ Templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (12%).
- ✚ Templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (10%) y;
- ✚ Semifrío subhúmedo con lluvias en verano (2%).

El rango de precipitación varía de 600 a 4,100 mm.

1.2.5. Principales ecosistemas

El municipio ha perdido una buena parte de su vegetación original, las zonas centro y sur muestran áreas reducidas de pino-encino y oyamel. Al norte, los bosques son más abundantes, encontrándose bosque mesófilo de montaña, constituido por liquidámbar y jaboncillo. Las áreas desforestadas han sido incorporadas a la actividad agropecuaria. Grandes zonas al centro y sur se dedican a la agricultura temporal. Al norte representa áreas extensas de pastizal inducido, que crecen a costa de los bosques. En fauna se cuenta con conejos, ardillas, armadillo, reptiles, y una gran variedad de aves. Algunos

animales como el venado temazate, pumilla, tigrillo, se extinguieron por la excesiva cacería y por los desmontes.

1.2.6. Recursos naturales y edafología

En la región existen bosques, minas de arena, piedra de cal, barro, arcilla roja y variedades de madera. Se identifican cuatro grupos de suelos (SEDESOL, 2014):

- ✚ Andosol: Cubre la mayor parte del territorio del río Apulco hacia el sur.
- ✚ Litosol: Ocupa un área reducida en el extremo sureste.
- ✚ Regosol: Se localizan en un área al sureste.
- ✚ Luvisol: Cubre el norte a partir del río Apulco.

1.3. Descripción de la especie

1.3.1. Descripción botánica

Martínez, 1948; Loock, 1950; Andresen, 1964 y Eguiluz, 1978, describen al *Pinus chiapensis* como un árbol de tronco recto, hasta de 30 metros de altura, con un diámetro normal de un metro aproximadamente, ramas largas, más o menos horizontales, apareciendo en verticilos regulares con claros entrenudos de 0.9 m de longitud, ramillas delgadas, colgantes, con las hojas amontonadas en sus extremidades. La corteza en árboles jóvenes y en la parte superior del tallo y ramas es lisa y de color grisáceo a verde grisáceo. La parte baja del tallo es áspera, la corteza es fuerte y parecida a la del roble (*Quercus* sp.) con fisuras verticales largas, poco profundas y en color gris encendido y café. La copa densa con forma piramidal y cónica.

Fascículos con 5 acículas, de 7.5 a 13.0 cm de longitud, muy delgadas y finas, flexibles, colgantes, con color verde encendido a verde amarillento y glaucos en caras internas; tres ductos resiníferos usualmente, rara vez menos (algunas veces cuatro canales resiníferos). Vainas café amarillentas brillantes en acículas muy jóvenes, pronto deciduas, de 13-15 mm de longitud, yemas subcilíndricas, café rojizas y resinosas.

Conillos masculinos laterales erectos, subcilíndricos, usualmente en agrupamientos de 2 a 3. Conos cilíndricos, ligeramente ahusados hacia la punta, muy resinosos, de 10 a

15 cm de longitud y de un color café amarillento pálido, con pedúnculos débiles y encorvados de 28 a 35 mm de longitud.

Semillas café oscuras, pequeñas, cerca de 6 mm de longitud y 4 mm de ancho con una testa frágil provista con un ala café cerca de 25 mm de longitud y 5 mm de ancho, 61,000 semillas por kilogramo (rango de 45,000-100,000).

1.3.2. Antecedentes

Pinus chiapensis (Martínez) Andresen, originalmente conocido como *P. strobus* L. es nativo de América del Norte, sorprendentemente fue encontrado únicamente en el Estado de Chiapas. Martínez (1948), no encontró diferencias específicas al comparar esta especie con ejemplares de *P. strobus* de Estados Unidos, tomando como referencia que las hojas son más delgadas y finas, los canales resiníferos son tres en vez de dos y de acuerdo a las características presentes en ejemplares norteamericanos, decidió consignarla como una variedad del *Pinus strobus* L. Andresen en 1966, recomendó que el *P. strobus* var. *chiapensis* Martínez fuera elevado de variedad a rango específico como *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. Esta propuesta consideró observaciones de campo del taxón de la especie, evidencias de estudios de morfología y datos de progenie (Martínez, 2000).

La utilización del nombre *Pinus strobus* var. *chiapensis* Martínez fue propuesta por Farjon, *et al.*, (1997). Debido a que la literatura nacional en la reciente década usa en forma extensiva el nombre de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, se decidió mantener este nombre para la presente investigación.

1.3.3. Distribución y características

Pinus chiapensis es una especie endémica de México y América Central. En México se distribuye en los estados de Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Puebla y Veracruz (Eguiluz, 1988). En Guatemala su distribución se limita a los Departamentos de Huehuetenango y Quiché (Rodríguez y Arteaga., 2004).

El rango altitudinal de *P. chiapensis* va de 150 a 2300 msnm, dentro de los 15°35' y 20°00' de latitud Norte, 92°15' y 101°20' de longitud Oeste (Eguiluz 1978; Wright *et al.*, 1996). Esta especie es considerada como uno de los recursos forestales más

importantes en las montañas húmedas y áreas subtropicales del sureste mexicano y noreste de Guatemala (Del Castillo *et al.*, 1995). *Pinus chiapensis* puede alcanzar alturas de 20 a 35 m y en ocasiones, hasta 50 m. Su diámetro varía de 60 a 130 cm (Del Castillo, 1996; Martínez, 2000; Rodríguez, 2004). La floración se presenta en los meses de marzo y abril, la maduración de conos se presenta en los meses de julio y agosto (Rodríguez y Arteaga, 2004).

Al ser una de las especies de pino que se distribuye más cerca al nivel del mar, representa un gran potencial para el desarrollo en zonas tropicales y subtropicales, sobre todo considerando que se reportan incrementos muy buenos (Romero, 2005). *P. chiapensis* alcanza diámetros de 60 a 65 cm y alturas de 25 a 30 m a la edad de 30 años, lo que representa incrementos anuales promedio de 2 cm en diámetro y de 1.0 m en altura, por lo que es considerado un árbol de rápido crecimiento (Domínguez, 1996). En África, Asia y América se ha evaluado la productividad de diferentes procedencias y los resultados obtenidos indican que puede alcanzar alturas de 8 a 18.3 m y de 8.3 a 29.5 cm de diámetro con edades de 3.5 a 12.5 años, respectivamente (Domínguez, 1996).

P. chiapensis habita en bosques montañosos, subtropicales, templados y cálidos, aledaños a las selvas altas, con gran cantidad de lluvia y neblina. Se encuentra en laderas de cerros, filos de serranías, pequeños lomeríos, cañadas, zonas rocosas y en terrenos con pendiente de 24 a 42°. Algunas poblaciones se encuentran en lomas con pendientes ligeras; también se localiza en terrenos expuestos a influencia marítima, en áreas donde existe humedad, como son los fondos de los barrancos y laderas de cañadas. Puede establecerse en exposiciones variadas, pero las más comunes son noreste, oeste y sureste (Romero, 2005).

La especie se desarrolla principalmente en bosques de pino-encino, encino y en bosques mesófilos de montaña en donde es muy común observarlo en asociación con *Liquidambar styraciflua*. En Los Chimalapas se encuentra en la selva alta perennifolia, y en bosques de encino principalmente en cañadas húmedas y en los bosques mesófilos de montaña, aunque también se puede encontrar en forma de bosque secundario. Se considera que *P. chiapensis* es una especie que tiene regulación

denso-dependiente a expensas de individuos de crecimiento más lento (Del Castillo *et al.*, 1995).

1.3.4. Importancia de la especie

Pinus chiapensis Martínez Andresen se encuentra bajo una presión muy severa, debido a la conversión de las pequeñas áreas de bosque donde se ubica a tierras agrícolas y a la explotación selectiva de la especie; aunado a esto, está la escasa regeneración natural de la especie por las condiciones especiales que requiere para ello (Domínguez, 1996). Debido a que en varias localidades está en peligro de extinción, es una especie que está catalogada bajo Protección Especial, las cuales son aquellas que se encuentran sujetas a limitaciones o vedas en su aprovechamiento por tener poblaciones reducidas o debido a que su distribución geográfica es muy restringida o para propiciar la recuperación y conservación de las especies que se asocian a ellas.

1.3.5. Vegetación asociada

En el Estado de Puebla y en diferentes regiones de México donde se distribuye *P. chiapensis*, se encuentra asociado con *P. pseudostrobus*, *Liquidambar styraciflua*, *Ostrya spp.* y *Platanus spp.* En Veracruz coexiste con *Platanus mexicana* y *Ulmus mexicana* en la zona de transición entre el bosque caducifolio y selva mediana subperenifolia (Del Castillo *et al.*, 1995; Romero, 2005)

En Oaxaca y Guerrero, se encuentra en asociación con *Quercus acutifolia*, *Carpinus caroliniana*, *Pinus ayacahuite* y *P. patula* var. *longepedunculata*, *Podocarpus spp.*, *Clethra spp.*, *Fraxinus spp.*, *Populus spp.* y varias especies de Lauráceas (Eguiluz, 1978).

1.3.6. Suelos

Pinus chiapensis se distribuye en suelos que pueden presentar grados de perturbación ligeros y en algunos casos erosión. En localidades de Oaxaca, Guerrero y Chiapas el cambio de uso de suelo para frutales o café, ejerce una alta presión para su permanencia (Martínez, 2000).

En su rango de distribución natural, los suelos son profundos, areno-arcillosos y con pH de 5.5 a 6.5 (Romero, 2005). A su vez, se reportan valores de 4.5 y 5.5 en las

comunidades de Atzalán, Veracruz y Tlatlauquitepec, Puebla, con suelos de buen drenaje, arenolimosos y arcillo-areno-limosos, con profundidades mayores a 1m (Rodríguez y Arteaga, 2004).

En la región de San Francisco Coatlán, Oaxaca, se presentó una textura arcillo-arenosa de color pardo oscuro y un pH de 5.0 (Domínguez, 1996). En Oaxaca y Guerrero los suelos presentan una textura areno-arcillosa, con una menor profundidad que las anteriores y buen drenaje (Téllez, 1999).

En localidades de Chiapas se encuentra en suelos con bajos contenidos de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y baja fertilidad, también se le puede encontrar en suelos de color gris oscuro, arcilloso, limoso y ricos en materia orgánica. El crecimiento secundario se ve limitado por los niveles de potasio presentes, pero en general tiende a aumentar directamente con las concentraciones de potasio, caso contrario ocurre cuando aumentan los niveles de calcio (Del Castillo, 1996; Romero, 2005).

1.4. Datos específicos de la plantación

1.4.1. Procedencia de las plantas

Las plantas de *Pinus chiapensis* utilizadas en la plantación provienen de tres viveros:

- ✚ Mazatepec, de Tlatlauquitepec, Puebla (65 000 plantas)
- ✚ Esperanza del Mañana, Cuetzalan, Puebla (90 000 plantas) y;
- ✚ Atoluca, de Teziutlán, Puebla (30 000 plantas).

Se hicieron varios replantes debido a que se encontraron varias plantas con deficiencias y se decidió cambiarlas.

1.4.2. Establecimiento y plantación de la especie

Antes de establecer la plantación, se realizó la preparación del terreno, haciendo chapeos y deshierbes. La densidad de plantación usada fue de 1,100 árboles ha⁻¹, el espaciamiento fue 4 m entre hileras y 2.25 m entre plantas, solo se ensayó un espaciamiento de 4 m entre hileras y 1.50 m entre plantas en tres hectáreas de la plantación realizada en 2007. En los años 2007 y 2008 se plantaron 70 ha, y del 2009 al 2013 30 ha. Dando un total de 100 ha plantadas.

Empíricamente los aclareos están programados para hacerse a los 8 y 16 años, y la cosecha final a los 25 años. Sin embargo, el primer aclareo se hizo en 2014, un año antes de lo programado ya que se observaron ramas entrelazadas y alta mortalidad de ramas de la parte baja de los árboles más viejos. Las plantaciones reciben tratamiento de control de malezas y vegetación competitiva durante todo el año. Estas actividades se realizan hasta que la plantación ya no puede ser rebasada por especies invasoras.

1.4.3. Estrategia del inventario

Para hacer una planeación y manejo eficientes es necesario conocer con precisión las existencias en volumen maderable de cualquier plantación forestal comercial (PFC), así como su distribución espacial, el estado actual y su potencial productivo.

Para lograr lo anterior se recurre a los inventarios forestales. Las principales variables dasométricas que deben tomarse en cuenta en el inventario, en términos de totales y promedios por unidad de superficie son; volumen, área basal y número de árboles.

Cuando la inferencia sobre la población se hace a partir de una muestra con el apoyo de estimadores de muestreo, se obtienen estimaciones confiables y científicamente defendibles (Schreuder *et al.*, 2004; Tamarit, 2014). Sin embargo, en la cuantificación de las existencias maderables resulta indispensable contar con una estrategia de muestreo que combine el procedimiento para seleccionar la muestra, con el de estimación de los parámetros de la población (Gregoire y Valentine, 2008; Tamarit, 2014).

Entre los estimadores de muestreo destacan los que realizan la inferencia sobre la población con base en diseño, tales como el muestreo simple al azar (MSA) y el muestreo simple estratificado (MSE), también aquellos en que la inferencia se hace en función a modelos y hacen uso de información auxiliar mediante variables que se correlacionan altamente con la variable de interés; en este sentido se destacan los estimadores de razón y de regresión que pueden aplicarse bajo un enfoque de MSA o MSE. El mejor estimador que debe integrar la estrategia para el inventario es aquel que presente la precisión más alta, la menor varianza e intervalos de confianza estrechos en el parámetro poblacional de interés; preferentemente debe considerar el uso de variables auxiliares fáciles, baratas y rápidas de medir (Tamarit, 2014). En el presente

estudio se decidió implementar el MSA, MSE y el muestreo de razón bajo un enfoque de MSA.

1.5. Modelos de crecimiento y rendimiento

Un modelo es una representación abstracta de la realidad. En el ámbito forestal, los modelos de crecimiento y rendimiento representan abstracciones de la dinámica natural de los rodales. Estos modelos generalmente se refieren a un sistema de ecuaciones que permiten predecir en el presente y el futuro, el crecimiento y rendimiento de un rodal bajo una amplia variedad de condiciones (Vanclay, 1994). Davis y Johnson (1987) comentan que el término puede incluir curvas y tablas de rendimiento, que han sido formuladas en una forma gráfica o tabular.

El crecimiento se refiere al aumento de las dimensiones de uno o más árboles de un rodal en un periodo de tiempo. El rendimiento, describe sus dimensiones totales al final de un periodo determinado. La predicción del rendimiento, es una aplicación importante de los modelos de crecimiento, pero el rendimiento también puede ser estimado por técnicas de simulación.

Los modelos de crecimiento facilitan la estimación del rendimiento en rodales homogéneos en varios regímenes de manejo, pero la estimación del estado del bosque, también debe involucrar el espacio y distribución temporal de los rendimientos, por lo que, la estimación del rendimiento puede apoyarse en las técnicas de programación matemática para encontrar la ruta óptima, que maximice el rendimiento sustentable y flujo declinante de la corta (Klepac, 1983).

En rodales coetáneos, una ecuación de crecimiento puede predecir el crecimiento el diámetro, área basal o volumen en función de la edad y otras características del rodal, mientras que una ecuación de rendimiento debería expresar el área basal del rodal o la producción total de volumen a una edad específica (Vanclay, 1994). En rodales incoetáneos, el rendimiento se define como la producción total en un periodo de tiempo determinado, mientras que el crecimiento, es la tasa de producción (Vanclay, 1994).

Para construir modelos de crecimiento deben considerarse las siguiente actividades: a) definición del problema: es decir establecer el propósito de estudio, que generalmente es la administración del bosque; b) construcción del modelo: esta fase contempla la

toma de datos, el análisis preliminar de la información y la formulación del propio modelo; y c) validación del modelo: esto consiste en un proceso repetitivo de corrección y ajuste del mismo, de manera que cada una de sus ecuaciones demuestre tener las bases teóricas que el modelo supone, así como reflejar de modo aceptablemente preciso la dinámica real de la variable que representa (Mendoza, 1983).

1.5.1. La curva sigmoide relacionada al crecimiento

Si se presenta la evolución en tamaño (diámetro, altura, área basal, volumen, etc) de un árbol o de una masa forestal a lo largo de su vida, se obtiene una curva de tipo sigmoide, cuyo patrón se mantiene sorprendentemente estable, con independencia de la especie de que se trate o de los cambios y de las fluctuaciones del entorno en que se desarrolle (Kiviste *et al.*, 2002). La curva sigmoide presenta dos características fundamentales que se derivan de la interacción entre los dos factores, puesto que condicionan el crecimiento ilimitado y limitado; tiene un punto de inflexión y una asíntota horizontal. La curva sigmoide representa la evolución del tamaño de cualquiera de las variables diámetro, altura, área basal, volumen, etc., y que el verdadero crecimiento de dicha variable, entendido como el incremento del tamaño en un periodo de tiempo determinado, se expresa por la curva de crecimiento corriente, que es la derivada de la sigmoide (o forma diferencial de la función de crecimiento). Sin embargo, en la gran mayoría de los estudios de crecimiento se busca modelar la curva sigmoide, ya que esta se corresponde con el crecimiento acumulado del tamaño (o forma integral de la función de crecimiento), es decir, el valor que tiene la variable en un momento dado, que es la manera en la que, por sencillez, se miden habitualmente dichas variables, y además, a partir de una curva sigmoide es posible determinar los crecimientos de la variable en cuestión (Kiviste *et al.*, 2002).

1.5.2. Cualidades de un modelo de crecimiento

Siguiendo las características propuestas por Goelz y Burk (1992), a continuación, se describen las condiciones que deben cumplir los modelos empleados para construir curvas de calidad de estación, las cuales pueden generalizarse a los modelos de crecimiento:

- 1) Existencia de un punto de inflexión. Representa el máximo crecimiento corriente de variables que expresan el crecimiento de un árbol o masa forestal.
- 2) Existencia de una asíntota horizontal. Se refiere al tamaño máximo que pueden alcanzar las variables de crecimiento del arbolado.
- 3) Comportamiento lógico: Los modelos no deben permitir valores anormales desde el punto de vista biológico.
- 4) Base biológica: La forma de las ecuaciones deben derivarse del conocimiento teórico que se tenga del crecimiento de la variable dependiente analizada. Al incorporar esta base teórica en el desarrollo de la ecuación se consigue que el ajuste a cualquier conjunto de datos resulte más exacto (Pienaar y Turnbull, 1973).
- 5) flexibilidad. Es la capacidad de ajuste con precisión a diferentes conjuntos de datos.

1.5.3. Clasificación de los modelos crecimiento

Los modelos de crecimiento reflejan diferentes filosofías de modelado y niveles de complejidad matemática. Existen numerosos caminos para clasificar los modelos, han sido varios los autores que han clasificado los modelos de crecimiento bajo diferentes enfoques a lo largo de la historia del modelado forestal. Diéguez-Aranda *et al.*, (2009) proponen las siguientes formas de clasificar los modelos de crecimiento forestal:

- 1) Modelos de rodal. Estiman la evolución de variables dasométricas dentro del rodal. La ventaja principal de estos modelos es que requieren poca información para las simulaciones, por lo que son los más sencillos y a la vez más robustos.
- 2) Modelos de clases dimensionales. Permiten simular el crecimiento en cada clase diamétrica o de área basal, de manera separada mediante el cálculo de las características del árbol medio representativo de cada una de las clases. Además de poder predecir las existencias volumétricas; también predicen la calidad de sus productos.
- 3) Modelos de árbol individual. Predicen el crecimiento de cada árbol del rodal introduciendo un factor de competencia, que puede ser dependiente o no de la distancia. Este tipo de modelos son más minuciosos que los de rodal, por lo que se

necesitan mediciones más detalladas y por lo tanto mayor esfuerzo en la toma de datos en campo.

- 4) Modelos estáticos. No dependen o no toman en cuenta explícitamente la tasa de crecimiento de los árboles y rodales forestales. Así, los modelos de rodal desarrollados a partir de datos de un solo inventario de una serie de parcelas de investigación son estáticos; también lo son los modelos generados a partir de datos de parcelas de investigación con más de una evaluación si la metodología de ajuste empleada no ha tomado en cuenta los crecimientos observados en cada parcela.
- 5) Modelos dinámicos. Tienen en cuenta el crecimiento de las variables descriptivas de los árboles y rodales forestales a través del tiempo. Para su construcción se utilizan datos colectados en árboles o rodales inventariados al menos en dos ocasiones para la construcción del modelo. Además, el ajuste estadístico debe realizarse con una metodología que permita tener en cuenta dicho crecimiento.
- 6) Modelos determinísticos. Generan siempre los mismos resultados ante el mismo escenario (mismos datos de entrada y algoritmos)
- 7) Modelos estocásticos. Al utilizar estos modelos se obtienen resultados diferentes cada vez que se realiza la simulación, debido a la introducción deliberada de un componente aleatorio en el modelo.
- 8) Modelos empíricos. Se basan en medidas de masa y tiempo. A partir de variables muy fáciles de medir, proporcionan estimaciones cuantitativas muy importantes para el manejo forestal. Estos modelos explican la dinámica de los árboles o los rodales forestales a partir de datos experimentales obtenidos en parcelas de investigación en una región determinada, representando fielmente la realidad observada, sin tener en cuenta los mecanismos de crecimiento.
- 9) Modelos basados en procesos. Estos modelos incorporan una interpretación fisiológica y ecológicamente fundamentada en la simulación, por lo que suelen incluir factores como la luz, ciclo de nutrientes, balance de carbono, índice de área foliar, etc. El grado de complejidad de los modelos de procesos varía

enormemente, y es mayor cuanto más se alejan del enfoque empírico clásico de los modelos de crecimiento.

- 10) Modelos híbridos. Se sitúan entre los empíricos y los de procesos, añaden influencias ambientales en los modelos empíricos de crecimiento y producción, evitando sus inconvenientes mediante la incorporación de variables edáficas y climáticas.

1.5.4. Importancia de los modelos de crecimiento

Los modelos forestales de crecimiento proporcionan una perspectiva sobre las complejas interacciones entre las estructuras y los procesos en los ecosistemas forestales y posibilitan una mejor comprensión de la dinámica forestal natural (Pretzsch, 2001).

Los modelos de crecimiento y rendimiento forestal son herramientas que facilitan la toma de esas decisiones por tres razones al menos:

- 1) Permiten predecir rendimientos y optimizar la cosecha del bosque.
- 2) Permiten evaluar regímenes o tratamientos de manejo alternativos.
- 3) Pueden usarse como una herramienta para controlar rendimientos.

Sin la ayuda de estas herramientas, sería complicado desarrollar planes de manejo forestal adecuados (Valdez y Lynch, 2000).

Una clasificación un poco más extensa está dada por Klepac (1983), que menciona que los modelos se elaboran con las siguientes finalidades:

- ✚ Realizar estimaciones confiables del crecimiento y del rendimiento futuro;
- ✚ Generar la información que permita mantener las cosechas dentro de la capacidad sustentable del bosque;
- ✚ Comparar alternativas de manejo que permitan analizar las mejores opciones de uso de la tierra;
- ✚ Determinar la edad óptima de cosecha, la programación de las cortas intermedias, la estimación de la producción anual, periódica o total durante el periodo de rotación y las clases de productos a obtener;

- ✚ Realizar análisis financieros, para explorar alternativas silvícolas;
- ✚ Examinar los impactos del manejo forestal y de la cosecha sobre otros valores del bosque y,
- ✚ Determinar un régimen de manejo que maximice el volumen maderable o el valor de la producción.

1.6. Sistemas de crecimiento y rendimiento maderable

Los sistemas de crecimiento y rendimiento maderable conocidos por sus siglas como SCRM, se definen como un conjunto de modelos matemáticos cuya función es predecir variables de interés (índice de sitio, altura dominante, volumen, entre otras) en el comportamiento de las masas forestales en función del tiempo. La importancia de estos sistemas es debido a que proporcionan información que ayuda al manejador forestal a tomar decisiones, como el cálculo de la posibilidad, regulación de las cortas, realizar análisis financieros y comparar alternativas de uso de la tierra (Zepeda, 1990).

1.6.1. Componentes del sistema de crecimiento y rendimiento maderable

Los componentes de un SCRM son las funciones de altura dominante e índice de sitio, área basal, número de árboles y volumen. En conjunto permiten conocer la calidad de los sitios forestales mediante la determinación de su productividad en términos de crecimiento y rendimiento maderable a través del tiempo (Galán *et al.*, 2008).

1.6.1.1. Altura dominante

La altura dominante es la variable menos afectada por efecto de la densidad del rodal y por los tratamientos silvícolas (aclareos). Es útil para evaluar la productividad del terreno forestal. Cuando se hace un aclareo selectivo en el que se extraen árboles de menor tamaño que el promedio, la altura media del rodal residual aumenta en una forma artificial. Una altura dominante, basada en los árboles más grandes, varía en menor proporción (García, 1995).

Existen tres enfoques generales para definir una medida de altura dominante. El primero se basa en la clasificación visual de los árboles en clases de copa, típicamente en dominantes, codominantes, intermedios, y suprimidos. Se toma la altura promedio

de los dominantes, o la de los dominantes y codominantes. Esta altura es poco sensible a la densidad y aclareos.

El segundo tipo de medidas de altura dominante, desarrolladas principalmente en Alemania, corresponden a la altura media de una proporción fija de los árboles más grandes, el 20% de los árboles de mayor diámetro.

El tercer tipo de alturas dominantes usa un número fijo de árboles por hectárea en lugar de una proporción fija. Por ejemplo, los 100 o 200 árboles mayores por hectárea. Esto se hace en parcelas de muestreo, donde se toma la proporción correspondiente al área de la parcela: para los 100 mayores por hectárea se toman los 10 mayores en una parcela de 1000 m² o los cinco mayores en una parcela de 500 m². Hay una serie de variantes en este enfoque. Pueden elegirse los n árboles más altos, o los n de mayor diámetro. Esto último frecuentemente es mucho más fácil. Cuando las alturas se estiman con una curva altura–diámetro normal, ambos métodos son equivalentes. Una vez seleccionados los n árboles, puede calcularse la media aritmética de sus alturas, ya sean medidas o estimadas (García, 1995).

1.6.1.2. Calidad de estación

Se define como el potencial de producción de madera de un sitio para una especie en particular o tipo de bosque (Clutter *et al.*, 1983). La estimación de la producción potencial de madera de un sitio se puede considerar una medida de la productividad del terreno forestal. Dentro de un cierto microclima, la calidad de estación refleja la productividad potencial de un sitio forestal, entendiendo esta como la integración de todos los factores bióticos y abióticos que influyen en el crecimiento del arbolado en ese sitio en particular (Torres y Magaña, 2001).

La calidad de estación puede clasificarse cualitativamente en tipos de sitio, a través de su clima, suelo y vegetación, o cuantitativamente en clases de sitio, a través de su potencial para producir madera. La productividad de los terrenos forestales se define en gran parte por la calidad del sitio, que se estima mediante la máxima cosecha de madera que el bosque produce en un tiempo determinado (Daniel *et al.*, 1982).

1.6.1.3. Índice de sitio

El índice de sitio es el valor de la altura dominante a una determinada edad base o de referencia, este es el método más popular y práctico para la evaluación de la calidad de estación. (Clutter *et al.*, 1983). El índice de sitio se ha convertido en el método más popular y práctico para la evaluación de la productividad forestal (Torres y Magaña, 2001).

El concepto de índice de sitio parte de la noción de que los sitios más fértiles para una especie, a una cierta edad base, podrán producirse árboles de mayores dimensiones que en los sitios menos fértiles (Mendoza, 1993). Por ello, es preciso modelar adecuadamente el crecimiento de la altura dominante, ajustando ecuaciones que estimen la relación funcional “altura dominante-edad”, la cual se generaliza a un tercer factor, que es la altura dominante del rodal a la edad base de referencia (Índice de sitio). Esto permite al silvicultor clasificar y proyectar el crecimiento del rodal de manera específica (De los Santos *et al.*, 2006).

Una familia de curvas de índice de sitio, representa un grupo de patrones de desarrollo en altura dominante con un símbolo cualitativo o numérico asociado a cada curva, para propósitos de referencia de calidades de sitio diferentes (Clutter *et al.*, 1983). Dependiendo de la naturaleza de las curvas de índice de sitio, éstas se han clasificado en dos grandes grupos: anamórficas y polimórficas.

1.6.1.3.1. Curvas anamórficas

En este tipo de curvas, la altura modelada del arbolado dominante de una curva a cualquier edad, representa una proporción constante de la altura del arbolado dominante de otra curva a la misma edad (Clutter, *et al.*, 1983). La altura guarda la misma proporción a diferentes edades, por lo que las curvas aparentan tener la misma forma. El punto de inflexión se presenta a la misma edad para todas las curvas (De la Fuente, 1998). En estas curvas, las tasas relativas de crecimiento entre sitios permanecen constantes pero su potencialidad máxima varía.

1.6.1.3.2. Curvas polimórficas

En este tipo de curvas, la tasa relativa de crecimiento en altura dominante no es constante para todas las curvas de índice de sitio, existen distintos tipos de crecimiento para las diferentes clases de sitios. Sin embargo, la potencialidad máxima es única (Avery y Burkhart, 1983; Rivero y Zepeda, 1990). En las curvas polimórficas, la proporción que guarda la altura es diferente entre curvas, y por tanto éstas aparentan diferente forma.

Las curvas polimórficas pueden ser articuladas y desarticuladas, o no cruzadas y cruzadas. Las articuladas son curvas que se relacionan, aunque no de forma proporcional, y no llegan a cruzarse en los intervalos de interés; mientras que las desarticuladas no tienen ninguna relación entre sí, y es posible que se crucen dentro del intervalo de interés (Clutter *et al.*, 1983).

Existe otro tipo de curvas, conocidas como diferencia algebraica generalizada (GADA, por sus siglas en inglés), en las cuales la tasa de crecimiento y las potencialidades máximas del sitio varían, dando origen al concepto de polimorfismo asintótico (Cieszewsky y Bailey, 2000).

1.6.1.3.3. Métodos de construcción de curvas de índice de sitio

Clutter, *et al.*, (1983) proponen los siguientes métodos de desarrollo de ecuaciones para la construcción de curvas:

- 1) Método de la curva guía. Éste método genera curvas de índice de sitio de tipo anamórficas o polimórficas (García *et al.*, 1998). La técnica permite ajustar la tendencia promedio de las alturas dominantes en todo el intervalo de edad para obtener una curva denominada curva guía, a partir de la cual se construye una familia de curvas por arriba y por debajo de ella, proporcionales entre sí. De esta forma, cada curva representará un índice de sitio diferente (Rivero y Zepeda, 1990; García *et al.*, 1998). Para su construcción se requieren datos provenientes de parcelas temporales de muestreo.
- 2) Método de diferencia algebraica y diferencia algebraica generalizada. Este método consiste en desarrollar en una forma de diferencia, la ecuación que va a ser ajustada. Esta forma expresa la altura remeida (H_2) como una función de la edad

de remediación (E2), de la edad inicial (E1) y de la altura inicial (H1) (Clutter *et al.*, 1983).

Para la aplicación de este método, se necesitan datos procedentes de árboles de parcelas permanentes, o datos de análisis troncales, los cuales pueden ser utilizados con cualquier ecuación altura-edad para generar familias de curvas anamórficas o polimórficas.

El método GADA puede usarse para derivar los mismos modelos obtenidos por diferencia algebraica. La ventaja de la GADA es que puede usarse para ampliar la base de ecuaciones de acuerdo a varias teorías sobre la asíntota y tasa de crecimiento, permitiendo más de un parámetro específico por sitio, esto hace más flexibles las ecuaciones dinámicas. Incluyen la habilidad para simular polimorfismo concurrente y múltiples asíntotas, una propiedad importante de las ecuaciones de sitio (Diéguez *et al.*, 2006).

3) Método de predicción de parámetros. Para implementar este método, se requieren datos procedentes de remediciones de árboles en parcelas permanentes, o de análisis troncales. Este método se desarrolló para reflejar las tasas variantes de crecimiento en altura para diferentes sitios, donde la altura está en función de la edad del rodal o índice de sitio. Clutter *et al.*, (1983).

La técnica se sigue usando, con la salvedad que los métodos modernos permiten ajustar simultáneamente los parámetros específicos de las variables de interés con los factores del sitio. Tal es el caso de los modelos de altura dominante desarrollados por Fang y Bailey (2001) donde los diferentes tratamientos silvícolas, como tipo de preparación del sitio, aplicación de fertilización y control de la vegetación se relacionaron con un modelo Chapman-Richards. Los parámetros de respuesta en altura dominante se ajustaron vía modelos de efectos mixtos como una sola estructura.

1.6.2. Área basal

El área basal corresponde a la suma de las secciones transversales del fuste a la altura del DN de todos los árboles por unidad de superficie, expresada en metros cuadrados. Es una medida directa de la densidad del rodal que involucra tanto el número de individuos como el tamaño de estos, y es, quizá la variable más utilizada para modelar

el efecto de la densidad en el crecimiento del arbolado, tanto a nivel poblacional como individual (Torres y Magaña, 2001). Adicionalmente a describir la densidad, esta variable se encuentra altamente correlacionada con el volumen total.

El área basal individual se define como

$$AB = \left(\frac{\pi}{40,000} \right) DN^2$$

1.6.3. Número de árboles

Es el número promedio de árboles vivos por hectárea. Se obtiene estimando el promedio del número de árboles ubicados en los sitios de muestreo. Esta variable es la más complicada de evaluar cuando no se cuenta con datos de sitios permanentes de muestreo. Evaluar el cambio en el número de individuos a través del tiempo resulta difícil si no se tiene claro el efecto de variables tales como; el efecto de la calidad de estación, agentes externos y otras que puedan afectar la mortalidad de los individuos. La mortalidad es la proporción de individuos muertos en la población a través del tiempo.

El propósito de estimar esta variable es conocer cuántos individuos sobreviven después de algún periodo, es decir, conocer la supervivencia. (Torres y Magaña, 2001). Las funciones de mortalidad regularmente predicen el número de árboles (NA) a una edad de proyección (NA2), a partir del número actual de árboles (NA1), de la edad inicial (E1) y de la edad de proyección (E2).

Clutter *et al.* (1983) y Torres y Magaña (2001) comentan que las funciones de mortalidad para poblaciones coetáneas, deben tener ciertas propiedades lógicas;

- i) Si la E1 es igual a E2 entonces NA1 debería ser igual a NA2
- ii) Si E2 es mayor que E1 entonces NA1 debería ser mayor que NA2
- iii) Si E2 se hace muy grande, entonces NA2 debería aproximarse a 0 o volverse asintótica.
- iv) Debe haber compatibilidad en las predicciones de árboles sobrevivientes.

1.6.4. Volumen

El volumen del árbol aumenta conjuntamente con la altura y el diámetro desde su nacimiento hasta su muerte. Tanto en inventarios forestales como en parcelas de crecimiento el volumen de cada árbol se obtiene con función de volumen general.

Con datos de volumen obtenidos mediante la cubicación de los árboles de un número de parcelas, pueden obtenerse ecuaciones de volumen en función de variables del rodal como área basal y altura dominante. Estas son conocidas como funciones de volumen por hectárea. Resulta más fácil usar la función de volumen que cubicar una parcela directamente. Las funciones de volumen por hectárea son útiles cuando no se tiene la información de los árboles individuales (García, 1995).

1.7. Objetivos

Si bien la plantación estudiada es un caso de éxito tanto por su supervivencia como por su manejo, se carece de herramientas cuantitativas que permitan el manejo informado de las plantaciones de *Pinus chiapensis*, por ello, se plantearon los siguientes objetivos.

1.7.1. General

- ✚ Generar herramientas dasométricas que permitan ilustrar el estado actual de las plantaciones de *Pinus chiapensis*, y que sirvan de apoyo para la toma de decisiones en el manejo de la misma.

1.7.2. Específicos

- ✚ Estimar el inventario maderable de las plantaciones a través de la implementación de estimadores de muestreo clásicos.
- ✚ Generar un Sistema de Crecimiento y Rendimiento Maderable (SCRM) compatible con los datos de inventario de *Pinus chiapensis*.

1.8. Literatura citada

Avery, T. E. y H. E. Burkhardt. 1983. Forest measurements. McGraw-Hill, Nueva York. USA. 331 p.

- Andresen, J.W., 1964. The taxonomic status of *Pinus chiapensis*. *Phytologia* 10, 417–421.
- Cieszewski, C. J. y R. L. Bailey. 2000. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *For. Sci.* 46: 116–126.
- Clutter J. L, Forston, J. C., Pienaar, L. V. Brister, G. H. y Bailey R. L. (1983). *Timber Management: A Quantitative Approach*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 333 p.
- Cruz C., F. 2007. Modelos de volumen y crecimiento en altura dominante para *Pinus cooperi* Blanco en el Estado de Durango, México. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo de México, México. 69 p.
- Daniel, T. W.; J. A. Helms y F. S. Baker. 1982. *Principios de Silvicultura*. Traducción del inglés por Ramón Elizondo Mata. McGraw_Hill. México. pp. 231-250.
- Davis, L. S. y K. N. Johnson. 1987. *Forest management*. Third Edition. McGraw-Hill, New York. USA. 804 p.
- De los Santos P, H, M., M. Montero M M. Kanninen. (2006). Curvas dinamicas de crecimiento en altura dominante para *Terminalia amazonica* (Gmel.) Excell en Costa Rica, *Agrociencia* 40:521-532.
- Del Castillo, R. F., S. Acosta, y N. V. Sánchez 1995. Estudio ecológico preliminar de *Pinus chiapensis* en el Estado de Oaxaca. Informe Técnico. Secretaría de Desarrollo Social y Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca, Oax. 160 p.
- Del Castillo, R. F. 1996. Aspectos autoecológicos de *Pinus chiapensis*. En: *Memorias del 2do. Coloquio Regional de Investigación, Ciencias Exactas y Naturales*. Garduño, L., Chavarría, G.V. y Pérez, I. M., Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Méx. pp. 63-68
- Diéguez-Aranda, U., A. Rojo, F. Castedo-Dorado, J. G. Álvarez, M. Barrio-Anta, F. Crecente-Campo, J. M. González, C. Pérez-Cruzado, R. Rodríguez, C. A. López-Sánchez, M. Á. Balboa-Miruas, J. J. Gorgoso y F. Sánchez. 2009. *Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia*. Dirección Xeral de Montes, Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia. 259 p.

- Diéguez, A. U.; H. E. Burkhart y R. L. Amateis. 2006. Dynamic site model for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations in the United States. *For. Sci.* 52(3): 262-272.
- Domínguez, F. 1996. *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen: nuevo registro para Oaxaca, México. *Ciencia Forestal en México* 21 (80): 131-137.
- Eguiluz P., T. 1978. Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género *Pinus* en México. Tesis de Licenciatura. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México. 623p.
- Eguiluz P., T. 1988. Distribución natural de los pinos en México. Nota Técnica No. 1. Centro de Genética Forestal, A.C. Chapingo, México. 6 p.
- Fang, Z. and R. L. Bailey. 2001. Nonlinear mixed-effects modelling for slash pine dominant height growth following intensive silvicultural treatments. *For. Sci.* 47: 287–300.
- FAO. 2011. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Informe sobre la situación de los bosques del mundo. 67 p.
- Farjon, A. J. A. de la. R. Pérez y B. T. Styles. 1997. A field guide to the pines of México and Central America. The Royal Botanic Gardens. 151 pp.
- Galán, R., H. M. De los Santos, J. I. Valdez. Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnel-smithii* Rose en San José Chapala, Pochutla, Oaxaca. 2008. *Madera y Bosques*. 14(2): 65-82.
- García, C. X.; H. Ramírez M.; C. Rodríguez F.; J. Jasso M. y C.A. Ortiz S. 1998. Índice de sitio para caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Quintana Roo, México. *Ciencia Forestal* 23 (84):9-19.
- García, O. 1995. Apuntes de Mensura Forestal I. Estática. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Chile. 65 p.
- Goelz, J.C.G.; Burk, T.E. 1992. Development of a well-behaved site index equation: jack pine in north central Ontario. *Can. J. For. Res.*, 22: 776-784.
- Gregoire, T. G., and T. H. Valentine. 2008. Sampling strategies for natural resources and the environment. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL. 474 p.
- Kiviste, A., Álvarez, J. G., Rojo, A., González, A. D., 2002: Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. *Comunicaciones I.N.I.A. Serie: Recursos Naturales*. No. 4.

- Klepac, D. 1983. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Segunda edición. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Méx. 365 pp.
- Loock, E. E. M. 1950. Pines of Mexico and British Honduras. Union South Africa Dep. Forest. Bull. 35. 244 p.
- Martínez Ch., M. 2000. Edad de transición de la madera juvenil a la madera madura de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen de Tanetze de Zaragoza, Oaxaca. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México. 65 p.
- Martínez, M. 1948. Los pinos mexicanos. 2da. Ed. Botas. México, D.F. 361 pp.
- Mendoza, M. A. 1983. Conceptos generales sobre modelaje matemático. Primera reunión sobre modelos de crecimiento de árboles y masas forestales. SARH-SF-INIF. Publicación especial No. 44. pp. 35-45.
- Peinaar, L.V.; Turnbull, K.J., 1973. The Chapman-Richards generalization of Von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even aged stands. For. Sci. 19: p.2-22.
- Pretzsch, H., 2001: Modellierung des Waldwachstums, Blackwell Wissenschafts Verlag, Berlin, Wien, 341 pp.
- Rivero, B. D. y M. Zepeda, B. 1990. Principios básicos de Regulación Forestal. Serie de apoyo académico No 42. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México. pp. 136-154.
- Rodriguez A., M. y B. Arteaga M. B 2004. Índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en los estados de Veracruz y Puebla, México. Revista Chapingo Serie Ciencias Sociales y del Ambiente 11:39-44.
- Romero H., A. E. 2005. Tabla de volúmenes para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en su área de distribución natural en los estados de Puebla y Veracruz. Tesis de Licenciatura. Chapingo, México. 79 p.
- Schreuder, H. T., R. Ernst, and H. Ramírez M. 2004. Statistical techniques for sampling and monitoring natural resources. Forest Service-USDA. General Technical Report RMRS-GTR- 126. 111 p.

- SEDESOL. (2014). Unidad de Microregiones. Reglas de Operación del Programa para el Desarrollo de Zonas Prioritarias Cédulas de Información. Recuperado de <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/datGenerales.aspx?entra=pdzp&ent=21&mun=186>.
- Tamarit U. J. C. 2013. Cubicación, crecimiento y rendimiento maderable e inventario operativo para *Tectona grandis* en el sureste de México. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 108 p.
- Téllez P., M. C. L. 1999. Estado del conocimiento de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México. 395 p.
- Torres, J. M. y O. S. Magaña. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Limusa Noriega Editores. México, D. F. 472 p.
- Valdez, L. J. R. y T. B. Lynch. 2000. Ecuaciones para estimar volumen comercial y total en rodales aclareados de pino patula en Puebla, México. *Agrociencia*. 34: 747-758.
- Vanclay, J. K. 1994. Modeling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forests. CAB International, Wallingfor, UK. 312 p.
- Wright, J. A., M. J. Jameel, and W. S. Dvorak. 1996. Laboratory kraft pulping from CAMCORE trials of *Pinus patula*, *P. tecunumanii*, *P. maximinoi* and *P. calcanzarhiapensis* grown in Colombia. *Forest Ecology and Management* 88: 283-288.
- Zepeda E. M. 1990. Predictor de rendimiento de maderables probables de *Pinus patula* Schiedey Deppe., de Perote, Ver., México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo de México, México. 331 p.

CAPÍTULO II

2. ESTIMADORES DE MUESTRO PARA INVENTARIO DE PLANTACIONES DE *Pinus chiapensis* (MARTÍNEZ) ANDRESEN EN TLATLAUQUITEPEC, PUEBLA.

2.1. RESUMEN

El inventario forestal es una herramienta básica para la cuantificación del manejo sostenible de los recursos del bosque. A través de este se determina el volumen maderable y la cantidad calidad de los arboles a cosechar para conocer la rentabilidad de las plantaciones o bosques nativos. Bajo estos principios se desarrollan metodologías para la evaluación de plantaciones forestales que proporcionan información cualitativa y cuantitativa sobre el estado, la utilización, ordenación y las tendencias de estos recursos.

En este estudio se establecieron parcelas permanentes de muestreo con la finalidad de recabar información dasométrica para obtener el inventario de las plantaciones de *Pinus chiapensis*. Se evaluaron diversos estimadores de muestreo clásicos como el Muestreo Simple al Azar (MSA); Estratificado, y estimadores de Razón y Regresión. Los resultados muestran que los estimadores de regresión son los más precisos para estimar las existencias en volumen con el Área Basal como variable auxiliar. El hecho de contar con re-mediciones de un año al otro permitió evaluar el crecimiento de las plantaciones con estimadores de Razón y Regresión, usando como variable auxiliar el volumen del año previo. En este caso se obtiene un estimador de Razón volumen actual/volumen previo que sugiere un incremento porcentual cercano al 30% del volumen previo. Esto permitió actualizar el inventario de un total de 4806 m³ para el primer año de medición a 6496 m³ en el segundo año.

Palabras clave: Inventario forestal, parcelas permanentes, sitios de muestreo, estimadores de muestreo, Muestreo Simple al Azar.

2.2. ABSTRACT

Forest inventory is basic to ensure sustainable forestry. Through forest inventory the total yield and number of trees is determined for the forest harvest. With this in mind, several methods have been developed to accurately evaluate forest plantations. In this study a network of re-measurement sampling plots was established to obtain forest measurement and estimate forest inventory. Several classic sampling estimates were used as random sampling, stratified random sampling and ratio/regression estimators.

The results show that regression estimators are the most accurate to estimate total yield, using basal area as auxiliary variable. The re-measured plots allow to estimate year to year change using ratio and regression estimators, using as auxiliary variable the previous year volume. In this case the ratio estimate Current Volume/Previous volume suggest a volume increment of 30% with respect to the previous volume. In this way was easy to update the inventory from 4,806 m³ to 6,496 m³

Key word: Forest inventory, re-measurement plots, sampling plots, regression estimators.

2.3. Introducción

En Plantaciones Forestales Comerciales (PFC) es de vital importancia conocer las existencias maderables y generar información útil para planificar acciones y poder tomar decisiones de manejo informadas. Cuando la superficie plantada es extensa, resulta impráctico medir todos los árboles existentes, y por eso, se recurre al inventario por muestreo, el cual permite obtener los parámetros de interés de una población de manera correcta, precisa y a costo mínimo (van Laar y Akça, 2007; Tamarit 2014).

Un inventario forestal consiste en la recolección sistemática de datos sobre los recursos forestales de una zona determinada. Permite la evaluación del estado actual y sienta las bases del análisis y la planificación, que constituyen el punto de partida de una gestión forestal sostenible. Su importancia radica en que sólo es posible adoptar decisiones con base en información fiable y sólida, por lo que es necesario un proceso cíclico de recolección de datos, adopción de decisiones y evaluación de los resultados obtenidos (Gregoire y Valentine, 2008). En México, gran parte de las investigaciones enfocadas a la obtención de los inventarios de recursos forestales, implementan muestreo basado en diseños (estimadores de muestreo simple al azar y muestreo estratificado) y estimadores basados en modelos (estimadores de razón y de regresión), dependiendo del tipo de datos tomados en campo (sitios de dimensiones fijas o variables), pueden obtenerse diferentes niveles de precisión (Ruiz, 1982; Schreuder *et al.*, 1992; Schreuder *et al.*, 2004).

El principio general del muestreo consiste en seleccionar un subconjunto de una población y analizar este subconjunto para inferir las características del resto de la población que no se midió. De esta manera se busca obtener resultados confiables para la planeación de las actividades silvícolas (Schreuder *et al.*, 2006). En este trabajo se probaron diferentes estimadores, y se plantea una estrategia eficiente de muestreo que permite realizar el inventario de las principales variables dasométricas de interés para contribuir a la ayuda en toma de decisiones para el manejo de las plantaciones de *Pinus chiapensis*, localizadas en el Municipio de Tlatlauquitepec, Puebla Los resultados permitirán a los administradores de la plantación contar con una herramienta que les permita actualizar el inventario cada vez que se recolecten datos para este fin.

2.4. Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en una superficie de 100 ha plantadas con *Pinus chiapensis* en el Municipio de Tlatlauquitepec, Puebla. Se establecieron 52 sitios permanentes de forma sistemática en todas las edades de la plantación (permite una distribución uniforme de la muestra) y de forma equidistante, la dimensión de los sitios fue de 400 m² (20 x 20 m).

El establecimiento y medición de los sitios se realizó en el año 2014 y en el 2015 se hizo la primera remediación. La base de datos para el inventario en el año 2014 estuvo conformada por 44 sitios, con edades de 3, 5, 6 y 7 años. Se excluyeron 8 sitios debido a que eran las edades más jóvenes (1 y 2 años) y no alcanzaron un diámetro mínimo considerable de 0.2 cm. Para la base del año 2014 se consideraron los mismos 44 sitios, esta vez con edades de 4, 5, 7 y 8 años, los árboles de 2 y 3 años no presentaron crecimiento significativo en el diámetro y debido a esto se excluyeron.

En cada sitio se tomó el registro del número de árboles, diámetro de todos los árboles y la altura total de 10 árboles dominantes y codominantes, con la finalidad de optimizar la proporcionalidad y equivalencia de muestrear en promedio 100 árboles por ha⁻¹ (Alder, 1980).

2.4.1. Obtención de variables

Las alturas que se midieron, se asumieron como una sub-muestra de la población, ésta se utilizó para estimar la altura total de cada uno de los árboles a través del mejor modelo ajustado de altura en función del diámetro normal (D_n). Con esto, se generó información para estimar el volumen de los árboles individuales. Las funciones ajustadas fueron: el modelo de Schumacher (1), el modelo Gompertz (2), y el modelo de Chapman-Richards de dos parámetros (3).

$$A = \alpha_0 \exp\left(\frac{-\alpha_1}{D_n}\right) \quad (1)$$

$$A = \alpha_0 \exp(-\alpha_1[-\alpha_2 D_n]) \quad (2)$$

$$A = \alpha_0 [1 - \exp(-\alpha_1 D_n)] \quad (3)$$

Donde: A: altura total del árbol expresada en m; D_n : diámetro normal a la altura de 1.30 m expresado en cm, α_i : parámetros a estimar.

El volumen individual con corteza del arbolado en los sitios de muestreo se estimó con base en una ecuación de Shumacher y Hall (1933) de volumen local, generada para esta especie, dicha expresión tiene la siguiente estructura:

$$V = 0.000065 D_n^{1.630512} H^{1.15635} \quad (4)$$

Donde: V : volumen con corteza en m^3 .

El área basal por árbol se calculó utilizando la fórmula $ab = \frac{\pi}{40000} D_n^2$.

También se registró el número de árboles vivos (NA). Las variables se extrapolaron a nivel de hectárea.

2.4.2. Estimadores muestrales

Para estimar el inventario en V , AB y NA , se aplicaron los estimadores del Muestreo Simple al Azar (MSA) y del Muestreo Simple Estratificado (MSE), en estos estimadores la inferencia sobre la población se basa en diseño. También se evaluaron estimadores cuya inferencia se basa en modelos como el de Razón (R) y el de Regresión (Rg) dentro del MSA, estimando el inventario en V y AB .

Para estratificar se usó como variable auxiliar la edad de la plantación, obteniéndose cuatro clases de edad. Para los estimadores de razón y de regresión se usaron como auxiliares al área basal y la edad de la plantación.

Adicionalmente se implementó una razón y regresión que considera el volumen en el tiempo 2 como variable principal, y el volumen en el tiempo 1 como variable auxiliar, con la finalidad de conocer la proporción en la que cambia el volumen ($m^3 \text{ año}^{-1}$), así como también el AB en el tiempo dos y el AB en el tiempo uno.

En el caso del área basal y para el estimador de razón bajo MSA se asumió como valor poblacional verdadero a la media muestral del área basal obtenida bajo MSE. Para MSE la edad fue conocida sin error al tenerse la edad exacta de las plantaciones.

Para la razón $Volumen2/Volumen1$ bajo el MSA, se consideró a la media muestral del $Volumen1$ obtenido en el MSE. Debido a que las plantaciones se establecieron en una extensión pequeña (100 ha), no se consideró el tamaño de muestra como un factor de comparación entre los estimadores de muestreo, ya que el objetivo principal fue obtener el inventario en variables dasométricas de interés, además, con los 52 sitios

establecidos, se cubre perfectamente la zona de plantación, obteniéndose varianzas pequeñas. En este sentido, el mejor estimador de muestreo se seleccionó con base en el menor valor de la varianza de la media, la más alta precisión y la menor amplitud de los intervalos de confianza.

2.4.2.1. Muestreo Simple Aleatorio

El MSA es un muestreo clásico en la estimación de inventarios forestales, este asume que las n unidades de muestreo son seleccionadas de las N unidades en la población de manera aleatoria, de tal forma que la combinación de las n unidades sean igualmente probables de ser las muestras seleccionadas (Kish, 1975; Cochran, 1977; Kish, 1995; Thompson, 2002). Diversos autores han propuesto y aplicado este método de muestreo, y argumentan que son métodos fáciles de aplicar, tales como: Schumacher y Chapman, (1942); Sukhatme, (1956); Freese, (1962); Scheaffer *et al.*, (1987); Särndal *et al.*, (1992); Kish, (1995); Torres y Magaña, (2001); Thompson, (2002); Schreuder *et al.*, (2006); Köhl *et al.*, (2006); Roldán *et al.*, (20013); Tamarit, (20013). En establecimiento y la primera remediación se consideró la misma cantidad de sitios. En cada año de inventario se consideró una población distinta. Las fórmulas utilizadas para la obtención del inventario a través del MSA, se muestran en el cuadro 2.4.1.

Cuadro 2.4.1. Estimadores del Muestreo Simple al Azar

Estimador	Fórmula
Media	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$
Varianza de la variable en la muestra	$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}}{n-1}$
Varianza de la media	$S_y^2 = \frac{S^2}{n} \left(\frac{N-n}{N} \right)$
Inventario total	$\hat{T} = N \bar{y}$

Donde: y_i =Volumen con corteza en m^3 de i -ésimo sitio de muestreo; N = Número total de unidades de muestreo en la población; n =Número de unidades incluidas en la muestra.

2.4.2.2. Muestreo Simple Estratificado

En general, este método de muestreo pretende reducir la varianza de la media estimada a partir de la muestra, los autores que han usado este método argumentan que es eficiente, pues agrupa y pondera las varianzas. (Sukhatme, 1956; Villa y Caballero, 1976).

Estratificar significa que dentro de la población de interés existen diferencias tales que es posible distinguir subpoblaciones de la misma. Estas poblaciones se denominan estratos (Schumacher y Chapman, 1942; Särndal *et al.*, 1992; Kish, 1995; Johnson, 2000; Thompson, 2002). El muestreo consiste en seleccionar una muestra de sitios de inventario (independientes) que puede ser aleatoria o sistemática. La estratificación reduce la variación en el estrato y, por esto se requiere que dichos estratos sean heterogéneos entre ellos, pero homogéneos dentro (Bell, 1998). Al implementar el MSE se decidió trabajar por clases de edad, debido a que estas son conocidas sin error. Aunque la plantación es joven, se lograron cuatro estratos de edades. A continuación se presentan las fórmulas implementadas para obtener el inventario para el AB, V y NA bajo el MSE (Cuadro 2.4.2).

Cuadro 2.4.2. Estimadores del Muestreo Simple Estratificado

Estimador	Fórmula
Media muestral por estrato h	$N = \sum_{h=1}^L N_h ; n = \sum_{h=1}^L n_h$
Estimadores muestrales	
Media muestral en el estrato h	$\bar{y}_h = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} \bar{y}_{h,i}$
Varianza muestral entre unidades muestrales del estrato h	$S_h^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} (y_{hi} - \bar{y}_h)^2}{n_h - 1}$
Varianza de la media muestral en el estrato h	$S_{\bar{y}_h}^2 = \frac{S_h^2}{n_h} \left(\frac{N_h - n_h}{N_h} \right)$
Total por estrato	$\hat{T} = N_h \bar{y}_h$
Varianza del total por estrato	$S_{\hat{T}_h}^2 = (N_h)^2 S_{\bar{y}_h}^2 = (N_h)^2 \frac{S_h^2}{n_h} \left(\frac{N_h - n_h}{N_h} \right)$
Estimadores poblacionales	
Media muestral de la población	$\bar{y}_E = \sum_{h=1}^L \frac{N_h}{N} \bar{y}_h = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L N_h \bar{y}_h$
Varianza de la media muestral de la población	$S_{\bar{y}_E}^2 = \sum_{h=1}^L \left(\frac{N_h}{n} \right)^2 S_h^2$
Estimador del total de la población	$\hat{T}_E = N \bar{y}_E = N \left(\frac{1}{N} \sum_{h=1}^L N_h \bar{y}_h \right) = \sum_{h=1}^L \bar{y}_h$
Varianza del estimador total de la población	$S_{\hat{T}_E}^2 = N^2 S_{\bar{y}_E}^2 = \sum_{h=1}^L N_h^2 S_{\bar{y}_h}^2 = \sum_{h=1}^L S_{\hat{T}_h}^2$

Donde: N_h = Número total de unidades muestrales en el estrato h ; L = Número total de estratos en la población; n_h = Número total de unidades muestrales en el estrato h incluidas en la muestra; y_{hi} = Valor observado de la variable de interés y (volumen con corteza en m^3) en la i -ésima unidad muestral en el h -ésimo estrato. Las demás variables ya fueron definidas.

2.4.2.3. Estimadores de Razón y de Regresión

En el método de estimación de Razón (R) se usa información auxiliar y, bajo ciertas condiciones, proporciona estimaciones de mayor confiabilidad y precisión que métodos de estimación simples. Este es el mejor método para estimar la media cuando la variable de interés, que generalmente es el volumen, se correlaciona de manera lineal con la variable auxiliar (pasa a través del origen), aumentando la precisión de los

estimadores. Estos estimadores son sesgados por definición, pero con varianzas pequeñas. Si se cumple lo anterior, el sesgo será muy pequeño. En muestras grandes los estimadores de razón son más eficientes que cuando se obtienen con medias convencionales (MSA). El estimador de Regresión (Rg) es preciso cuando la relación entre la variable de interés y la variable auxiliar no pasa necesariamente por el origen, pero es lineal. También genera estimadores sesgados al igual que el de Razón. Este muestreo será eficiente si la variable auxiliar es fácil de medir.

El muestreo de Razón y Regresión asume el valor de la variable auxiliar a nivel poblacional es conocida sin error (μ_x) de muestreo, esto es posible cuando realmente se conoce este valor, pero en la mayoría de los casos debe asumirse un valor muestral sin error. En este trabajo se probaron como variables auxiliares el AB y la edad (es conocida sin error). Para el área basal se toma en cuenta como media poblacional el valor obtenido en el MSE, ya que se supone más precisa que la obtenida bajo el MSA. Al implementar este método se obtiene una nueva variable aleatoria, que en muchos casos presenta implicaciones prácticas en el inventario forestal.

En este sentido, si la variable principal es el volumen y la auxiliar el AB, se tiene una Razón que describe la cantidad de m^3 en pie por cada m^2 de área basal. Cuando la variable auxiliar que se utiliza es la edad, entonces se obtiene una medida del crecimiento esperado de manera anualizada.

También resulta interesante evaluar estos estimadores utilizando las variables auxiliares de forma combinada, cuando los datos así lo permiten, una Razón que involucre la variable principal medida en el tiempo dos, y su misma variable medida en el tiempo uno, es decir una razón $V2/V1$, o $AB2/AB1$. Para el primer caso, la razón que se obtiene nos indica el incremento proporcional en función del volumen inicial. Para el AB la razón obtenida reflejaría un cambio en proporción respecto al AB inicial. En este trabajo también se analizaron las dos Razones.

El estimador de Regresión, compensa por exceso o por defecto (por arriba o por abajo) sobre el valor de la media, a través de una adición que tiene como base la pendiente de regresión β (Shiver *et al.*, 1996).

Las fórmulas empleadas para la estimación de muestreo por Razón y Regresión se presentan en el cuadro 2.4.3.

Cuadro 2.4.3. Estimadores de Razón (R) y Regresión (Rg).

Estimador	Fórmula
Razón	$R = \frac{\mu_y}{\mu_x}$
Estimadores de Razón	
Estimador de Razón	$\hat{R} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i}$
Media	$\bar{y}_R = \hat{R}_{\mu_x} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} \mu_x$
Varianza de la razón	$S_{\hat{R}}^2 = \frac{1}{\mu_x^2} \frac{S_u^2}{n} \frac{n}{N}$
	$S_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{R}x_i)^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 + \hat{R}^2 \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2\hat{R} \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n-1}$
Varianza de la media	$S_{\bar{y}_R}^2 = \frac{S_u^2}{N} \left(1 - \frac{n}{N}\right)$
Estimadores de Regresión	
Media	$\bar{y}_{REG} = \bar{y} + \beta(\mu_x - \bar{x})$
Pendiente	$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
Varianza de la media	$S_{\bar{y}_{REG}}^2 = \frac{S_{xy}^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)$
	$S_{xy}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \beta^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-2}$

Donde: μ_y = Media poblacional de la variable de interés (principal); μ_x = Media poblacional de la variable auxiliar. Las demás variables ya fueron definidas.

2.5. Resultados y Discusión

2.5.1. Modelos de altura total

A través del mejor modelo de diámetro-altura ajustado se estimaron las alturas de los arboles restantes dentro del sitio, lo que permitió estimar el volumen puntual por árbol para alimentar al SCRM. En el cuadro 2.5.1 se muestran los resultados obtenidos del ajuste.

Cuadro 2.5.1. Estadísticos obtenidos, parámetros estimados y significancia de los modelos de altura en función del diámetro normal.

Modelo	SCE	CME	R ² Adj	Parámetro	Estimación	Error estándar	Significancia
Gompertz	1335.8	2.351	0.884	α_0	16.6687	0.8695	<.0001
				α_1	2.2357	0.0614	<.0001
				α_2	0.1327	0.0067	<.0001
Schumacher	1657.1	2.917	0.857	α_0	17.4573	0.5500	<.0001
				α_1	6.0705	0.1517	<.0001
Chapman Richards dos parámetros	1320.2	2.328	0.885	α_0	17.8028	0.5596	<.0001
				α_1	0.0694	0.0037	<.0001

SCE: suma de cuadrados del error, CME = cuadrado medio del error, R²Adj= coeficiente de determinación ajustado.

Los estadísticos obtenidos muestran que existe poca diferencia entre el ajuste de los modelos, presentando una ligera superioridad el modelo de Chapman Richards de dos parámetros, por lo cual se consideró apropiado para predecir la altura de los árboles en función del diámetro normal. La Figura 2.5.1 muestra la capacidad de predicción del modelo seleccionado para estimar las alturas faltantes:

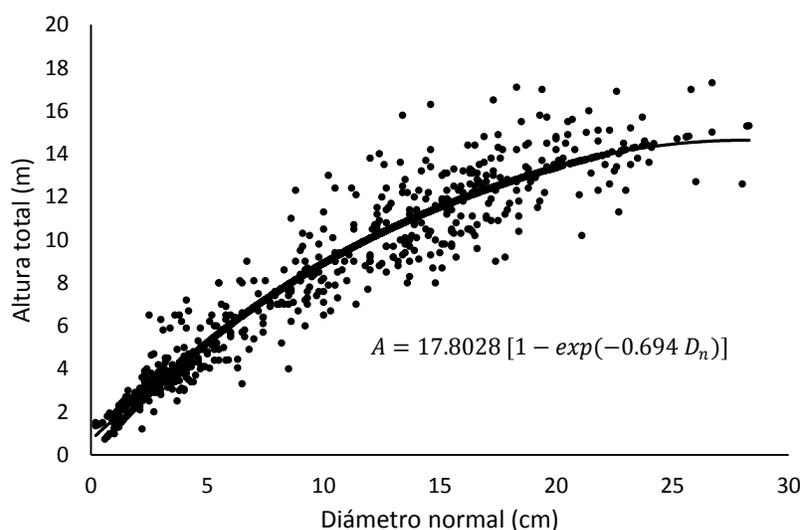


Figura 2.5.1. Curva diámetro-altura.

2.5.1.1. Correlaciones de las variables

Para la medición del año 2013, los datos de volumen ($\text{m}^3 \text{ sitio}^{-1}$) con relación al área basal ($\text{m}^2 \text{ sitio}^{-1}$), se correlacionaron en un 99.52%; respecto a la edad la correlación fue de 64.37% (Figuras 2.5.2., a, a1). Para el año 2014 la correlación entre el Volumen y el AB es de 99.58%, mientras que para la edad respecto al volumen es de 68.6 % (Figuras 2.5.2.b, b1). La correlación existente entre el volumen 2 respecto al volumen 1, es de 98.5 %, para el AB 2 respecto al AB 1, estas se correlacionan en un 98.37 %, (Figuras 2.5.2.c, c1).

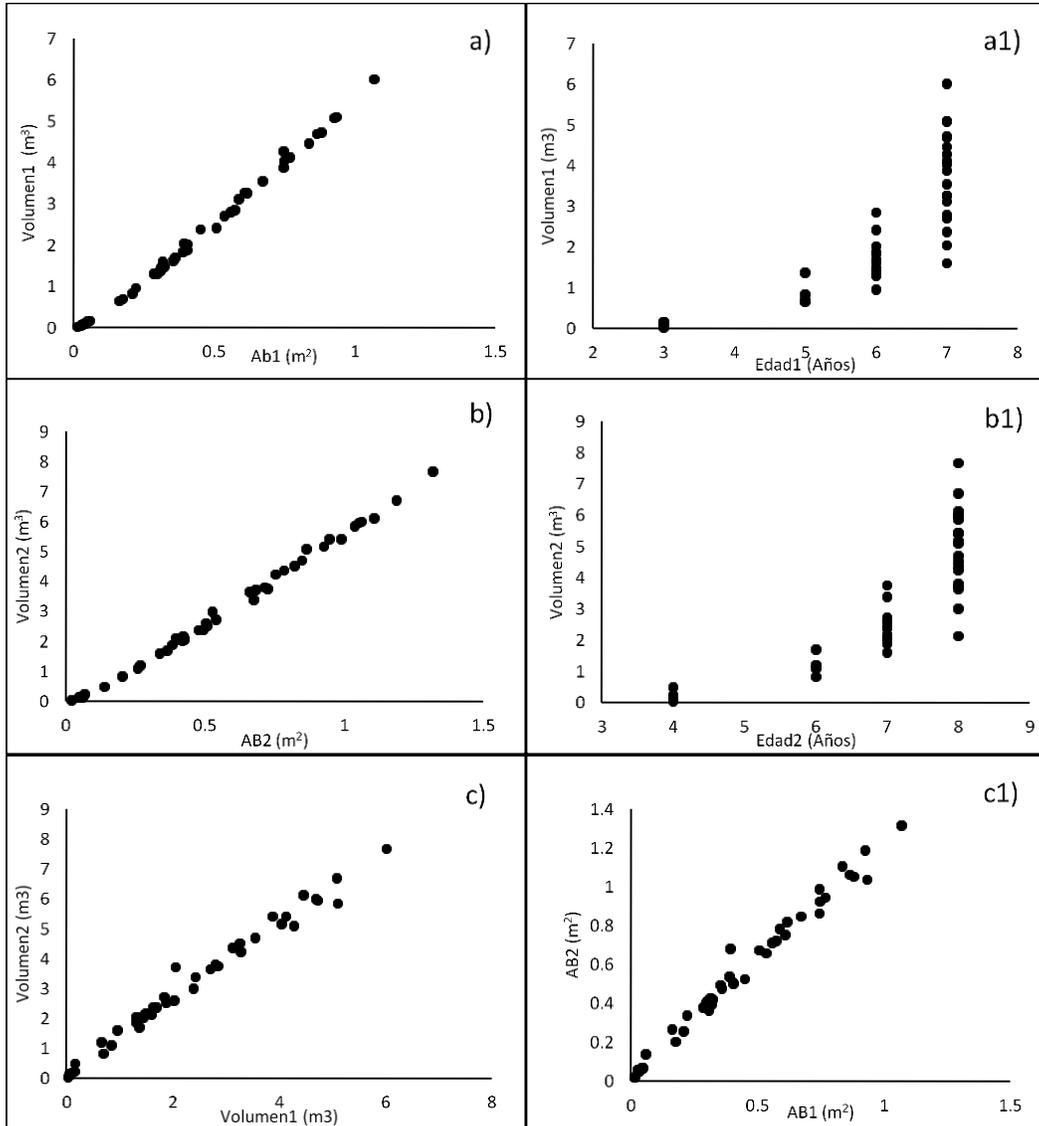


Figura 2.5.2. Relación de las variables principales respecto a las auxiliares para las mediciones 1 y 2.

Las tendencias anteriores sugieren que la variable área basal y el volumen, son variables que pueden ser utilizadas como variables auxiliares en la estimación del inventario, ya sea a través de estimadores de razón o de regresión.

2.5.2. Resultados de los muestreos implementados

De los cuadros 2.5.2 al 2.5.8, se muestran los valores estimados de la media, la varianza, Intervalos de confianza, y precisión para las variables de interés AB, V y NA para el MSA y MSE en los años de medición 2014 y 2015, y los valores estimados para las Razones y regresiones evaluadas.

Cuadro 2.5.2. Resultados de los estimadores del MSA 2014.

Estimadores	Inventario Sitio ⁻¹			Inventario ha ⁻¹			Inventario total		
	AB m ²	V m ³	NA	AB m ²	V m ³	NA	AB m ²	V m ³	NA
Media	0.441	2.25	39	11.03	56.28	971	959.46	4896.78	84479
V. Muestral	0.082	2.65	41.39	2.05	66.31	1034.82	178.69	5768.83	90029.14
V. Media	0.002	0.06	0.92	0.05	1.48	23.04	3.98	128.46	2004.72
IC + 95%	0.527	2.74	41	13.18	68.53	1019	1146.95	5962.06	88687
IC - 95%	0.355	1.76	37	8.87	44.04	923	771.97	3831.50	80271
Precisión	19.54%	21.8%	4.98%	19.54%	21.75%	4.98%	19.54%	21.75%	4.98%

Cuadro 2.5.3. Resultados de los estimadores del MSE 2014.

Estimadores	Inventario Sitio ⁻¹			Inventario ha ⁻¹			Inventario total		
	AB m ²	V m ³	NA	AB m ²	V m ³	NA	AB m ²	V m ³	NA
Media	0.4338	2.21	39	10.84	55.14	975	943.51	4796.94	84797
V. Media	0.0004	0.01	0.72	0.01	0.34	17.98	0.90	29.33	1564.28
IC + 95%	0.4749	2.44	41	11.87	60.99	1017	1032.83	5306.32	88517
IC - 95%	0.3927	1.97	37	9.82	49.28	932	854.20	4287.55	81078
Precisión	9.47%	10.62%	4.39%	9.47%	10.62%	4.39%	9.47%	10.62%	4.39%

Cuadro 2.5.4. Resultados de los estimadores de R y Rg 2014.

Estimador	Parámetros							Ganancia	
	Media	R	Rg	V.M.	L.S.	L.I	Inventario (m ³)		Precisión
R V/AB MSA	2.21	5.10	-	8.67E-04	2.27	2.15	4815.39	2.68%	0.12
R V/E MSA	2.25	0.38	-	3.41E-02	2.62	1.87	4885.87	16.58%	0.75
Rg V/AB MSA	2.21	-	5.67	2.91E-04	2.24	2.18	4806.38	1.556%	0.07
Rg V/E MSA	2.24	-	0.93	2.15E-02	2.54	1.94	4870.40	13.220%	0.59

Cuadro 2.5.5. Resultados de los estimadores del MSA 2015.

Estimadores	Inventario Sitio-1			Inventario ha-1			Inventario total		
	AB m ²	V m ³	NA	AB m ²	V m ³	NA	AB m ²	V m ³	NA
Media	0.567	3.03	38	14.18	75.83	958	1233.54	6597.17	83342
V. Muestral	0.120	4.19	40.78	3.01	104.80	1019.50	261.83	9117.29	88696.78
V. Media	0.003	0.09	0.91	0.07	2.33	22.70	5.83	203.02	1975.06
IC + 95%	0.671	3.65	40	16.79	91.22	1006	1460.49	7936.39	87519
IC - 95%	0.463	2.42	36	11.57	60.44	910	1006.59	5257.95	79165
Precisión	18.40%	20.30%	5.01%	18.40%	20.30%	5.01%	18.40%	20.30%	5.01%

Cuadro 2.5.6. Resultados de los estimadores del MSE 2015.

Estimadores	Inventario Sitio-1			Inventario Ha-1			Inventario total		
	AB m ²	V m ³	NA	AB m ²	V m ³	NA	AB m ²	V m ³	NA
Media	0.559	2.98	38	13.98	74.52	962	1216.36	6483.57	83680
Var Med	0.001	0.02	0.73	0.01	0.46	18.36	1.22	40.32	1597.61
IC + 95%	0.607	3.26	40	15.18	81.39	1005	1320.27	7080.82	87439
IC - 95%	0.511	2.71	37	12.79	67.66	919	1112.45	5886.33	79921
Precisión	8.54%	9.21%	4.49%	8.54%	9.21%	4.49%	8.54%	9.21%	4.49%

Cuadro 2.5.7. Resultados de los estimadores de R y Rg 2015.

Estimador	Parámetros							Ganancia	
	Media	R	Rg	V.M.	L.S.	L.I	Inventario (m ³)		Precisión
R V/AB MSA	2.99	5.35	-	1.18E-03	3.06	2.92	6505.29	2.31%	0.14
R V/E MSA	3.03	0.44	-	5.50E-02	3.50	2.55	6584.62	15.62%	0.95
Rg V/AB MSA	2.99	-	5.89	4.02E-04	3.03	2.95	6496.01	1.354%	0.08
Rg V/E MSA	3.02	-	1.20	3.00E-02	3.37	2.67	6562.94	11.577%	0.70

Cuadro 2.5.8. Resultados de los estimadores de R y Rg 2014 y 2015.

Estimadores	Parámetros							Inventario (m ³)	Precisión	Ganancia
	Media	R	Rg	V.M.	L.S.	L.I				
R V2/V1	2.97	1.35	-	1.99E-03	3.06	2.88	6462.66	3.03%	0.18	
R AB2/AB1	0.56	1.29	-	5.69E-05	0.57	0.54	1213.04	2.73%	0.03	
Rg V2/V1	2.98	-	1.25	1.44E-03	3.05	2.90	6472.60	2.569%	0.15	
Rg AB2/AB1	0.56	-	1.20	4.47E-05	0.57	0.54	1214.40	2.415%	0.03	

2.5.2.1. Inventario 2014

Para los estimadores MSA y MSE se observa que al estratificar por la edad se obtiene una mejora sustancial en la precisión sobre el promedio para las variables Volumen, Área Basal y Número de Árboles. Para el AB se mejora en un 10.07 %, en el V la precisión gana un 11.18%, y para el NA la precisión mejora en un 0.59 % (cuadros 2.5.2 y 2.5.3).

Al estratificar por edad, algunos autores han encontrado que se aumenta la precisión de las estimaciones al reducirse la varianza (Gilbert *et al.*, 1998; Achard *et al.*, 1998 y Thrower, 1992. Una de las estrategias para optimizar un inventario es recurrir a la estratificación usando alguna variable fuertemente relacionada con la variable de interés, en este caso el Volumen con la edad de las plantaciones (Lencinas y Mohr-Bell, 2007).

Para la Razón de V/AB, el valor del estimador indica que por cada m² de AB, existen aproximadamente 5.10 m³ ha⁻¹ de volumen en pie. El dato obtenido puede ser útil para obtener inventarios rápidos cuando se utiliza el relascopio. Aunque tiene menor correlación, la edad también se puede usar como una variable auxiliar. Cuando se hace esto el estimador funciona como un sistema de crecimiento y rendimiento simplificado, en donde conociendo la edad ponderada (5.8 años), obtenida a partir de las clases de edad y el tamaño de cada estrato, puede estimarse el inventario en forma anualizada, al dejar crecer la plantación, suponiendo que la superficie plantada se mantenga constante con el transcurso del tiempo y que no se incorporen o remuevan áreas de plantaciones en la estimación (Roldan, 2013; Tamarit, 2013).

El estimador de Razón Volumen/Edad, indica que el incremento anualizado en las plantaciones es de 0.38 m³ por sitio, es decir 9.5 m³ ha⁻¹ año⁻¹. Para implementar este muestreo se utilizó el AB ponderada por el tamaño de los estratos del MSE (debido a

que hace uso de la media poblacional de variable auxiliar). De esta manera se combina el diseño estratificado bajo el MSA con el estimador de MAE. Esto tiene una ventaja estadística, pues en este caso la variable auxiliar si es conocida sin error (Se conocen las edades de la plantación); de este modo se asume que los valores obtenidos de los estimadores muestrales son estadísticamente correctos. Por otro lado, los valores de los estimadores de Regresión, poseen la cualidad de ser muy precisos, incluso más que los estimados por Razón. Esto se corrobora con los valores mediante la regresión V/AB, y Volumen/Edad, al obtenerse en el primer caso una mejora del 1.12% con una precisión del 1.56 %, y para el segundo caso se mejora en un 3.36 % con una precisión del 13.22%.

Al igual que en los estimadores de razón, en los de regresión se utilizó la media del AB obtenida en los estimadores del MSE. Estos indican que por cada m^2 de AB, existen aproximadamente $5.67 m^3 ha^{-1}$ de volumen en pie cuando la variable auxiliar es el AB. Cuando se usa como auxiliar a la Edad respecto al Volumen, los estimadores indica que en las existe un volumen de $0.93 m^3$ por sitio/año ($25 m^3 ha^{-1} año^{-1}$) La amplia diferencia que se obtiene en los estimadores de razón, respecto a los de regresión en la estimación del incremento anualizado se debe a que la pendiente de regresión no pasa por el origen, si no que atraviesa el eje X atendiendo el comportamiento de los datos. Debido a lo anterior resulta correcto elegir los estimadores de regresión. Estos estimadores muestran una estimación del inventario en volumen de $4806.38 m^3$ cuando se utiliza el área basal como variable auxiliar, y de $4870.40 m^3$ cuando la variable auxiliar es la Edad.

2.5.2.2. Inventario 2015

De manera similar al inventario del 2014, en los estimadores MSA y MSE se tienen ganancias en precisión al estratificar por edad las variables de interés. Para el AB se mejora en un 9.86 %, en el V la precisión gana un 11.09%, y para el NA la precisión mejora en un 0.52 % (cuadros 2.5.5 y 2.5.6).

Para la Razón de V/AB, el valor del estimador indica que por cada m^2 de AB, existen aproximadamente $5.35 m^3 ha^{-1}$ de Volumen en pie. La Razón Volumen/Edad, indica

que el incremento anualizado en las plantaciones es de 0.44 m^3 por sitio ($11 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

En los estimadores de la Regresión V/AB se obtienen mejoras en precisión respecto al de Razón en un 0.46 %, para la Regresión V/E, la mejora es del 0.32 %. A pesar de que los estimadores de razón y regresión conducen a obtener estimadores sesgados, tal sesgo es mínimo y puede considerarse despreciable, siempre que el tamaño de muestra sea mayor a 30 (Scheaffer *et al.*, 1987; Velasco *et al.*, 2003).

Para los estimadores de Razón que involucran como variable principal el Volumen del año 2015, y como variable auxiliar el Volumen en el 2014, se tiene que por cada m^3 que había en el 2014 (volumen inicial), el Volumen creció en proporción aproximadamente el 35 %. Para la Razón AB2/AB1, se obtuvo un incremento del 29 %. De los estimadores empleados en este trabajo y bajo los criterios de evaluación mencionados, los mejores fueron los de Regresión V/AB. El inventario en volumen que muestran estos estimadores es de 6496.01 m^3 , y cuando se utiliza como variable auxiliar a la edad, el inventario es de 6562.94 m^3 .

2.6. Conclusiones

Los estimadores de Razón y Regresión que consideran al Volumen/AB y Volumen/Edad, permitieron aumentar la precisión en los métodos evaluados. Estos estimadores ofrecen bondades deseables para la estimación del inventario forestal, estas estimaciones fueron más eficientes que las estimaciones de muestreo basados en las medias aritméticas simples (MSA y MSE).

Además de que los estimadores permiten obtener más eficiencia, también brindan un panorama del incremento en m^3 por unidad de superficie arbolada (AB) cuando se trabaja con razones de V/AB, y cuando se trabaja con razones de V/Edad, los estimadores permiten conocer el incremento medio anual (clases de un año).

Cuando se implementa el método de Muestreo al Azar con estimadores de Razón utilizando como variables principales las que se midieron en el tiempo dos (volumen 2 y área basal 2), y como auxiliares las medidas en el tiempo uno (volumen 1 y área basal 1), es posible obtener el incremento de la plantación en proporción por año, respecto al valor inicial de la variable dasométrica de interés.

Con la eficiencia de los estimadores de muestreo evaluados, se puede decir que pueden integrarse distintos métodos de muestreo y complementarse entre sí, con la finalidad de obtener estimaciones más precisas sobre la media poblacional.

Con estos resultados se obtiene un panorama del estado actual de las plantaciones, sin embargo se recomienda seguir realizando el levantamiento de información en años posteriores para incluir las edades más jóvenes (Edades de 1 y 2 años) y actualizar el inventario en el futuro.

2.7. Literatura citada

- Achard, F., T. Richards and J. Gallego. 1998. A new sampling scheme for tropical forest monitoring using satellite imagery. *In*: Hansen M. and T. Burk. Integrated tools for natural resources inventories in the 21st century. 1998: August 16-20, Forest Service. Boise, Idaho. United States of America. pp. 607-613.
- Alder D. (1980). Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Estudio FAO. Montes 22/2. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 118 p.
- Bell, J., F. 1998. Basic truths for planning and executing an inventory. *In*: Integrated tools for natural resources inventories in the 21st century. 1998: August 16-20, Forest Service. Boise, Idaho. United States of America. pp. 14-19.
- Cochran, W. G. 1977. Sampling techniques. Third edition. John Wiley & Sons. New York. 428 p.
- Freese, F. 1962. Muestreo forestal elemental. USDA FS Agriculture Handbook No. 232. 91 p.
- Gilbert, D. K. Tudor, S. Otukol y K. Jahraus. 1998. Rebuilding our legacy inventories: identifying the good and fixing the bad. *In*: Hansen M. y T. Burk. Integrated tools for natural resources inventories in the 21st century. 1998: August 16-20, Forest Service. Boise, Idaho. United States of America. pp. 50-59.
- Gregoire, T. G. y T. H. Valentine. 2008. Sampling strategies for natural resources and the environment. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL. 474 p.
- Johnson, W. E. 2000. Forest sampling desk reference. CRC Press LLC. United States of America. 985 p.

- Kish, L. 1975. Muestreo de encuestas. Traducido al español por Ricardo Vinós Cruz López. Editorial Trillas. México. 739 p.
- Kish, L. 1995. Survey sampling. Willey Classics Library. United States of America. 643 p.
- Köhl, M. S., S. Magnussen, M. Marchetti. 2006. Sampling methods, remote sensing and GIS multiresource forest inventory. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York. 373 p.
- Lencinas, J.D. & Mohr-Bell, D.; 2007. Estimación de clases de edad de las plantaciones de la provincia de Corrientes, Argentina, con base en datos satelitales Landsat. Revista Bosque Vol. 28, Nro. 2: pp. 106-118.
- Roldan, C., H. M. De los Santos, H. Ramírez, J. R. Valdez, G. Ángeles y A. Velázquez. Estimadores de muestreo para inventario de plantaciones forestales comerciales de eucalipto en el sureste mexicano. 2013. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 26(5): 38-57
- Ruiz, A. M. 1982. Curso sobre inventarios forestales. Breve descripción de algunas técnicas de muestreo. Boletín Divulgativo No. 61. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. México. 34 p.
- Särndal, C. E., B. Swensson y J. Wretman. 1992. Model assisted survey sampling. Springer series in statistics. Springer-Verlag. New York. 694 p.
- Scheaffer, R. L., W. Mendenhall y L. Ott. 1987. Elementos de muestreo. Grupo Editorial Iberoamérica. Traducido al español de Elementary survey sampling. Tercera edición. México. 321 p.
- Schumacher, F. X. y Chapman, R. A. 1942. Sampling methods in forestry and range management. Duke University. School of Forestry. Bulletin 7. Durham, North Carolina. 213 p.
- Schreuder, H. T., J. C. Rennie y M. Williams. 1992. Comparison of three sampling schemes for estimating frequency and D2H by diameter class a simulation study. Forest Ecology and Management. 50: 117-131.
- Schreuder, H. T., R. Ernst y H. Ramírez M. 2004. Statistical techniques for sampling and monitoring natural resources. Forest Service-USDA. General Technical Report RMRS-GTR-126. 111 p.

- Schreuder, H. T., R. Ernst y H. Ramírez, M. 2006. Técnicas estadísticas para evaluación y monitoreo de recursos naturales. Universidad Autónoma Chapingo. México. 144 p.
- Shiver, B. D. y B. E. Borders. 1996. Sampling techniques for forest resource inventory. John Wiley. New York. 356 p.
- Sukhatme, P. V. 1956. Teoría de encuestas por muestreo con aplicaciones. Traducción al español por Ana María Flores y José Nieto de Pascual. Secretaría de Economía. Dirección General de Estadística. Departamento de Muestreo. Fondo de Cultura Económica. México. 495 p.
- Thrower, J. S. 1992. An historical summary of forest inventory sampling designs in British Columbia. Report to de B.C. Ministry of Forests Inventory Branch, Timber Inventory Task Force. Forest Research Consulting. Victoria, B.C. Canadá. 26 p.
- Tamarit U. J. C. 2013. Cubicación, crecimiento y rendimiento maderable e inventario operativo para *Tectona grandis* en el sureste de México. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 108 p.
- Thompson, S. K. 2002. Sampling. Willey Series in Probability and Statistics. Pennsylvania State University. A Willey-Interscience Publication. Second Edition. United States of America. 367 p.
- Torres, R. J. M. y O. S. Magaña T. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Editorial Limusa. Grupo Noriega Editores. México. 472 p.
- Van Laar, A., and A. Akça. 2007. Forest mensuration. Springer. Dordrecht, The Netherlands. 383 p.
- Villa, S. A. B. y M. Caballero, D. 1976. Técnicas de muestreo usadas en México en inventarios forestales. Desarrollo histórico. *In*: Recopilación de Notas Sobre Técnicas de Muestreo Usadas en Inventarios Forestales. Publicación Especial Núm. 64 (1993). Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. División Forestal. México. 69 p.
- Velasco B., E., H. Ramírez M., F. Moreno S., y A. De la Rosa V. 2003. Estimadores de razón para el inventario nacional forestal de México. *Ciencia Forestal en México* 28: 23-43.

CAPÍTULO III

3. Sistema de crecimiento y rendimiento para plantaciones de *Pinus chiapensis* (Martinez) Andresen en Tlatlauquitepec, Puebla.

3.1. RESUMEN

Un Sistema de Crecimiento y Rendimiento Maderable (SCRM), es un conjunto de ecuaciones que describen cuantitativamente el crecimiento de los rodales a través del tiempo y permiten evaluar financieramente un proyecto de inversión forestal. El objetivo del presente trabajo fue construir un SCRM como herramienta de apoyo en la toma de decisiones para el manejo de plantaciones de rápido crecimiento de *Pinus chiapensis*. Los datos provienen de 44 sitios permanentes establecidos en 2013 en Tlatlauquitepec, Puebla, y remedidos en 2014. Los componentes del sistema se ajustaron a través de ecuaciones de predicción y proyección mediante el método de diferencia algebraica. El ajuste se hizo con la técnica de regresión aparentemente no relacionada bajo un sistema de ecuaciones simultáneas. Para la altura dominante, el modelo de Hossfeld IV polimórfico resultó ser el más apropiado. El ajuste y parámetros estimados para el área basal, número de árboles y volumen, explican del 80.9% al 99.9% la variación total observada. La tabla de rendimiento variable generada indica que en sitios de menor productividad el ICA en volumen máximo ocurre a los 14 años con un volumen potencial de $25.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y un rendimiento medio de $197 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, mientras que en índices de sitio de mediana productividad el ICA máximo en volumen sucede a los 11 años, con un volumen potencial de $32.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y un rendimiento medio de $199 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. En sitios ricos el máximo ICA sucede a los nueve años con un volumen potencial de $41 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y rendimientos de $201 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. El turno técnico estimado en sitios ricos sucede a los 17 años con rendimientos de $473 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. En sitios promedio el turno técnico se acerca a 20 años con rendimientos de $454 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. En sitios pobres el turno se acerca a los 25 años con rendimientos de $442 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Palabras clave: Diferencia algebraica, modelos de predicción y proyección, altura dominante, tabla de rendimiento, regresión aparentemente no relacionada.

3.2. ABSTRACT

A growth and yield prediction system (GYPS) is a set of interrelated equations that quantitatively describe the growth of forest stands over time allowing to financially evaluate the investment of the project. This study was aimed to construct GYPS to manage fast-growing *Pinus chiapensis* plantations. Data for the GYPS come from 44 permanent sites established in 2013 and re-measured in 2014. The GYPS components are a set of prediction and projection equations built by the method of algebraic difference and fitted as a non-linear seemingly unrelated regression system of simultaneous equations. For the dominant height a Hossfeld IV polymorphic model was the most appropriate. The fit and parameter estimates for basal area, number of trees and volume explain the 80.9% to 99.9% of the total variation. The average yield table indicates that potential yield for the least productive sites will average $197 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ at age 14 when maximum current annual increment (MCAI) of $25.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ occurred. For the average site index a yield of $199 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ will happen at age 11 an MCAI of $32.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. Rich sites will average yields of $201 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ at age 8 and a MCAI of $41 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. Volume rotation is estimated on this rich sites at age 17 with yields of $473 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. On average sites a rotation or 20 years is expected with yields of $454 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. In the poorest sites volume rotation is estimated at 25 years with yields of $442 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Keywords: Algebraic difference, modeling and forecasting, dominant height, yield table, seemingly unrelated regression.

3.3. Introducción

Para realizar un manejo adecuado de los bosques es de vital importancia estimar el crecimiento y rendimiento maderable de los rodales, lo cual se consigue generalmente a través del uso de modelos. Por ello, el administrador forestal debe contar con herramientas que le permitan estimar de forma adecuada la evolución de un rodal para lograr un rendimiento sostenido (De la Fuente *et al.*, 1998).

En bosques con manejo intensivo es necesario contar con modelos de crecimiento y predicción que describan adecuadamente el comportamiento de las variables del rodal en el tiempo, y que incluyan distintas variedades de condiciones de manejo, sobre todo por la inversión que se realiza en ellos a través de prácticas silvícolas intensivas (García, 1994, Zepeda y Acosta, 2000).

Los modelos de predicción de crecimiento y rendimiento son herramientas que facilitan la toma de decisiones, ya que permiten planear la cosecha, evaluar regímenes o tratamientos de manejo alternativos y pueden usarse como una herramienta básica para la evaluación financiera. Sin la ayuda de estas herramientas, es difícil desarrollar planes de manejo forestal eficientes (Valdez y Lynch, 2000).

La implementación de sistemas de crecimiento y rendimiento maderable (SCRM), ha tenido gran desarrollo en México en los últimos años en masas naturales coetáneas y en plantaciones, con el objetivo de producir y aprovechar madera (Zepeda y Domínguez, 1998; Galán *et al.*, 2008; Magaña *et al.*, 2008).

La función de los SCRM es predecir el cambio a través del tiempo de las variables de interés dasométrico de un rodal, tales como el índice de sitio (IS), la altura dominante (AD), el área basal (AB), el número de árboles (NA) y el volumen (V). Las ecuaciones que componen el sistema describen distintas relaciones entre las variables de interés, basándose en el supuesto de que todas las relaciones ocurren de forma simultánea (Borders y Bailey, 1986).

Los modelos que conforman el SCRM pueden tener diversas características. Una de las más deseables es la compatibilidad en el tiempo y que dependa de las relaciones simultáneas que presentan las variables (Borders y Bailey, 1986).

Los sistemas de tipo compatible empezaron a desarrollarse por Buckman (1962) y Clutter (1963), quienes establecieron que los componentes del crecimiento están

relacionados entre sí. De manera opcional surgieron las ecuaciones expresadas en forma de diferencia algebraica. Esta técnica puede generar ecuaciones dinámicas de predicción y proyección, que al obtenerse de un mismo modelo base, resultan ser compatibles al compartir los mismos parámetros con valores idénticos. (García, 1988; García, 1994).

El objetivo de este estudio fue desarrollar un SCRM mediante el modelado de predicción explícita que permita simular escenarios para el manejo silvícola y estimar el volumen maderable potencial en plantaciones de rápido crecimiento de *Pinus chiapensis* Martínez Andresen en Tlatlauquitepec, Puebla.

3.4. Materiales y métodos

Los datos de este estudio provienen de dos mediciones realizadas cronológicamente en 44 parcelas permanentes de muestreo de 400 m², establecidas en 100 ha de plantaciones de *Pinus chiapensis* en el Municipio de Tlatlauquitepec, Puebla, México (19° 36' 24"N, y 97° 14' 42" O; 1900 m de altitud promedio).

El clima que predomina en la región es templado húmedo con abundantes lluvias en verano, temperatura promedio anual de 15.6° y una precipitación promedio anual de 1,435 mm.

Los sitios fueron establecidos en edades de la plantación que van de 1 a 8 años. En la construcción del SCRM se utilizó información de altura dominante y codominante de los arboles (10 árboles por sitio), diámetro normal con corteza de todos los arboles dentro del sitio, y altura total del resto del arbolado, previamente estimada con una ecuación de altura-diámetro.

La información dasométrica obtenida de los sitios fue; altura dominante (HD en m) de 10 árboles dominantes y codominantes, con la finalidad de optimizar la proporcionalidad y equivalencia de muestrear en promedio 100 árboles por ha⁻¹ (Alder, 1980), diámetro normal con corteza de todos los arboles (Dn en cm) y número de árboles vivos dentro de los sitios (NA). Las alturas que se midieron fueron asumidas como una submuestra de la población, ésta se utilizó para estimar la altura total de cada uno de los árboles a través de un modelo de altura en función del diámetro normal (Dn). El modelo utilizado es el siguiente:

$$A = 17.8028 [1 - \exp(-0.694 D_n)] \quad (1)$$

Donde: A: altura total del árbol expresada en m; D_n : diámetro normal a la altura de 1.30 m expresado en cm; α_i : parámetros a estimar.

Para el Volumen individual con corteza del arbolado en los sitios de muestreo se estimó con una ecuación de volumen local generada para esta especie;

$$V = 0.000065 D_n^{1.630512} H^{1.15635} \quad (2)$$

Donde: V: volumen con corteza en m³; H: Altura del árbol en m.

3.4.1. Sistema de rendimiento maderable

El sistema de crecimiento y rendimiento explícito es sencillo y preciso, ha sido utilizado ampliamente debido a que requiere información básica del diámetro normal (DN) y altura (H) para su construcción.

El sistema proporciona información general de la plantación de interés, sin embargo, algunas modificaciones y ampliaciones de estos modelos pueden usarse para proporcionar información más detallada de la misma (Torres y Magaña, 2001). Debido a que en la región no se cuenta con información básica de *Pinus chiapensis*, se decidió construir un SCRM explícito, el cual permitirá generar datos acerca de la dinámica del crecimiento y rendimiento de la plantación, que servirá como base para trabajos posteriores.

3.4.2. Altura dominante

El primer paso para generar el SCRM fue ajustar los modelos de HD, el modelo que define la familia curvas de índice de sitio (IS , es la altura dominante del rodal a una edad base de referencia) tiene la estructura $Y_2 = f(Y_1, E_2, E_1, \beta_i)$, donde Y_2 es el valor de la variable analizada del rodal a una E_2 (edad de proyección), Y_1 es la variable de interés medida a una edad E_1 (edad inicial), $\alpha_i, \beta_i, \sigma_i, \gamma_i$, son los parámetros de regresión (Clutter *et al.*, 1983; Diéguez *et al.*, 2005; Magaña *et al.*, 2008).

Los modelos seleccionados para el ajuste, han sido utilizados en estudios anteriores de crecimiento por los autores Santiago *et al.*, (2013); Roldán (2013) y Rodríguez y Arteaga, (2005). El ajuste se realizó de forma simultánea, con la finalidad de lograr la

compatibilidad total entre el modelo de predicción y el de proyección. Los modelos probados son los siguientes:

Cuadro 3.4.1. Estructuras de los modelos ajustados en altura dominante.

Nombre	Modelo de predicción	Modelo de proyección
Bass anamórfico	$HD_1 = \frac{\alpha_0 (1 - e^{-\alpha_1 E_1})}{1 + \alpha_2 e^{-\alpha_1 E_1}}$	$HD_2 = HD_1 \left(\frac{(1 - e^{-\alpha_1 E_2}) / (1 + \beta_2 e^{-\alpha_1 E_2})}{(1 - e^{-\alpha_1 E_1}) / (1 + \beta_2 e^{-\alpha_1 E_1})} \right)$
Hossfeld IV anamórfico	$HD_1 = \frac{\alpha_0}{1 + e^{(\alpha_1) \times e^{[-\alpha_2 \ln(E_1)]}}$	$HD_2 = HD_1 \left(\frac{1 + e^{\alpha_1 e^{-\alpha_2 \ln(E_2)}}}{1 + e^{\alpha_1 e^{-\alpha_2 \ln(E_1)}}} \right)$
Hossfeld IV polimórfico	$HD_1 = \frac{\alpha_0}{1 + e^{(\alpha_1) \times e^{[-\alpha_2 \ln(E_1)]}}$	$HD_2 = \frac{\alpha_0}{1 + \left(\frac{\alpha_0}{HD_1} - 1 \right) \times \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{\alpha_2}}$
Weibull anamórfico	$HD_1 = \alpha_0 (1 - e^{-\alpha_1 E_1^{\alpha_2}})$	$HD_2 = HD_1 \left[\frac{(1 - e^{-\alpha_1 E_2^{\alpha_2}})}{(1 - e^{-\alpha_1 E_1^{\alpha_2}})} \right]$
Weibull polimórfico	$HD_1 = \alpha_0 (1 - e^{-\alpha_1 E_1^{\alpha_2}})$	$HD_2 = \alpha_0 \left[1 - \left(1 - \frac{HD_1}{\alpha_0} \right)^{\left(\frac{E_2}{E_1} \right)^{\alpha_2}} \right]$
Schumacher anamórfico	$HD_1 = \alpha_0 e^{\left[-\alpha_1 \left(\frac{1}{E_1} \right) \right]}$	$HD_2 = HD_1 \left(\frac{e^{\alpha_1 / E_2}}{e^{\alpha_1 / E_1}} \right)$

Donde: HD_2 : altura dominante en m, medida en el periodo 2; HD_1 : altura dominante medida en el periodo 1; E_2 y E_1 : edad del rodal en años, correspondientes a los periodos 2 y 1; \ln : logaritmo natural, y β_i parámetros a estimar.

El IS permite al administrador forestal clasificar y proyectar el crecimiento del rodal, lo que representa un medio eficaz y simplificado para evaluar la productividad forestal (Torres y Magaña, 2001; De los Santos-Posadas *et al.*, 2006).

La hipótesis de las curvas anamórficas, es que las tasas de crecimiento entre sitios son constantes pero su potencialidad máxima (asíntota) varía. Por el contrario, la hipótesis de las curvas polimórficas, se basa en que la tasa de crecimiento no es constante en todos los sitios, pero la potencialidad máxima es única (asíntotas constantes) (Bailey y Clutter, 1974).

3.4.3. Crecimiento en área basal

La estimación del área basal (AB) en un SCRM es de vital importancia, esta es una variable altamente correlacionada con el volumen total, la cual mide de manera directa la densidad del rodal, también permite evaluar el efecto de las prácticas silvícolas como los aclareos, (Torres y Magaña, 2001; Santiago, 2009). Los modelos ajustados son los desarrollados por Torres y Magaña (2001), estos tienen la siguiente estructura:

Modelo de predicción:

$$AB_1 = e^{\left(\frac{-\beta_1}{E_1}\right)} HD_1 \beta_2 \quad (9)$$

Modelo de proyección

$$AB_2 = AB_1 \left(\frac{HD_2}{HD_1}\right)^{\beta_2} e^{\left(\frac{-\beta_1}{E_2} + \frac{-\beta_1}{E_1}\right)} \quad (10)$$

Donde: AB_1 : área basal expresada en $m^2 ha^{-1}$ a la edad E_1 ; AB_2 : área basal futura, a la E_2 ; β_i parámetros a estimar, lo demás ya fue definido.

3.4.4. Mortalidad

El número de árboles residuales, NA (o mortalidad), es la variable más compleja de modelar en el SCRM, debido a que inherentemente la mortalidad requiere del uso de funciones de riesgo discretas, y sin embargo se modela como una función continua. Los modelos de mortalidad son derivados de tasas de cambio en el número de individuos. El supuesto es que la tasa de cambio en el número de individuos a través del tiempo es constante. Para evaluar el NA se ajustaron modelos con estructura exponencial, propuestos por Torres y Magaña (2001). Estos tienen la siguiente forma:

Modelo de predicción:

$$NA_1 = \sigma_0 e^{(-\sigma_1 E_1)} \quad (11)$$

Modelo de proyección:

$$NA_2 = NA_1 e^{[-\sigma_1 (E_2 - E_1)]} \quad (12)$$

Donde NA_1 es el número de árboles presentes por hectárea en la edad inicial E_1 , NA_2 es el número de árboles a la edad de proyección E_2 ; y σ_1 : es el parámetro a ser estimado.

3.4.5. Volumen total con corteza

En la predicción del rendimiento en volumen presente de las plantaciones a nivel de rodal, se usaron los modelos de volumen propuestos por Tamarit *et al.*, (2014), donde el más apropiado incluye las variables área basal, altura dominante, edad y número de árboles. La estructura de los modelos es la siguiente:

Modelo de predicción:

$$V_1 = \gamma_0 AB_1^{\gamma_1} HD_1^{\gamma_2} e^{(\gamma_3 NA_1/E_1)} \quad (13)$$

Modelo de proyección:

$$V_2 = V_1 \frac{AB_2^{\gamma_1} HD_2^{\gamma_2} e^{(\gamma_3 NA_2/E_2)}}{AB_1^{\gamma_1} HD_1^{\gamma_2} e^{(\gamma_3 NA_1/E_1)}} \quad (14)$$

Donde: V_1 : volumen expresado en $m^3 ha^{-1}$, a la edad inicial E_1 ; V_2 : volumen por hectárea a la edad de proyección E_2 ; β_i : parámetros a estimar del modelo, lo demás ya fue definido.

Con las variables que incluyen los modelos seleccionados, es posible calcular el volumen maderable de las plantaciones en tiempo actual y futuro.

3.4.6. Ajuste del SCRM

Los elementos del SCRM se ajustaron de manera simultánea mediante la técnica de regresión aparentemente no correlacionada (SUR), utilizando el paquete SAS/ETS® (Statistical Analysis System Institute, 2008). Rose y Lynch (2001) mencionan que esta técnica proporciona una mejor estimación de parámetros cuando los componentes del error se correlacionan para un sistema de ecuaciones, también permite compatibilidad total entre el modelo de estimación promedio y el de proyección, de forma que los parámetros estimados son los mismos mientras se cumple con el criterio de minimización de cuadrados de los residuos (Galán *et al.*, 2008).

Los criterios estadísticos para calificar la bondad de ajuste de los modelos se basaron en análisis numérico y gráficos de residuales; en el caso numérico, consistió en tres estadísticos utilizados con frecuencia en biometría; suma de cuadrados del error (SCE), cuadrado medio del error (CME) y coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) (Prodan *et al.*, 1997; Diéguez *et al.*, 2003; Corral *et al.*, 2007).

Con el conjunto de ecuaciones del sistema es posible obtener tablas de rendimiento para las diferentes calidades de sitio establecidas, esto permite visualizar la dinámica del crecimiento y rendimiento de las plantaciones.

3.5. Resultados y discusión

Conocer el potencial productivo de los sitios forestales bajo manejo es esencial en un SCRM, para esto se utilizan modelos de altura dominante (HD). Debido a que los datos provienen de parcelas con una remediación, es posible aplicar el método de curvas de diferencia algebraica, ajustando de manera simultánea, haciendo compatibles (comparten los mismos valores de los parámetros) las ecuaciones de predicción y proyección de crecimiento en HD.

Para los modelos de crecimiento en altura dominante los criterios estadísticos de bondad de ajuste del sistema de ecuaciones ajustada, se presentan en el cuadro 3.5.1.

Cuadro 3.5.1. Estadísticos obtenidos de los modelos ajustados en diferencia algebraica para altura dominante.

Modelo	Predicción			Proyección		
	SCE	CME	R ² Adj	SCE	CME	R ² Adj
Bass anamórfico	51.650	1.229	0.891	27.762	0.645	0.949
Hossfeld IV anamórfico	77.376	1.842	0.845	26.268	0.494	0.941
Hossfeld IV polimórfico	54.413	0.645	0.891	27.762	0.645	0.949
Weibull anamórfico	59.638	1.181	0.901	31.396	0.730	0.943
Weibull polimórfico	51.674	1.301	0.891	53.009	1.232	0.903
Schumacher anamórfico	59.769	1.406	0.882	34.530	0.793	0.938

Los modelos generaron buenos ajustes al explicar 84.5 % en predicción y 94.9 % en proyección de la variación total observada en HD. Se obtuvieron valores similares en los estadísticos para los modelos propuestos en la SCE, el CME y errores estándar reducidos, es normal observar que estas plantaciones tengan un crecimiento más acelerado que los rodales naturales, esto contrasta con lo que encontraron Rodríguez *et al.*, (2005) en un trabajo realizado en rodales coetáneos de *Pinus chiapensis* en los estados de Veracruz y Puebla, donde también realizaron ajustes empleando el método de diferencia algebraica en datos provenientes de análisis troncales, teniendo ajustes que explican del 65.8 % del modelo promedio, al 98.3 % de la variación para la HD. Los parámetros estimados de los modelos de HD se presentan en el Cuadro 3.5.2.

Cuadro 3.5.2. Parámetros estimados, error estándar y significancia de los modelos ajustados en diferencia algebraica para altura dominante.

Modelo	Parámetro	Estimación	Error estándar	Significancia
Bass anamórfico	α_0	19.1453	1.7696	<0.0001
	α_1	0.3854	0.0716	<0.0001
	α_2	5.3658	1.7748	0.0042
Hossfeld IV anamórfico	α_0	15.4201	0.8991	<0.0001
	α_1	4.9110	0.3914	<0.0001
	α_2	3.3691	0.2081	<0.0001
Hossfeld IV polimórfico	α_0	33.2849	0.5414	0.0003
	α_1	3.4135	0.1582	<0.0001
	α_2	1.5283	0.1964	<0.0001
Weibull anamórfico	α_0	22.2266	3.8521	<0.0001
	α_1	0.0439	0.0060	<0.0001
	α_2	1.5507	0.1588	<0.0001
Weibull polimórfico	α_0	20.4770	1.9826	<0.0001
	α_1	0.0501	0.0091	<0.0001
	α_2	1.5433	0.1537	<0.0001
Schumacher anamórfico	α_0	28.7514	1.4477	<0.0001
	α_1	5.5392	0.2998	<0.0001

El análisis estadístico muestra que los modelos generan ajustes buenos, el modelo polimórfico de Hossfeld IV resulta ser el más promisorio, ya que además de presentar un R^2 Adj alto en las ecuaciones de predicción y proyección, también se obtienen valores bajos en la SCE y el CME. Rodríguez *et al.* (2005), quienes realizaron un trabajo de índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en los estados de Veracruz y Puebla, México, identificaron asíntotas similares que varían entre 37.03 y 31.53 m. Esto concuerda con el trabajo realizado para la misma especie en el Rincón de Oaxaca, México, donde Sánchez y Del Castillo (2001) encontraron que en rodales de masas puras la relación asintótica entre la altura y la edad en la que puede observarse un crecimiento inicial rápido, sucede durante los primeros 30 años. *Pinus chiapensis* es considerada una especie de rápido crecimiento, por lo tanto, la tendencia del conjunto de datos presentará una forma sigmoide y alcanzará su máximo desarrollo a una edad más temprana. No obstante, se necesita corroborar las predicciones de los modelos con los datos de campo, por lo que se procedió a graficar los modelos

promedio (curva guía) y las familias de curvas de los modelos ajustados para observar el comportamiento a detalle de cada una de ellas. En las Figuras 3.5.1 y 3.5.2 se observan los comportamientos de las Curvas generadas.

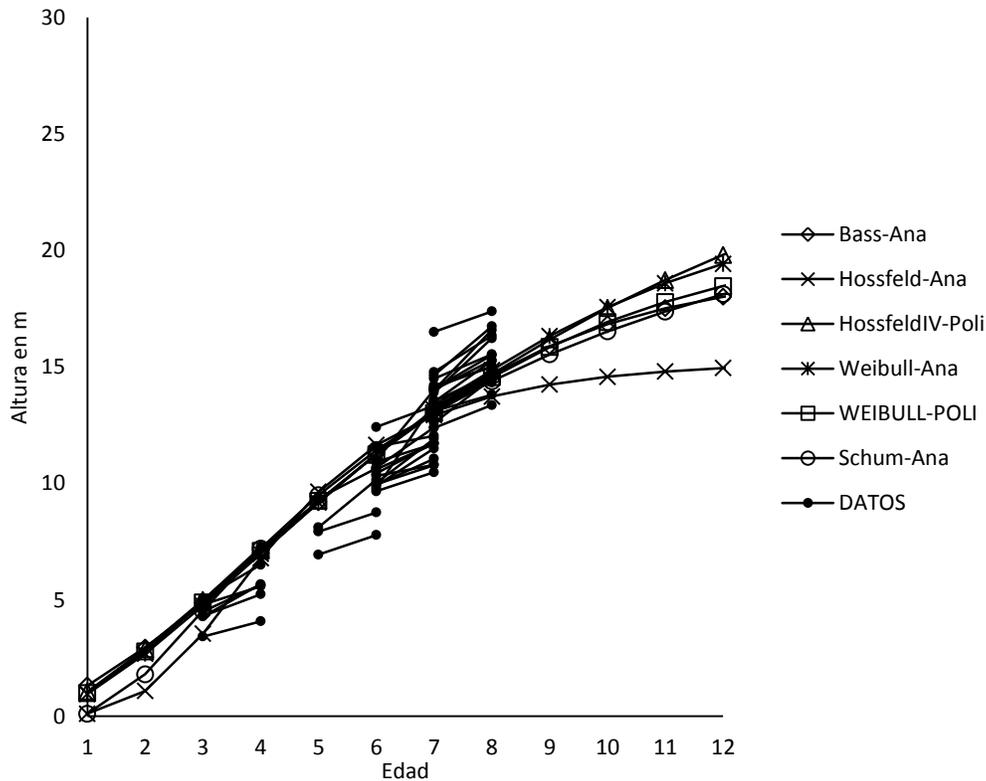


Figura 3.5.1. Curvas promedio de crecimiento en altura dominante para *Pinus chiapensis*.

En la figura anterior se observa la capacidad predictiva de los modelos ajustados, ya que tienden a pasar por en medio de la nube de datos, esto hace evidente su buen comportamiento para proyectar el crecimiento en altura dominante. Con los resultados obtenidos, se construyeron las familias de curvas correspondientes a cada modelo ajustado (Figura 3.5.2).

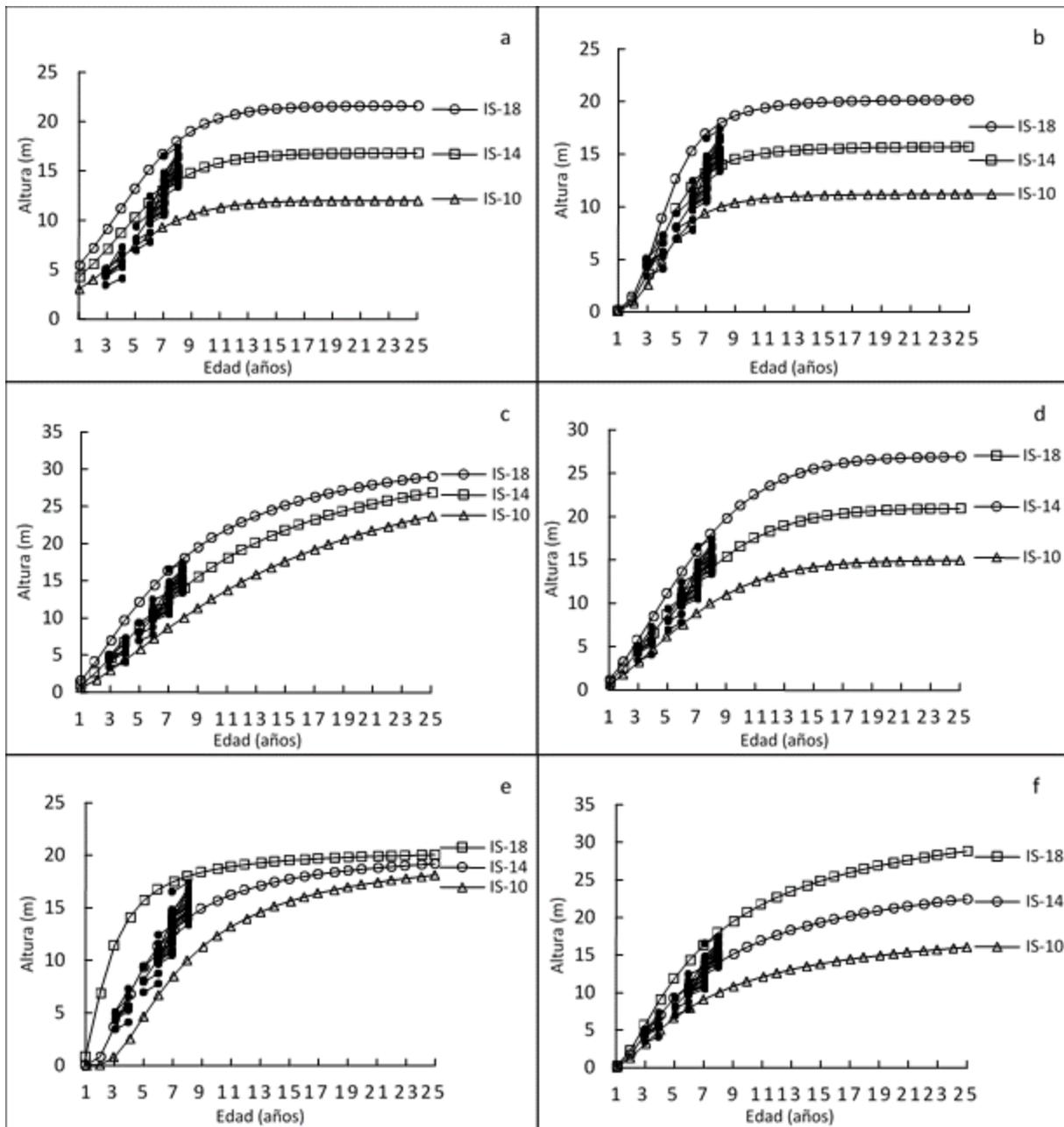


Figura 3.5.2. Familias de curvas de crecimiento en altura dominante para categorías de índice de sitio de 18, 14 y 10 m a una edad base de 8 años para los modelos: a) Bass anamórfico b) Hossfeld IV anamórfico c) Hossfeld IV polimórfico d) Weibull anamórfico e) Weibull polimórfico y f) Shumacher anamórfico.

Si se compara el crecimiento en altura dominante de estas plantaciones con el de bosques naturales de la misma especie, evidentemente las plantaciones tienen un

mejor crecimiento, el IS también será mayor (alcanzan una mayor altura en menos tiempo) siendo resultado de la aplicación de tratamientos silvícolas. En este caso, observando el patrón de crecimiento del índice promedio en las distintas familias de curvas generadas, considerando un IS promedio de 14 m se tiene lo siguiente:

- El modelo a) proyecta una altura de 15 m a los 12 años
- El modelo b) proyecta una altura de 14 m a los 12 años
- El modelo c) proyecta una altura de 19 m a los 12 años
- El modelo d) proyecta una altura de 17 m a los 12 años
- El modelo e) proyecta una altura de 17 m a los 12 años
- El modelo f) proyecta una altura de 16 m a los 12 años

En el trabajo realizado por Rodríguez *et al.* (2005), a los 12 años el arbolado de masas naturales no ha alcanzado una altura de 10 m.

En el trabajo realizado por Santiago *et al.*, (2013) se ajustaron curvas de índice de sitio implementando el modelo de Hossfeld IV en su forma anamórfica en rodales coetáneos de *Pinus patula* Schl. et Cham, asumieron tasas de crecimiento constantes y asíntotas variables, siendo estas las más apropiadas. Por el contrario, en el presente trabajo, las familias de curvas polimórficas son las más adecuadas para describir el patrón de crecimiento de la plantación, asumiendo tasas de crecimiento variables y asíntotas constantes (Bailey y Clutter, 1974). En todas las proyecciones de las curvas, se observa que los árboles seguirán creciendo a medida que pasa el tiempo (Figuras 3.5.3 y 3.5.4).

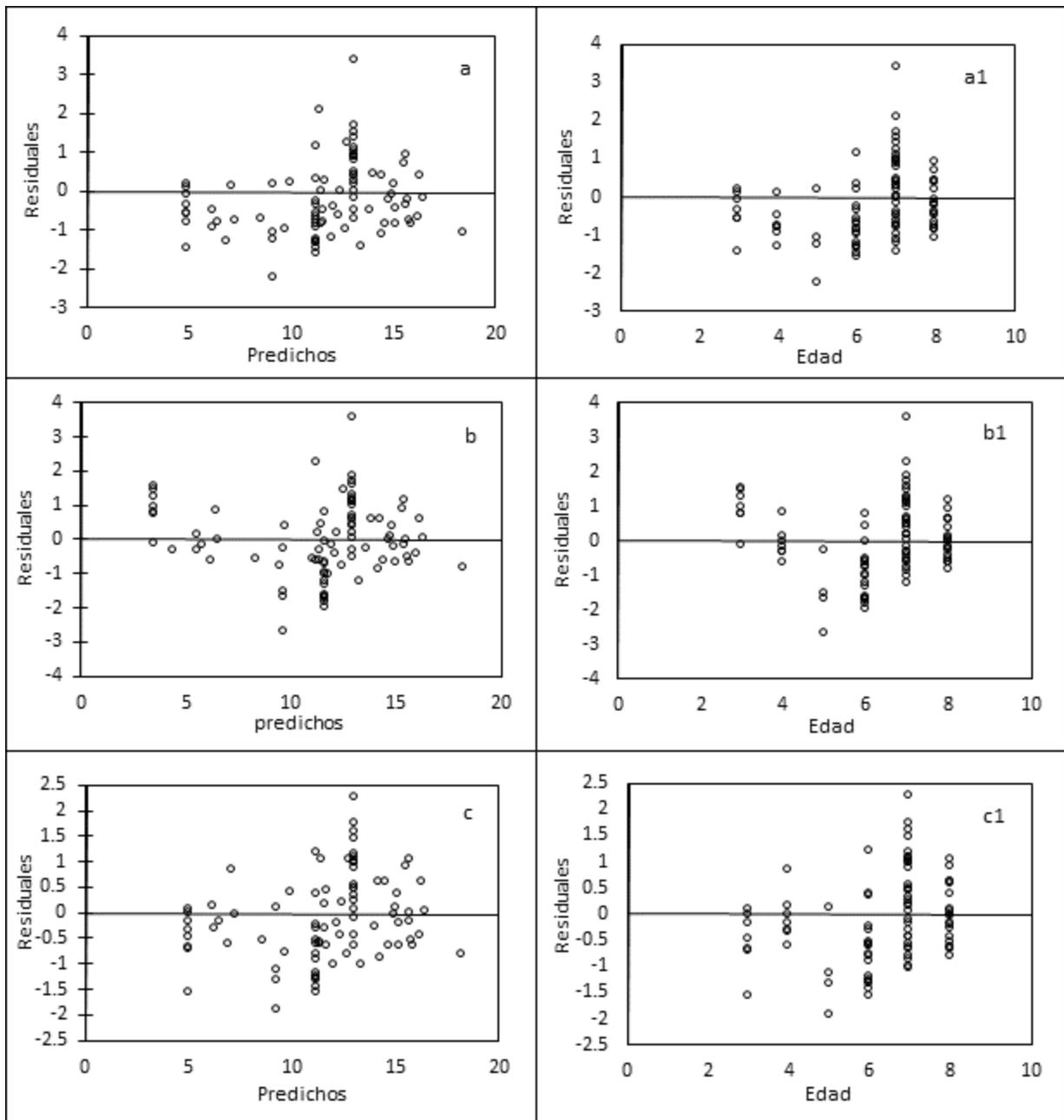


Figura 3.5.3. Residuales contra predichos y la edad de los modelos ajustados, a), a1) Bass anamórfico; b), b1) Hossfeld IV anamórfico y c), c1) Hossfeld IV polimórfico.

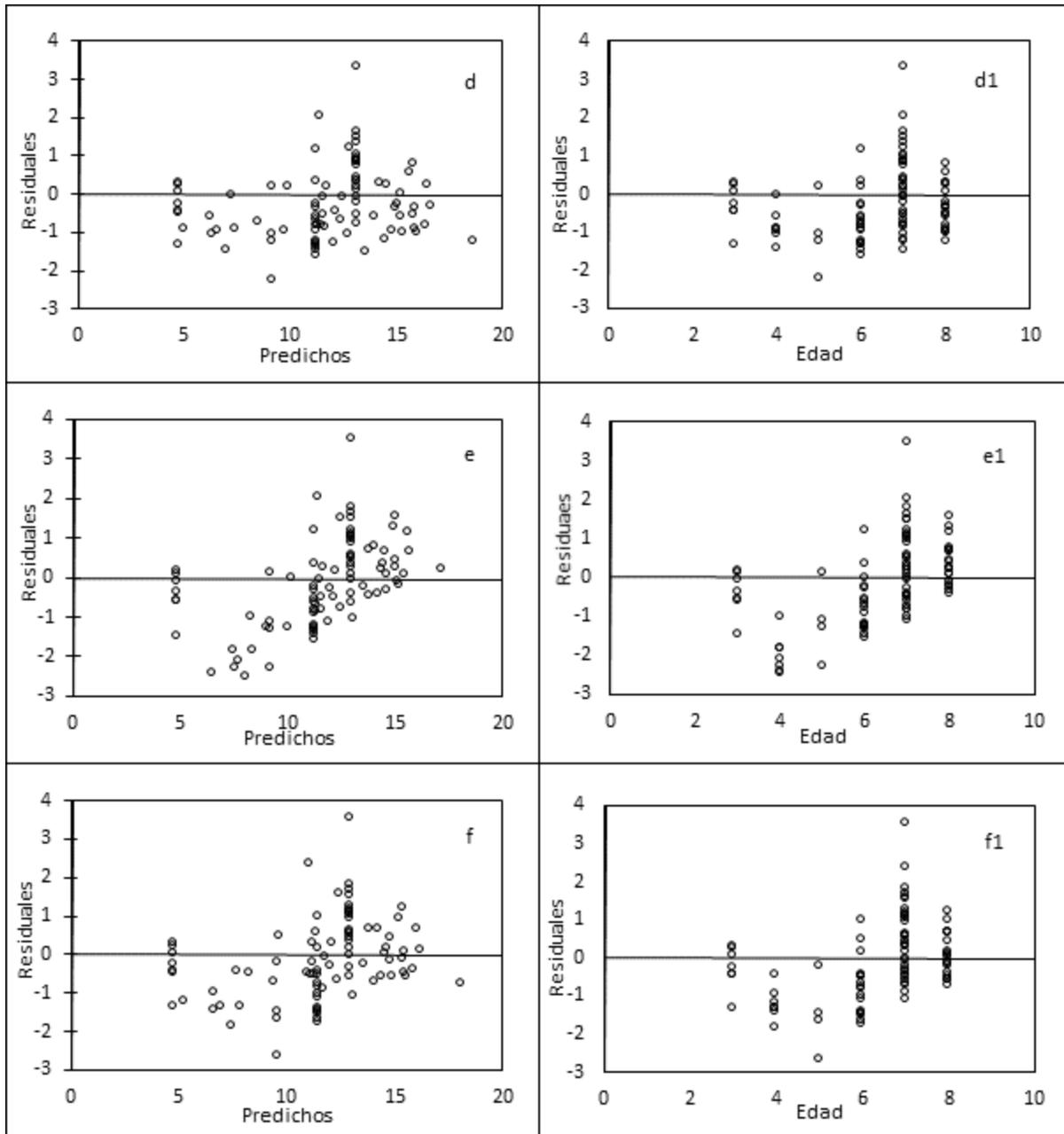


Figura 3.5.4. Residuales contra predichos y la edad de los modelos ajustados. d), d1) Weibull anamórfico e), e1) Weibull polimórfico y f), f1) Shumacher anamórfico

Puede observarse que el comportamiento de los residuales contra los predichos y la edad no se distribuyen de forma aleatoria en la mayoría de los modelos, esto es debido a una falta de ajuste. Sin embargo, el que presenta una mejor distribución es el modelo de Hossfeld IV polimórfico. Los residuales correspondientes a este modelo son los que

presentan los valores más bajos (cerca de cero), siendo el ideal para ser incluido en el SCRM para *Pinus chiapensis*. Por último, en los cuadros 3.5.3 y 3.5.4 se presentan las comparaciones predictivas de los modelos ajustados respecto a la altura verdadera de los árboles. Esto se hizo con el objetivo de identificar al modelo que se acerque más a la realidad de los datos.

Cuadro 3.5.3. Comparación en la estimación de las alturas dominantes de los modelos promedio ajustados respecto a las alturas verdaderas.

Edad	Bass anamórfico	Hosffeld IV anamórfico	Hosffeld IV polimórfico	Weibull anamórfico	Weibull polimórfico	Schumacher anamórfico	Alturas Reales Promedio
1	1.32	0.11	1.06	0.95	1.00	0.11	1.112
2	2.95	1.09	2.89	2.68	2.78	1.80	1.923
3	4.88	3.54	4.19	4.76	4.89	4.54	4.478
4	7.00	7.79	6.16	7.98	7.10	7.20	5.710
5	9.18	9.64	9.16	9.18	9.25	9.50	8.089
6	11.27	11.64	11.23	11.26	11.24	11.42	10.250
7	13.12	12.93	13.04	13.17	13.02	13.03	13.028
8	14.66	13.73	14.69	14.06	14.55	14.39	15.254

Cuadro 3.5.4. Suma de cuadrados de las diferencias por edad de los modelos promedio ajustados.

EDAD	BASS	Hosffeld IV anamórfico	Hosffeld IV polimórfico	Schumacher anamórfico	Weibull anamórfico	Weibull polimórfico
1	0.04	1.00	0.00	1.00	0.02	0.01
2	1.06	0.69	0.93	0.01	0.58	0.74
3	0.16	0.87	0.08	0.00	0.08	0.17
4	1.68	4.32	0.20	2.22	5.15	1.93
5	1.20	2.40	1.14	1.98	1.19	1.34
6	1.03	1.94	0.96	1.37	1.03	0.97
7	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00
8	0.35	2.32	0.31	0.75	1.43	0.49
Total	5.53	13.56	3.63	7.34	9.50	5.65

Una vez más el modelo de Hosffeld IV polimórfico es mejor, ya que tiene la menor suma de cuadrados respecto al valor verdadero de las alturas promedio de los datos.

El modelo polimórfico elegido coincide con el utilizado por Gómez *et al.*, (2009) al encontrar que la familia de curvas polimórficas de Hosffeld IV es la más adecuada para describir la altura dominante de plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en Oaxaca, México.

Torres y Magaña (2001) señalan que en años recientes se ha dado mayor énfasis al desarrollo de funciones polimórficas, debido a que se ha comprobado que tales tendencias se aproximan más a la tendencia real del crecimiento en altura. Corral-Rivas *et al.* (2004) mencionan que las funciones anamórficas generalmente no son adecuadas para representar el crecimiento en altura porque la forma de las curvas varía entre sitios, por tanto, el crecimiento en altura dominante es realmente polimórfico.

Una vez elegido el modelo en HD, es posible implementar la expresión del Incremento Corriente Anual (ICA) y el Incremento Medio Anual (IMA) en altura dominante. A partir del modelo que da origen a la familia de curvas polimórficas se obtiene la primera derivada; la expresión resultante se ajustó a los datos de índice de sitio y de esta forma se obtuvieron las familias de curvas de incrementos para los tres índices de sitio (Figura 3.5.5). Es importante conocer la edad a la que se logra la máxima producción (turno técnico.) en crecimiento en altura dominante respecto a los índices de sitio pues este es un indicador para conocer en que sitios podría esperarse un rendimiento mayor en volumen a una edad menor.

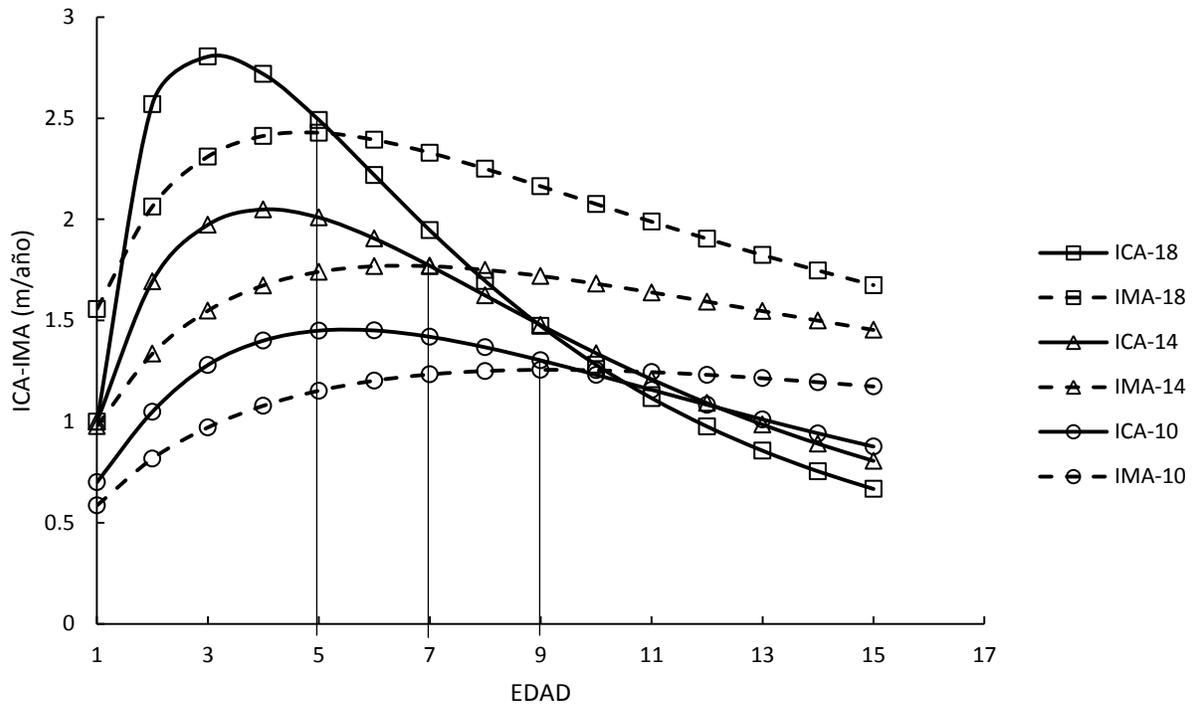


Figura 3.5.5. Turnos técnicos de Incremento en altura dominante en tres índices de sitio para el sistema Hossfeld IV-Polimórfico.

Las curvas polimórficas implican que los sitios más productivos tienen turnos técnicos en altura dominantes más cortos (5 años a un IS de 18 m) que los menos productivos (9 años a un IS de 10 m), por lo tanto, requieren intervenciones silvícolas con mayor frecuencia, esto ayudará a maximizar el potencial del sitio. Las familias de curvas demuestran que se presentan distintos patrones de crecimiento y que sus turnos son distintos para cada índice de sitio.

Debido a que esta es una plantación a la que se le aplican labores silvícolas de forma constante, resulta normal tener estos incrementos a tempranas edades. A manera de comparación, Rodríguez *et al.* (2005) y Sánchez y del Castillo (2001), encuentran incrementos en altura a edades mayores que las reportadas en este trabajo.

3.5.1. Modelos de área basal, mortalidad y volumen

Para las variables que representan la densidad y el volumen, el ajuste y los parámetros estimados muestran una precisión alta que explica 80.9 % en la predicción promedio y el 99.9 % la variación en proyección (Cuadro 3.5.5).

Cuadro 3.5.5. Estadísticos obtenidos de los modelos ajustados en diferencia algebraica para área basal, mortalidad y volumen.

Modelo	Predicción			Proyección		
	SCE	CME	R2Adj	SCE	CME	R2Adj
Área basal	419.800	9.761	0.809	115.1	2.676	0.964
Mortalidad	102760	2329.700	0.078	26978.5	620.200	0.975
Volumen	18.535	0.446	0.999	58.9	1.387	0.999

La significancia alta de los parámetros (< 0.0001) y sus bajos errores estándar hacen robustos y confiables los modelos de crecimiento propuestos (Cuadro 3.5.6).

Cuadro 3.5.6. Parámetros estimados, error estándar y significancia de los modelos de predicción y proyección en área basal, mortalidad y volumen.

Modelo	Parámetro	Estimación	Error estándar	Significancia
Área basal	β_1	5.6638	0.536821	$<.0001$
	β_2	1.3858	0.032734	$<.0001$
Mortalidad	σ_0	1072.0340	35.383265	$<.0001$
	σ_1	0.0171	0.004664	$<.0001$
	γ_0	2.1027	0.113022	$<.0001$
Volumen	γ_1	1.0596	0.006723	$<.0001$
	γ_2	0.3000	0.022942	$<.0001$
	γ_3	-0.0002	0.000073	0.0006

El nivel de precisión del sistema es comparativamente similar al obtenido en otros estudios realizados para distintas especies de *Pinus*. En el sistema compatible de crecimiento y rendimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula* realizado por Santiago *et al.*, (2013), reportan una precisión obtenida para el SCRM de 88.4 % en predicción, y de 99.7 % en proyección. Valor similar que obtuvo Santiago (2013), al actualizar los modelos de este sistema para la misma especie, con un valor de 88.4 % en predicción, y 99.7 % en proyección. Al respecto, Roldán (2008), al generar un sistema de crecimiento y rendimiento maderable para plantaciones de *Eucalyptus*

urophylla S. T. Blake, obtiene una precisión en el ajuste del sistema de 84.2 % en predicción y de 99.9 % en proyección. Asimismo, Galán *et al.* (2008), quienes desarrollaron un sistema compatible para *Cedrela odorata* y *Tabebuia donnell-smithii* Rose, con base en datos de sitios con remediciones, obtuvieron una precisión en el ajuste de 89.6 % en predicción y de 99.6 % en proyección del SCRM. Estos datos indican que el sistema ajustado en este estudio se encuentra dentro de los estándares de ajuste de SCRM obtenidos por otros autores.

Los modelos de área basal generan un patrón de crecimiento con características deseables en una curva de crecimiento (forma sigmoide) con un punto de inflexión, y tendencia a alcanzar una asíntota horizontal a edades avanzadas (Kiviste *et al.*, 2002). Las características de los parámetros de este modelo, muestran su eficiencia estadística porque tienen errores estándar reducidos y son significativos.

Para observar el comportamiento del modelo de AB, se graficó el comportamiento de las curvas generadas en los tres IS establecidos, a IS más altos, estos son más productivos (Figura 3.5.6).

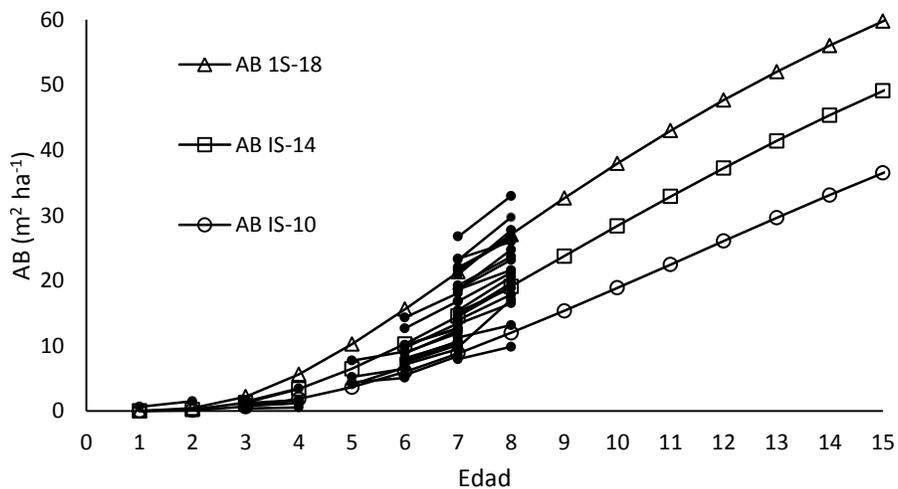


Figura 3.5.6. Curvas de crecimiento en área basal en tres índices de sitio para *Pinus chiapensis*.

La plantación es joven y está en pleno crecimiento, las curvas muestran que el crecimiento en AB será constante si se siguen aplicando las labores silvícolas. El modelo se ajusta de forma correcta a la trayectoria de los datos, sin embargo debe

seguirse complementando la información dasométrica (remediciones) en años posteriores para poder hacer una proyección más precisa del crecimiento a futuro.

El NA permite simular regímenes silvícolas para distintos IS. Sin embargo, se observa que existe una falta de ajuste para predecir el número de árboles; esto tiene que ver con las edades jóvenes de la plantación, ya que a edades tempranas existe poca mortalidad. Al hacer el ajuste de forma simultánea, el modelo de proyección en NA brinda una mejor estimación, pues explica 97.5% de la variabilidad de esta, teniendo una estimación de mortalidad de 1.7% anual.

Estos modelos concuerdan con el reportado por Magaña *et al.* (2008), quienes presentaron una función de mortalidad para *Pinus rudis* Endl. En la cual la tasa de mortalidad proporcional es dependiente de la edad y el índice de sitio. Para hacer pronósticos de rendimiento, se tiene que definir un valor asintótico mínimo, ya que el modelo de mortalidad calcula obtener cero árboles ha^{-1} , cuando en un bosque manejado es difícil que ocurra esto. Otra cualidad de estos modelos son los valores pronosticados de las variables de estado del rodal a un instante futuro, a partir de un estado inicial deben ser iguales, independientemente del número de pasos utilizados en su predicción (Sullivan y Clutter, 1972; Dieguez *et al.*, 2005). Esta cualidad se define como composición o propiedad de semigrupo, siendo el resultado de proyectar el estado, primero de E0 a E1, y luego de E1 a E2, debe ser el mismo el mismo que el de la proyección en una sola etapa de E0 a E2 (Sullivan y Clutter 1972; García, 1994).

Los modelos de volumen incorporan variables de AB, HD, Edad y NA. Estas se han utilizado para modelar el rendimiento maderable de distintas especies tales como; *Pinus arizonica* Engl. (Zepeda y Dominguez, 1998), *Pinus rudis* Endl. (De la Fuente *et al.*, 1998; Magaña *et al.*, 2008), *Pinus patula* (Valdez y Lynch, 2000), *Pinus montezumae* Lamb. (Zepeda y Acosta, 2000), *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose (Galan *et al.*, 2008).

Para observar el comportamiento del modelo de volumen, se graficó el comportamiento de las curvas generadas (Figura 3.5.7).

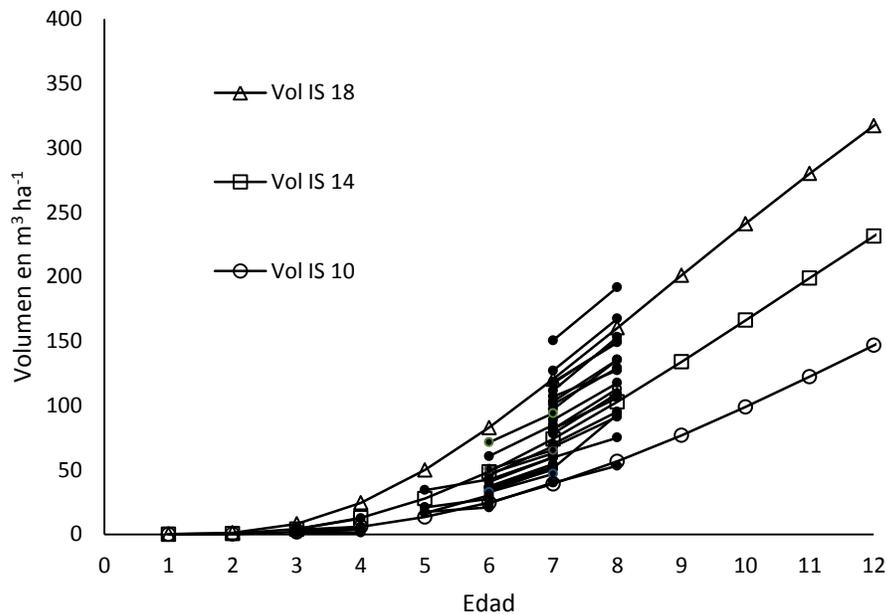


Figura 3.5.7. Curvas crecimiento en Volumen en tres índices de sitio para *Pinus chiapensis*.

Al igual que las curvas de AB, estas curvas proyectan correctamente el crecimiento en volumen de la plantación. Las curvas se ajustan a la trayectoria de los datos y muestran crecimiento gradual conforme aumenta la edad. Las proyecciones se harán más precisas si se tienen remediciones futuras. Estos modelos permiten hacer estimaciones del rendimiento volumétrico por hectárea bajo el enfoque explícito.

3.5.2. Uso del SCRM

El SCRM permite representar, en términos cuantificables la vida de un rodal a través de una tabla de rendimiento generada para la especie, la cual muestra diferencias en las variables de interés a medida que varía su edad. El Cuadro 3.5.7 presenta una tabla de rendimiento, para los rodales de *Pinus chiapensis* en los IS de 10, 14 y 18 m de HD a una edad base de 8 años. La tabla de rendimiento muestra el crecimiento esperado en las variables de interés para cada calidad de sitio. Esta permite distinguir varios niveles de incremento corriente anual (ICA) y de incremento medio anual (IMA) en volumen, a través de estos es posible definir la edad a la que ocurre el turno técnico, cuando el ICA = IMA.

Cuadro 3.5.7. Predicción del crecimiento y rendimiento maderable para los IS =10, 14 y 18 m considerando una densidad inicial de 1100 árboles ha⁻¹.

Edad	NA	IS 10				IS 14				IS 18						
		HD	AB	V	ICA	IMA	HD	AB	V	ICA	IMA	HD	AB	V	ICA	IMA
1	1100	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00	0.00	1.56	0.01	0.01	0.01	0.01
2	1081	1.63	0.12	0.22	0.22	0.11	2.67	0.23	0.53	0.53	0.27	4.13	0.42	1.15	1.14	0.57
3	1063	2.91	0.67	1.75	1.53	0.58	4.64	1.27	3.99	3.46	1.33	6.93	2.21	8.10	6.96	2.70
4	1045	4.31	1.84	5.89	4.14	1.47	6.69	3.38	12.81	8.82	3.20	9.65	5.62	24.46	16.36	6.12
5	1027	5.76	3.65	13.43	7.54	2.69	8.70	6.46	27.83	15.02	5.57	12.14	10.25	50.16	25.70	10.03
6	1009	7.21	6.02	24.59	11.16	4.10	10.61	10.26	48.63	20.80	8.10	14.36	15.62	83.09	32.93	13.85
7	992	8.63	8.83	39.19	14.60	5.60	12.38	14.55	74.11	25.49	10.59	16.30	21.32	120.68	37.59	17.24
8	975	10.00	11.98	56.82	17.63	7.10	14.00	19.09	103.02	28.91	12.88	18.00	27.05	160.68	40.00	20.09
9	959	11.30	15.36	76.94	20.12	8.55	15.48	23.74	134.15	31.13	14.91	19.47	32.64	201.37	40.69	22.37
10	942	12.53	18.87	99.00	22.06	9.90	16.82	28.36	166.48	32.33	16.65	20.75	37.96	241.56	40.18	24.16
11	926	13.69	22.46	122.49	23.48	11.14	18.02	32.87	199.21	32.73	18.11	21.87	42.98	280.46	38.90	25.50
12	910	14.77	26.05	146.92	24.43	12.24	19.12	37.23	231.73	32.51	19.31	22.85	47.66	317.61	37.15	26.47
13	895	15.78	29.61	171.89	24.98	13.22	20.10	41.39	263.59	31.86	20.28	23.70	52.01	352.78	35.16	27.14
14	880	16.73	33.10	197.08	25.19	14.08	20.99	45.34	294.50	30.91	21.04	24.46	56.03	385.85	33.08	27.56
15	865	17.60	36.50	222.20	25.12	14.81	21.80	49.08	324.27	29.77	21.62	25.12	59.75	416.84	30.99	27.79
16	850	18.42	39.79	247.05	24.85	15.44	22.53	52.60	352.77	28.50	22.05	25.72	63.18	445.81	28.96	27.86
17	836	19.18	42.96	271.46	24.41	15.97	23.19	55.91	379.95	27.18	22.35	26.24	66.36	472.83	27.03	27.81
18	821	19.88	46.01	295.31	23.85	16.41	23.79	59.02	405.79	25.84	22.54	26.72	69.29	498.04	25.21	27.67
19	807	20.54	48.93	318.51	23.20	16.76	24.34	61.93	430.31	24.52	22.65	27.14	72.00	521.54	23.50	27.45
20	794	21.15	51.72	340.99	22.48	17.05	24.85	64.67	453.54	23.23	22.68	27.52	74.52	543.47	21.92	27.17
21	780	21.72	54.39	362.73	21.73	17.27	25.31	67.24	475.52	21.98	22.64	27.87	76.85	563.93	20.46	26.85
22	767	22.25	56.93	383.69	20.96	17.44	25.73	69.65	496.32	20.79	22.56	28.19	79.02	583.04	19.11	26.50
23	754	22.74	59.36	403.86	20.18	17.56	26.12	71.92	515.98	19.67	22.43	28.47	81.04	600.91	17.87	26.13
24	741	23.21	61.67	423.26	19.40	17.64	26.48	74.05	534.58	18.60	22.27	28.73	82.92	617.63	16.72	25.73
25	728	23.64	63.87	441.88	18.63	17.68	26.81	76.05	552.17	17.59	22.09	28.97	84.67	633.30	15.67	25.33

NA: número de árboles por hectárea; HD: altura dominante; IS: índice de sitio; AB: área basal por hectárea; V: volumen por hectárea; ICA: incremento corriente anual, e IMA: incremento medio anual. Los valores en negrita muestran la edad a la que ocurre el máximo ICA y el turno técnico.

Estos resultados son producto de una silvicultura intensiva, donde el control de malezas es esencial para redistribuir nutrientes. La plantación es joven y se encuentra en etapa de crecimiento. Las labores que se lleven a cabo ayudaran en gran parte a seguir estimulando el crecimiento de la misma.

Debido a que el modelo de HD seleccionado es de tipo polimórfico, las tasas de crecimiento son variables (Figura 3.5.8).

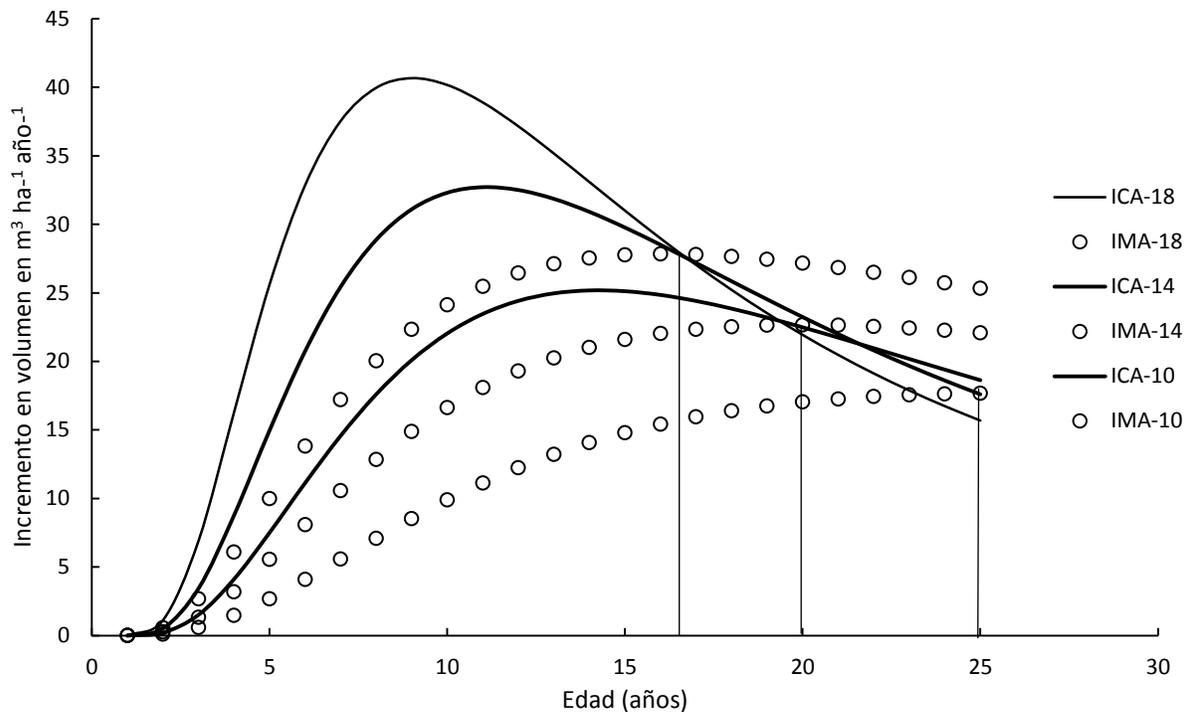


Figura 3.5.8. Curvas del incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) por índice de sitio, a una edad base de 10 años.

El sistema construido sugiere un turno técnico para los sitios de mayor productividad de 17 años, con rendimientos de $473 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. El máximo ICA en estos sitios sucede a los 9 años con un volumen potencial de $41 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y rendimientos de $201 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Para los sitios de productividad promedio, el sistema indica un turno técnico a la edad de 20 años con rendimientos de $454 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. En estos sitios el ICA máximo en volumen se obtiene a los 11 años, con un volumen potencial de $32.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y un rendimiento medio de $199 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Para los sitios pobres el turno técnico estimado se acerca a los 25 años con rendimientos de $442 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Aquí se tiene un ICA en

volumen máximo a los 14 años, y un volumen estimado de $25.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y rendimiento promedio de $197 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

El turno es variable y depende de la calidad del sitio, en los más productivos el turno ocurre a menor edad. El hecho de que en los sitios promedio el turno técnico en volumen se estime a los 20 años (cruce del ICA e IMA), sugiere que la aplicación de tratamientos silvícolas intensivos tales como limpias, fertilización y aclareos fuertes, se realice antes de esta edad a fin de promover el crecimiento de una masa de alto valor económico en el menor tiempo posible acortando el turno técnico.

De acuerdo con Sánchez *et al.* (2003) los turnos aumentan según disminuye la calidad del sitio, y la edad del turno disminuye cuando el nivel de densidad del rodal es más bajo o se intensifican los aclareos.

El SCRM resulta una herramienta de manejo poderosa para generar esquemas de manejo maderable, y con ello tomar decisiones. Los modelos de crecimiento y las simulaciones de crecimiento del bosque juegan un papel importante en manejo forestal dada la longevidad de los árboles y rodales forestales (Pretzsch, 2009). En rodales coetáneos las tablas de rendimiento pueden ser el mejor enfoque para realizar el manejo forestal, en donde la producción de volumen es el principal objetivo.

3.6. Conclusiones

El sistema de ecuaciones de crecimiento y rendimiento desarrollado, permite simular escenarios silvícolas para el manejo de rodales de *Pinus chiapensis*, y puede ser utilizado en la toma de decisiones para la planeación de su manejo futuro.

Otros estudios realizados para esta misma especie muestran crecimientos inferiores en términos de altura, el aumento rápido en altura de las plantaciones se debe en gran medida a las actividades silvícolas intensivas usadas, como son el control de vegetación competidora.

Las proyecciones de las curvas de índice de sitio generadas mostraron buenos ajustes en general. Con el modelo de Hossfeld IV proyectado hasta los 25 años, se sugiere seguir alimentando la base de datos para obtener estimaciones más precisas y confiables.

Para los sitios de productividad promedio, el sistema generado sugiere un turno técnico a la edad de 20 años con rendimientos de $454 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

El modelo de altura dominante de Hossfeld IV polimórfico, representa la opción adecuada para modelar el crecimiento de altura dominante e índice de sitio, ya que es realista a las tendencias de los datos usados en el presente estudio.

Las tasas de crecimiento estimadas sugieren que estas plantaciones se beneficiarían con aclareos fuertes que redistribuyan el potencial de crecimiento.

Con el SCRM se obtienen predicciones y proyecciones precisas de las variables de interés del rodal. Sin embargo, para poder validar los estudios, a largo plazo, es conveniente dar seguimiento a los sitios de medición establecidos, por lo que los resultados presentados no deben extrapolarse más allá de 25 años. Las mediciones futuras permitirán establecer con mayor precisión los patrones de mortalidad natural, para el manejo adecuado de la densidad.

3.7. Literatura citada

- Alder D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Estudio FAO. Montes 22/2. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 118 p.
- Bailey R. L. y J. L. Clutter. 1974. Base-age invariant polymorphic site curves. For. Sci. 20: 155-159.
- Borders, B. E., R.A. Souter, R. L. Bailey, and K. D. Ware. 1987. Percentile-based distributions characterize forest stand tables. For. Sci. 33: 570-576.
- Buckman R (1962) Growth and yield of red pine in Minnesota. USDA Forest Service, Tech. Bull. 1272. 50 p.
- Clutter, J. L. 1963. Compatible growth and yield models for loblolly pine. For. Sci. 9: 354-371.
- Clutter J. L, Forston, J. C., Pienaar, L. V. Brister, G. H. y Bailey R. L. 1983. Timber Management: A Quantitative Approach. John Wiley & Sons, Inc. New York. 333 p.
- Corral-Rivas. J.J., Diéguez A. U., Corral. R. S., y Castedo. D. F. 2007. A Merchantable volumen system for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). Forest Ecology and Management. 118-129 p.

- Corral-Rivas, J. J., J. G. Álvarez G., A. D. Ruíz G. y K. V. Gadow. 2004. Compatible height and site index models for five pine species in El Salto, Durango (Mexico). *Forest Ecology and Management* 201: 145–160.
- De la Fuente E, A., A. Velásquez M., J. M. Torres R., H. Ramírez M., C. Rodríguez F. y A. Trinidad S. 1998. Predicción del crecimiento y rendimiento de *Pinus rudis* Endl., en Pueblos Mancomunados, Ixtlán, Oaxaca. *Rev. Ciencia For. Mex.* 23 (84): 3-8.
- De los Santos P, H, M., M. Montero M M. Kanninen. (2006). Curvas dinámicas de crecimiento en altura dominante para *Terminalia amazonica* (Gmel.) Excell en Costa Rica, *Agrociencia* 40:521-532.
- Diéguez A., U., M. Barrio A., D. Dorado F., G. Ruiz A. D., T. Álvarez M. F., G. Álvarez J. G., y A. Rojo A. 2003. *Dendrometría*. Ediciones Mundi-Prensa. España. 327 p.
- Diéguez A, U., F. Castedo D., J. G. Álvarez G. 2005. Funciones de crecimiento en área basimétrica para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblaciones en Galicia. *Invest. Agr. Sist. Recur.For.* 14:253-266.
- Galán, R., H. M. De los Santos y J. I. Valdez. Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnel-smithii* Rose en San José Chapala, Pochutla, Oaxaca. 2008. *Madera y Bosques*. 14(2): 65-82.
- García, O. 1988. Growth modelling--a (re)view. *New Zealand of Forestry* 33(3): 14–17.
- García, O. 1994. The state–space approach in growth modeling. *Canadian Journal of Forest Research* 24: 1894–1903.
- 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, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32 (2): 161–169.
- Kiviste, A., Álvarez, J. G., Rojo, A. y González, A. D., 2002: Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. *Comunicaciones I.N.I.A. Serie: Recursos Naturales*. No. 4.
- Magaña T, O. S., J. M. Torres R., C. Rodríguez F., H. Aguirre D., A. M. Fierros G. (2008). Predicción de la producción y rendimiento de *Pinus rudis* Endl. en Aloapan, Oaxaca. *Madera y Bosques* 14: 5-19.

- Pretzsch, H. 2009. Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Germany. 664 p.
- Prodan, M; Peters, R.; Cox, F. y Real, P. 1997. Mensura Forestal. Instituto Intercambio de Cooperación para la Agricultura (IICA). Costa Rica. 561 p.
- Rodríguez A, M., y B. Arteaga M. 2005. Índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en los estados de Veracruz y Puebla, México. Rev. Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 11: 39-44.
- Rodriguez A., M. y B. Arteaga M. B 2005. Índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en los estados de Veracruz y Puebla, México. Revista Chapingo Serie Ciencias Sociales y del Ambiente 11:39-44.
- Roldan C. M. A. 2013. Inventario forestal y crecimiento maderable de *Eucalyptus urophylla* en la empresa FORESTACIONES OPERATIVAS DE MÉXICO. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 115 p.
- Rose, Jr. C. E. and T. B. Lynch. 2001. Estimating parameters for tree basal area growth with a system of equation and seemingly unrelated regressions. Forest Ecology and Management. 148: 51–61.
- Sánchez V, N. M., y R. F. Del Castillo S. 2001. Calidad de estación para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen en el Rincón, Oaxaca, México. Rev. Forest. Ver. 3: 9-12.
- Santiago G, W., H. M. De los Santos P., G. Ángeles P., J. R. Valdez L., G. Ramírez V. 2013. Sistema compatible de crecimiento y rendimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula*. Fitotecnia Mexicana.. 36: 163-172
- Santiago G. W. 2013. Simulador de crecimiento para el manejo de rodales coetáneos de *Pinus patula*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 121 p.
- Statistical Analysis System (SAS). 2008. SAS/STAT® 9.2 User's Guide. SAS Institute Inc. Raleigh, NC USA. s/p.
- Sullivan, A. D. y J. L. Clutter. 1972. A simultaneous growth and yield model for loblolly pine. Forest Science 18(1): 76–86.

- Tamarit U, J. C., H. M. De los Santos P., A. Aldrete., J. R. Valdez L., H. Ramírez M., V. Guerra de la C. Ecuaciones dinámicas de índice de sitio para *Tectona grandis* en Campeche, México. *Agrociencia*. 48: 225-238.
- Torres, J. M. y O. S. Magaña. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Limusa Noriega Editores. México, D. F. 472 p.
- Valdez, L. J. R. y T. B. Lynch. 2000. Ecuaciones para estimar volumen comercial y total en rodales aclareados de pino patula en Puebla, México. *Agrociencia*. 34: 747-758.
- Zepeda B E M, M Acosta M (2000) Incremento y rendimiento maderable de *Pinus montezumae* Lamb., en San Juan Tetla, Puebla. *Madera y Bosques* 6:15-27.
- Zepeda B E M, A Domínguez P (1998) Niveles de incremento y rendimiento maderable de poblaciones naturales de *Pinus arizonica* Engl., de El Poleo, Chihuahua. *Madera y Bosques* 4:27-39.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES GENERALES

4.1. Inventario forestal

Para realizar el inventario forestal de las plantaciones, los métodos evaluados sugieren utilizar una estrategia de muestreo de regresión que utilice como variable principal el volumen, y como variable auxiliar el área basal. El inventario en volumen total con el mejor método de muestreo, estima un total de 4,806.38 m³ para el año 2014, y para el 2015 un volumen de 6,496.01 m³. Estos permiten estimar el crecimiento a partir de una proporción muestral que representa el crecimiento en m³ por cada m² de área basal presente en la plantación.

El inventario estimado permite actualizar la información cada vez que se recolecten datos para incluirlos en las estimaciones. Con esta información los administradores de la plantación cuentan con una herramienta que les permite tener un criterio sobre toma de decisiones y para el manejo de la plantación.

4.2. Sistema de crecimiento y rendimiento explícito

El SCRM generado es compatible con los datos de inventario y permite predecir el crecimiento y estimar el rendimiento por hectárea a una determinada edad.

El sistema se conforma por funciones dinámicas de altura dominante, mortalidad, área basal y volumen expresadas en diferencia algebraica. El SCRM estima que en los sitios más productivos (18 m a una edad asé de 8 años) es donde sucede el turno técnico a una edad de 17 años, en sitios de mediana productividad, el turno técnico sucede a los 20 años, y sitios de baja productividad el turno ocurre a los 25 años. Este hecho, sugiere que la aplicación de tratamientos silvícolas intensivos, tales como limpiezas, fertilización y aclareos fuertes, se realice antes de esta edad a fin de promover el crecimiento de una masa de alto valor económico en el menor tiempo posible acortando el turno técnico. El SCRM puede rectificarse con la inclusión de nuevas observaciones a edades más avanzadas de la plantación.

El conjunto de herramientas silvícolas generadas, contribuyen en el proceso de toma de decisiones para mejorar el manejo de las plantaciones forestales de *Pinus*

chiapensis. Se aconseja seguir trabajando la información de las plantaciones con la finalidad incluir una guía para el manejo de la densidad, obtener estimaciones sobre rendimiento y distribución por tipo de producto de acuerdo a diámetros mínimos comerciales en la punta del fuste.

También se señala la importancia de realizar estudios sobre el crecimiento y rendimiento que consideren el efecto de los tratamientos silvícolas en la plantación. Esto proporcionará mayores y mejores elementos para la toma de decisiones en el manejo de las plantaciones.