



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO FORESTAL

**INVENTARIO FORESTAL Y CRECIMIENTO MADERABLE
DE *Eucalyptus urophylla* EN LA EMPRESA
FORESTACIONES OPERATIVAS DE MÉXICO.**

MARIA ANGELICA ROLDAN CORTES

T E S I S

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

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO.

MAYO, 2013.

La presente tesis titulada “**Inventario forestal y crecimiento maderable de *Eucalyptus urophylla* en la empresa Forestaciones Operativas de México**”, realizada por la alumna **MARIA ANGELICA ROLDAN CORTES**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTORA EN CIENCIAS
FORESTAL**

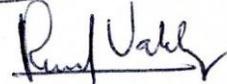
CONSEJO PARTICULAR

**CONSEJERO
Y
DIRECTOR DE TESIS**



Dr. Héctor Manuel De Los Santos Posadas

ASESOR



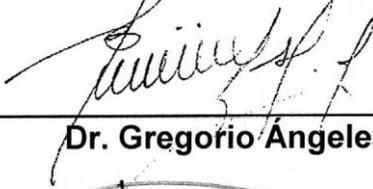
Dr. J. René Valdez Lazalde

ASESOR



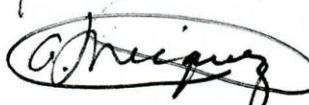
Dr. Hugo Ramírez Maldonado

ASESOR



Dr. Gregorio Ángeles Pérez

ASESOR



Dr. Alejandro Velázquez Martínez

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Mayo de 2013.

Dedico esta tesis:

A Dios el gran ser supremo y la divina Virgen de Guadalupe; por haberme dado la vida y la salud para lograr mis objetivos y llegar hasta este punto. La fe puesta en ustedes me ilumina con un espíritu entusiasta para lograr mis retos y salir triunfante de los obstáculos o pruebas de la vida, situaciones que me han permitido conocerlos más y afianzar mi confianza en su eterna voluntad y misericordia. Una vez más y para siempre, Benditos sean.

A mi mayor Ángel de la guarda José Víctor Roldán Hernández; sustancial motivo por el cual mi mente se pierde en recuerdos y en cada escena de mis sueños aparece: mi papá. A ti por haberme legado el compromiso de superación profesional, sé que compartes la alegría de esta meta cumplida y te manifiestas y haces presente entre nosotros cada vez que el viento roza nuestras mejillas. Gracias por seguir dándome tus bendiciones. ¡Dios te guarde!

A la mujer más maravillosa que el Señor me ha permitido conocer, mi madre Benedicta Cortes Granillo; Ángel extraordinario que me dio la vida. Mi mejor ejemplo de lucha constante. Mamita te dedico este logro ya que sin tu apoyo insustituible este momento no hubiera llegado jamás; mil gracias por haber decidido abandonar tu estilo de vida para que yo tuviera la confianza de que mi bebé no puede estar en mejores manos. Te quiero mamá. ¡Infinítamente, que Dios te Bendiga!

A la más grande razón de mi existencia: mi pequeño Víctor Guillermo. Hijo, Dios me bendijo desde el primer día de tu presencia y me dio la oportunidad de esculpir tu nombre en el último escrito de mi preparación profesional. Dedico a ti este éxito por alegrar cada instante de mi vida con el dulce timbre de tu voz y por iluminarme con la paz de tu sonrisa. Por ti la búsqueda constante de un mejor mañana. Te amo mucho gran milagro de mi vida.

A Mayra Azucena; porque a pesar de las adversidades, siempre tienes la fuerza para salir adelante. Hermana he alcanzado la meta y contar contigo ha sido fundamental. Né, Bruy y Mary no duden que siguen siendo la luz que ilumina nuestro hogar. Les agradezco cuidar de mi hijo, sobretodo en mis ausencias por el desarrollo de este trabajo.

A mi hermano Alejandro; quien día a día busca su superación personal, felicidad y progreso. La distancia no impide que lleguen hasta mí tus vibras y buenos deseos. Gracias por compartir este momento de alegría en la familia. A Jesús, Christian y Diana; chiquillos que mantienen encendida la luz de tu esperanza.

A mi hermana Dulce Leticia; por ser cómplice y confidente. Voy gracias a Dios por poner en mi camino a una hermana que trae integrada a una amiga en su corazón. A Luis por formar parte de la familia, A Eldy, Fer y Kenneth; queridos niños que reflejan amor e inocencia y comparten su tiempo con mi hijo. Agradezco el detalle de organizar y regalarme la fiesta por la culminación de esta fase. ¡Que Dios les recompense!

A Willy; por ser el complemento del pilar estructural de mi mayor tesoro. Eres una persona maravillosa, agradezco tu apoyo y dedicación, recuerda que son inagotables pero es importante cultivarlos para obtener cosechas abundantes, Ahora y más que nunca, sigue como el gran genio que conocí, cumpliendo cada uno de nuestros deseos.

A María; la abuelita que a pesar de los regaños, damos gracias a Dios por tenerla entre nosotros. A Delfino; mi abuelito que hasta el último momento, mostró la lección más grata con su propio ejemplo de trabajo y honradez, transmisor de conocimiento cosechado de su experiencia.

A mi tío; porque a pesar de su ausencia, sigue presente en nuestros corazones, Gracias por la confianza que me profesaste. Seguiremos siendo cómplices aun cuando nuestros caminos por un momento han dejado de abrazarse.

A las familias Roldan; motivo de superación continua y por formar parte de esta meta.

A las familias Cortes; quiero expresarles un profundo agradecimiento y manifestar mi deseo de que este logro deje huella para que las generaciones jóvenes y pequeñas de la familia, busquen y superen a las actuales.

A mi padrino el Ing. Enrique Fernández y a su esposa Chelo; por ayudarme a tomar la primera decisión profesional de mi vida y ser los cimientos de la estructura académica que hasta hoy se ha construido, orgullosamente les digo que por el apoyo de ustedes y el de mi familia he alcanzado el grado académico que hoy ostento.

A Víctor Manuel y Juan Pablo; gracias por ser los mejores primos del mundo y más aun por confiar en mí. Los recuerdos de antaño cuando compartimos la niñez y la juventud con días de locura permanecen intactos con la esperanza de un encuentro no tan lejano. ¡Que Dios los Bendiga!

A Carlos Alberto Torres (Requiescat in pace); por ser un gran amigo y compañero durante nuestros estudios de licenciatura. Sin duda, la generación forestal de Chapingo 2005 aun sentimos tu ausencia, sobretodo las mujeres de nuestro equipo de trabajo que aun añoramos tus gestos de amabilidad y compañerismo. ¡Que Dios te Guarde!

Gracias por permitirme ser parte de sus vidas.

Hoy y más que nunca... Gracias por ser parte esencial en mi vida.

Con afecto y amor

María Angélica Roldan Cortés



Agradecimientos

A Dios; por darme la oportunidad de ser parte de este proyecto de la vida, por hacerme el camino fácil los primeros años lejos de mi familia y por salir triunfante ante las adversidades.

A punto de concluir esta maravillosa etapa de mi formación profesional, es momento de manifestar la mayor gratitud a las instancias y personas que participaron en el desarrollo y culminación de esta investigación, quiero reiterarles que sin ustedes, no hubiera sido posible.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT); por haberme otorgado el privilegio de pertenecer una vez más al grupo de los becarios y financiar la continuación de mis estudios de postgrado.

A todos los mexicanos; porque con el pago de sus impuestos hacen posible nuestra preparación profesional.

Al Colegio de Postgraduados campus Montecillo; por ser una institución de enseñanza e investigación agrícola de excelencia siempre en búsqueda de las mejores opciones para el agro mexicano, especialmente a su Postgrado Forestal; por darme un espacio para forjar y enriquecer mi formación profesional y alcanzar el grado académico que hoy ostento.

Muy sinceramente a la Universidad Autónoma Chapingo; por darme la oportunidad de volver a creer que los sueños se pueden alcanzar cuando uno de los soportes más fuertes de la estructura de mi vida se derrumbó y a la División de Ciencias Forestales; por existir y enseñarme a conocer y cuidar el ambiente, los bosques y todo el entorno natural.

A la empresa Forestaciones Operativas de México, especialmente a los Ing. Eric Gordillo Lopez, Juan Ramon Aguilar, Manuel Mapula Larreta y Jorge Barajas Peralta; por permitirme acceder a sus datos de inventario y por las facilidades otorgadas durante las visitas a sus plantaciones.

No tengo palabras para agradecer el apoyo brindado por mi consejero y director de tesis, el Dr. Héctor M. De los Santos Posadas. Gracias por aceptarme como alumna y dirigir este trabajo, por las acertadas sugerencias, aportaciones y correcciones que lo enriquecen, pero sobretodo por la extremada paciencia durante mi estancia como estudiante y por su preocupación para lograr este objetivo. Le expreso mi admiración por su talento profesional y reconocimiento nacional e internacional en la biometría forestal.

Al Dr. J. René Valdez Lazalde; por su excelencia para transmitir en el aula un poco de lo mucho que conoce en el ámbito forestal, pero muy encarecidamente por darse el tiempo necesario y dedicarlo a la exhaustiva revisión de este documento, sin duda sus sugerencias fueron pilar importante para concluirlo.

Al Dr. Hugo Ramírez Maldonado; por la revisión de este escrito, lo mejoró sustancialmente. Por tener palabras de aliento al final de este camino y por poseer el tacto para que un "no" suene amigable.

Al Dr. Alejandro Velázquez Martínez; por sus atinadas observaciones para enriquecer este trabajo y por brindar un gesto de amistad en todo momento.

Al Dr. Gregorio Angeles Pérez; por su gran disponibilidad para la realización de esta investigación y por sus valiosas aportaciones que ayudaron a estructurar y perfeccionar este documento.

Al Dr. Arnulfo Aldrete; por fungir como sinodal y por sus consejos tan acertados.

A todos los maestros involucrados a lo largo de mi trayectoria académica, especialmente a María de Los Angeles, Cristina y Arturo; quienes merecen mi admiración por haber logrado en mi el interés por el estudio. En el mismo sentido a Fidel Fernández; por ser mi gran amigo y el mejor ejemplo de lograr lo que se quiere. A Laura Muñoz; por depositar en mi su confianza y ofrecer apoyo en todos los

sentidos cuando todo parecía más oscuro en aquella triste etapa de mi vida. *A Víctor Hugo del Razo*; excelente muestra de amistad y calidad docente. *A Arnulfo Mejía*; por ayudarme a tomar la mejor decisión para el futuro de mi vida: aprovechar la gran oportunidad de continuar mis estudios en Chapingo. *A Humberto Ross*; por su talento para hacer excelentes y amenas las clases de la preparatoria. *Al maestro Javier Santillán*; por su gran apoyo, afecto y comprensión y por mostrar amistad en cada oportunidad que nos da la vida. *A la Dra. Amparo Bojia*; por creer en mí, por tener un consejo y orientación oportunos cuando requeri tomar decisiones. *Al Dr. David Cibrián y la M.C. Silvia García*; por tener siempre una palabra de ánimo y confianza. *A Roberto Campana y Paty Posco*; gracias por la confianza depositada en mí, por ser más que académicos, excelentes amigos con su toque de servicio insuperable. *Al Dr. Alberto Escalante, la M.C. Teresa Rodríguez y al Dr. Víctor Volk*; por contribuir en mi preparación profesional en el C.P.

Al M.C. Guillermo Carrillo E.; por la oportunidad para aprender un poco en el ramo forestal, además por su amistad y por enseñarme que los sueños no desaparecen mientras yo no los abandone.

A Elijio Martínez; agradezco el haberme compartido su álgebra de la vida: sumar amigos y restar tristezas, alcanzar la paz para dividirla y mantener la esperanza para multiplicarla por nuevos ideales.

Al Dr. Hubert Tchikoué; por su amistad y confianza en mi desempeño profesional.

Al personal administrativo del Programa Forestal, especialmente a *Maru y Lupita*; por sus atenciones amables. *A Rosario del área de Educación*; por su orientación en los trámites de graduación. *A Isa, Toño y Marce*; por las facilidades en la casa y por profesar amistad a cada instante.

A mis compañeros contemporáneos Lilia, Wenceslao, J. Carlos y Gerónimo; por permitirme compartir esta etapa de estudiantes y por aclararme algunas dudas propias de la ciencia que dominan.

A Andrés Pérez; por pertenecer a la familia y porque contar con *Mayra* y contigo es un honor sobretodo en la última fase de mis estudios doctorales, cuando una palabra de aliento siempre fue necesaria.

A Silvia G.; por mostrar que la distancia no impide mantener encendida la luz de la unidad familiar.

Al Sr. Rogelio Hernández; por sus muestras de afecto y amistad, por compartir conmigo la felicidad de la especialidad más maravillosa de la vida: la maternidad. Infinitamente agradezco su interés para lograr la preservación de las células madre, como el primero y el mejor regalo de vida para mi hijo.

Al Sr. Marcelino Chávez; por tener siempre un gesto amable e incondicional para mí y mi familia y por demostrar a cada instante que la ética siempre se hace acompañar de más y mejores oportunidades.

A la Sra. Socorro Santamaria y el Sr. Ramón; por su amistad y por compartir momentos inolvidables con su familia durante mis estudios. Aún con la distancia los recuerdo constantemente.

A Maira Cruz; a pesar de que nuestros caminos tomaron rumbos distintos, tengo certeza de seguir contando con su amistad incondicional. Agradezco haberme inducido por esta rama de la ciencia forestal.

Al Sr. Mario; por el genial regalo al terminar la primaria. *A Daniel y Santa*; por su apoyo en momentos difíciles de la familia.

A mi padrino Luis y Amanda; por acompañarme en este gran día que mis estudios culminan.

A todos aquellos que no menciono pero que me permitieron conocerles y ayudaron a llegar a la meta.

Con admiración y respeto ... *María Angélica Roldán Cortes*



INVENTARIO FORESTAL Y CRECIMIENTO MADERABLE DE *Eucalyptus urophylla* EN LA EMPRESA FORESTACIONES OPERATIVAS DE MÉXICO.

María Angélica Roldán Cortés, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2013.

RESUMEN

Eucalyptus urophylla es la especie con mayor superficie plantada por Forestaciones Operativas de México, S. A. de C. V. (FOMEX) en el sureste mexicano y a pesar de contar con una gran cantidad de información dasométrica, aún se carece de las técnicas y modelos biométricos adecuados que permitan optimizar el manejo de estas plantaciones. Para subsanar esa deficiencia, en esta investigación se planteó determinar un esquema óptimo de muestreo para el inventario forestal tomando en cuenta el error máximo permisible fijado por la empresa y que permita reducir los costos en tiempo que implica el levantamiento de la información en campo. Complementario a este estudio se generó un sistema de crecimiento y rendimiento maderable (SCRM) de tipo explícito e implícito para describir adecuadamente las existencias volumétricas totales y por clase de diámetro y tipo de producto (celulosa, astilla, aserrío).

Los resultados sugieren que el mejor estimador para evaluar el inventario es uno de proporciones (razón) entre volumen total y edad, seguido del estimador de razón de volumen total y área basal con estratificación a nivel de predios. En el SCRM el índice de sitio se describe mejor con las familias anamórficas de los modelos de Schumacher-Korf y Hossfeld IV. El SCRM explícito estima que el turno técnico en volumen total sucede a la edad de 5 años. El sistema de predicción implícita indica que la venta de madera con clasificación de productos de volumen comercial prácticamente cuadruplica los ingresos brutos no descontados respecto al valor del volumen total para astillas o celulosa a la edad de 18 años. Tanto el SCRM explícito como el implícito son 100%

compatibles con el inventario y adecuados para clasificación de tierras y actualizaciones de inventario, permitiendo a los administradores y dueños de las plantaciones una toma mejor informada de decisiones en cuanto al manejo y valoración de las mismas.

Palabras clave: inventario óptimo, crecimiento y rendimiento, Weibull, Percentiles, distribución diamétrica, volumen comercial.

**FOREST INVENTORY AND TIMBER GROWTH OF *Eucalyptus urophylla* IN
FORESTACIONES OPERATIVAS DE MÉXICO COMPANY.**

María Angélica Roldán Cortés, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2013.

ABSTRACT

Eucalyptus urophylla S. T. Blake covers an important land acreage of the total area of Forestaciones Operativas de México, S. A. de C. V. (FOMEX) in southeast Mexico. Despite the rich dasometric data collected by the company they lack reliable techniques and biometric models to optimize plantations' management. This research focused to determine an optimal forest inventory sampling scheme that considers the maximum allowable sampling error established by FOMEX while reducing time and costs. Complementary to the inventory an explicit and implicit growth and yield prediction system (GYPS) was developed to adequately describe total volume growth and volume by diameter class and product type (pulpwood, chip and wood, and sawmill). The best evaluated sampling estimator was the volume/age ratio estimator stratified by age. The second in precision was the volume/basal area ratio estimator stratified by stand (owner-wise stratification). For the GYPS the site index is adequately described with the anamorphic models of Schumacher-Korf and Hossfeld IV and a 5-year rotation based on total volume growth was estimated. The implicit prediction system indicates that total timber value after product classification is four times larger than the non-discounted net income of woodchip and pulpwood at age 10. Both explicit and implicit system are 100% compatible with inventory data and can be used to update it and to land ranking, allowing managers and plantation owners to take informed decisions regarding management and assessment.

Key words: optimal inventory, growth and yield, Weibull, Percentile, diameter distribution, commercial volume.

CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	iii
CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	2
1.2.1. Localización geográfica.....	2
1.2.2. Clima y precipitación	2
1.2.3. Geología.....	2
1.3. FORESTACIONES OPERATIVAS DE MÉXICO	3
1.3.1. Especies empleadas	3
1.3.1.1. <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake	3
1.3.2. Preparación del terreno y plantación	5
1.4. HERRAMIENTAS GENERADAS	5
1.4.1. Estrategia óptima de inventario forestal.....	6
1.4.2. Sistema de Crecimiento y Rendimiento Maderable (SCRM).....	6
1.4.3. Sistema de distribución diamétrica para estimar crecimiento y rendimiento.....	7
1.5. OBJETIVOS	8
1.5.1. Objetivo general	8
1.5.2. Objetivos específicos	8
1.6. LITERATURA CITADA	9
CAPÍTULO II	12
2. ESTIMADORES DE MUESTREO PARA INVENTARIO DE PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES DE EUCALIPTO EN EL SURESTE MEXICANO .	12
2.1. RESUMEN	12
2.2. ABSTRACT	13
2.3. INTRODUCCIÓN	14
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS	15
2.4.1. Área de estudio	15

2.4.2.	Datos dasométricos.....	16
2.4.3.	Estimadores muestrales.....	16
2.4.3.1.	Muestreo Simple Aleatorio (MSA).....	17
2.4.3.2.	Muestreo Estratificado.....	18
2.4.3.3.	Estimadores de Razón (Proporción) y Regresión.....	20
2.4.3.4.	Estimadores de razón bajo estratificación.....	23
2.4.4.	Criterios de evaluación.....	25
2.5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
2.5.1.	Volumen total y las variables auxiliares.....	25
2.5.2.	Resultados obtenidos por estimador muestral	26
2.5.2.1.	Inventario 2008	28
2.5.2.2.	Inventario 2009	29
2.6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31
2.7.	LITERATURA CITADA.....	32
CAPÍTULO III.....	37	
3.	SISTEMA DE CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO MADERABLE PARA PLANTACIONES DE <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake: AJUSTE CON DATOS DE INVENTARIOS OPERATIVOS.....	37
3.1.	RESUMEN.....	37
3.2.	ABSTRACT	38
3.3.	INTRODUCCIÓN.....	39
3.4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
3.4.1.	Área de estudio.....	40
3.4.2.	Datos dasométricos.....	40
3.4.3.	Cubicación de árboles en pie.....	41
3.4.4.	Altura dominante.....	41
3.4.5.	Crecimiento en área basal.....	44
3.4.6.	Supervivencia residual.....	46
3.4.7.	Volumen total con corteza.....	46
3.4.8.	Ajuste del SCRM.....	48
3.5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
3.5.1.	Modelos de altura dominante.....	48
3.5.2.	Ajuste simultaneo.....	51
3.5.3.	Predicción de supervivencia, área basal y volumen total.....	51
3.5.4.	Simulación de escenarios, rendimiento medio y turno técnico.....	52
3.5.5.	Supervivencia inicial y rendimiento maderable.....	55

3.6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
3.7. LITERATURA CITADA	61
CAPÍTULO IV	66
4. DISTRIBUCIONES DIAMÉTRICAS PARA ESTIMAR CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO MADERABLE DE <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake USANDO DATOS DE INVENTARIOS OPERATIVOS.....	66
4.1. RESUMEN.....	66
4.2. ABSTRACT	67
4.3. INTRODUCCIÓN.....	68
4.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	70
4.4.1. Área de estudio	70
4.4.2. Datos dasométricos.....	70
4.4.3. Modelo explícito	71
4.4.4. Modelo de volumen comercial variable para distribución de productos...	72
4.4.5. Distribución diamétrica basada en la fdp Weibull	73
4.4.6. Distribución diamétrica basada en percentiles.....	75
4.4.7. Modelo de volumen comercial sin distribuciones diamétricas.....	77
4.4.8. Prueba de bondad de ajuste de la fdp Weibull.....	78
4.4.9. Ajuste de los sistemas de predicción.....	79
4.4.10. Evaluación de sistemas.....	79
4.4.11. Comparación de la distribución de productos	79
4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	80
4.5.1. Sistema de predicción implícita basado en la fdp Weibull.....	80
4.5.2. Sistema de predicción implícita basada en percentiles	83
4.5.3. Volumen comercial vía modelo de razones de volumen	86
4.5.4. Evaluación de sistemas	87
4.5.5. Comparación de la distribución de productos	88
4.6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
4.7. LITERATURA CITADA	93
CAPÍTULO V	98
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES	98
5.1. INVENTARIO FORESTAL.....	98
5.2. SISTEMA DE CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO MADERABLE	99
5.3. DISTRIBUCIÓN DIAMÉTRICA PARA ESTIMAR CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO	100

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Estimadores del Muestreo Simple Aleatorio.....	17
Cuadro 2.2. Estimadores del Muestreo Estratificado.	19
Cuadro 2.3. Estimadores de Razón (proporción) y Regresión.....	22
Cuadro 2.4. Estimadores de Razón Estratificada.	24
Cuadro 2.5. Estimadores calculados para las mediciones del año 2008.	26
Cuadro 2.6. Estimadores calculados para las mediciones del año 2009.	27
Cuadro 3.1. Ajuste de los modelos promedio y valor de los parámetros para evaluar el crecimiento en altura dominante de <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake.	48
Cuadro 3.2. Sesgo promedio, factor de ajuste y calificación para proyecciones y retracciones de los 36 sitios de validación para altura dominante.....	50
Cuadro 3.3. Bondad de ajuste y parámetros estimados para los componentes del SCRM propuesto.	51
Cuadro 3.4. Evaluación de sesgo medio (B_{PROM}) y factor de ajuste (FA) para los modelos de proyección propuestos para área basal (17), supervivencia residual (19) y volumen total (23).	52
Cuadro 3.5. Predicción del crecimiento y rendimiento para tres índices de sitio a partir de un año de establecida la plantación y con una densidad inicial de 851 árboles por hectárea.....	52
Cuadro 4.1. Criterios de ajuste y parámetros estimados de las ecuaciones que predicen los percentiles de la fdp de Weibull en las plantaciones de eucalipto.	80
Cuadro 4.2. Sitios rechazados por la falta de ajuste de su distribución diamétrica a la función Weibull para tres niveles de significancia (Prueba de K-S).....	81
Cuadro 4.3. Estadísticas de ajuste y parámetros estimados de las ecuaciones que conforman el sistema de predicción implícita basada en percentiles.	84
Cuadro 4.4. Parámetros estimados y estadísticas de ajuste del modelo de volumen comercial propuesto por Amateis <i>et al.</i> (1986)	86
Cuadro 4.5. Comparación de medias de volumen para los métodos evaluados.	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Relación de volumen-área basal (a) y volumen-edad (b) por sitio de las mediciones del 2008.....	25
Figura 2.2.	Relación de volumen-área basal (a) y volumen-edad (b) por sitio de las mediciones del 2009.....	26
Figura 2.3.	Tamaños de muestra para los métodos de muestreo con mejor precisión en 2008 (a) y 2009 (b).	30
Figura 3.1.	Altura dominante medida en campo y curvas promedio de crecimiento en altura dominante para <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake para los modelos ajustados.	49
Figura 3.2.	Familias anamórficas de Hossfeld IV para <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake de IS-16, 23, 30, 37 y 44 m y edad base = 14 años.	50
Figura 3.3.	Curvas de desarrollo de área basal de las plantaciones de <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake para diferentes índices de sitio.....	54
Figura 3.4.	Curvas de rendimiento en volumen para los IS definidos en las plantaciones de <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake.	54
Figura 3.5.	Incremento Medio Anual y Corriente Anual, por IS, para las plantaciones de <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake.	55
Figura 3.6.	Escenarios de mortalidad para una densidad inicial de 1200 árboles por hectárea y cuatro curvas de supervivencia al año 1: 100%, 80%, 60% y 40%.	56
Figura 3.7.	Variación en rendimiento total por hectárea estimado con base a supervivencias al año 1 de 90% (1080 árboles), 75% (900 árboles) y 50% (600) de un total de 1200 plantados.....	57
Figura 4.1.	Proporción de árboles por hectárea por categoría diamétrica basada en fdp Weibull.	82
Figura 4.2.	Rendimiento en volumen maderable para las categorías diamétricas establecidas basado en la fdp Weibull.	83
Figura 4.3.	Proporción de árboles por hectárea por categoría diamétrica basada en percentiles.	85
Figura 4.4.	Rendimiento en volumen maderable para las categorías diamétricas establecidas basado en la predicción de percentiles.....	85

Figura 4.5. Volumen comercial por hectárea de razón de volumen por tipo de producto.	86
Figura 4.6. Volumen total estimado por predicción implícita y por predicción explícita.	87
Figura 4.7. Distribución de productos vía modelo de razones: a) Volumen comercial total para los tres índices de sitio. b) Volumen de aserrío para los tres índices de sitio. c) Volumen de astilla para los tres índices de sitio. d) Volumen de celulosa para los tres índices de sitio.	89
Figura 4.8. Distribución de productos por métodos implícitos y explícitos: a) Volumen comercial total para los tres métodos. b) Volumen de aserrío para los tres métodos. c) Volumen de astilla para los tres métodos. d) Volumen de celulosa para los tres métodos.	90
Figura 4.9. Diferenciación de ingreso por tipo de producto de madera cosechado. a) periodo de 1 a 7 años. b) periodo de 7 a 18 años.	92
Figura 4.10. Variación del ingreso con y sin distribución de producto de madera. a) periodo de 1 a 7 años. b) periodo de 7 a 18 años.	92

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. GENERALIDADES

La reducción en el área de bosque designada para funciones productivas refleja la cada vez mayor dependencia de los bosques plantados y de bosques naturales con una ordenación más intensiva para la producción de madera tanto para uso industrial como energético (FRA, 2010). Actualmente, se estima que la participación de la producción industrial de bienes derivados de la madera es del orden del 2% del producto mundial bruto (1.43 billones de dólares) y México contribuye con poco menos de 1% de la producción mundial (SEMARNAT, 2005). Es claro que la producción de madera con fines industriales está trasladándose de los bosques naturales a los plantados y esto puede representar una alternativa para conservar los recursos forestales naturales ya que la mayoría de las plantaciones forestales en el mundo se realizan en terrenos cuyo uso previo era agrícola o ganadero (FRA, 2010).

En México para satisfacer la creciente demanda de madera se creó en 1997 el programa para el desarrollo de plantaciones forestales comerciales (PRODEPLAN) que para el 2004 había orientado un tercio de los apoyos otorgados al cultivo de árboles para celulosa y papel con *Eucalyptus* spp. como principal especie. Las plantaciones forestales como proyectos de largo aliento requieren de procesos claros y consistentes de seguimiento y evaluación para su adecuada administración. Entre estas herramientas de planeación se distinguen los inventarios forestales que permite recabar información precisa de la cantidad de volumen (biomasa) en pie a través de su identificación y caracterización.

Dicha herramienta proporciona información dasométrica que requiere de actualizaciones constantes y para ello se complementa con los sistemas de

crecimiento y rendimiento maderable. La combinación de ambas herramientas permite realizar proyecciones certeras para planificar las actividades silvícolas y orientar la toma de decisiones, entre ellas las de tipo financiero y contable.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.2.1. Localización geográfica

Forestaciones Operativas de México S.A. de C.V. (FOMEX) tiene la mayoría de sus plantaciones de rápido crecimiento en los municipios de Agua Dulce y Las Choapas, Veracruz cuyas coordenadas geográficas son 17°55' de Latitud Norte y 94°06' de Longitud Oeste y otra proporción en la región de Huimanguillo, Tabasco a los 17°19' de Latitud Norte y 93°23' de longitud Oeste.

1.2.2. Clima y precipitación

El clima para la zona de Veracruz es cálido, con temperatura media anual de 27.0°C, con abundantes lluvias en verano y principios de otoño. La precipitación media anual es de 2,900.0 mm. Huimanguillo presenta dos tipos de clima; cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Am), que es el clima dominante en Tabasco, con una temperatura media anual de 26.2°C. Este tipo de clima se presenta en las zonas bajas y planas del municipio, en las zonas que presentan un relieve montañoso, se aprecia el clima cálido húmedo con lluvias todo el año (Af), que es el clima que presentan las selvas altas de Chiapas, Veracruz y la sierra tabasqueña; cuya temperatura media varía entre 25.4°C y 26.9°C. La precipitación media anual es de 2,290.3 mm.

1.2.3. Geología

Los municipios de Veracruz se encuentran ubicados en la zona limítrofe del sureste del estado, su topografía es irregular debido a la Sierra Madre Oriental, destacando los cerros Colorado, Brujo, Jimbal, Flores, Guao, Pelón, Mancuernillas y otros. El municipio de Huimanguillo presenta en la parte occidental suelos de zonas costeras, en la parte meridional relieve montañoso y

el resto es planicie; se encuentran los cerros mono pelado, la pava, la ventana, la copa y las flores.

1.3. FORESTACIONES OPERATIVAS DE MÉXICO

Se inició en el negocio de las plantaciones en 1994. Entre los objetivos de la empresa se busca el producir materias primas para la industria forestal de alta calidad a precios competitivos, sin dejar de lado la protección al ambiente y las relaciones sociales en las áreas circunvecinas.

FOMEX establece las primeras plantaciones comerciales del sureste mexicano con varias especies de eucalipto propagadas por semilla de diferentes procedencias en terrenos de baja productividad agrícola o dedicados a la ganadería. A la fecha se ha implementado el uso de la clonación con éxito a partir de material adaptado a la región, pero sin abandonar fuentes todavía mezcladas con semillas importadas bajo las normas internacionales de inspección y certificación.

1.3.1. Especies empleadas

Las plantaciones de eucalipto de FOMEX se han realizado con las siguientes especies: *Eucalyptus urophylla*, *E. grandis*, *E. urograndis*, *E. tereticornis*, *E. saligna* y *Gmelina arborea*. Más de la mitad de su superficie plantada es de *E. urophylla* S. T. Blake en el sureste mexicano proviene de semilla.

1.3.1.1. *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake

Muchas de las plantaciones forestales comerciales utilizan especies forestales de rápido crecimiento, orientadas a la producción de materias primas para la industria de la pulpa, el papel y la astilla. Especies del género *Eucalyptus* se incluyen en dicha clasificación, y permiten satisfacer la demanda de madera en las partes más cálidas del mundo, donde se cultivan para la obtención de leña y postes y en extensas plantaciones para celulosa y papel, principalmente,

donde la madera y otros productos forestales son escasos (Eldridge *et al.*, 1994; Fuentes, 2009). El área global total de plantaciones de eucalipto en el 2000 fue de casi 13 millones de ha, principalmente localizadas en China, India, Sudáfrica y sureste de Asia (FAO, 2000). Las plantaciones más grandes de *E. urophylla* se encuentran en Brasil y en años recientes, esta especie ha cobrado popularidad en regiones con clima tropical húmedo y subhúmedo de países como Indonesia y sur de China.

México actualmente tiene una superficie plantada de eucalipto de más de 20 mil hectáreas y promete aumentar con el paso de los años (Reyes, 2006), tan sólo FOMEX posee casi el 30% de dicha superficie. Tal especie pertenece a la Familia Myrtaceae y la Subfamilia Myrtoideae. Se distribuye naturalmente en suelos derivados del vulcanismo entre los 122°-127° de longitud y los 7°30´-10° de latitud. Inicialmente fue introducida en Java en 1890 y en Brasil en 1919 y no fue sino hasta 1966 cuando se introdujo en Australia, siendo el parteaguas para su distribución a otros países, entre éstos destaca Camerún, China, Congo, Francia, Gabón, Costa de Marfil, Madagascar, Malasia y Papúa Nueva Guinea, entre otros. Del género *Eucalyptus* esta especie es la que mayor rango altitudinal tiene, abarcando desde los 70 hasta los 2960 msnm, aunque presenta mejor desarrollo en zonas climáticas húmedas y subhúmedas y altitudes máximas de 400 m donde la temperatura máxima promedio es de 30°C en el mes más caliente y de 12°C del mes más frío y la precipitación media anual es de 1500 a 2000 mm. Se considera una especie muy apta para establecerse en sitios pobres. Puede alcanzar alturas hasta de 55 m en ambientes favorables o buena calidad de sitio (Sein y Mitlöhner, 2011).

Dentro de las múltiples características y propiedades de la especie, resalta la presencia del eucaliptol como principal componente del aceite de eucalipto, y por su olor alcanforado, es de utilidad en la formulación de ciertos medicamentos, la madera es adecuada para obtener pasta química blanqueada con un rendimiento promedio de 49.5% de celulosa. Una densidad promedio de

500 a 550 kg/m³ se considera conveniente en plantaciones para pulpa. Los principales usos de *E. urophylla* es que la madera se emplea para producción de pulpa, leña y carbón, así como tableros, postes para las líneas de transmisión eléctrica, ebanistería, carpintería, contrachapados y aglomerados. La corteza contiene aproximadamente 10% de taninos y en las hojas tiene un aceite ampliamente usado en la industria de la perfumería (Sein y Mitlöhner, 2011).

1.3.2. Preparación del terreno y plantación

Previo al establecimiento de la plantación, se realiza la preparación del terreno para limpia y desinfección del suelo. La densidad normalmente usada es de 1,100 árboles por hectárea con espaciamientos de 3.0 × 3.0 m. La sobrevivencia esperada al mes de establecida es de al menos 85%, si es menor se lleva a cabo el primer replante de recuperación y las prácticas culturales como deshierbes así como la primera fertilización. Dichas actividades se realizan periódicamente hasta que la vegetación de interés ya no pueda ser rebasada por la vegetación invasora. La cosecha se ha realizado generalmente a los siete años mediante matarrasa y el material cosechado se destina a la obtención de celulosa para satisfacer la demanda de Rexcel tableros y aglomerados de Zitácuaro, Michoacán y el remanente se vende a terceros.

1.4. HERRAMIENTAS GENERADAS

A pesar de su experiencia en el establecimiento de plantaciones forestales se detectó que algunas de las prácticas de gestión en FOMEX requerían adecuaciones para hacer más expedita y confiable su administración. Tradicionalmente los inventarios maderables para la empresa se levantan de manera anual y podían cubrir desde el 30% hasta el 90% de su superficie total, consumiendo una cantidad de tiempo considerable. Tampoco se contaba con herramientas analíticas que permitieran hacer proyecciones confiables a partir del estado inicial del inventario y se carecía de un sistema de clasificación de

tierras mucho más objetivo que el actualmente utilizado que se basa en estimaciones del incremento corriente y medio en volumen. No se tenía tampoco una forma de estimar la distribución potencial de productos por ha para aprovechar las ventajas del mercado abierto regional. Ante estas inquietudes por parte de la empresa se decidió abordar de manera puntual en esta investigación los siguientes tópicos:

1.4.1. Estrategia óptima de inventario forestal

La mayoría de los inventarios de recursos forestales en México recurren a herramientas de muestreo clásico basado en diseño (estimadores de muestreo simple al azar y muestreo estratificado) y estimadores basados en modelos (estimadores de regresión y proporción) que dependiendo del tipo de datos tomados en campo, permiten obtener diferentes niveles de precisión (Ruiz, 1982; Schreuder *et al.*, 1992). En este contexto, el manejo de las plantaciones forestales comerciales de FOMEX requiere de información que permita una adecuada planificación a mediano y largo plazo con un buen balance entre costo, confiabilidad estadística y precisión deseada, por lo que hace algunos años FOMEX se interesó por mejorar sus esquemas de inventario, desde la toma de datos hasta las estrategias de análisis de los mismos, situación que busca resolverse en la presente investigación a partir de la evaluación de estimadores de muestreo clásico.

1.4.2. Sistema de Crecimiento y Rendimiento Maderable (SCRM)

Es ideal que las masas forestales cuenten con modelos o expresiones matemáticas que describan su dinámica de crecimiento lo más cercano a lo que en la realidad sucede. Los SCRM surgen como una respuesta a una necesidad explícita del manejo forestal ya que solo a partir de estimaciones confiables del rendimiento a nivel de rodal o masa forestal es posible determinar estrategias de manejo de tipo silvícola y financiero (Clutter *et al.*, 1983; De la Fuente, 1998; Torres y Magaña, 2001).

En este trabajo y mediante el uso de información provista por FOMEX de sus inventarios forestales operativos, se generó un SCRM que tiene la capacidad de proporcionar proyecciones del rendimiento maderable y permite hacer simulaciones que ayudarán a definir los regímenes y prácticas silvícolas. El SCRM esta compuesto por modelos para estimar el crecimiento en altura dominante que permiten determinar la calidad del sitio forestal; cuenta con componentes para modelar los cambios probables en densidad (área basal y mortalidad) y permite obtener las estimaciones de volumen total por unidad (Cruz, 2007; Clutter *et al.*, 1983; Santiago, 2009).

1.4.3. Sistema de distribución diamétrica para estimar crecimiento y rendimiento

La simulación de la distribución diamétrica es la base para la predicción del volumen por distribución de productos de manera dinámica (Mateus y Tomé, 2011). La predicción del rendimiento de logra de manera “implícita” ya que estos modelos estiman el número de árboles por categoría de diámetro por unidad de área. Para determinar el rendimiento en dicha unidad, se hace uso de un modelo para estimar volumen de árbol individual y la sumatoria define las existencias maderables (Clutter *et al.*, 1983; Acosta *et al.*, 1997).

En la presente investigación se hizo uso del modelo de volumen comercial variable, desarrollado específicamente para las plantaciones forestales comerciales de eucalipto de propiedad de FOMEX por Méndez (2007), mismo que permite realizar la distribución de productos por árbol definidos por la empresa (celulosa, astilla y aserrío). Las ecuaciones que generan la predicción del número de árboles por clase y altura promedio del conjunto de árboles que la conforman, normalmente requiere datos de edad de rodal, índice de sitio (o altura dominante) y número total de árboles sobrevivientes. Con esta estrategia se obtiene información más detallada de la estructura de rodal a diferencia de la predicción explícita.

Complementando este enfoque se hace uso del modelo propuesto por Amateis *et al.* (1986) para estimar el volumen comercial sin distribuciones diamétricas que, sin embargo, requiere de atributos de rodal tales como edad, índice de sitio, área basal y número de árboles sobrevivientes por unidad de área. Esto para comparar las estimaciones proporcionadas por los métodos implícitos y las obtenidas por la proporción de volumen de este método.

1.5. OBJETIVOS

Considerando que *E. urophylla* es la especie con mayor superficie plantada en los predios de FOMEX ubicados en el sureste del país, se plantearon los siguientes objetivos:

1.5.1. Objetivo general

Generar herramientas de gestión de recursos maderables útiles para FOMEX con el fin de optimizar sus recursos financieros.

1.5.2. Objetivos específicos

- Definir un esquema de muestreo óptimo que permita estimar el inventario maderable de las plantaciones forestales comerciales de manera confiable y precisa, mismo que garantice la reducción de los costos por efectos de levantamiento de información de campo y que a su vez, permita la actualización de los mismos.
- Generar un Sistema de Crecimiento Rendimiento Maderable (SCRM) compatible con los datos de inventario y que permita la actualización del mismo.
- Determinar el crecimiento y rendimiento maderable en función de categorías diamétricas con base a los datos recabados en los inventarios operativos, así como las existencias volumétricas por cada tipo de producto clasificados por la misma empresa.

1.6. LITERATURA CITADA

- Acosta, M. M., J. M. Torres R. y C. Rodríguez F. 1997. Predicción del rendimiento en *Pinus montezumae* Lamb. usando modelos de distribuciones diamétricas. Rev. Ciencia Forestal en México. 22 (81): 71-89.
- Amateis, R. L., H. E. Burkhart and T. E. Burk. 1986. A ratio approach to predicting merchantable yields of unthinned loblolly pine plantations. Forest Science. 32(2): 287-296.
- Borders, B. E., R. A. Souter, R. L. Bailey and K. D. Ware. 1987. Percentile-based distributions characterize forest stand tables. Forest Science 33: 570-576.
- Carrillo, E. G. 2008. Casos prácticos para muestreos e inventarios forestales. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. México. 172 p.
- Clutter, J. L., J.C. Forston, L. V. Pienaar, G. H. Brister and R.L. Bailey. 1983. Timber management: a quantitative approach. John Wiley & Sons, Inc. New York. 333 p.
- 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. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 78 p.
- De la Fuente, E. A., A. Velázquez 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. Ciencia Forestal en México. 23 (84): 3-8.
- DOF, 2005. Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Cámara de Diputados del H. Congreso de La Unión. Secretaría de Servicios Parlamentarios. Dirección General de Bibliotecas. México. 44 p.
- Eldridge, K., J. Davidson, C. Harwood and G. van Wyk. 1994. Eucalypt domestication and breeding. Oxford University Press. Oxford, United Kingdom. 301 p.

- FAO, 2000. Global forest resource assessment 2000. FAO Forestry Paper No. 140. Food and Agriculture Organization, Rome. (www.fao.org).
- FRA, 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe principal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 381 p.
- Frayer, W. E. and G. M. Furnival. 1998. History of forest survey sampling designs in the United States. Forest Service. Boise, Idaho. United States of America. 8 p.
- Fuentes, A. S. L. 2009. Calidad germinativa de semilla de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake de árboles selectos en plantaciones comerciales. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México. 58 p.
- Mabvurira, D., M. Maltamo and A. Kangas. 2002. Predicting and calibrating diameter distributions of *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden plantations in Zimbabwe. *New Forests*. 23 (3): 207-223.
- McTague, John_P. and R. Bailey L. 1987. Compatible basal area and diameter distribution models for thinned loblolly pine plantations in Santa Catarina, Brasil. *Forest Science*. 33 (1): 43-51.
- Mateus, A. and M. Tomé. 2011. Modelling the diameter distribution of eucalyptus plantations with Johnson's SB probability density function: parameters recovery from a compatible system of equations to predict stand variables. *Annals of Forest Science*. 68: 325-335.
- Méndez, L. B. 2007. Sistema de cubicación en pie para árboles provenientes de semillas y clones de eucalipto en FOMEX. Tesis de Licenciatura Inédita. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- 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.

- Santiago, G. W. 2009. Sistema de crecimiento y rendimiento para *Pinus patula* de Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 89 p.
- Sein, C. C. and R. Mitlöhner. 2011. *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. Ecology and silviculture in Vietnam. Center for International Forestry Research. CIFOR. Indonesia. 26 p.
- SEMARNAT, 2001. Inventarios forestales de México. Dirección General de Federalización y Descentralización de Servicios Forestales y de Suelos.
http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/compendio_2000/03dim_ambiental/03_05_Forestales/data_forestales/RecuadroIII.5.1.1.htm
- SEMARNAT, 2005. Informe de la situación del medio ambiente en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. www.semarnat.gob.mx (Abril 2013).
- Schreuder, H. T., J. C. Rennie and 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.
- 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.
- Torres, R. J. M. y O. S. Magaña T. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Editorial Limusa. México. 472 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.

CAPÍTULO II

2. ESTIMADORES DE MUESTREO PARA INVENTARIO DE PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES DE EUCALIPTO EN EL SURESTE MEXICANO

2.1. RESUMEN

En un inventario forestal se busca el balance entre el costo mínimo de implementación y la confiabilidad y precisión estadística máximas. Este balance es crítico particularmente en inventarios de plantaciones forestales de superficies grandes. Este estudio toma como base datos de inventarios operativos para evaluar diversos estimadores de muestreo clásico en plantaciones forestales comerciales de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* S. T. Blake) buscando determinar un esquema óptimo que tome en cuenta el error de muestreo máximo permisible y al mismo tiempo permita reducir costos. Los resultados sugieren que el estimador mejor evaluado para esta población fue un estimador de proporciones (razón) volumen total y edad, estratificado a nivel de clases de edad. En segundo lugar en precisión se encuentra el estimador de razón de volumen total y del área basal con estratificación a nivel de predios. Para el primer caso, en un umbral de 5% de error de muestreo, es posible reducir el tamaño de muestra en 84.7%; en el segundo caso la reducción puede ser de 89.9%.

Palabras clave: *Eucalyptus urophylla*, inventario forestal, método de muestreo, plantación forestal, razón estratificada.

SAMPLING ESTIMATORS TO EUCALYPTUS INVENTORY COMMERCIAL FOREST PLANTATIONS IN MEXICO SOUTHEAST

2.2. ABSTRACT

In a forest inventory the balance between minimum implementation cost and maximum reliability and statistical precision is always the goal. This balance is particularly critical in forest plantations where large areas are usually inventoried. This study takes operational inventory data to evaluate various classic sampling estimators in a commercial Eucalyptus plantation (*Eucalyptus urophylla* S. T. Blake) in order to determinate an optimal scheme that considers maximum allowable sampling error and also reduce costs. The results suggest that the best evaluated method was the total volume/age ratio estimator stratified with age classes. The second in precision is the volume/basal area ratio estimator stratified by stand (owner-wise stratification). For the first case and with a 5% sampling error threshold, it is possible to reduce the sample size in 84.7% and 89.9% for the given ratio estimators.

Key words: *Eucalyptus urophylla*, forest inventory, sampling method, forest plantation, stratified ratio estimators.

2.3. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los inventarios de recursos forestales recurren a herramientas de muestreo clásico basado en diseño (estimadores de muestreo simple al azar y muestreo estratificado) y estimadores basados en modelos (estimadores de regresión y proporción), que dependiendo del tipo de datos tomados en campo (sitios de dimensiones fijas o de dimensiones variables también conocido como muestreo de Bitterlich), permiten obtener diferentes niveles de precisión (Ruiz, 1982; Schreuder *et al.*, 1992). Estos estimadores se pueden combinar con información proveniente de sensores remotos para obtener estimaciones de la población de interés (Schreuder *et al.*, 2006; Köhl *et al.*, 2006; Aguirre *et al.*, 2009). Existen además las estimaciones basadas en técnicas no paramétricas como el re-muestreo (métodos Bootstrap y Jackknife) (Köhl *et al.*, 2006), las basadas en la teoría de juegos como son los estimadores Monte Carlo (Manly, 1997), las basadas en teoría geoestadística (Loukas *et al.*, 1998; Renard *et al.*, 2004) y también los métodos bayesianos (Manly, 1997; Köhl *et al.*, 2006); estas técnicas se cuentan entre los aportes más importantes de la teoría estadística a la estimación del inventario forestal.

Al realizar un inventario forestal a través del muestreo se buscan dos objetivos:

- 1) Obtener resultados confiables para la planeación de las actividades silvícolas.
- 2) Que los costos y tiempos de la toma de información sean reducidos.

Estos objetivos, en apariencia antagónicos, que se pueden atender empleando estimadores robustos e información del inventario (Schreuder *et al.*, 2006).

En 2007, Forestaciones Operativas de México, empresa que tiene las plantaciones de eucalipto más importantes de México, planteó como un tópico de interés la mejora en los protocolos del inventario, desde la toma de datos en campo hasta las estrategias de análisis de los mismos. Considerando que esta

empresa realiza cada año el inventario con base en un muestreo sistemático de una superficie total de aproximadamente 10,000 hectáreas, se propuso explorar metodologías basadas en muestreo clásico, es decir, métodos tradicionales y comúnmente utilizados, como es el caso del muestreo simple al azar, el estratificado y los estimadores de razón y regresión, que permitan la cuantificación de la madera de manera cercana al óptimo, reduciendo costos en mediciones y con una precisión que satisfaga las expectativas de la empresa. De tal manera que en este trabajo se probaron diversos estimadores de muestreo a fin de estimar el inventario de las plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, propiedad de FOMEX y mediante una comparación y análisis de los mismos, determinar cual o cuales permitían lograr lo anterior de manera coherente y a un costo menor al actual.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló con datos de las plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake propiedad de la empresa FOMEX, establecidas en los municipios de Agua Dulce y Las Choapas, en el estado de Veracruz (17°55' de Latitud Norte y 94°06' de Longitud Oeste) con clima cálido-regular y temperatura promedio de 27.0°C. Los ecosistemas que existen en el municipio son selva baja perennifolia y caducifolia (Méndez *et al.*, 2008). Otra parte de las plantaciones está en la región de Huimanguillo, Tabasco (17°19' de Latitud Norte y 93°23' de Longitud Oeste), donde el clima predominante es cálido-húmedo con abundantes lluvias en verano y temperatura media anual de 26.2°C teniendo máximas hasta de 45.0°C. En la zona existen áreas con vegetación diversa, pero se encuentran ecosistemas forestales de selva alta perennifolia (Méndez *et al.*, 2008; Velázquez *et al.*, 2009).

2.4.2. Datos dasométricos

Se establecieron de manera sistemática (que no es probabilístico pero permite una distribución uniforme de la muestra) y equidistante, sitios rectangulares de 20 m de ancho por 25 m de largo (500 m²) separados 200 metros. En cada sitio se contaron los árboles y se les midió el diámetro normal y la altura total, con forcípula o cinta y con clinómetro.

Se utilizaron dos bases de datos de mediciones realizadas en 2008 y 2009 en 144 predios con plantaciones de diferentes edades, para un total de 1,288 sitios. En la base para el inventario de 2008 se incluyeron 49 predios que acumulan 2,196 ha y edades de 1 a 14 años, con 351 sitios de muestreo. Respecto a la base del año 2009, se trabajó en 135 predios con una superficie de 4,784 ha y se muestrearon 937 sitios con edades que también oscilan entre 1 y 14 años. Para calcular la cantidad de madera de los sitios se utilizaron las ecuaciones de volumen locales propias de FOMEX.

2.4.3. Estimadores muestrales

Para determinar el inventario de las plantaciones de FOMEX, se utilizaron estimadores que parten del muestreo clásico, tales como el muestreo simple al azar, el estratificado, el de razón y regresión y el de razón bajo estratificación (Sukhatme, 1956; Sukhatme y Sukhatme, 1970; Villa, 1971), estos últimos en México han sido poco utilizados en inventarios forestales. Para evaluar la eficiencia de dichos estimadores se partió de dos medidas de muestreo, la primera, el error de muestreo (o precisión respecto a la media) y la segunda, el tamaño de muestra a diferentes niveles de error de muestreo, ambos a la confiabilidad estadística de referencia del 95%. Estas medidas sencillas permiten calificar que tan eficientemente se agrupa la varianza total bajo cierto estimador y diseño de muestreo. A partir de los resultados obtenidos se sugiere una estrategia de muestreo (estimadores muestrales) en campo que permitirá reducir el costo total del inventario.

2.4.3.1. Muestreo Simple Aleatorio (MSA)

El MSA 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 es igualmente probable de ser la muestra seleccionada (Kish, 1975; Cochran, 1977; Kish, 1995; Thompson, 2002). El valor de la i -ésima unidad muestral está definido por el volumen total de madera con corteza por sitio (m^3). En cada año de inventario se consideró una población distinta.

Las fórmulas descritas en el Cuadro 2.1 describen los estimadores del MSA (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):

Cuadro 2.1. Estimadores del Muestreo Simple Aleatorio.

Estimador		Ecuación
Media muestral	(1)	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$
Varianza de la variable en la muestra	(2)	$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}$
Varianza de la media	(3)	$S_{\bar{y}}^2 = \frac{S^2}{n} \left(\frac{N - n}{N} \right)$
Inventario o Población Total	(4)	$\hat{T} = N\bar{y}$
Estimación del tamaño de muestra	(5)	$n = \frac{t_{n-1, (\alpha/2)}^2 N S_y^2}{B^2 N + S_y^2 t_{n-1, (\alpha/2)}^2}$

Donde:

y_i = Volumen con corteza en m^3 en el i -ésimo sitio de muestreo.

N = Número total de unidades de muestreo en la población.

n = Número de unidades incluidas en la muestra.

B = Tamaño aceptable del error de estimación o de muestreo.

t = Distribución t de Student.

2.4.3.2. Muestreo Estratificado

En este enfoque, la población es dividida en sub-poblaciones no traslapadas llamadas estratos (Schumacher y Chapman, 1942; Särndal *et al.*, 1992; Kish, 1995; Johnson, 2000; Thompson, 2002). En cada estrato se selecciona una muestra (aleatoria o sistemática) de sitios de inventario, los cuales son independientes (Cochran, 1977). Con la estratificación se reduce la variación en el estrato (Cochran, 1977; Bell, 1998). Por lo tanto, el método requiere que los estratos sean lo más hete

rogéneo posible entre ellos pero lo más homogéneo posible dentro de cada uno. Este método busca, a partir de un mejor diseño del inventario que agrupa y pondera las varianzas, reducir la varianza de la media estimada a partir de la muestra (Sukhatme, 1956; Schumacher y Chapman, 1942; Villa y Caballero, 1976; Särndal *et al.*, 1992; Kish, 1995; Thompson, 2002).

Para los datos bajo estudio se decidió probar dos tipos de estratificación:

- a) Cada predio como estrato.
- b) Cada edad (clases de edad de 1 año) como estrato.

Ya que en la mayoría de los predios plantados se conoce la edad en meses. Aunque pueden sugerirse otras formas de estratificación, como tipo de suelo, material genético usado, densidad inicial utilizada, etc. Por el momento para la administración de las plantaciones estas dos formas se consideraron las más útiles.

Las fórmulas del Cuadro 2.2 se emplearon para obtener los estimadores donde los sitios en cada estrato se han recolectado de manera sistemática (Sukhatme, 1956; Freese, 1962; Cochran, 1977; Scheaffer *et al.*, 1987; Särndal *et al.*, 1992; Kish, 1995; Thompson, 2002):

Cuadro 2.2. Estimadores del Muestreo Estratificado.

Estimador		Ecuación
Unidades muestrales	(6)	$N = \sum_{h=1}^L N_h \quad ; \quad n = \sum_{h=1}^L n_h$
Estimadores muestrales		
Media muestral en el estrato h	(7)	$\bar{y}_h = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} \bar{y}_{h,i}$
Varianza muestral entre unidades muestrales del estrato h	(8)	$S_h^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} (y_{hi} - \bar{y}_h)^2}{n_h - 1}$
Varianza de la media muestral en el estrato h	(9)	$S_{\bar{y}_h}^2 = \frac{S_h^2}{n_h} \left(\frac{N_h - n_h}{N_h} \right)$
Total por estrato h	(10)	$\hat{T}_h = N_h \bar{y}_h$
Varianza del total por estrato	(11)	$S_{T_h}^2 = (N_h)^2 S_{\bar{y}_h}^2 = (N_h)^2 \frac{S_h^2}{n_h} \left(\frac{N_h - n_h}{N_h} \right)$
Estimadores poblacionales		
Media muestral de la población	(12)	$\bar{y}_E = \sum_{h=1}^L \frac{N_h}{N} \bar{y}_h = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L N_h \bar{y}_h$
Varianza de la media muestral de la población	(13)	$S_{\bar{y}_E}^2 = \sum_{h=1}^L \left(\frac{N_h}{N} \right)^2 S_{\bar{y}_h}^2$
Estimador del total de la población	(14)	$\hat{T}_E = N \bar{y}_E = N \left(\frac{1}{N} \sum_{h=1}^L N_h \bar{y}_h \right) = \sum_{h=1}^L \hat{T}_h$
Varianza del estimador total de la población	(15)	$S_{\hat{T}_E}^2 = N^2 S_{\bar{y}_E}^2 = \sum_{h=1}^L N_h^2 S_{\bar{y}_h}^2 = \sum_{h=1}^L S_{\hat{T}_h}^2$
Estimación del tamaño de muestra	(16)	$n = \frac{(\sum_{h=1}^L N_h S_h)^2}{N^2 \frac{B^2}{t^2} + \sum_{h=1}^L N_h S_h^2}$

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.

$y_{h,i}$ = 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.

El muestreo estratificado permite distribuir (asignar) la muestra a cada estrato de varias maneras, resultando tamaños diferentes de muestra según la magnitud o el tamaño del estrato, la variabilidad de los mismos y el costo por medirlos, por lo que se tienen diferentes errores de estimación (Johnson, 2000).

2.4.3.3. Estimadores de Razón (Proporción) y Regresión

El método de estimación de Proporción (Razón) usa información auxiliar y, bajo ciertas condiciones, proporciona estimaciones de mayor confiabilidad y precisión que los promedios simples. Es un método mejor para estimar la media poblacional si la relación entre la variable de interés (volumen por sitio) y una variable auxiliar dada (medida en el sitio) es lineal y pasa a través del origen, estando altamente correlacionadas. Estos estimadores son por definición sesgados, pero con varianzas pequeñas (precisos). Cuando las condiciones anteriores se cumplen hacen que el sesgo desaparezca o sea muy pequeño como para considerarse significativo. En muestras grandes, los estimadores de razón serán más eficientes que los obtenidos con muestreo basado en la media aritmética simple como en el MSA. Se requieren condiciones semejantes para el estimador de regresión pero en este caso no es necesario que la relación entre la variable principal y la variable auxiliar pase por el origen (Sukhatme, 1956; Scheaffer *et al.*, 1987; Thompson, 2002).

Para lograr que el muestreo sea eficiente en términos de costo, es deseable que la variable auxiliar además sea fácil de medir (Köhl *et al.*, 2006). El uso de estos estimadores no excluye extensiones lógicas como sería la estratificación y esto se discute más adelante (Thompson, 2002). En este primer caso de ambos estimadores el diseño asumido es claramente bajo MSA.

Uno de los supuestos básicos para el uso de este tipo de estimadores es que el valor de la variable auxiliar a nivel poblacional es conocido sin error de muestreo, esto es posible en ciertos casos, pero en ocasiones es necesario asumir un valor muestral como verdadero dependiendo de la información disponible de la variable auxiliar. Para este estudio se probaron dos variables auxiliares: el área basal y la edad; para esta última se cumple con los supuestos del estimador ya que en cada predio se tiene el registro de la fecha de plantación. En el caso del área basal se utiliza como media poblacional el valor obtenido de la estimación bajo estratificación siendo que ésta debe ser estadísticamente más precisa que la obtenida vía MSA.

Se puede apreciar que el estimador de razón implica la construcción de una nueva variable aleatoria. En muchos casos, ésta tiene implicaciones prácticas para el inventario forestal. Si el cociente utilizado es el volumen total sobre el área basal se tiene entonces una proporción que describe la cantidad de m^3 en pie por cada m^2 de área basal, de forma que si se conoce de manera precisa el área basal la estimación del volumen total es fácilmente obtenible. De manera similar la proporción volumen edad⁻¹ (años) permitirá obtener una medida del crecimiento esperado de manera anualizada. Las fórmulas del Cuadro 2.3 se emplearon para obtener sus valores estimados (Scheaffer *et al.*, 1987; Thompson, 2002; Köhl *et al.*, 2006).

En la estimación de la media poblacional (Ecuación 18), resalta la importancia de conocer lo más preciso posible el valor de la media poblacional de la variable auxiliar. Este valor funciona como un factor de ajuste de la media

dependiendo del cociente $\frac{\mu_x}{\bar{x}}$. Si $\frac{\mu_x}{\bar{x}} > 1$ por consecuencia de la correlación entre variables, se tiene un menor valor de la variable de interés y por lo tanto el uso de MSA hubiera sub-estimado el valor de la población. En el caso contrario, cuando $\frac{\mu_x}{\bar{x}} < 1$ implica que el muestreo realizado tendería a sobre-estimar la población de interés (Shiver *et al.*, 1996; Lohr, 2010). El muestreo se realiza bajo un esquema de MSA, por lo que el cálculo del tamaño de muestra se puede obtener con la Ecuación 22.

De manera similar al estimador de razón, los estimadores de regresión compensan por exceso (por arriba) o por defecto (por abajo) sobre la media, pero en este caso lo hacen a través de una adición que tiene como base la pendiente de regresión (Shiver *et al.*, 1996). A diferencia de los estimadores de razón, éstos funcionan más eficientemente cuando la relación entre la variable principal y la variable auxiliar no pasa por el origen (Shiver *et al.*, 1996). A continuación se presentan los estimadores de regresión (Cuadro 2.3) que al igual que los de razón asumen que la muestra obtenida fue bajo MSA (Schreuder *et al.*, 2006).

Cuadro 2.3. Estimadores de Razón (proporción) y Regresión.

Estimador		Ecuación
Razón	(17)	$R = \frac{\mu_y}{\mu_x}$
Estimadores de Razón		
Estimador de Razón	(18)	$\hat{R} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i}$
Media	(19)	$\bar{y}_R = \hat{R}\mu_x = \frac{\bar{y}}{\bar{x}}\mu_x$

Estimador		Ecuación
Varianza de la Razón	(20)	$S_{\hat{R}}^2 = \frac{1}{\mu_x^2} \frac{S_u^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)$ $S_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{R}x_i)^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 + \hat{R}^2 \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2\hat{R} \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n-1}$
Varianza de la Media	(21)	$S_{\bar{y}_{\hat{R}}}^2 = \frac{S_u^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)$
Tamaño de muestra	(22)	$n = \frac{t_{n-1,(\alpha/2)}^2 N S_u^2}{L_{\hat{R}}^2 \mu_x^2 N + t_{n-1,(\alpha/2)}^2 S_u^2}$
Estimadores de Regresión		
Media	(23)	$\bar{y}_{REG} = \bar{y} + \beta(\mu_x - \bar{x})$
Pendiente	(24)	$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
Varianza de la Media	(25)	$S_{\bar{y}_{REG}}^2 = \frac{S_{xy}^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)$ $S_{xy}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \beta^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-2}$
Tamaño de muestra	(26)	$n = \frac{t_{n-1,(\alpha/2)}^2 N S_{xy}^2}{L_{REG}^2 N + t_{n-1,(\alpha/2)}^2 S_{xy}^2}$

Donde:

μ_y = Media poblacional de la variable de interés (principal).

μ_x = Media poblacional de la variable auxiliar.

$L_{\hat{R}}$ = Tamaño aceptable del error de estimación o de muestreo.

L_{REG} = Tamaño aceptable del error de estimación o de muestreo respecto a \bar{y}_{REG} .

Las demás variables ya fueron definidas.

2.4.3.4. Estimadores de razón bajo estratificación

Los estimadores de razón bajo estratificación ofrecen una estimación satisfactoria del total de la población si el tamaño de la muestra dentro de cada

estrato es suficientemente grande (usualmente mayor a 30, aunque dependerá de la naturaleza de la población muestreada y del grado de aproximación a la distribución normal requerido) y se trabaja con el apoyo de una razón ponderada (Sukhatme, 1956). Es posible, sin embargo, usar razones por estrato, pero se necesitaría todavía mayor tamaño muestral por estrato. Este estudio se enfocó solamente a los estimadores basados en la razón ponderada. La estratificación propuesta, así como las variables auxiliares utilizadas permitieron realizar la estimación poblacional de la manera siguiente:

- a) Estratificación por predio y uso de razones de Volumen Área basal⁻¹
- b) Estratificación por edad (clase de edad) y uso de razones de Volumen Edad⁻¹ (Edad exacta)

Los estimadores utilizados en este caso son (Cochran, 1977; Kölh *et al.*, 2006):

Cuadro 2.4. Estimadores de Razón Estratificada.

Estimador	Ecuación
Media (27)	$\bar{y}_{Rc} = \frac{\sum_{h=1}^L W_h \bar{y}_h}{\sum_{h=1}^L W_h \bar{x}_h} \mu_x$
Varianza (28)	$S_{\bar{y}_{Rc}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L W_h \left(\frac{N_h - n_h}{n_h(N_h - 1)} \right) \times \left(\sum_{i=1}^{n_h} y_{i_h}^2 + \hat{R}_c^2 \sum_{i=1}^{n_h} x_{i_h}^2 - 2\hat{R}_c \sum_{i=1}^{n_h} y_{i_h} x_{i_h} \right)$ $\hat{R}_c = \frac{\sum_{h=1}^L W_h \bar{y}_h}{\sum_{h=1}^L W_h \bar{x}_h}$
Tamaño de muestra (29)	$S_h^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} (y_{h,i} - R_c x_{h,i})^2}{n_h - 1}$

Para la estimación del tamaño de muestra de estos estimadores que combinan la estimación basada en modelos con un diseño de muestreo estratificado se decidió adaptar la fórmula de muestreo estratificado pero remplazando *ad hoc* los valores de S_h^2 de la ecuación 29 para el caso de muestreo con estimadores de razón ponderada y los valores obtenidos con dicha expresión se sustituyen en la fórmula 16 con el mismo criterio de amplitud basado en el inventario.

2.4.4. Criterios de evaluación

Con la finalidad de definir cual escenario de los métodos de muestreo probados fue el más recomendable así como las ventajas que se obtienen con su aplicación, se consideró en primer lugar la precisión estimada al 95% de confiabilidad. Adicionalmente, se calculó el tamaño de muestra en intervalos por debajo del 10% a fin de ofrecer una gama amplia de posibilidades sobre la intensidad de muestreo a utilizar.

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1. Volumen total y las variables auxiliares

Para las mediciones del 2008 los datos de volumen ($\text{m}^3 \text{ sitio}^{-1}$) al área basal en $\text{m}^2 \text{ sitio}^{-1}$ tuvieron una correlación de 0.97 y respecto a la edad en años la correlación fue de 0.73 (Figura 2.1). Para el grupo de edades, la mayor cantidad de individuos pertenece a las clases de 4 a 6 años y de 8 a 10 años.

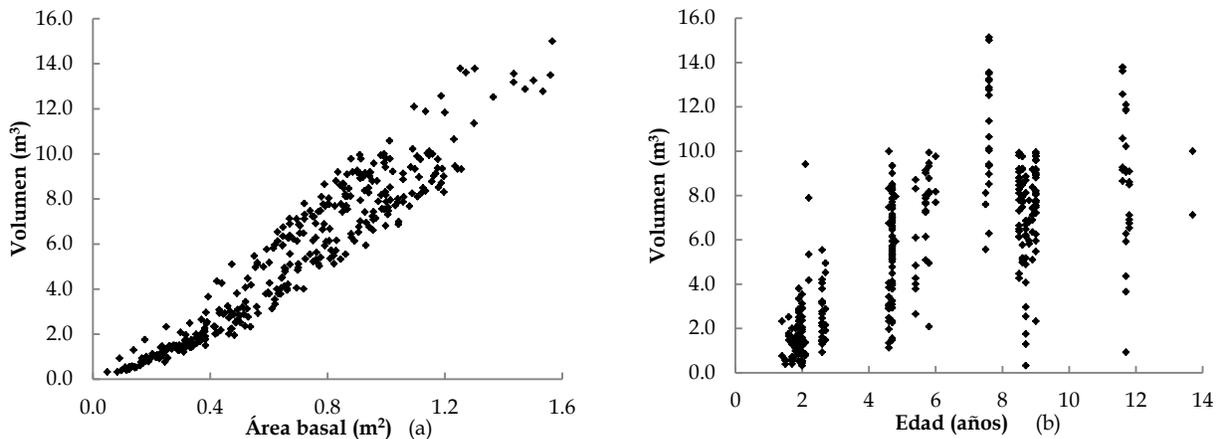


Figura 2.1. Relación de volumen-área basal (a) y volumen-edad (b) por sitio de las mediciones del 2008.

A su vez para el 2009 la correlación entre el área basal ($\text{m}^2 \text{ sitio}^{-1}$) y el volumen ($\text{m}^3 \text{ sitio}^{-1}$) en el inventario fue de 0.97; la de edad respecto al volumen fue de 0.81 (Figura 2.2).

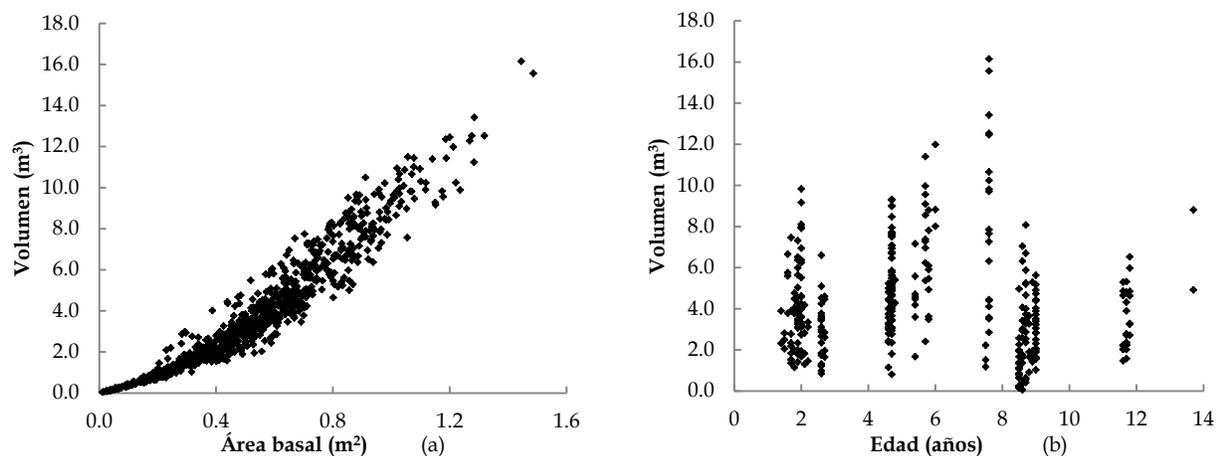


Figura 2.2. Relación de volumen-área basal (a) y volumen-edad (b) por sitio de las mediciones del 2009.

Estos resultados sugieren que la variable área basal es fuerte candidata para usarse como variable auxiliar en la estimación del inventario ya sea a través de estimadores de razón o de regresión.

2.5.2. Resultados obtenidos por estimador muestral

En los Cuadros 2.5 y 2.6 se muestran los valores estimados: media, varianza, inventario (existencias maderables totales), precisión y tamaños de muestra sugeridos para dos precisiones comunes en los datos tomados en el 2008 y 2009, respectivamente.

Cuadro 2.5. Estimadores calculados para las mediciones del año 2008.

Estimador	Media	Var. Media	Inventario (m ³)	Precisión	n (10%)	n (5%)	
Muestreo Simple Aleatorio	5.63	0.03	247,586	6.4%	146	576	
Estratificado Edad	6.00	0.02	263,794	4.2%	46	184	
Estratificado Predio	6.18	0.01	271,547	3.7%	26	85	
R							
Razón Volumen Área Basal ⁻¹	5.89	8.05	0.004	258,760	2.1%	16	63

Estimador	Media		Var. Media	Inventario (m ³)	Precisión	n (10%)	n (5%)
Razón Volumen Edad ⁻¹	5.78	0.98	0.02	253,926	4.7%	63	250
β							
Regresión Volumen Área Basal ⁻¹	5.65	9.71	0.003	261,524	1.9%	12	48
Regresión Volumen Edad ⁻¹	5.95	0.75	0.02	261,270	4.4%	68	272
R_p							
Razón Estratificada Volumen Edad ⁻¹	5.96	1.01	0.0001	264,452	0.4%	3	10
Razón Estratificada Volumen Área basal ⁻¹	6.13	8.43	0.0006	269,170	0.8%	9	76

Cuadro 2.6. Estimadores calculados para las mediciones del año 2009.

Estimador	Media		Var. Media	Inventario (m ³)	Precisión	n (10%)	n (5%)
Muestreo Simple Aleatorio	3.71		0.009	354,600	5.0%	236	938
Estratificado Edad	4.30		0.004	411,354	2.8%	48	191
Estratificado Predio	4.30		0.003	411,315	2.5%	26	95
R							
Razón Volumen Área Basal ⁻¹	4.05	7.26	0.003	387,542	2.9%	29	118
Razón Volumen Edad ⁻¹	4.00	0.87	0.01	382,757	5.0%	48	192
β							
Regresión Volumen Área Basal ⁻¹	4.18	9.95	0.001	399,858	1.3%	15	61
Regresión Volumen Edad ⁻¹	4.29	0.68	0.003	410,876	2.7%	70	278
R_p							
Razón Estratificada Volumen Edad ⁻¹	4.23	0.92	0.00003	404,766	0.26%	7	31
Razón Estratificada Volumen Área basal ⁻¹	4.30	7.70	0.00005	411,315	0.34%	19	89

Donde:

Var. = Varianza.

n (10%) = Tamaño de muestra para una precisión de 10%.

n (5%) = Tamaño de muestra para una precisión de 5%.

R = Razón.

β = Valor de la pendiente de regresión.

Rp = Razón ponderada.

2.5.2.1. Inventario 2008

Para los estimadores tradicionales puramente basados en diseño, se observa que al estratificar se obtiene ya sea por edad o por predio una mejora sustancial en la precisión sobre el promedio del volumen total por sitio (ganancias de 2.2 y 2.8% respectivamente) (Cuadro 2.5). Habría que tener en cuenta que en este caso se rebasa la precisión fijada por la empresa para su inventario que es del 5%. En el centro se ubica la estimación bajo estratificación por edad. Varios autores han señalado que a través de la estratificación se puede aumentar la precisión de las estimaciones (Opsomer *et al.*, 2010; Gilbert *et al.*, 1998; Achard *et al.*, 1998; Thrower, 1992).

En el caso de la razón de volumen área basal⁻¹ se tiene que por cada m² de AB en un sitio existen aproximadamente 8.05 m³ de volumen en pie. Este dato puede usarse para obtener inventarios rápidos como en los casos en que se utiliza solo el relascopio y el conteo o número de árboles. A su vez el estimador de razón volumen edad⁻¹ sugiere que el incremento anualizado en las plantaciones es de 0.98 m³ sitio⁻¹ año⁻¹ (19.6 m³ ha⁻¹ año⁻¹). Como en el estimador de la media de razón hace uso de μ_x (la media poblacional de la variable auxiliar), se empleó la estimación del AB ponderada por el tamaño de los estratos obtenida en el muestreo estratificado. Además con el uso de dicha variable, se tiene una ventaja adicional ya que de manera empírica combina un estimador de diseño estratificado (el AB) con uno bajo MSA (la razón VAB⁻¹).

Para la edad, se obtuvo el valor ponderado a partir de las clases generadas y su superficie, siendo éste de 5.9 años. En este caso la variable auxiliar es realmente conocida sin error, por lo que los valores estimados de los estimadores muestrales se pueden considerar “estadísticamente correctos”. Este estimador tiene además la ventaja de que se puede conocer de manera directa qué pasaría con el volumen en pie si se dejara crecer la plantación manteniendo la misma superficie de un año a otro al cambiar la edad de referencia de 5.9 a 6.9 años. De igual manera estimar el volumen del año previo es también posible. Esta estimación es válida siempre y cuando ninguna superficie se coseche o siniestre de un año a otro, y ciertamente que no se integren nuevas áreas dentro de este marco de muestreo.

Por otro lado, los valores de los estimadores de regresión a pesar de ser sesgados, poseen la cualidad de ser bastante precisos, incluso más que aquellos calculados a través de proporción. Lo que puede corroborarse en el caso de los obtenidos con la regresión del volumen-área basal (VAB^{-1}); (1.9%) y volumen-edad (VAB^{-1}); (4.4%). Al igual que en los estimadores de proporción se hizo uso de la media poblacional del AB obtenida en los estimadores del muestreo estratificado por predio en dicho año.

2.5.2.2. Inventario 2009

De manera similar al inventario del 2008, en los estimadores tradicionales se tiene que al estratificar ya sea por edad o por predio existe una ganancia en la precisión sobre el promedio del volumen total por sitio (2.3% para el caso de la edad y 2.5% para la estratificación por predio). También la estratificación por predio es mas precisa, aunque se puede calificar como un inventario intermedio al considerar su marco de muestreo, seguido del inventario bajo estratificación por edad que arroja una precisión muy por debajo de la máxima aceptable (2.8%). En ambos casos la precisión que se encuentra esta dentro del límite deseable fijado por los administradores de la empresa (5%).

Los estimadores de razón para 2009 señalaron que la razón de volumen área basal⁻¹ indica que por cada m² de AB ya sea a nivel de ha o de sitio existen 7.26 m³ de volumen en pie. Por otro lado, el estimador de razón volumen edad⁻¹ propone un incremento anualizado de 0.87 m³ sitio⁻¹ año⁻¹, es decir, de 17.4 m³ ha⁻¹ año⁻¹. A partir de las clases de edad generadas, se obtuvo la edad ponderada (4.6 años), considerándose ésta como variable auxiliar que se puede asumir sin error. De todos los estimadores probados y bajo los criterios de evaluación establecidos, el mejor resultó ser el de razón volumen edad⁻¹ estratificada por clase de edades.

De manera gráfica y usando las fórmulas para estimar el tamaño de muestra a diferentes errores de muestreo (Figura 2.3 (a) y Figura 2.3 (b)) se aprecia que es posible mantener altas precisiones (menos del 5%) por debajo de un tamaño de muestra de n≤400 para el 2008 y de n≤500 para el 2009. Esto implica que a pesar de que las variaciones entre ellos, aparentemente es mínima, la ganancia en precisión se intensifica.

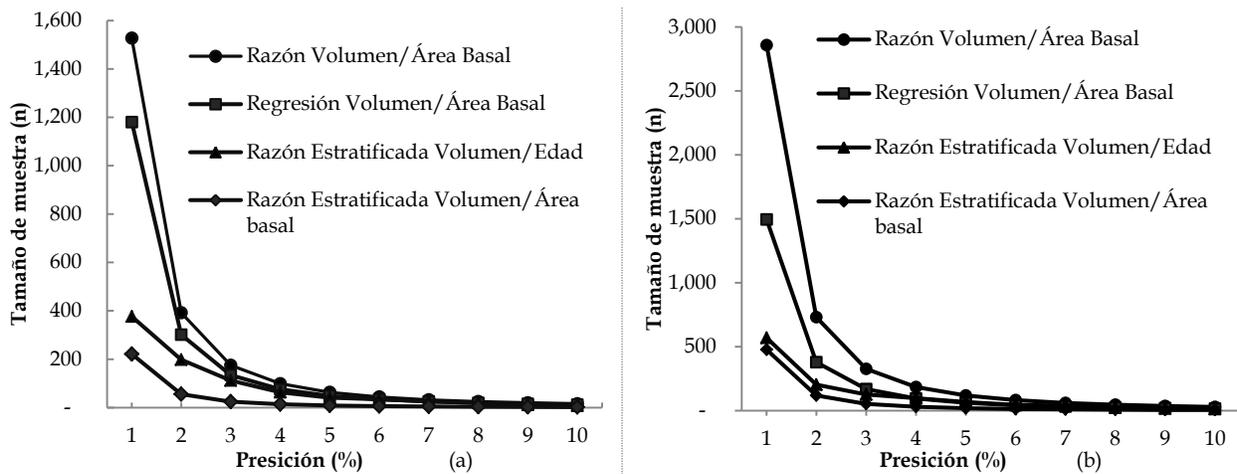


Figura 2.3. Tamaños de muestra para los métodos de muestreo con mejor precisión en 2008 (a) y 2009 (b).

2.6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estimador de razón estratificada con base al volumen y las variables edad y área basal permitió aumentar la precisión en todos los casos evaluados. Los estimadores de razón y regresión; considerando la edad y el área basal como variables auxiliares, ofrecieron las bondades deseadas para la realización del inventario ya que en muestras grandes, las estimaciones fueron más eficientes que las estimaciones de muestreo basados en la media aritmética simple.

Considerando que los administradores de la plantación se han fijado como meta obtener sus inventarios año con año a una precisión de al menos 5%. Los estimadores recomendados satisfacen esta condición y para lograrlo resulta útil hacer uso de variables auxiliares, como el caso de la edad, lo que permite a la empresa tener una ventaja al respecto ya que cuenta con este tipo de información. Además de obtener eficiencia en la estimación, es posible también tener una idea rápida del incremento medio por año, por lo que una ventaja más que se tiene, siempre y cuando se trabaje con la proporción volumen edad¹ y clases de edad de un año, es que se puede ahorrar dinero y reducir esfuerzo para obtener el inventario año con año, ya que se puede planear el inventario de forma bi-anual y no necesariamente anual.

Hasta este momento se han considerado estimadores a nivel poblacional. Para obtener los correspondientes a los predios de la empresa se podría implementar el uso del área basal como variable auxiliar, sin necesidad de que la precisión se vea sacrificada, es decir, se buscaría lograr las mismas o mejores precisiones.

De acuerdo a los tamaños de muestra obtenidos para cada uno de éstos, pero considerando sobretodo el número de predios involucrados, a partir del inventario del 2011, se sugirió establecer como mínimo tres sitios de muestreo por predio, de los cuales, uno de cada tres quedaría como parcela permanente

de remediación, mismos que servirían para actualizar el inventario y conocer el ritmo de crecimiento de las plantaciones, tal como lo hizo Fong-Long (1998). Se esperaría que con dicha implementación se logren tener resultados similares a dicho estudio y así poder corroborar las ventajas que se tienen al emplear sitios de remediación (Ortiz y Quirós, 2009). Es recomendable también implementar un método de Muestreo de Relascopio a nivel predial a fin de utilizar el AB como variable auxiliar y combinarla con la estratificación. Debido a que ésta es fácil de medir, se debe hacer de manera extensiva, es decir, en más sitios que la variable principal, la cual se mide intensivamente en pocos sitios y con más cuidado para garantizar confianza.

Se sugiere que dentro de la malla o vía caminamientos aleatorios se puedan establecer una cantidad considerable de sitios de relascopio. En predios donde por falta de tiempo o por las condiciones de desarrollo de la vegetación secundaria no es posible realizar las remediciones se pueden usar estimadores de razón estratificada por área basal o edad y combinar estos valores con mediciones de campo y con modelos de crecimiento compatibles con el inventario.

También es recomendable realizar el inventario mediante el muestreo de sitios de menor tamaño que el actualmente empleado, de 400 m² por ejemplo, esperando tener resultados equivalentes a los presentados en este estudio pero en menor superficie muestreada y, por lo tanto, menores costos, tal como lo obtuvieron Borders *et al.* (1998).

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.
- Aguirre-Salado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. De Los Santos-Posadas, R. Haapanen, A. I. Aguirre-Salado. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino patula en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43: 209-220.
- 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.
- Borders, B. E., G. H. Brister, N. Grahl, B. D. Shiver and C. J. Cieszewski. 1998. A comparison of sample unit designs in the national inventory of the U.S. *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. 20-27.
- Cochran, W. G. 1977. *Sampling techniques.* Third edition. John Wiley & Sons. New York. 428 p.
- Fong-Long, F. 1998. State-of-the-art technologies of forest inventory and monitoring in Taiwan. *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. 35-41.
- Freese, F. 1962. *Muestreo forestal elemental.* USDA FS Agriculture Handbook No. 232. 91 p.
- Gilbert, D. K. Tudor, S. Otukol and K. Jahraus. 1998. Rebuilding our legacy inventories: identifying the good and fixing the bad. *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. 50-59.
- 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.
- Lohr, S. L. 2010. Sampling: design and analysis. Second Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning. United States of America. 596 p.
- Loukas, G. A., B. Ramachandran, D. P. Brackett, H. Abd-El Rasol and X. Du. 1998. Multiresource inventories incorporating GIS, GPS and database management system. *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. 1-7.
- Manly, B. F. J. 1997. Randomization, bootstrap and monte carlo methods in biology. Text in statistical science. University of Otago. New Zealand. 2nd. Ed. Chapman and Hall. London, UK. 399 p.
- Méndez, M. J. T., S. E. García D., B. Don Juan M., L. Ángel A. 2008. Diagnóstico fitosanitario en plantaciones forestales comerciales en Las Choapas, Veracruz y Huimanguillo, Tabasco. Comisión Nacional Forestal. Gerencia Nacional de Sanidad. Universidad Autónoma Chapingo. México. 97 p.
- Opsomer, J. D., M. F. Fernández, X. Li. 2010. Model based nonparametric variance estimation for systematic sampling. Department of Statistics, Colorado State University. Fort Collins. United States of America. 23 p.
- Ortiz, E. y D. Quirós. 2009. Definiciones y tipos de inventarios forestales. *In*: inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Corredor Biológico Mesoamericano. Turrialba, Costa Rica. 264 p.

- Renard, P., D. Héline and F. Roland. 2004. Geostatistics for environmental applications. proceedings on the fifth european conference on geostatistics for environmental applications. Springer. New York. 480 p.
- 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, 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.
- Schreuder, H. T., J. C. Rennie and 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. 2006. Técnicas estadísticas para evaluación y monitoreo de recursos naturales. Universidad Autónoma Chapingo. México. 144 p.
- Schumacher, F. X. and Chapman, R. A. 1942. Sampling methods in forestry and range management. Duke University. School of Forestry. Bulletin 7. Durham, North Carolina. 213 p.
- Shiver, B. D. and 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.
- Sukhatme, P. V. and B. V. Sukhatme. 1970. Sampling theory of surveys with application. Iowa State University. Ames. Iowa, U.S.A. 452 p.
- Torres, R. J. M. y O. S. Magaña T. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Editorial Limusa. Grupo Noriega Editores. México. 472 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.
- 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.
- Velázquez, M. A., A. M. Fierros G., A. Aldrete, A. Gómez G., H. M. de los Santos, M. González G., J. López U., T. Llanderal O. y S. Fernández C. 2009. Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. Comisión Nacional Forestal - Colegio de Postgraduados. México. 429 p.
- Villa, S. A. B. 1971. Generalidades sobre las técnicas de muestreo en inventarios forestales. *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.
- 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.

CAPÍTULO III

3. SISTEMA DE CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO MADERABLE PARA PLANTACIONES DE *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake: AJUSTE CON DATOS DE INVENTARIOS OPERATIVOS

3.1. RESUMEN

Con la finalidad de optimizar el uso de información disponible por parte de empresas plantadoras, se decidió construir un sistema de crecimiento y rendimiento maderable explícito (SCRM) para plantaciones forestales de rápido crecimiento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. Lo anterior, considerando de que a pesar de que el programa mexicano de subsidio a las plantaciones forestales comerciales ha logrado aumentar la superficie plantada en los últimos 15 años, a la fecha se carece de información dasométrica que permita proyectar el crecimiento maderable y realizar evaluaciones financieras confiables. Para lograr el objetivo, se usaron datos dasométricos colectados mediante inventarios operativos que abarcan una crono-secuencia de edades entre 1 y 18 años. El SCRM obtenido permite estimar el índice de sitio (IS) y el rendimiento maderable a partir de modelos matemáticos ajustados por regresión no lineal. El IS se describe de manera adecuada ajustando los modelos anamórficos de Schumacher-Korf y de Hossfeld IV. Los modelos ajustados para predecir el crecimiento en área basal, la mortalidad y el volumen sugieren factores de ajuste superiores al 98%. El turno técnico estimado es de 5 años con un incremento medio de $24.7 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, pudiendo alcanzar hasta $36.9 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ en los sitios de alta productividad. El SCRM es 100% compatible con los datos de inventario y puede utilizarse para actualizarlo y realizar evaluaciones financieras.

Palabras clave: Eucalipto, índice de sitio, plantaciones forestales.

GROWTH AND YIELD TIMBER SYSTEM FOR *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake PLANTATIONS: FIT WITH OPERATIONAL INVENTORY DATA.

3.2. ABSTRACT

To optimize the available information from plantation companies, we decided to build an explicit growth and yield system for fast-growing *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake plantations. The motivation behind the work is the fact that despite the subsidization of commercial forest plantations in Mexico in the last 15 years, today there is almost no information available that allows projection of timber growth for reliable financial assessments on this kind of projects. The systems used data collected through an operational inventory network that includes a chrono-sequence from 1 to 18 years. This system estimates site index (SI) and timber yield from mathematical models adjusted by nonlinear regression. The SI is adequately described through the anamorphic models of Schumacher-Korf and Hossfeld IV. For basal area, mortality and volume the system fit index is close to 98%. A 5-year rotation was estimated with an average growth of $24.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ and in some sites may reach $36.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. Growth and yield timber system is 100% compatible with inventory data and can be used to update it and make financial assessments.

Key words: eucalyptus, site index, forest plantations.

3.3. INTRODUCCIÓN

El manejo óptimo de plantaciones forestales comerciales requiere de estimaciones confiables del rendimiento (cosecha probable a cierta edad) e incremento (tasa de cambio probable en un intervalo de tiempo), en volumen de madera para establecer adecuadamente un plan de negocios en el mediano y largo plazo, además de facilitar la definición de prácticas de cultivo financieramente viables. Lo anterior se logra a través de la modelación del rendimiento con ecuaciones matemáticas que representan los componentes del rodal (Borders y Jordan, 1999; Valdez y Lynch, 2000; Torres y Magaña, 2001; Velázquez *et al.*, 2009).

El conjunto de ecuaciones a utilizar deben proyectar componentes tales como la altura dominante, el área basal, la supervivencia residual (mortalidad) y el volumen total de la plantación en función de la edad y de sus interrelaciones como componentes del rodal (Zepeda y Domínguez, 1998; Galán *et al.*, 2008). A este grupo de ecuaciones o funciones se le define como un sistema de crecimiento y rendimiento maderable (SCRM).

Forestaciones Operativas de México S.A. de C.V. (FOMEX), empresa enfocada al establecimiento de plantaciones forestales comerciales, posee una superficie plantada de aproximadamente 10,000 hectáreas y carece de un SCRM confiable y de uso local. Sus plantaciones contienen especies forestales de rápido crecimiento como *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, *E. grandis* Hill ex Maiden, *E. urograndis*, *E. tereticornis* Sm y *Gmelina arborea* Roxb, pero con clara preferencia por *E. urophylla* (cerca de 7,000 ha).

El presente capítulo reporta la construcción de un SCRM de predicción explícita para plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla* utilizando datos de inventarios operativos periódicos que la empresa realiza para evaluar sus plantaciones.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1. Área de estudio

El SCRM se desarrolló con datos dasométricos de plantaciones de *Eucalyptus urophylla* propiedad de FOMEX, establecidas en los municipios de Agua Dulce y Las Choapas, Veracruz, México (17°55' de Latitud Norte y 94°06' de Longitud Oeste). En esta zona, el clima es cálido, con una temperatura media de 27°C, los ecosistemas existentes son selva baja perennifolia y selva baja caducifolia. Otra parte de las plantaciones se localiza en la región de Huimanguillo, Tabasco (17°19' de Latitud Norte y 93°23' de Longitud Oeste), ahí el clima predominante es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y temperatura media anual de 26°C. En la zona existen áreas con vegetación diversa, encontrándose ecosistemas forestales de selva media perennifolia (Miranda y Hernández, 1963; García, 1988; Méndez *et al.*, 2008; Velázquez *et al.*, 2009).

3.4.2. Datos dasométricos

Se utilizaron en conjunto tres bases de datos con mediciones realizadas en un total de 224 predios (1,973 sitios rectangulares de 20×25 m). La primera se obtuvo en 2008 y comprende 49 predios, cuya superficie es de 2,196 ha con 351 sitios. La base 2009 incluye 135 predios en 4,784 ha y los sitios muestreados fueron 937. La base del 2012 en 97 predios con 4,339 ha, comprende 685 sitios temporales y 36 permanentes, mismos que a inicios del 2013, fueron re-medidos para estimar de manera directa el incremento en volumen. El rango de las edades involucradas oscila entre 1 y 18 años. En cada sitio de inventario se midió el diámetro normal y la altura total de todos los árboles vivos. La plantación de mayor edad se estableció en 1994 con el objetivo de producir material celulósico, actualmente la empresa considera ampliar su mercado produciendo madera para aserrío.

3.4.3. Cubicación de árboles en pie

El volumen de los árboles en pie se estimó con la ecuación de volumen total con corteza tipo Schumacher y Hall (1933) ajustada para la zona por Méndez (2007):

$$V_t = 0.000066 \times D^{1.706446} \times H^{1.049807} \quad (1)$$

Donde:

V_t = Volumen total con corteza de un árbol en m³.

D = Diámetro normal o a la altura del pecho (DAP) en centímetros.

H = Altura total del árbol en metros.

3.4.4. Altura dominante

Este concepto tiene varias acepciones dependiendo del autor (Klepac, 1983; Avery y Burkhart, 1983). En este estudio se definió a la altura dominante como el promedio de los cien árboles dominantes por hectárea, lo que implica identificar los 5 árboles de mayor altura por sitio y promediarlos para obtener el valor de altura dominante de cada sitio de inventario.

La altura dominante se relaciona estrechamente con el volumen total del sitio, con cierta independencia de su densidad, permitiendo la caracterización de la productividad potencial del rodal. A esta medida compendiada de productividad, se le denomina índice de sitio (IS), y se usa frecuentemente para clasificar tierras forestales con base a su productividad (Daniel *et al.*, 1982; Clutter *et al.*, 1983; Mendoza, 1993; Avery y Burkhart, 1994; Cieszewski, 1999; Torres y Magaña, 2001). Una buena determinación del IS es fundamental para la clasificación de tierras de productividad equivalente donde es posible comparar rodales de diferentes edades y condiciones dasométricas y, con esto, definir regímenes de manejo adecuados y específicos (Cieszewski y Bailey, 2000; Gómez *et al.*, 2009; Weiskittel *et al.*, 2009; Hughell, 2009).

Debido a que el conjunto de datos son mediciones puntuales (una sola medición), como primer paso se ajustó un modelo promedio o curva guía de la forma $A = f(E; \beta)$, A es la altura dominante promedio de sitio a la edad E de la plantación en años y β el vector de parámetros de crecimiento. En este trabajo se decidió trabajar con las expresiones matemáticas para los modelos promedio de Schumacher-Korf (2), Hossfeld IV (3), Levakovic II (4) y Chapman-Richards (5):

$$A = \beta_0 \times e^{\left(\frac{-\beta_1}{E\beta_2}\right)} \quad (2)$$

$$A = \frac{\beta_0}{1+e^{\beta_1 \times E^{-\beta_2}}} \quad (3)$$

$$A = \beta_0 \times \left(\frac{E}{\beta_1+E}\right)^{\beta_2} \quad (4)$$

$$A = \beta_0 \times [1 - e^{(-\beta_1 \times E)}]^{\beta_2} \quad (5)$$

Donde:

A = Altura dominante promedio del sitio de inventario en metros.

E = Edad en años.

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = Parámetros de crecimiento a estimar.

Para proyectar el crecimiento y estimar el IS se utilizaron dos familias de curvas de IS por modelo, una anamórfica y otra polimórfica, que en cada caso tienen las siguientes formas de diferencia algebraica:

Anamórfica Schumacher-Korf

$$A_2 = A_1 \times e^{-\beta_1 \times \left(\frac{1}{E_2\beta_2} - \frac{1}{E_1\beta_2}\right)} \quad (6)$$

Polimórfica Schumacher-Korf

$$A_2 = \beta_0 \times \left(\frac{A_1}{\beta_0}\right)^{\left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{\beta_2}} \quad (7)$$

Anamórfica Hossfeld IV

$$A_2 = A_1 \times \left[\frac{1+e^{\beta_1 \times e^{(-\beta_2 \times \ln E_2)}}}{1+e^{\beta_1 \times e^{(-\beta_2 \times \ln E_1)}}}\right] \quad (8)$$

Polimórfica Hossfeld IV

$$A_2 = \frac{\beta_0}{\left(1 + \left(\frac{\beta_0}{A_1} - 1\right) \times \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{\beta_2}\right)} \quad (9)$$

Anamórfica Levakovic II

$$A_2 = A_1 \times \left(\frac{\frac{\beta_1 + 1}{E_1}}{\frac{\beta_1 + 1}{E_2}}\right)^{\beta_2} \quad (10)$$

Polimórfica Levakovic II

$$A_2 = \beta_0 \times \left(\frac{E_2}{E_1} \times \left(\left(\frac{A_1}{\beta_0}\right)^{-\left(\frac{1}{\beta_2}\right)} - 1\right) + 1\right)^{-\beta_2} \quad (11)$$

Anamórfica Chapman-Richards

$$A_2 = A_1 \times \left(\frac{1 - e^{(-\beta_1 \times E_2)}}{1 - e^{(-\beta_1 \times E_1)}}\right)^{\beta_2} \quad (12)$$

Polimórfica Chapman-Richards

$$A_2 = \beta_0 \times \left(1 - \left(1 - \left(\frac{A_1}{\beta_0}\right)^{\frac{1}{\beta_2}}\right)^{\frac{E_2}{E_1}}\right)^{\beta_2} \quad (13)$$

Donde:

A_1 = Altura dominante en metros a la edad E_1 en años (condiciones iniciales).

A_2 = Altura dominante a proyectar en metros a la edad E_2 de proyección en años.

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = Parámetros a estimar.

Cada una de las familias seleccionadas se validó mediante el procedimiento descrito por Gómez *et al.* (2009), lo que permitió evaluar la capacidad de los modelos para predecir la altura dominante mediante el uso de datos de sitios con remediciones. Para este proceso se utilizaron 36 pares de datos provenientes de sitios medidos en 2012 y remedidos en 2013 evaluados mediante los índices de predictibilidad siguientes:

El sesgo medio (B_{PROM}):

$$B_{PROM} = \frac{\sum_{j=1}^K (A_j(E_R) - \hat{A}_j(A_0, E_0, E_R))^2}{K-p} \quad (14)$$

Donde:

$A_j(E_R)$ = Altura dominante medida en el j-ésimo sitio a la edad de remediación E_R .

$\hat{A}_j(A_0, E_0, E_R)$ = Altura proyectada/retraída en el j-ésimo sitio tomando como referencia a la primera medición definida por A_0 y E_0 .

K = Número total de parcelas con remediciones.

p = Número total de parámetros estimados estadísticamente en el modelo.

El factor de ajuste (FA) se define como:

$$FA = 1 - \frac{\sum_{j=1}^K (A_j(E_R) - \hat{A}_j(A_0, E_0, E_R))^2}{\sum_{j=1}^K (A_j(E_R) - \bar{A}_j(E_R))^2} \quad (15)$$

Donde:

$\bar{A}_j(E_R)$ = Media de alturas dominantes a la edad de remediación E_R .

Las demás variables ya fueron definidas.

Para ambos criterios se usaron tanto las predicciones (la estimación de la altura futura en base a las condiciones iniciales) como las retracciones (la predicción de altura previa basada en la medición más reciente). Cada familia de IS se calificó mediante una calificación total (CT) como un indicador relativo de ajuste en cada caso, asignando el valor de 1 al mejor ajuste, de forma tal que el mejor modelo fue el que tuvo la menor suma de calificaciones totales (CT).

3.4.5. Crecimiento en área basal

El área basal (AB) es una variable altamente correlacionada con el volumen total, que mide de manera directa la densidad del rodal; es quizá la variable más utilizada para evaluar el efecto de las prácticas silvícolas, sobre todo los

aclareos, tanto a nivel poblacional, como en árboles individuales (Torres y Magaña, 2001; Santiago, 2009). Para su predicción se ajustó la propuesta básica de Sullivan y Clutter (1972) que tiene la forma siguiente:

$$AB = e^{\alpha_0} \times e^{\left(\frac{-\alpha_1}{E}\right)} \times A^{\alpha_2} \times N^{\alpha_3} \quad (16)$$

Donde:

AB = Área basal en $m^2 ha^{-1}$.

N = Número de árboles vivos por hectárea.

a_0, a_1, a_2, a_3 = Parámetros a estimar.

Las demás variables ya fueron definidas.

A este modelo le corresponde un modelo de proyección de diferencia algebraica de la forma:

$$AB_2 = AB_1 \times e^{-\alpha_1\left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1}\right)} \times \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\alpha_2} \times \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{\alpha_3} \quad (17)$$

Donde:

AB_2 = Área basal en $m^2 ha^{-1}$ a la edad de proyección E_2 .

AB_1 = Área basal inicial en $m^2 ha^{-1}$ a la edad inicial E_1 .

N_1 = Número de árboles vivos por hectárea en la condición inicial E_1 .

N_2 = Número de árboles vivos por hectárea predichos a la E_2 .

A_2 = Altura dominante en metros a la edad de proyección E_2 .

A_1 = Altura dominante en metros a la edad inicial E_1 .

La estructura de este modelo permite, a partir de inventarios obtenidos, proyectar el AB a un tiempo futuro o conocer un estado previo, pues es posible que $E_2 < E_1$ y en este caso se tiene una “retracción” o condición previa estimada. En ésta, así como para la supervivencia residual y el volumen total proyectado, se realizó una validación del modelo de proyección/crecimiento propuesto en cada caso a fin de evaluar la bondad predictiva total. En este caso el valor de $A_j(E_R)$ para calcular el B_{PROM} y el FA es remplazado por el de $AB_j(E_R)$, $N_j(E_R)$ y $V_j(E_R)$ y contrastado contra sus proyecciones/retracciones para evaluar su capacidad predictiva.

3.4.6. Supervivencia residual

Todo sistema de crecimiento requiere de un componente de supervivencia residual. Estos modelos, comúnmente llamados de mortalidad, son el eslabón más débil dentro del SCRM, ya que básicamente son funciones de riesgo que se modelan como variables continuas. No obstante es posible lograr buenas predicciones siempre que se pueda contar con un espectro amplio de los cambios en el número total de individuos en el tiempo (Torres y Magaña, 2001). Para evaluar esta variable se construyó un modelo simple basado en la mortalidad exponencial de la forma:

$$N = \delta_0 \times e^{(-\delta_1 \times E)} \quad (18)$$

Donde:

δ_0 y δ_1 = Parámetros a estimar.

Las demás variables ya fueron definidas.

Al igual que para el AB es posible, vía diferencia algebraica, definir un sistema de proyección de la forma;

$$N_2 = N_1 \times e^{-\delta_1 \times (E_2 - E_1)} \quad (19)$$

De manera similar a los modelos de IS, que permiten estimar el potencial productivo, este sistema de supervivencia residual permite ubicar zonas de ésta basadas en una supervivencia inicial dada. Ello implica que a mayor supervivencia inicial la cantidad final de árboles será mayor, impactando en el volumen total.

3.4.7. Volumen total con corteza

La evaluación de las existencias maderables en una plantación forestal requiere de expresiones o modelos matemáticos, llamadas ecuaciones de volumen, que basadas en una muestra objetivamente seleccionada y cuidadosamente medida, permiten estimar el volumen de los árboles en pie sobre la base de mediciones simples como diámetro y altura (Reyes, 2006). Para predecir el rendimiento en volumen por ha se utilizó el siguiente modelo no lineal:

$$V = \gamma_0 \times AB^{\gamma_1} \times A^{\gamma_2} \quad (20)$$

Donde:

V = Volumen total con corteza en $m^3 \text{ ha}^{-1}$.

$\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ = Parámetros a estimar.

Las demás variables ya fueron definidas.

Este modelo es de uso fácil en la práctica ya que permite estimaciones rápidas del rendimiento por hectárea si se conoce la altura dominante en el sitio específico y si se estima el área basal mediante un método sencillo como el relascopio.

Así, se ajustó una estructura de rendimiento sin considerar a la edad como variable predictora ya que ésta es considerada en la estimación del AB y la A , variables dinámicas que incorporan a la edad en la predicción. La predicción y proyección se obtiene a partir de sustituir los valores obtenidos para cada variable. Es fácil ver que:

$$V = \gamma_0 \times g(E, N, A, \alpha_i)^{\gamma_1} \times f(E, \beta_i)^{\gamma_2} \quad (21)$$

Donde:

La función $g(.)$ representa el cambio en AB .

La función $f(.)$ el cambio en altura dominante.

Ambos dependientes de la edad.

Si se aplican las funciones propuestas y la función de altura dominante con base al IS, el volumen total será también sensible a los cambios en la productividad potencial:

$$V = \gamma_0 \times g(E, N, A, \alpha_i)^{\gamma_1} \times f(E, IS, E_b, \beta_i)^{\gamma_2} \quad (22)$$

Donde:

$\gamma_i, \alpha_i, \beta_i$ = Parámetros a estimar.

E_b = Edad base o de referencia en años.

Las demás variables ya fueron definidas.

La expansión a un sistema de proyección en volumen vía proporciones tomaría entonces de la siguiente estructura:

$$V_2 = V_1 \times \left(\frac{AB_2}{AB_1}\right)^{\gamma_1} \times \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\gamma_1} \quad (23)$$

3.4.8. Ajuste del SCRM

Inicialmente se ajustó la *A* vía mínimos cuadrados ordinarios para definir el mejor modelo de predicción. Una vez definido se ajustó el SCRM de manera simultánea mediante la técnica de regresión aparentemente no correlacionada (SUR; por sus siglas en inglés) usando el paquete estadístico SAS/STAT® 9.0 (SAS Institute Inc., 2002) (Statistical Analysis System) (Borders, 1989; Galán *et al.*, 2008).

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1. Modelos de altura dominante

En el Cuadro 3.1 se muestran los resultados del ajuste obtenido para los modelos promedio (curva guía) ensayados con datos de información puntual (una medición).

Cuadro 3.1. Ajuste de los modelos promedio y valor de los parámetros para evaluar el crecimiento en altura dominante *de Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Modelo	Parámetros estimados	Error estándar	Suma de Cuadrados del Error (SCE)	Cuadrado Medio del Error (CME)	R ²	Pr> t
(2) Schumacher-Korf	39.3601	1.217	19227.2	9.760	0.7837	<.0001
	1.8219	0.025				<.0001
	0.7365	0.038				<.0001
(3) Hossfeld IV	34.8558	0.687	19225.5	9.759	0.7837	<.0001
	1.3448	0.024				<.0001
	1.2163	0.044				<.0001
(4) Levakovic II	36.3752	0.520	19218.7	9.756	0.7838	<.0001
	1.4878	0.308				<.0001
	1.8289	0.276				<.0001
(5) Chapman-Richards	30.9559	0.340	19237.1	9.765	0.7836	<.0001
	0.2417	0.013				<.0001
	0.8893	0.036				<.0001

Es evidente que todos los modelos probados tuvieron buen ajuste de acuerdo a los criterios de evaluación empleados: valores reducidos de la SCE, del CME y

del error estándar, así como los valores relativamente altos de la pseudo- R^2 . La curva guía de la altura dominante para cada uno de ellos junto, con los datos de campo se muestra en la Figura 3.1.

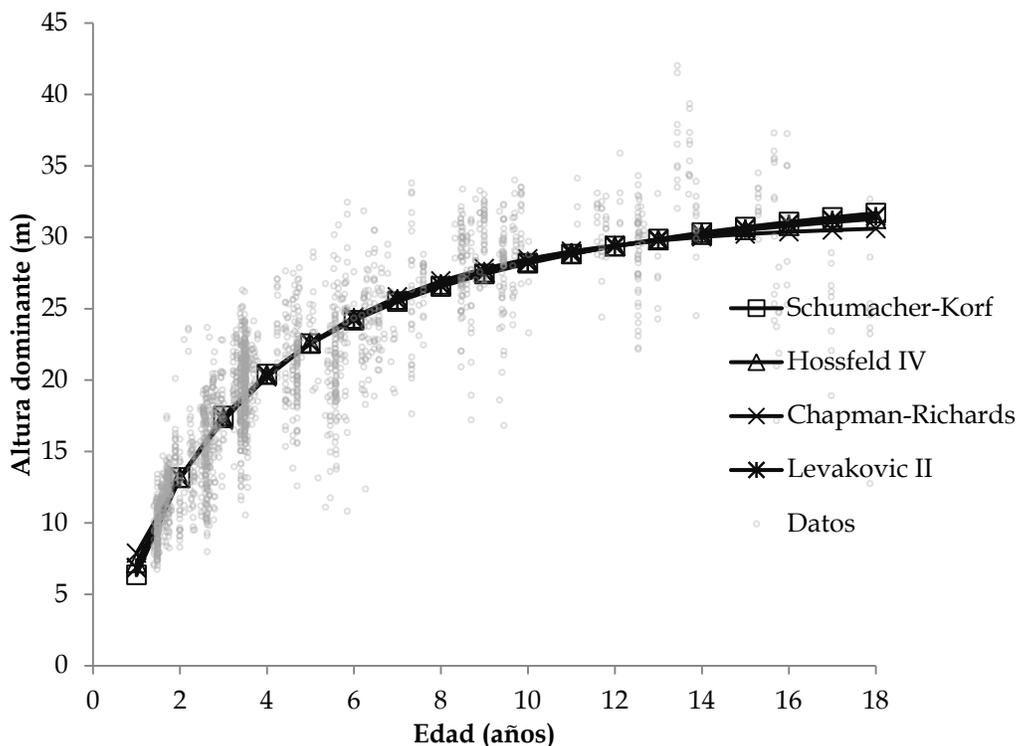


Figura 3.1. Altura dominante medida en campo y curvas promedio de crecimiento en altura dominante para *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake para los modelos ajustados.

Los cuatro modelos evaluados predicen de manera lógica el crecimiento en altura dominante —pasan en el centro de la dispersión de los datos—. Los resultados de la validación, tanto hacia atrás como hacia delante, de las familias de IS (Cuadro 3.2) sugieren que el mejor modelo para proyectar la altura dominante y por ende, predecir el IS es el modelo anamórfico de Hossfeld IV. Éste tuvo el mejor factor de ajuste y el menor sesgo promedio de las familias seleccionadas (Figura 3.2). En segundo lugar se sitúa el modelo anamórfico de Levakovic II. De manera general las curvas polimórficas tuvieron un ajuste intermedio, siendo los modelos de Schumacher-Korf y Levakovic II los más balanceados en términos de proyección y retracción; ambos recibieron

calificaciones totales idénticas (18). El modelo Polimórfico de Chapman-Richards es el mejor calificado para proyectar el crecimiento, pero el peor para estimar la altura previa.

Cuadro 3.2. Sesgo promedio, factor de ajuste y calificación para proyecciones y retracciones de los 36 sitios de validación para altura dominante.

Tipo de curvas	Criterios de validación por tipo de curvas				Calificación por curvas				Calificación total
	Proyección		Retracción		Proyección		Retracción		
	B _{PROM}	FA	B _{PROM}	FA	B _{PROM}	FA	B _{PROM}	FA	
ANAMÓRFICAS									
Schumacher-Korf	1.5576	0.9897	1.3420	0.9908	7	7	4	4	22
Hossfeld IV	1.5557	0.9898	1.3317	0.9908	5	5	2	2	14
Levakovic II	1.5560	0.9898	1.3360	0.9908	6	6	3	3	18
Chapman-Richards	1.5606	0.9897	1.3188	0.9909	8	8	1	1	18
POLIMÓRFICAS									
Schumacher-Korf	1.4966	0.9901	1.7570	0.9879	4	4	5	5	18
Hossfeld IV	1.4569	0.9904	1.8157	0.9875	2	2	7	7	18
Levakovic II	1.4753	0.9903	1.7913	0.9877	3	3	6	6	18
Chapman-Richards	1.3814	0.9909	1.8523	0.9873	1	1	8	8	18

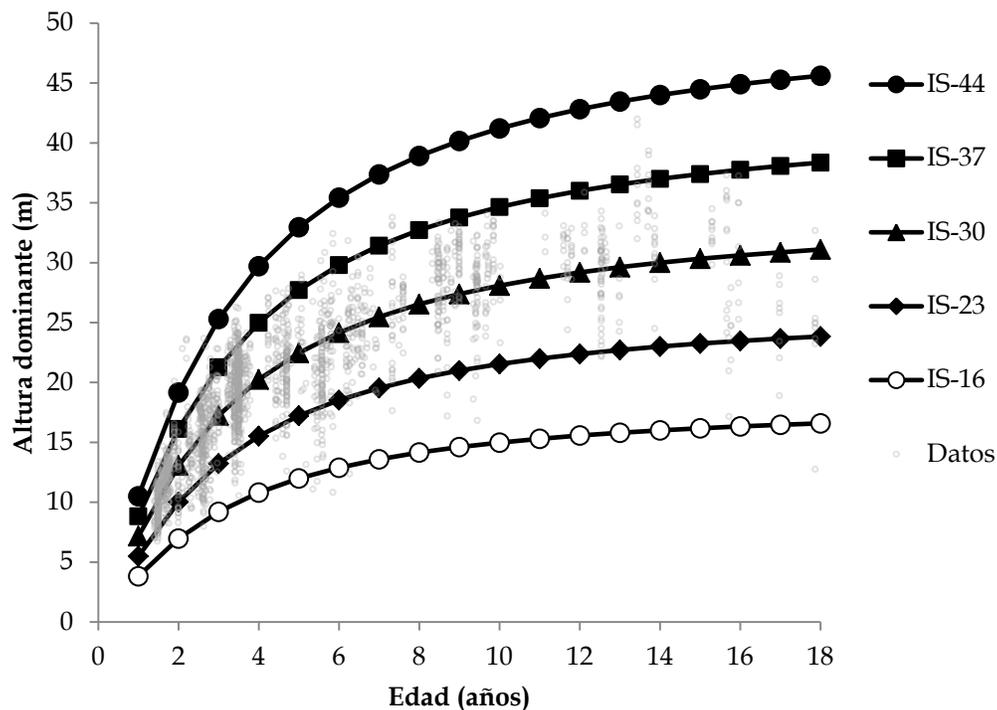


Figura 3.2. Familias anamórficas de Hossfeld IV para *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake de IS-16, 23, 30, 37 y 44 m y edad base = 14 años.

3.5.2. Ajuste simultaneo

En el Cuadro 3.3 se presentan los parámetros de bondad de ajuste del sistema de predicción ajustado bajo el método SUR:

Cuadro 3.3. Bondad de ajuste y parámetros estimados para los componentes del SCRM propuesto.

Ecuación	GL Modelo	GL Error	SCE	CME	Raíz CME	R ²	R ² -ajustada
A (3)	3	1754	16209.2	9.2413	3.04	0.7794	0.7791
AB (16)	4	1753	9183.4	5.2387	2.2888	0.8429	0.8426
N (18)	2	1755	60777643	34631.1	186.1	0.1709	0.1704
V (20)	3	1754	79671.3	45.4226	6.7396	0.9887	0.9887

Parámetro	Valor estimado	Error Estándar	Valor t calculado	Pr > t
α_1	36.7385	0.9136	40.21	<.0001
α_2	1.3283	0.0236	56.26	<.0001
α_3	1.1081	0.0423	26.2	<.0001
β_0	-4.5595	0.1565	-29.13	<.0001
β_1	0.7003	0.0663	10.57	<.0001
β_2	1.2051	0.0307	39.25	<.0001
β_3	0.5564	0.0144	38.59	<.0001
γ_0	0.8850	0.0172	51.47	<.0001
γ_1	0.9923	0.0055	179.61	<.0001
γ_2	0.7146	0.0081	88.23	<.0001
δ_0	852.0358	9.6098	88.66	<.0001
δ_1	0.0384	0.0023	17.02	<.0001

3.5.3. Predicción de supervivencia, área basal y volumen total

En general, las estructuras propuestas (17, 19 y 23) predicen de manera bastante certera los valores de proyección en cada una de las variables. Es interesante notar que la supervivencia residual se estima con mayor precisión hacia el futuro ($B_{PROM} = 2653.7$; $FA=0.9988$) mientras que tanto para el área basal como para el volumen son mejor sus estimadas hacia atrás ($B_{PROM_AB} = 0.8731$; $FA_{AB}=0.9988$ y $B_{PROM_V} = 12.4266$; $FA_{V}=0.9999$) (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Evaluación de sesgo medio (B_{PROM}) y factor de ajuste (FA) para los modelos de proyección propuestos para área basal (17), supervivencia residual (19) y volumen total (23).

Modelo	Criterios de validación			
	Proyección		Retracción	
	B_{PROM}	FA	B_{PROM}	FA
Área basal (17)	1.1003	0.9987	0.8731	0.9988
Supervivencia residual (19)	2653.7177	0.9988	2825.0981	0.9988
Volumen total (23)	15.2088	0.9999	12.4266	0.9999

A pesar de la pérdida en precisión acumulada por cada modelo en el sistema, es fácil ver que el factor de ajuste total para las predicciones a partir de condiciones iniciales es de al menos 98% (obtenido de multiplicar los FA de cada componente en predicción).

3.5.4. Simulación de escenarios, rendimiento medio y turno técnico

El SCRM construido permite simular un número infinito de escenarios probables, por lo que es necesario establecer condiciones iniciales promedio para obtener las tablas de rendimiento medio. En este caso y tomando como base la supervivencia promedio al año uno (partiendo de 851 árboles plantados) es posible obtener predicciones por IS donde la edad base utilizada es 14 años y 30 m es el IS promedio (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.5. Predicción del crecimiento y rendimiento para tres índices de sitio a partir de un año de establecida la plantación y con una densidad inicial de 851 árboles por hectárea.

E	N	A			AB			V			IMA			ICA		
		IS			IS			IS			IS			IS		
		37	30	23	37	30	23	37	30	23	37	30	23	37	30	23
1	826	8.8	7.2	5.5	2.9	2.3	1.7	12.0	8.0	4.8	12.0	8.0	4.8			
2	802	16.1	13.1	10.0	8.7	6.8	4.9	54.8	36.7	22.1	27.4	18.3	11.0	42.8	28.6	17.2
3	778	21.3	17.2	13.2	13.5	10.5	7.7	104.2	69.7	41.9	34.7	23.2	14.0	49.3	33.0	19.8
4	755	25.0	20.3	15.5	17.1	13.3	9.7	148.3	99.2	59.6	37.1	24.8	14.9	44.1	29.5	17.7
5	733	27.7	22.5	17.2	19.8	15.4	11.2	184.6	123.5	74.3	36.9	24.7	14.9	36.3	24.3	14.6
6	711	29.8	24.2	18.5	21.7	16.9	12.3	213.6	142.9	85.9	35.6	23.8	14.3	29.0	19.4	11.7
7	690	31.4	25.5	19.5	23.1	18.0	13.1	236.5	158.2	95.1	33.8	22.6	13.6	22.9	15.3	9.2

E	N	A			AB			V			IMA			ICA		
		IS			IS			IS			IS			IS		
		37	30	23	37	30	23	37	30	23	37	30	23	37	30	23
8	670	32.7	26.5	20.3	24.2	18.8	13.7	254.4	170.2	102.3	31.8	21.3	12.8	17.9	12.0	7.2
9	650	33.8	27.4	21.0	24.9	19.4	14.1	268.2	179.5	107.9	29.8	19.9	12.0	13.9	9.3	5.6
10	631	34.7	28.1	21.5	25.4	19.8	14.4	278.9	186.6	112.2	27.9	18.7	11.2	10.7	7.1	4.3
11	613	35.4	28.7	22.0	25.7	20.1	14.6	287.0	192.0	115.4	26.1	17.5	10.5	8.1	5.4	3.3
12	594	36.0	29.2	22.4	25.9	20.2	14.7	293.0	196.1	117.8	24.4	16.3	9.8	6.0	4.0	2.4
13	577	36.5	29.6	22.7	26.0	20.3	14.8	297.3	199.0	119.6	22.9	15.3	9.2	4.3	2.9	1.7
14	560	37.0	30.0	23.0	26.1	20.3	14.8	300.3	200.9	120.8	21.4	14.4	8.6	2.9	2.0	1.2

Donde:

E = Edad en años.

N = Número de árboles por hectárea.

A = Altura dominante en metros.

AB = Área basal en $m^2 ha^{-1}$.

V = Volumen total en $m^3 ha^{-1}$.

IMA = Incremento medio anual en $m^3 ha^{-1}$.

ICA = Incremento corriente anual en $m^3 ha^{-1}$.

IS = Índice de sitio.

37, 30 y 23 = Índices de sitio a edad base de 14 años.

Las Figuras 3.3 y 3.4 ilustran el patrón de crecimiento en área basal y volumen total con corteza respectivamente con respecto a los datos de inventario por índice de sitio.

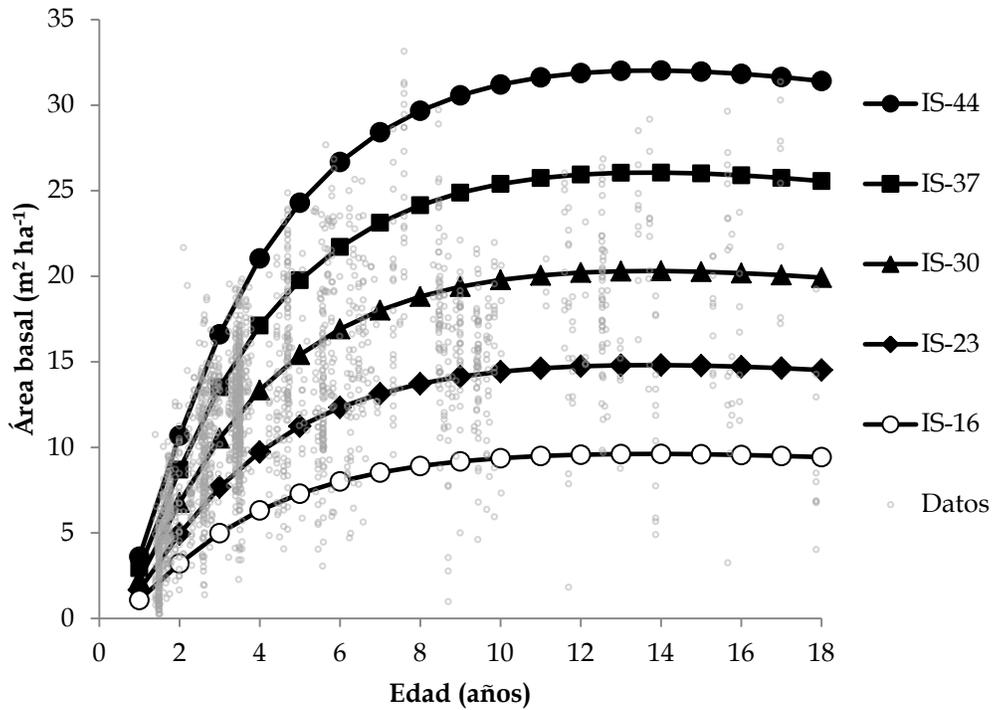


Figura 3.3. Curvas de desarrollo de área basal de las plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake para diferentes índices de sitio.

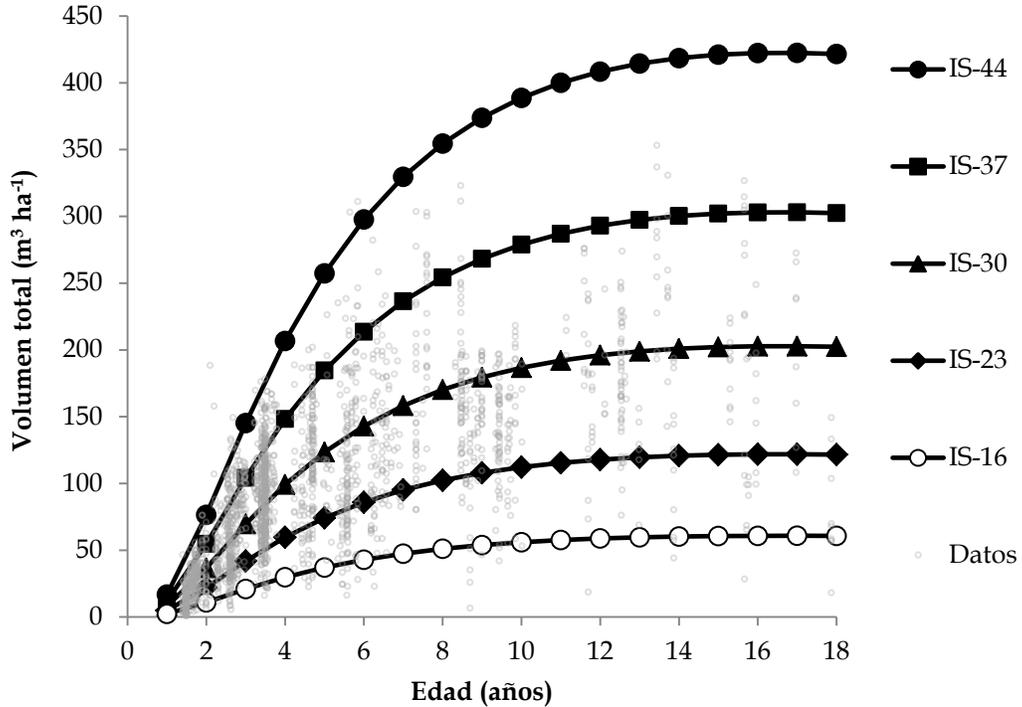


Figura 3.4. Curvas de rendimiento en volumen para los IS definidos en las plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Las proyecciones de IMA e ICA respecto a la edad (Cuadro 3.5), indican que el turno técnico (maximización de volumen) para estas plantaciones, independientemente del IS, se da a los 5 años. Si bien estas pueden adquirir mayor valor al aumentar las dimensiones de sus árboles, este aumento en valor debe de ser mayor que la tasa decremental de ganancia en volumen total a fin de hacer costeable alargar el turno (Figura 3.5).

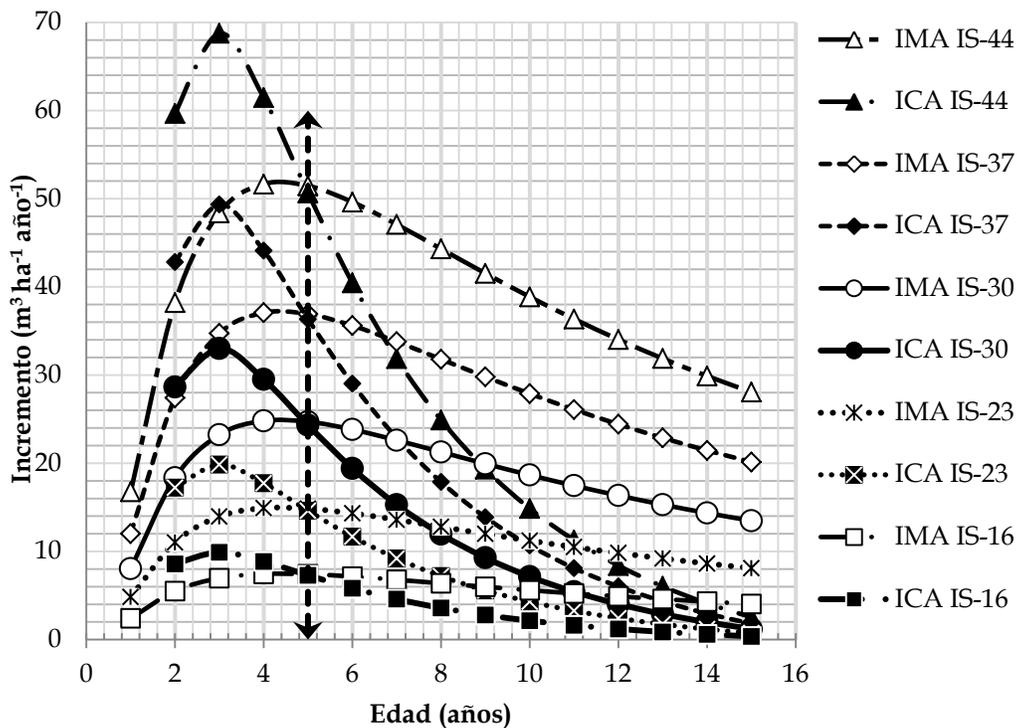


Figura 3.5. Incremento Medio Anual y Corriente Anual, por IS, para las plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

3.5.5. Supervivencia inicial y rendimiento maderable

A partir del modelo 19 es posible construir curvas de supervivencia equivalente que permiten evaluar el efecto de la supervivencia al año 1 en el rendimiento final (Figura 3.6). El modelo utilizado asume que la tasa de mortalidad relativa permanece constante por lo que es posible estimar cuales sitios tuvieron buena supervivencia inicial.

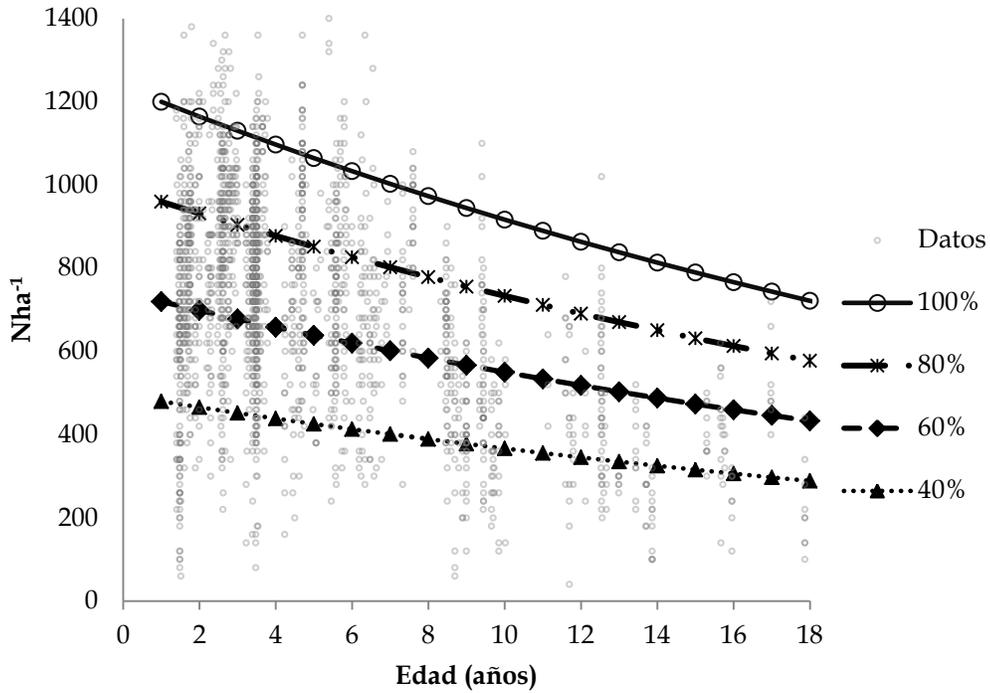


Figura 3.6. Escenarios de mortalidad para una densidad inicial de 1200 árboles por hectárea y cuatro curvas de supervivencia al año 1: 100%, 80%, 60% y 40%.

Obtener una buena supervivencia al año 1 es un factor crítico para garantizar el rendimiento futuro. Para simular estos escenarios de rendimiento se plantean tres posibles niveles de supervivencia al año 1: 90% (1080 árboles), 75% (900 árboles) y 50% (600). Se toma como referencia básica un sitio medio con IS 30 m (Figura 3.7).

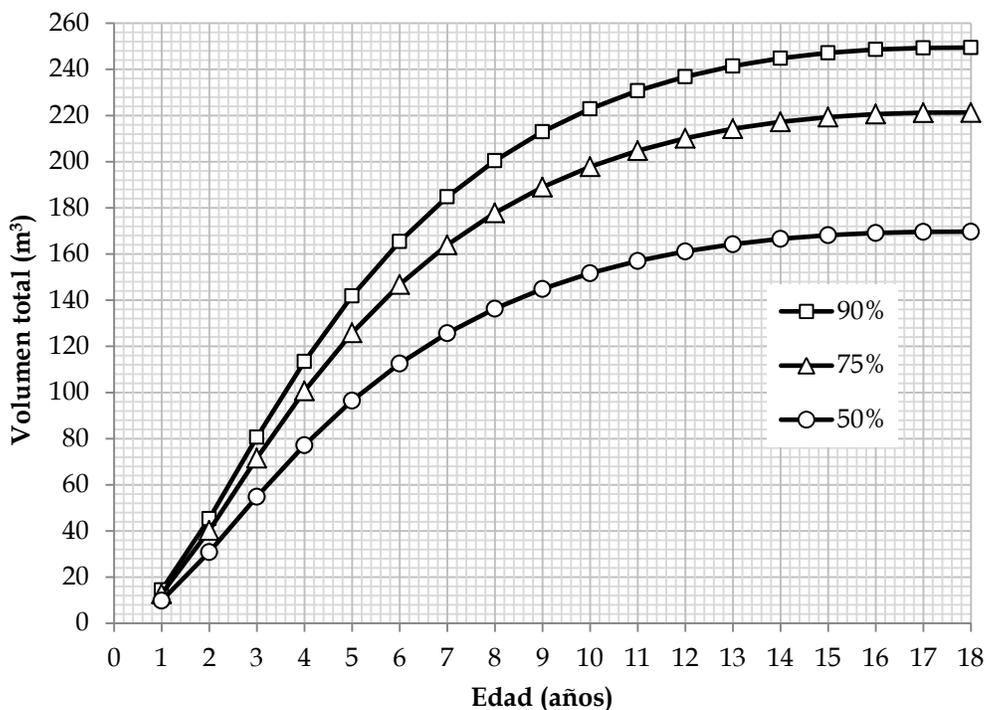


Figura 3.7. Variación en rendimiento total por hectárea estimado con base a supervivencias al año 1 de 90% (1080 árboles), 75% (900 árboles) y 50% (600) de un total de 1200 plantados.

Si se considera que la CONAFOR subsidia plantaciones con una supervivencia mínima de 70% (CONAFOR, 2008) y mínima del 80% (CONAFOR, 2011), los escenarios planteados dan idea del volumen de madera que se pierde o se gana si se garantiza un porcentaje intermedio a éstos (75%), inferior (50%) y superior (90%). De tal manera que se debe entender que el no garantizar una supervivencia del 90% representa, al año 5, una reducción de $15.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, es decir, un 11.3% menos de volumen. Esta diferencia se magnifica si la supervivencia al año 1 es del 50%, lo que implica que solo se coseche 68% del potencial —lo que se cosecharía con una supervivencia del 90% al año 5—.

A medida que aumenta la edad de la plantación y el IS, el efecto en el rendimiento final es más notorio, por ello es importante lograr una buena supervivencia inicial, particularmente en los sitios más productivos. Por ejemplo, en el $IS=37$ se obtendrían rendimientos al año 5 de 209.5, 186 y 142

$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para el 90, 75 y 50% de supervivencia al año 1, respectivamente. Es evidente que la proporción de pérdida de cosecha es similar al sitio medio, pero la pérdida en volumen absoluto, se vuelve considerablemente mayor.

El modelo de mortalidad resultó adecuado para el rango de los datos ya que provee resultados realistas de la mortalidad probable con una tasa de mortandad aproximada de 3%. Sin embargo a edades muy avanzadas (mas de 20 años) el modelo tendería a sobrestimar la mortalidad por lo que un piso de 150 arboles por ha es razonable para estimaciones más allá de los 15 años. Esto a fin de evitar que la simulación conduzca a una supervivencia cero.

Para los modelos de IS los patrones de crecimiento validados sugieren que las familias anamórficas de Hossfeld IV y Levakovic II son las mejores candidatas para estimar el crecimiento en altura dominante y aunque se cuenta con remediciones, un número mayor de sitios con remedición es deseable a fin de ajustar de manera simultánea el sistema predicción/proyección en altura dominante, como tradicionalmente se hace para garantizar compatibilidad completa (Galán *et al.*, 2008; Cieszewski *et al.*, 2000; Vargas *et al.*, 2010). Aumentar la cantidad de remediciones de una misma parcela permitiría ajustar el sistema con una estrategia propia de datos longitudinales, lo que actualmente se considera mas adecuado para robustecer la descripción del patrón de familias de IS (Calegario *et al.*, 2005). Evidentemente los datos provenientes de los sitios de inventario permiten estimaciones robustas para el patrón de altura dominante, por el amplio espectro de los datos que describen y que permite con pocas remediciones probar y validar familias de IS de manera aceptable.

Para el sistema de ecuaciones utilizado tanto para el área basal, como para la supervivencia residual y el volumen, se sigue una estructura clásica que puede ser enriquecida con la existencia de una mayor cantidad de sitios con remediciones (Chaves e Carvalho *et al.*, 2011). De manera similar a los modelos de IS, la gran variedad de información provista por los datos de inventario y el

resultado de las validaciones permiten concluir que el ajuste obtenido es suficientemente robusto para realizar proyecciones específicas. Indudablemente contar con datos de tipo experimental en relación a aclareos o prácticas silvícolas como fertilización y regímenes de control de vegetación competidora, permitirán no solo modelar los efectos de las mismas, sino realizar su evaluación económica. El sistema propuesto evalúa indirectamente la silvicultura utilizada hasta la fecha, por lo que cambios en la misma deben de registrarse y remedirse cuidadosamente para ser incluidos en el sistema. Como sugieren las proyecciones de la supervivencia residual, si no se mejora la supervivencia al año 1 se pueden tener pérdidas en volumen considerables, sobre todo en los sitios con mejor IS.

A la fecha, FOMEX cuenta con amplias zonas plantadas con clones, factor que no se consideró en el modelo, pues muchas veces no fue posible identificar los predios que están plantados con un solo clon, una mezcla de clones o mezclas clones-semilla. Para evitar resultados que pudieran ser inconsistentes se decidió utilizar un modelo general donde el efecto de los clones no es explícito y éste se absorbe en el modelo de IS.

Los modelos de IS permitieron evaluar que para el inventario del 2012; 71.8% de los sitios de muestreo son de IS-30 o mayor y que un 3.5% está por debajo de IS-23. Estos sitios de bajo potencial productivo deberían ser evaluados financieramente por la empresa dado que es altamente probable que los costos de la plantación superen los beneficios, como demostraron Téllez *et al.* (2008) para plantaciones de *E. urophylla* en la zona de María Lombardo, Oaxaca.

La determinación del turno técnico igual a 5 años, sugiere que las tasas relativas de incremento son muy similares a las que se tienen para *Eucalyptus grandis* en algunos lugares de Brasil, de Argentina y de la región Litoral y Centro de Uruguay (Fondo Nacional de Pre-inversión, 1994; Chaves e Carvalho *et al.*, 2011), donde las empresas plantadoras reportan turnos de 5-6 años con

rendimientos medios superiores a los 30 m³ ha⁻¹ año⁻¹. Contrariamente, las plantaciones de eucalipto en Bolivia tiene incrementos medios de 13 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (Guzmán *et al.*, 2012).

El modelo de proyección en área basal (17) permite simular aclareos, aunque las predicciones realizadas serán conservadoras (es decir, se tiende a subestimar la respuesta del área basal al aclareo). Para lograr estimaciones realistas del efecto de los aclareos se necesitan datos experimentales provenientes de parcelas con aclareos y remediciones para calibrar la respuesta efectiva. Una forma de compensar empíricamente es asumir que durante el primer año después del aclareo la tasa de mortalidad es cercana cero y esta se mantiene hasta antes del cierre de copas (Pienaar, 1979; Gonzalez *et al.*, 2012).

3.6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los modelos descritos para evaluar eficientemente la altura dominante, permiten implementarse en las plantaciones de eucalipto sin restricción de la fuente empleada en su producción, pudiendo adoptarse para la región o área de influencia, siempre que las características geográficas y condiciones de suelo y ambientales sean lo más semejantes posible.

El SCRM generado es adecuado para estimar el crecimiento y el rendimiento maderable en tiempo actual y futuro, inclusive permite determinar estados previos de crecimiento de las plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* del sureste mexicano y aporta información del turno óptimo sugerido. Los modelos Levakovic II y Hossfeld IV estiman eficientemente el crecimiento en altura dominante, permitiendo definir índices de sitio entre los 16 y 44 m a la edad de 18 años, siendo el índice de sitio promedio (30 m) el más representado en el área estudiada. Se estimó un turno técnico igual a 5 años en todos los predios plantados.

Casi el 80% de los predios medidos en el año 2012 entre el índice de sitio promedio y superior, algunos de los cuales fueron evaluados en el inventario del año 2008 y 2009, reflejando que mantienen su nivel de producción, y podría presumirse que con algunas actividades culturales serían más productivos, inclusive al nivel de predios de Brasil y Uruguay citados anteriormente. La maximización del volumen maderable de las plantaciones requiere que se garantice un porcentaje de sobrevivencia mayor al 75% a un año de establecida la plantación, además el turno o periodo de rotación según sugiere el sistema aquí generado es de 5 años y no de 7 como lo han venido haciendo en las cosechas de FOMEX, pues es un periodo de tiempo innecesario en el que el potencial productivo de los terrenos con altos niveles de producción son subutilizados.

Se recomienda mejorar las prácticas silvícolas que sumadas a mejores materiales vegetales y mejor elección de sitios permitirían en el corto plazo la definición de un paquete tecnológico que permita lograr rendimientos competitivos a nivel mundial. También establecer lotes experimentales con manejo operativo para evaluar el desempeño de los clones utilizados. Evidentemente la silvicultura clonal es la dirección a la que se dirige la empresa, pero es necesario contar con datos experimentales que permitan evaluar objetivamente las fuentes vegetales (Calegario *et al.*, 2004).

3.7. LITERATURA CITADA

- Avery, T. E. and H. E. Burkhart. 1983. Forest measurements. 3rd ed. McGraw-Hill. Nueva York. 331 p.
- Borders, B. E. 1989. Systems of equations in forest modelling. Forest Science 35: 548-556.
- Borders, B. E. and F. Jordan J. 1999. Loblolly and slash pine growth and yield prediction for regional timber supply projection algorithms. Southern Journal of Applied Forestry 23(4): 230-237.

- Calegario, N., R. F. Daniels, R. Maestri and R. Neiva. 2005. Modeling dominant height growth based on nonlinear mixed-effects model: a clonal Eucalyptus plantation case study. *For. Ecol. Manage.* 204:11-20.
- Chaves e Carvalho, S. de P., N. Calegario, F. Fonseca e Silva, L. A. Coimbra B., A. Ribeiro de M., M. Peres de L. 2011. Modelos não lineares generalizados aplicados na predição da área basal e volume de Eucalyptus clonal. *Cerne, Lavras.* 17(4): 541-548.
- Cieszewski, C. J. 1999. The algebraic difference approach improves fixed base-age site models based on Chapman-Richards function. PMRC Technical Report 9. Warnell School of Forest Resources. University of Georgia. 14 p.
- Cieszewski, C. J., M. Harrison and S. W. Martin. 2000. Practical methods for estimating non-biased parameters in self-referencing growth and yield models. PMRC Technical Report 7. Warnell School of Forest Resources. University of Georgia. 11 p.
- Cieszewski, C. J. and R. L. Bailey. 2000. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *Forest Science* 46:116-126.
- CONAFOR, 2008. Manual para la verificación de la propuesta técnica y ambiental de los beneficiarios de plantaciones (aspectos técnicos). Coordinación General de Producción y Productividad. Gerencia de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales. México. 26 p.
- CONAFOR, 2011. Lineamientos para la asignación y operación de apoyos a proyectos de plantaciones forestales comerciales. Comisión Nacional Forestal. 44 p.
- Clutter, J. L., J. C. Forston, L. V. Pienaar, G. H. Brister, and R.L. Bailey. 1983. *Timber management: a quantitative approach.* John Wiley & Sons, Inc. New York. 333 p.
- Daniel, T. W., J. A. Helms y F. S. Baker. 1982. *Principios de Silvicultura.* Traducción al español de Ramón Elizondo Mata. McGraw_Hill. México. 492 p.

- De Los Santos, P. H. M., M. Montero M. y M. Kanninen. 2006. Curvas dinámicas de crecimiento en altura dominante para *Terminalia amazonia* (Gmel.) Excell en Costa Rica. *Agrociencia* 40: 521-532.
- Fondo Nacional de Pre-inversión. 1994. Uruguay-Proyecto regional de alternativas para la inversión forestal. Dirección de Ganadería, Agricultura y Pesca. Uruguay.
<http://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea20s/begin.htm#Contents>
- Galán, L. R., H. M. De los Santos P. y J. I. Valdez H. 2008. Crecimiento y rendimiento maderable de *Cedrela odorata* I. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosques* 14 (2): 65-82.
- García, M. E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen; 4ta. Edición. México. 217 p.
- Gómez, T. J., H. M. De Los Santos P., A. M. Fierros G. y J. R. Valdez L. 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.
- Gonzalez, B. C. A., S. A. Gezan, D. J. Leduc, T. A. Martin, W. P. Cropper, Jr, and L. J. Samuelson. 2012. Modelling survival, yield, volume partitioning and their response to thinning for longleaf pine plantations. *Forests* 3:1104-1132.
- Guzmán, G. M. Morales, T. Pukkala and S. de-Miguel. 2012. A model for predicting the growth of *Eucalyptus globulus* seedling stands in Bolivia. *Forest Systems* 21(2): 205-209.
- Hughell, D. 2009. Modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento de: *Eucalyptus camaldulensis*, *Gliricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia* y *Leucaena leucocephala* en América Central. Apuntes. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
http://books.google.com.mx/books?id=gnVzafKHSXQC&pg=PA15&lpg=PA15&dq=modelos+para+predicci%C3%B2n+del+crecimiento+y+rendimiento+de+eucalyptus+camaldulensis&source=bl&ots=NFQVdb2QSO&sig=t5p1nTDj0Ov8uhKqX23dAzaAYJI&hl=es&ei=QURvSvrGLIGuNqWondUI&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=3 (Noviembre de 2011).

- Klepac, D. 1983. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Segunda Edición. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 365 p.
- Méndez, L. B. 2007. Sistema de cubicación en pie para árboles provenientes de semillas y clones de eucalipto en FOMEX. Tesis de Licenciatura Inédita. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Méndez, M. J. T., S. E. García D., B. Don Juan M., L. Ángel A. 2008. Diagnóstico fitosanitario en plantaciones forestales comerciales en Las Choapas, Veracruz y Huimanguillo, Tabasco. Comisión Nacional Forestal. Gerencia Nacional de Sanidad. Universidad Autónoma Chapingo. México. 97 p.
- Mendoza, B. M. A. 1993. Conceptos básicos de Manejo Forestal. UTEHA NORIEGA Editores. México. 161 p.
- Miranda, F. y E, Hernández X, 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. Boletín de la Sociedad Botánica de México. 176p.
- Piennar, L. V. 1979. An approximation of basal area growth after thinning based on growth in unthinned plantations. Forest Science 25 (2): 223-232.
- Reyes, V. J. R. 2006. Sistema de cubicación para *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en los estados de Veracruz y Oaxaca. Tesis de Licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 79 p.
- Santiago, G. W. 2009. Sistema de crecimiento y rendimiento para *Pinus patula* de Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 89 p.
- SAS Institute Inc. 2002. SAS/STAT® 9.0 User's Guide. SAS Institute Inc. NC.
- Schumacher, F. X. y F. S. Hall. 1933. Logarithmic expression of timber tree volume. J. Agric. Res. 47: 719-734.
- Sullivan, A. D. and J. L. Clutter. 1972. A simultaneous growth and yield model for loblolly pine. Forest Science 18: 76-86.

- Téllez, M. E., M. J. González G., H. M. De los Santos P., A. M. Fierros G., R. J. Lilieholm y A. Gómez G. 2008. Rotación óptima en plantaciones de eucalipto al incluir ingresos por captura de carbono en Oaxaca, México. *Fitotecnia Mexicana* 31 (2): 173-182.
- Torres, R. J. M. y O. S. Magaña T. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Editorial Limusa. México. 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.
- Vargas, L. B., J. G. Álvarez G., J. J. Corral R. y O. A. Aguirre C. 2010. Construcción de curvas dinámicas de índice de sitio para *Pinus cooperi* Blanco. *Fitotecnia Mexicana* 3: 343-351.
- Velázquez, M. A., A. M. Fierros G., A. Aldrete, A. Gómez G., H. M. De los Santos, M. González G., J. López U., T. Llanderal O. y S. Fernández C. 2009. Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. Comisión Nacional Forestal - Colegio de Postgraduados. México. 429 p.
- Weiskittel, R. A., D. W. Hann, D. E. Hibbs, Tzeng Yih, and A. A. Blumh. 2009. Modeling top height growth of red alder plantations. School of Forest Resources, University of Maine, United States. Department of Forest Engineering, Resources and Management, Oregon State University. Corvallis, United States. www.oregonstate.edu.
- Zepeda, B. M. y A. Domínguez. 1998. Niveles de incremento y rendimiento maderable de poblaciones naturales de *Pinus arizonica* Engl. de "El Poleo", Chihuahua. *Madera y bosques* 4(1): 27-39.

CAPÍTULO IV

4. DISTRIBUCIONES DIAMÉTRICAS PARA ESTIMAR CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO MADERABLE DE *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake USANDO DATOS DE INVENTARIOS OPERATIVOS

4.1. RESUMEN

Las plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* establecidas en el sureste de México cubren una superficie importante. Sin embargo no se cuenta con modelos confiables que permitan hacer predicciones del rendimiento maderable para optimizar su cosecha. Por esta razón, se decidió probar el método implícito de predicción del rendimiento con base a distribuciones diamétricas, utilizando datos dasométricos de 1973 sitios de inventarios temporales con rangos de edad de 1 a 18 años. El sistema se desarrolló tomando como base la distribución Weibull de tres parámetros y la distribución diamétrica libre basada en percentiles. Los resultados de ambos enfoques se contrastan con los obtenidos por el modelo de volumen comercial variable de Amateis *et al.* (1986) para la misma clasificación de productos, pero que no requiere de distribuciones diamétricas. La predicción implícita de volumen total basada en la función de densidad de probabilidades Weibull tiende a ser más conservadora en sus estimaciones respecto a la estimación basada en percentiles. Para la distribución de productos, en el volumen de celulosa, Weibull es el más optimista. El valor monetario estimado de las plantaciones tiende a diferenciarse a partir del año 7 en el cual el incremento en volumen de madera aserrada aumenta exponencialmente.

Palabras clave: predicción implícita, Weibull, percentiles, clasificación de productos.

GROWTH AND YIELD OF *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake BASED ON DIAMETER DISTRIBUTION METHODS USING OPERATIONAL INVENTORY DATA

4.2. ABSTRACT

Commercial forest plantations of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake located in southeast Mexico cover an important land surface of the total plantation area in the country, but there is a lack of reliable models to predict timber yield to optimize harvesting planning. Implicit yield prediction through diameter distributions using data from 1973 temporary plots in a chrono-sequence aged from 1 to 18 years was implemented. The system was developed based on the three-parameter Weibull pdf and the free-pdf percentile-based distribution. Both approaches were compared with variable-top merchantable volume equation proposed by Amateis *et al.* (1986). Implicit prediction of yield based in percentile was more optimistic than Weibull probability density function before the age of 7, however the last was less conservative on the estimation of pulpwood volume. At the age 7 the estimated non-discounted net income increases exponentially.

Key words: growth and yield, diameter distribution, implicit prediction, Weibull, Percentiles.

4.3. INTRODUCCIÓN

La superficie total de las plantaciones forestales comerciales en el mundo asciende a 187 millones de hectáreas que representa casi el 5% de la superficie forestal mundial (Velázquez *et al.*, 2009). A este nivel el *Eucalyptus* es el segundo género en importancia (10%: 13 millones de ha) antecedido por el género *Pinus* (20%: 25 millones de ha), a una tasa de plantación y replantación de 2 a 3 millones de ha anuales. Contrastando estos datos con lo hecho en México se tiene que la superficie forestal plantada es de 117,479 ha (0.08% de la superficie forestal nacional), distribuidas principalmente en los estados del sureste, manteniéndose la tendencia del eucalipto como un grupo de especies más utilizadas en estos cultivos con más de 20 mil ha establecidas (Martínez *et al.*, 2006; Velázquez *et al.*, 2009).

Actualmente, casi la totalidad de la cosecha proveniente de las plantaciones forestales comerciales de eucalipto se destina al consumo interno, básicamente para celulosa y astilla, con un mercado incipiente que trata de orientarse hacia la madera aserrada como lo indica el Programa Estratégico Forestal 2025 (CONAFOR, 2001). Por lo anterior, el manejo óptimo en plantaciones forestales comerciales de rápido crecimiento requiere de estimaciones confiables del rendimiento (cosecha probable a cierta edad) e incremento (tasa de cambio probable) en volumen de madera para establecer una estrategia de manejo y lograr una producción sostenida en el tiempo (Torres y Magaña, 2001).

Forestaciones Operativas de México S.A. de C.V. (FOMEX) es una empresa de plantaciones forestales comerciales con una superficie plantada de aproximadamente 10,000 ha con especies de rápido crecimiento como *Eucalyptus urophylla*, *E. grandis*, *E. urograndis*, *E. tereticornis* y *Gmelina arborea*, pero debido a que la mayor superficie plantada (cerca de 7,000 ha) está destinada a *E. urophylla*, se definió realizar la presente investigación

únicamente para esta especie. En una fase anterior se generó, ajustó y validó un sistema de crecimiento y rendimiento de predicción explícita que permite determinar eficientemente la productividad y producción total en volumen por ha (Roldán *et al.*, 2013). Buscando complementar dicho sistema en este trabajo se plantea incorporar los elementos de un sistema implícito que permitan obtener la distribución de productos maderables en dichas plantaciones y mejorar las estimaciones financieras de la misma (Clutter *et al.*, 1983; De la Fuente *et al.*, 1998; Bueno y Bevilacqua, 2011).

Existe una gran diversidad de métodos para modelar el crecimiento y rendimiento de bosques coetáneos uniespecíficos a través de distribuciones diamétricas, tales como A de Charlier, normal (2 y 3 parámetros), Beta, Gamma, SB de Johnson y Weibull (Avery y Burkhart, 1983; Clutter *et al.*, 1983; Kibet, 2009).

En este estudio se evalúan dos de los métodos más exitosos para describir la estructura diamétrica en rodales coetáneos puros, la distribución Weibull, por la amplia variedad de formas que puede modelar (Bailey y Dell, 1973; Borders *et al.*, 1987; Torres y Magaña, 2001; Acosta *et al.*, 1997; García *et al.*, 2002; Cao, 2004; Magaña *et al.*, 2008), y el método de percentiles (Borders *et al.*, 1987) que permite describir patrones de distribuciones diamétricas sin vincularlos directamente a una función de densidad de probabilidad (Tang *et al.*, 1997). Ambos métodos permiten estimar el número de árboles por unidad de área en cada categoría diamétrica, y mediante funciones de ahusamiento-volumen se obtiene la predicción del rendimiento por tipo de producto (celulosa, astilla y aserrío) (Rojo *et al.*, 2005; Diéguez *et al.*, 2006).

Para comparar estos métodos se toma como referencia al modelo de proporciones de Amateis *et al.* (1986) que permite estimar volumen comercial a diferentes diámetros mínimos en la punta sin el uso de distribuciones

diamétricas (Gadow *et al.*, 2007; Fonweban *et al.*, 2012). Los datos usados provienen de una crono-secuencia a partir de datos obtenidos para inventarios operativos de la empresa FOMEX.

4.4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.4.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló con datos de las plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake propiedad de la empresa FOMEX, establecidas en los municipios de Agua Dulce y Las Choapas, en el estado de Veracruz (17°55' de Latitud Norte y 94°06' de Longitud Oeste). El clima en la zona es cálido con una temperatura media de 27°C. Los tipos de vegetación existentes en el municipio son selva baja perennifolia y selva baja caducifolia. Otra parte de las plantaciones está en la región de Huimanguillo, Tabasco (17°19' de Latitud Norte y 93°23' de Longitud Oeste). El clima predominante es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y temperatura media anual de 26°C. En la zona existen áreas con vegetación diversa, encontrándose ecosistemas forestales de selva media perennifolia (Miranda y Hernández, 1963; García, 1988; Méndez *et al.*, 2008; Velázquez *et al.*, 2009). El proceso de establecimiento de plantaciones se inició desde 1994 cuyo objetivo ha sido la producción de material celulósico con miras a ampliar su mercado en un futuro próximo a maderas para aserrío.

4.4.2. Datos dasométricos

Se utilizaron en conjunto tres bases de datos con mediciones realizadas en un total de 224 predios (1,973 sitios rectangulares de 20×25 m). La primera se obtuvo en 2008 y comprende 49 predios cuya superficie es de 2,196 ha y 351 sitios. La base de 2009 incluye 135 predios en 4,784 ha y los sitios muestreados fueron 937. La base del 2012 en 97 predios con 4,339 ha comprende 685 sitios. El rango de las edades involucradas oscila entre 1 y 18 años. En cada sitio de inventario se midió el diámetro normal y la altura total de todos los árboles vivos.

4.4.3. Modelo explícito

En la fase previa de esta investigación, se generó el sistema de crecimiento y rendimiento maderable (SCRM) explícito en el que se generaron las siguientes expresiones matemáticas (Roldán *et al.*, 2013) para definir las variables de estado del sistema implícito, mismas que se describen a continuación:

$$A = \frac{34.8558}{1 + e^{1.3048 \times E^{-1.2163}}} \quad (1)$$

$$AB = e^{-4.9133} \times e^{\left(\frac{-0.7748}{E}\right)} \times A^{1.1893} \times N^{0.6218} \quad (2)$$

$$N_2 = N_1 \times e^{-0.0299 \times (E_2 - E_1)} \quad (3)$$

$$V = 0.8294 \times AB^{0.9923} \times A^{0.7357} \quad (4)$$

$$DQ = \sqrt{\frac{40,000}{\pi} \times \frac{AB}{N}} \quad (5)$$

Donde:

A = Altura dominante en metros.

E = Edad en años.

AB = Área basal en m^2ha^{-1} .

N = Número de árboles por hectárea.

N_2 = Número de árboles sobrevivientes por hectárea a la E_2 a partir de la edad de referencia E_1 .

V = Volumen total en m^3ha^{-1} .

DQ = Diámetro cuadrático en centímetros obtenido de manera implícita.

El diámetro cuadrático (DQ) es una variable fundamental en la predicción del rendimiento maderable mediante sistemas implícitos (Pienaar *et al.*, 1996; Chauchard, 2000). Con la finalidad de determinar la mejor estimación del diámetro cuadrático para los datos bajo estudio y mantener la compatibilidad con el sistema explícito, se decidió definir éste a partir de su forma meramente implícita (mediante el área basal: AB y el número de árboles: N , modelo 5).

4.4.4. Modelo de volumen comercial variable para distribución de productos

La evaluación de las existencias maderables en una plantación forestal requiere de expresiones o modelos matemáticos, llamadas ecuaciones de volumen, que basadas en una muestra objetivamente seleccionada y cuidadosamente medida, permiten estimar el volumen de los árboles en pie sobre la base de mediciones simples como diámetro y altura (Reyes, 2006). Para realizar la distribución de productos por árbol se utilizó el modelo de volumen comercial y ahusamiento compatible que permite obtener de manera simultánea el volumen comercial variable a cualquier punto del fuste. Dicha expresión es específica para las plantaciones de eucalipto de la empresa, la cual se generó por método destructivo midiendo 635 árboles de *Eucalyptus urophylla* y con los datos dasométricos recabados se ajustó y generó el modelo compatible de ahusamiento-volumen (Méndez, 2007), quedando de la siguiente forma:

$$V_c = 0.000066 \times D^{1.706446} H^{1.049807} - 0.000024 \times d^2 (H - h) \quad (6)$$

Cuya función compatible de ahusamiento está dada por:

$$d = \sqrt{\frac{0.000066}{0.000024} \times D^{1.706446} \times H^{\left(1.049807 - \frac{k}{0.000024}\right)} \times (H - h)^{\left(\frac{k - 0.000024}{0.000024}\right)}} \quad (7)$$

Donde:

V_c = Volumen comercial variable con corteza en m^3 .

D = Diámetro normal en centímetros.

H = Altura total en metros.

k = Constante de proporcionalidad; $k = \pi/40000$.

h = Altura dada en el fuste a un diámetro superior d en cm.

Con la función de ahusamiento es posible cubicar cualquier segmento del fuste (Rentería, 1995; Pompa y Solís, 2008) al despejar h de la ecuación (7), sobre todo cuando se establecen límites de punta no comercial y se sustituye este valor en el modelo (6), con el fin de conocer el volumen comercial acumulado. La expresión usada para evaluar los datos de inventario queda entonces de la siguiente manera:

$$h = H - \left[\frac{d^2}{\frac{0.000066}{0.000024} \times D^{1.706446} \times H \left(\frac{1.049807 - k}{0.000024} \right)} \right]^{\frac{0.000024}{k - 0.000024}} \quad (8)$$

La distribución de productos usada se basa en las dimensiones de los árboles, considerando un límite comercial a la punta del fuste de 8 cm. Para celulosa el límite superior es de 8 cm y el inferior de 15 cm; éste a su vez, es el superior para la astilla y el inferior a los 25 cm. El límite superior de punta para aserrió es 25 cm y el inferior los diámetros mayores a éste.

4.4.5. Distribución diamétrica basada en la fdp Weibull

Para realizar la predicción implícita del rendimiento actual y proyectarlo se implementó la metodología con base al enfoque de distribuciones sugerido por Clutter *et al.* (1983). Las distribuciones teóricas se obtuvieron con la función de densidad de probabilidad (fdp) Weibull de tres parámetros (9); con los parámetros: a de localización, b de escala y c de forma. Los parámetros b y c siempre son positivos. El parámetro a , puede tomar valores negativos, cero o positivos, pero se limita a ser positivo para representar una distribución de diámetros y se refiere al valor mínimo de la variable.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{c}{b} \left(\frac{x-a}{b} \right)^{c-1} \times e \left[-\left(\frac{x-a}{b} \right)^c \right], & (a \leq x \leq \infty) \\ 0, & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (9)$$

Donde:

$f(x)$ = Densidad de probabilidad.

Las demás variables ya fueron definidas.

Una expresión de forma analítica cerrada de la función de distribución acumulada está dada por:

$$f(x) = 1 - e \left[-\left(\frac{x-a}{b} \right)^c \right] \quad (10)$$

Esta relación puede establecerse de la siguiente forma: si una población tiene una distribución Weibull, la proporción de la misma con valores superiores a I (diámetro menor en una clase) y menor que S (diámetro superior a una clase) está dada por la expresión:

$$P(I < x < S) = e\left[-\left(\frac{I-a}{b}\right)^c\right] - e\left[-\left(\frac{S-a}{b}\right)^c\right] \quad (11)$$

Cuando los parámetros de la distribución Weibull ya han sido estimados, se puede obtener la proporción de árboles por clase de diámetro, mediante la aplicación de la expresión anterior. Para el estudio se consideraron categorías diamétricas de 5 cm aunque las categorías pueden ser de cualquier amplitud.

Para la estimación de las distribuciones diamétricas, los tres percentiles siguientes centrados en el diámetro cuadrático, son los que ajustaron mejor en una regresión contra el diámetro cuadrático:

$$p0 = \alpha_0 \times DQ^{\alpha_1} \times A^{\alpha_2} \times E^{\alpha_3} \times AB^{\alpha_4} \quad (12)$$

$$p63 = \alpha_0 \times DQ^{\alpha_1} \quad (13)$$

$$p95 = \alpha_0 \times p0^{\alpha_1} \times A^{\alpha_2} \times E^{\alpha_3} \times N^{\alpha_4} \times DQ^{\alpha_5} \quad (14)$$

Donde:

$p0$, $p63$ y $p95$ = Percentiles 0, 63 y 95 de la distribución diamétrica.

α_i ;= Parámetros a estimar.

Las demás variables ya fueron definidas.

Los percentiles se utilizan para la recuperación de parámetros de una distribución Weibull. Bajo el criterio de Pienaar *et al.* (1996), dichos parámetros fueron estimados por el método de momentos:

Primero se obtuvo el parámetro de localización a , mediante la siguiente consideración:

$$\begin{cases} \hat{a} = D_0 - 2.5 ; \text{ sí } D_0 \geq 2.5 \\ \hat{a} = D_0/2.5 ; \text{ sí } D_0 < 2.5 \end{cases} \quad (15)$$

Una vez conocido el parámetro a es posible determinar el c o parámetro de forma:

$$\hat{c} = \frac{\ln\left[\frac{-\ln(1-0.95)}{-\ln(1-0.63)}\right]}{\ln\left[\frac{(p95-\hat{a})}{(p63-\hat{a})}\right]} \quad (16)$$

Por último, se calcula el parámetro de escala b , ya que requiere el valor de los previos:

$$\hat{b} = -\hat{a} \times \left(\frac{\Gamma_1}{\Gamma_2}\right) + \left[\left(\frac{\hat{a}}{\Gamma_2}\right)^2 \times (\Gamma_2^2 - \Gamma_1) + \left(\frac{DQ^2}{\Gamma_2}\right)\right]^{0.5} \quad (17)$$

Donde:

D_0 = Percentil 0, corresponde al diámetro mínimo en cm.

$\ln(\cdot)$ = Logaritmo natural.

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

Las demás variables ya fueron definidas.

4.4.6. Distribución diamétrica basada en percentiles

El método describe un sistema de percentiles basados en una distribución uniforme para conocer el número de árboles por clase de diámetro por unidad de superficie entre los percentiles adyacentes (Borders *et al.*, 1987). En el presente trabajo, se empleó dicha metodología para generar un sistema implícito de crecimiento y rendimiento basado en percentiles que fueron construidos como sigue:

$$P_n = (\text{atributos de rodal}) \quad (18)$$

Donde:

P_n = n-ésimo percentil de la distribución.

Para ajustar el sistema de ecuaciones por mínimos cuadrados ordinarios, éste se formuló con base a un percentil definido como guía que generalmente logró el mejor ajuste posible de grupo de percentiles observados y en donde:

$$\begin{cases} P_g = (\text{atributos de rodal}) \\ P_{g+i} = (P_g, \text{atributos de rodal}) \end{cases} \quad (19)$$

Donde:

P_g = Percentil guía.

P_{g+1} = Percentiles que se relacionan con P_g y conforman el conjunto de ecuaciones del sistema siempre y cuando haya j percentiles más pequeños que P_g y k percentiles más grandes que P_g .

Por lo tanto,

$$i = -j, -j+1, \dots, -1, 1, 2, \dots, k.$$

Considerando la distribución diamétrica, se definieron nueve percentiles centrados en el diámetro cuadrático; el percentil 65 fue el que presentó mejor ajuste, por lo que se definió como el guía o conductor del sistema. A partir de éste se generó una ecuación por percentil definido, destacando que el percentil cero corresponde al diámetro mínimo y en consecuencia, el percentil cien se refiere al diámetro máximo de los datos bajo estudio, quedando conformado el sistema de predicción por percentiles de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 p_{65} &= \beta_1 + \beta_2 \times DQ + \beta_3 \times \left(\frac{1}{E}\right) \\
 p_{80} &= p_{65} + \beta_4 \times DQ \\
 p_{90} &= p_{80} + \beta_5 \times DQ \\
 p_{100} &= p_{90} + \beta_6 \times DQ \\
 p_{50} &= p_{65} + \beta_7 \times DQ \\
 p_{40} &= p_{50} + \beta_8 \times DQ \\
 p_{30} &= p_{40} + \beta_9 \times DQ \\
 p_{15} &= p_{30} + \beta_{10} \times DQ \\
 p_0 &= p_{15} + \beta_{11} \times DQ
 \end{aligned} \tag{20}$$

Donde:

p_i = Percentiles del sistema.

β_i = Parámetros a estimar.

Las demás variables ya fueron definidas.

Después de obtener el grupo de percentiles que conforman el sistema, se retomaron las clases diamétricas para distribuir los árboles uniformemente en los percentiles seleccionados, dicha distribución se hizo con base en:

$$N_k = \left\{ \frac{P_i - ID_k}{P_i - P_{i-1}} \times (t_i - t_{i-1}) + (t_j - t_i) + (t_{j+1} - t_j) \times \frac{SD_k - P_j}{P_{j+1} - P_j} \right\} \times N \tag{21}$$

Donde:

$$P_{i-1} < ID_k < P_i$$

$$P_j < SD_k < P_{j+1}$$

N_k = Número de árboles por hectárea en la k-ésima clase de categoría diamétrica.

ID_k = Límite inferior de la k-ésima categoría diamétrica.

SD_k = Límite superior de la k-ésima categoría diamétrica.

P_i, P_{i-1} y P_j, P_{j+1} = Percentiles adyacentes en el sistema, bajo la consideración siguiente ($P_i > P_{i-1}$ y $P_j < P_{j+1}$).

$t_i, t_{i-1}, t_j, t_{j+1}$ = Proporción de árboles por clase de la categoría diamétrica de los percentiles adyacentes.

N = Número de árboles sobrevivientes a través de los años, obtenida de la predicción explícita.

4.4.7. Modelo de volumen comercial sin distribuciones diamétricas

La principal característica útil de los dos enfoques previamente descritos es que permiten estimar la distribución de productos con base en diámetros mínimos de corta y con la ayuda de un modelo de ahusamiento también de diámetros de punta (Burkhart y Tomé, 2012). Se consigue al reconstruir la estructura de diámetros de la población, sin embargo la cantidad de cálculos a realizar por unidad de manejo puede resultar considerable.

En contraparte a este enfoque se han desarrollado modelos de partición a nivel de rodal (Amateis *et al.*, 1986) que permiten fraccionar el volumen total sin tener que conocer de manera directa las distribuciones diamétricas (Pienaar *et al.*, 1990). En este estudio se utilizó también este enfoque a partir de la función de razón para rodal que permite obtener el volumen hasta un determinado diámetro de punta (d) definida como:

$$V_{Dm,d} = V \times e \left[-\lambda_1 \times \left(\frac{d}{DQ} \right)^{\lambda_2} - \lambda_3 \times N^{\lambda_4} \times \left(\frac{Dm}{DQ} \right)^{\lambda_5} \right] \quad (22)$$

Donde:

$V_{Dm,d}$ = Volumen comercial por ha a un diámetro mínimo de punta (d) para árboles con $Dn \geq Dm$ a una altura comercial, en m^3ha^{-1} .

d = Diámetro de punta en cm.

Dm = Diámetro mínimo de corta en cm.

D_n = Diámetro normal en cm.

λ_i = Parámetros a estimar.

Las demás variables ya fueron definidas.

Para ajustar este modelo se requiere obtener en cada sitio el volumen total con corteza en m^3ha^{-1} así como el diámetro de punta, el diámetro cuadrático, el diámetro mínimo de corta, el número de árboles por hectárea y el volumen estimado para cada par de dimensiones relacionadas a d y D_m , mismos que son los límites inferiores y superiores de la clasificación de productos establecida, e indican la proporción de madera por tipo de producto.

4.4.8. Prueba de bondad de ajuste de la fdp Weibull

Se empleó la prueba de Kolmogorov-Smirnov por ser la más habitual para comprobar la bondad de ajuste de la distribución empírica de una muestra aleatoria a un modelo distribucional teórico. Las hipótesis son:

$$H_0: G(x) = F_{teórica}(x) \text{ vs. } H_1: G(x) \neq F_{teórica}(x); \text{ para al menos una } x \quad (23)$$

Donde:

$G(x)$ = Función de distribución empírica (o de los valores observados).

$F_{teórica}(x)$ = Función de distribución teórica especificada.

La prueba es sensible a cualquier diferencia entre las distribuciones, por lo que el estadístico se basa en la máxima diferencia entre las dos distribuciones y se define como la máxima distancia vertical entre $G(x)$ y $F_{teórica}(x)$. El estadístico D_n de Kolmogorov-Smirnov es:

$$D_n = \sup |F_n(x) - F(x)|_i \quad (24)$$

Es decir, para un i -ésimo sitio se debe obtener la máxima diferencia entre las frecuencias acumuladas del modelo y de la distribución real. El valor del estadístico calculado se debe comparar con el tabulado. Se evaluó para los niveles de significancia 0.05, 0.10 y 0.20 para determinar el número de sitios no ajustados a la distribución.

4.4.9. Ajuste de los sistemas de predicción

El ajuste de las ecuaciones empleadas en el sistema implícito basado en la función de densidad de probabilidad de Weibull y el modelo de Amateis *et al.* (1986), se hizo utilizando el método de mínimos cuadrados ordinarios. El sistema de ecuaciones en la distribución diamétrica basada en percentiles se ajustó de manera simultánea mediante la técnica de regresión aparentemente no correlacionada (SUR, por sus siglas en inglés), en el paquete de análisis estadístico SAS/STAT® 9.0 (SAS Institute Inc., 2002). La técnica SUR de estimación de parámetros produce estimadores consistentes y asintóticamente eficientes en presencia de correlaciones contemporáneas (Borders *et al.*, 1987, Galán *et al.*, 2008). Los valores bajos de los cuadrados medios del error y los valores elevados de los coeficientes de determinación, así como la significancia de los parámetros, fueron los criterios que se emplearon para juzgar la calidad del ajuste.

4.4.10. Evaluación de sistemas

Una vez obtenidas las estimaciones de volumen total de los sistemas implícitos, se decidió compararlos con el modelo explícito previamente generado, a fin de discernir qué método es mejor en sus predicciones y no sólo por los criterios de evaluación. En este caso, se graficaron las estimaciones volumétricas contra la edad y se verificó a través de la prueba de comparación múltiple de Tukey. La prueba de hipótesis fue la siguiente: H_0 : Las predicciones de volumen total para todos los métodos evaluados son iguales. H_1 : Al menos una predicción de volumen total estimado es diferente. Con una confiabilidad de 95%.

4.4.11. Comparación de la distribución de productos

Procedimiento similar se realizó respecto a la predicción de volumen comercial o por tipo de producto, comparando las estimaciones obtenidas vía los métodos implícitos que asumen distribución diamétrica y aquel que no hace uso de ésta (razón de volumen), bajo las mismas consideraciones que en el caso anterior.

4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.5.1. Sistema de predicción implícita basado en la fdp Weibull

Los parámetros estimados así como los criterios estadísticos de evaluación del ajuste de las ecuaciones que predicen los percentiles de la distribución diamétrica de las plantaciones de eucalipto (*E. urophylla* S. T. Blake) se muestran en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Criterios de ajuste y parámetros estimados de las ecuaciones que predicen los percentiles de la fdp de Weibull en las plantaciones de eucalipto.

Ecuación	Parámetros estimados	Error estándar	Valor t	Suma de Cuadrados del Error (SCE)	Cuadrado Medio del Error (CME)	R ²	Pr> t
(12)	$\alpha_0 = 0.4508$	0.0339	13.30	6421.0	3.2627	0.7122	<.0001
	$\alpha_1 = 1.6959$	0.0417	40.69				<.0001
	$\alpha_2 = -0.4371$	0.0397	-11.02				<.0001
	$\alpha_3 = -0.0688$	0.0160	-4.31				<.0001
	$\alpha_4 = -0.1249$	0.0119	-10.52				<.0001
(13)	$\alpha_0 = 1.0449$	0.0113	92.44	1486.4	0.7541	0.9734	<.0001
	$\alpha_1 = 1.0020$	0.0038	267.32				<.0001
(14)	$\alpha_0 = 2.0191$	0.1100	18.36	6517.6	3.3135	0.9342	<.0001
	$\alpha_1 = -0.0526$	0.0072	-7.33				<.0001
	$\alpha_2 = 0.1849$	0.0174	10.60				<.0001
	$\alpha_3 = 0.1098$	0.0067	16.53				<.0001
	$\alpha_4 = -0.0220$	0.0053	-4.12				<.0001
	$\alpha_5 = 0.6759$	0.0234	28.90				<.0001

Las ecuaciones mostradas en el Cuadro 4.1 fueron primordiales en la determinación de los parámetros de la fdp Weibull, además, el parámetro de localización a de la distribución diamétrica, fue la base para el cálculo del parámetro de forma c , y éste último permitió el cálculo del parámetro de escala

b. Los parámetros de la fdp Weibull son dependientes de las variables de estado: diámetro mínimo y diámetro cuadrático del rodal, por lo que, de proyectarse dichas variables en el tiempo, se “recupera” o conoce el valor de estos parámetros a una edad de interés (Pienaar *et al.*, 1996; De la Fuente *et al.*, 1998).

Lo percentiles 63 y 95 se estimaron eficientemente (ecuaciones 13 y 14; Cuadro 4.1); dicho par fue de utilidad para la determinación del parámetro *c*. Santiago *et al.* (2013) obtuvo mejor ajuste para el par de percentiles 50 y 90. García *et al.* (2002) empleó el 17 y el 97 por el buen ajuste obtenido y Pienaar *et al.* (1996) consideró los percentiles 24 y 93. Por lo que puede observarse que en la mayoría de los casos se emplea un percentil superior o igual a 90%.

La bondad de ajuste de las distribuciones observadas se hizo con base al estadístico de Kolmogorov-Smirnov para el nivel de significancia básico del 5% y para dos niveles más estrictos (10 y 20%), siendo el último el más exigente se ilustra en el Cuadro 4.2.

Cuadro 4.2. Sitios rechazados por la falta de ajuste de su distribución diamétrica a la función Weibull para tres niveles de significancia (Prueba de K-S).

α	Sitios rechazados	Proporción de rechazo (%)
0.20	164	8.3
0.10	147	7.5
0.05	134	6.8

Aún para el nivel de significancia más estricto, el 91.7% de los sitios responde adecuadamente al modelo propuesto, en contraste con el menos restrictivo que muestra un buen ajuste al modelo ensayado en el 93.2% de los sitios evaluados. Estos resultados son mucho mejores que los reportados por García *et al.* (2002) quienes en plantaciones de *Pinus pinea* con valores de α de 0.05 y 0.20 tienen una proporción de rechazo de 18 y 24%, respectivamente.

Una vez conocidas las variables anteriores para el sitio promedio (IS-30) a una edad de referencia de 14 años, densidad inicial de 1200 árboles por hectárea y DQ calculado de manera indirecta, se estimaron los parámetros de la fdp Weibull y se obtuvo la proporción de árboles por categoría diamétrica (Figura 4.1).

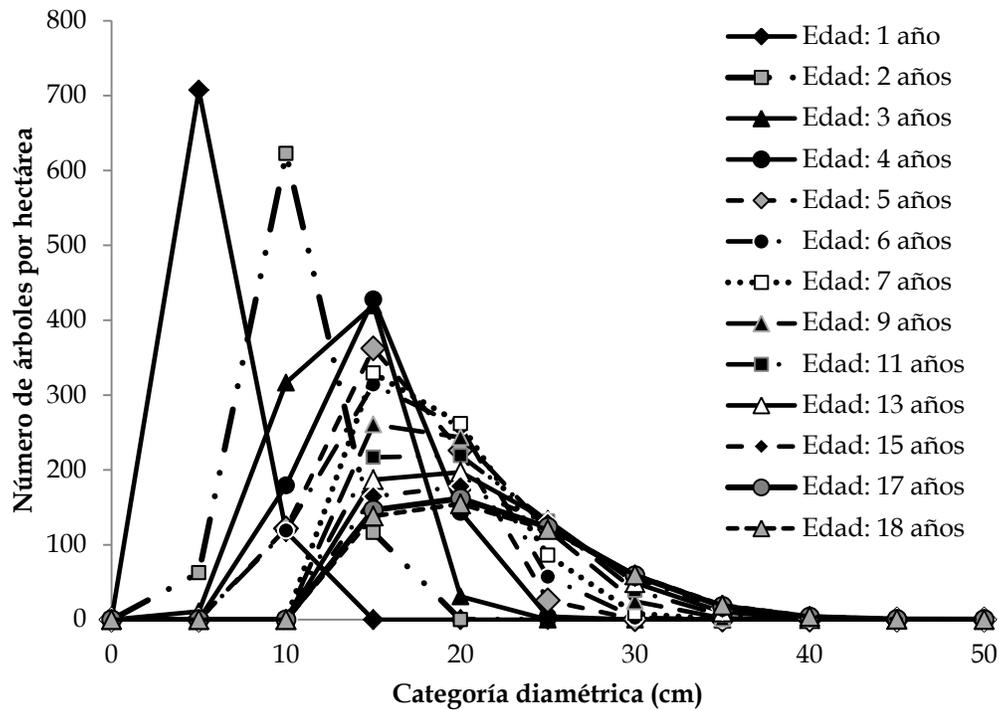


Figura 4.1. Proporción de árboles por hectárea por categoría diamétrica basada en fdp Weibull.

Para completar la predicción implícita basada en la fdp Weibull es necesario obtener el rendimiento en volumen por categoría diamétrica en cada edad y sumarla para obtener el valor por ha (Pienaar *et al.*, 1996). Se estima también el volumen total y se compara con la distribución de productos descrita (Figura 4.2).

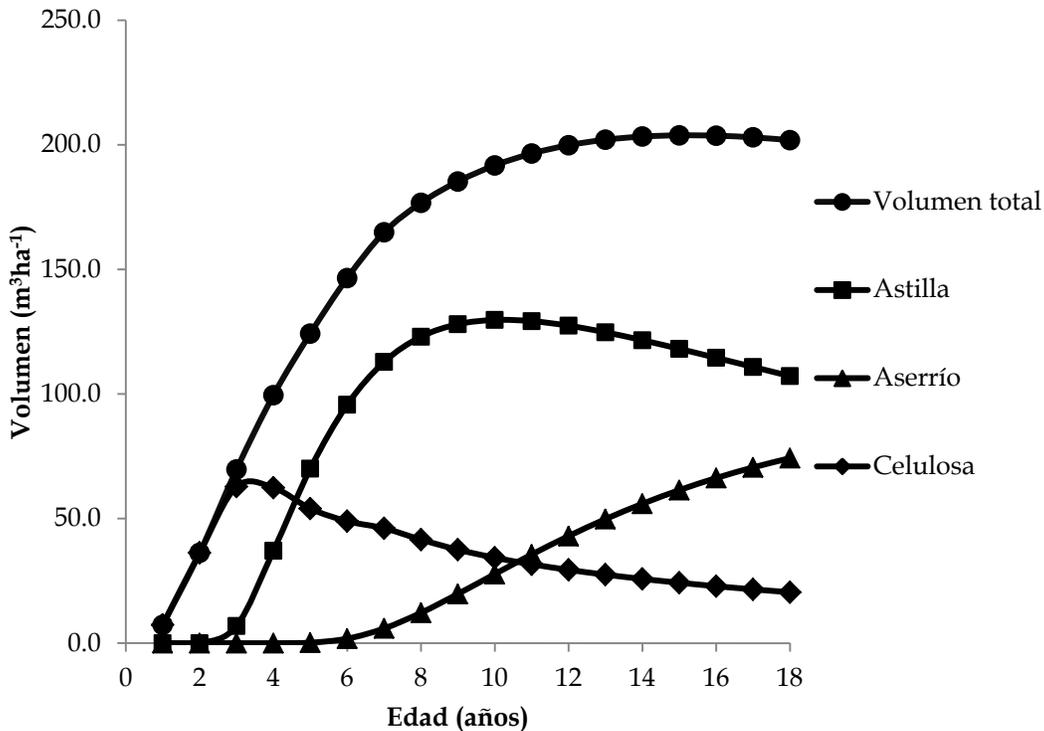


Figura 4.2. Rendimiento en volumen maderable para las categorías diamétricas establecidas basado en la fdp Weibull.

De la Figura 4.2 se deduce que el volumen total comercial a la edad del turno técnico (5 años) (Roldán *et al.*, 2013) es de 124 m³ ha⁻¹. Del cual, la mayor proporción de madera es para astilla o chip (56.4%) y el 43.5% corresponde a celulosa o pulpa. A esta edad, el volumen maderable para aserrío es prácticamente imperceptible, sin embargo ya se destina una cantidad a este producto.

4.5.2. Sistema de predicción implícita basada en percentiles

En el sistema implícito basado en percentiles, el percentil 65 de la distribución diamétrica fue el que mejor se ajustó al DQ a través de un modelo de regresión lineal ($R^2=0.9822$), de tal manera que el sistema de nueve ecuaciones se generó en torno a él. En el Cuadro 4.3 se muestran los estadísticos de ajuste y estimados de los parámetros de las ecuaciones que conforman el sistema de predicción de percentiles:

Cuadro 4.3. Estadísticas de ajuste y parámetros estimados de las ecuaciones que conforman el sistema de predicción implícita basada en percentiles.

Ecuación	Suma de Cuadrados del Error (SCE)	Cuadrado Medio del Error (CME)	Parámetros estimados	Error estándar	Valor t	R ²	Pr> t
(20) p65	1026.9	0.522	$\beta_1 = -0.080$ $\beta_2 = 1.068$ $\beta_3 = 0.134$	0.026 0.002 0.033	-3.06 700.54 4.10	0.9822	<.0001
(20) p80	2115.6	1.073	$\beta_4 = 0.102$	0.001	69.93	0.9700	<.0001
(20) p90	2994.9	1.519	$\beta_5 = 0.097$	0.002	55.77	0.9651	<.0001
(20) p100	8255.2	4.188	$\beta_6 = 0.161$	0.003	55.84	0.9217	<.0001
(20) p50	1513.3	0.768	$\beta_7 = -0.092$	0.001	-74.28	0.9681	<.0001
(20) p40	778.3	0.395	$\beta_8 = -0.060$	0.001	-67.38	0.9814	<.0001
(20) p30	1121.7	0.569	$\beta_9 = -0.066$	0.001	-62.20	0.9690	<.0001
(20) p15	2104.5	1.067	$\beta_{10} = -0.118$	0.001	-80.96	0.9266	<.0001
(20) p0	4841.6	2.456	$\beta_{11} = -0.186$	0.002	-83.86	0.7826	<.0001

El sistema de predicción de percentiles posee buen ajuste y alta significancia en cada una de las ecuaciones que lo conforman, situación que permite explicar del 78.2 al 98.2% de la variación total en la distribución diamétrica. Borders *et al.* (1987) con datos provenientes de *Pinus ellioti* también emplearon en su sistema el percentil 65 como guía, la diferencia en este caso radica en que éste estuvo integrado por 12 ecuaciones para los 12 percentiles seleccionados para modelar las distribuciones diamétricas y el número de árboles incluido en cada una. Santiago *et al.* (2013) utilizaron el percentil 50 como el guía y su sistema estuvo integrado por 8 ecuaciones de los percentiles adyacentes. La proporción de árboles calculada por este método para cada categoría diamétrica mediante la aplicación de la ecuación 21, puede observarse en la Figura 4.3.

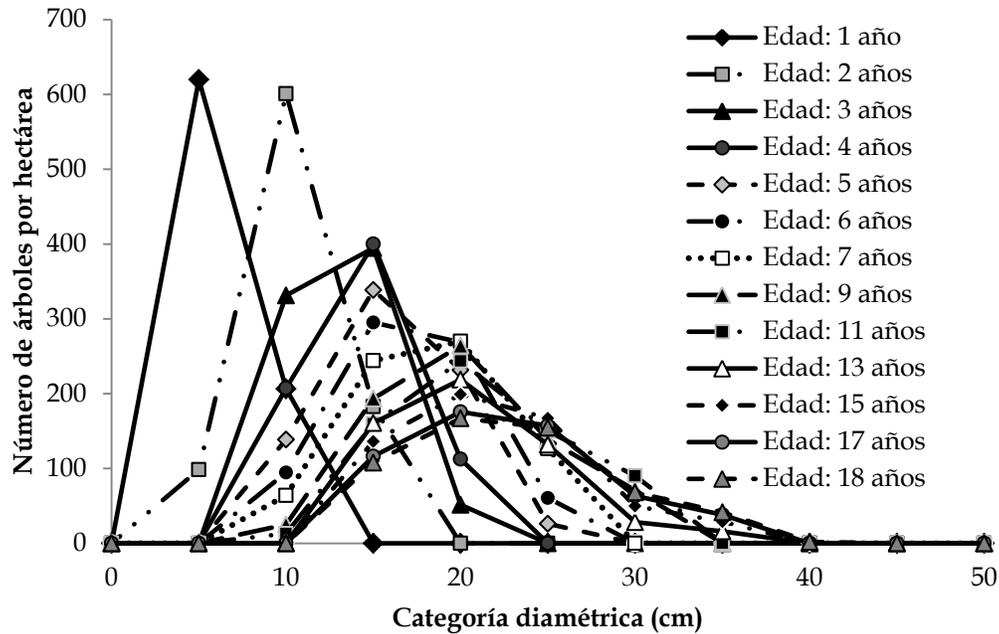


Figura 4.3. Proporción de árboles por hectárea por categoría diamétrica basada en percentiles.

En la Figura 4.4 se expresa la predicción del rendimiento maderable por el método de percentiles. Proporción de árboles por categoría diamétrica.

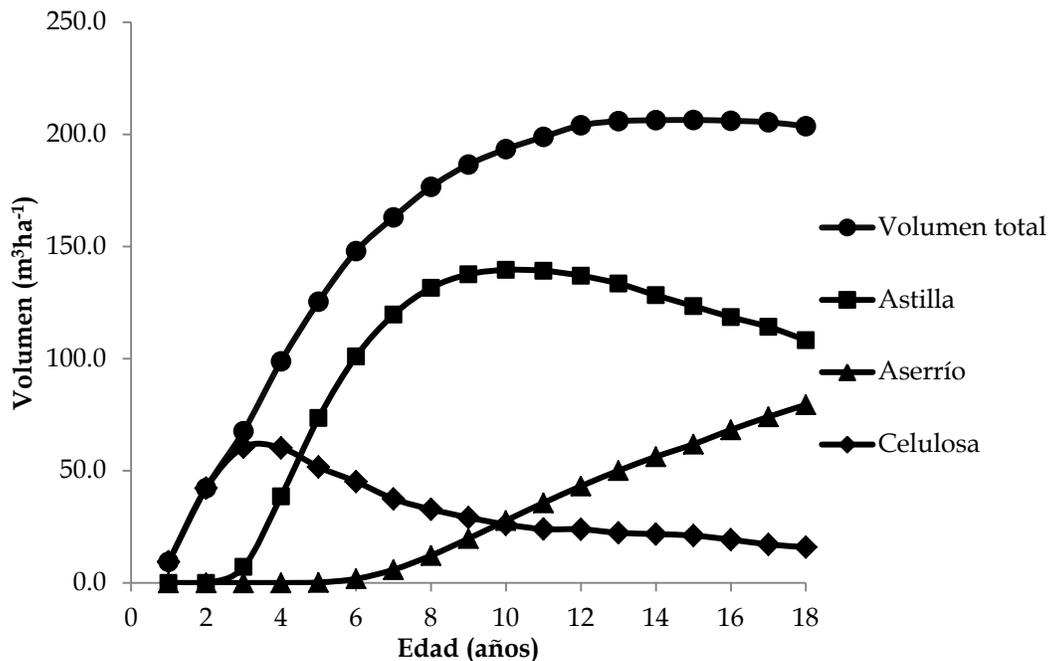


Figura 4.4. Rendimiento en volumen maderable para las categorías diamétricas establecidas basado en la predicción de percentiles.

4.5.3. Volumen comercial vía modelo de razones de volumen

La distribución de productos a partir del volumen total, se determinó mediante la ecuación de predicción de volumen comercial propuesta por Amateis *et al.* (1986) (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4. Parámetros estimados y estadísticas de ajuste del modelo de volumen comercial propuesto por Amateis *et al.* (1986)

Ecuación	Parámetros estimados	Error estándar	Valor t	Suma de Cuadrados del Error (SCE)	Cuadrado Medio del Error (CME)	R ²	Pr> t
(22)	$\lambda_1 = 0.2409$	0.0518	4.65	347767	58.0095	0.9870	<.0001
	$\lambda_2 = 1.6433$	0.1759	9.34				<.0001
	$\lambda_3 = 0.1115$	0.0111	10.09				<.0001
	$\lambda_4 = 0.1896$	0.0152	12.45				<.0001
	$\lambda_5 = 5.5116$	0.0448	123.02				<.0001

En el Cuadro 4.4 se observa que el modelo propuesto se ajusta adecuadamente a los datos bajo estudio. Para un índice de sitio promedio de 30 m definido por la predicción explícita, la aplicación del modelo ofrece la distribución de productos ilustrada en la Figura 4.5.

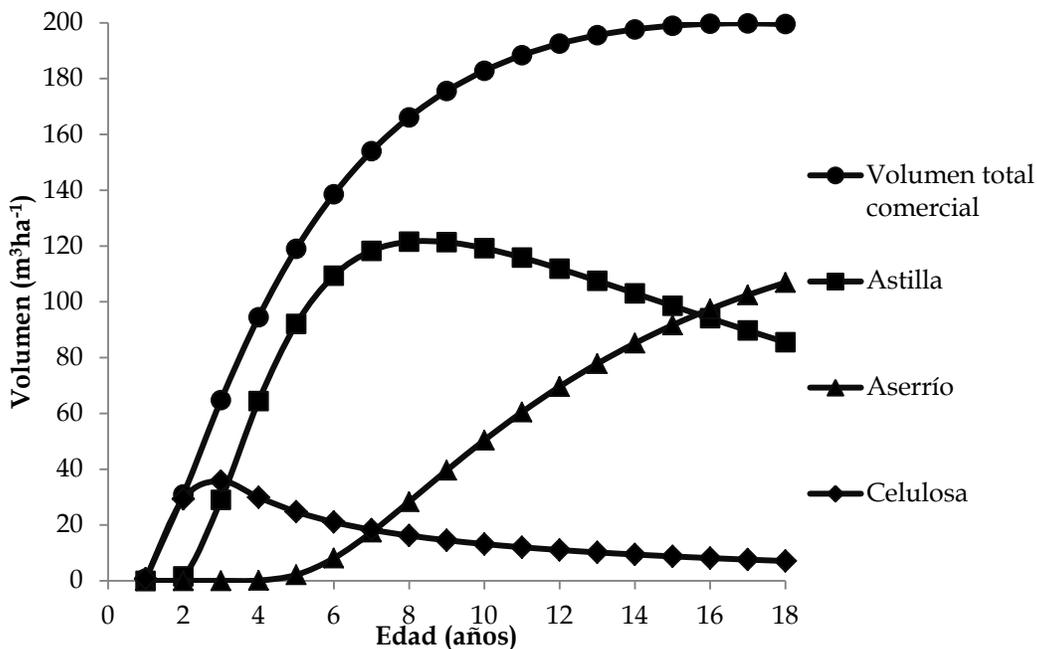


Figura 4.5. Volumen comercial por hectárea de razón de volumen por tipo de producto.

Puede observarse que en los primeros años de la plantación, el producto principal que se obtendría en la cosecha es la celulosa con una pequeña proporción de astilla o chip. De manera análoga a los métodos anteriores, se podría contar con los tres tipos de productos, aunque el aserrío en un porcentaje bajo, el cual se va incrementando a medida que crece la plantación, tal y como lo describen Mora y Hernández (2007).

4.5.4. Evaluación de sistemas

El volumen total estimado en el IS promedio es muy similar en el tiempo de evaluación tanto en la predicción implícita como en la explícita (Figura 4.6).

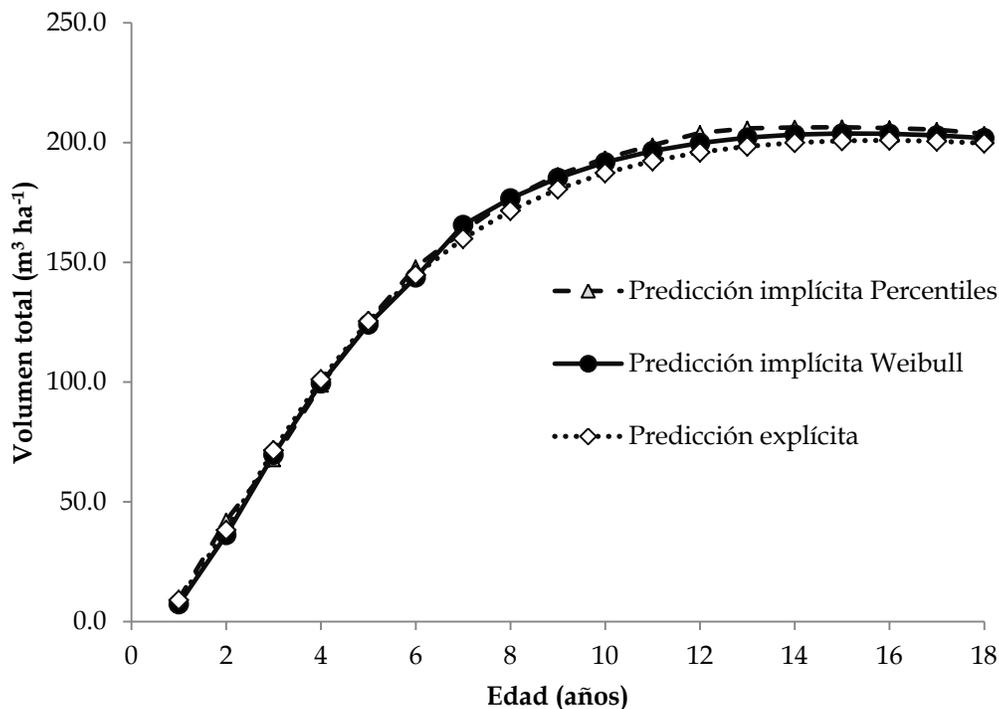


Figura 4.6. Volumen total estimado por predicción implícita y por predicción explícita.

La diferencia contra la predicción explícita empieza a manifestarse a partir de los siete años tanto para Weibull como para percentiles y esta tendencia se mantiene haciendo a los sistemas implícitos ligeramente más optimistas (Figura 4.6). No obstante, hasta la edad del turno sugerido, el volumen total estimado es ligeramente menor en la forma implícita.

Gráficamente no se observan diferencias marcadas en las estimaciones. A fin de corroborar tal aseveración, se probó la hipótesis planteada sobre las predicciones del rendimiento total maderable, estimadas a partir de los sistemas implícitos de Weibull y percentiles, y del sistema explícito mediante una comparación de medias basada en Tukey a un $p \leq 0.05$ para el índice de sitio promedio (IS-30) en el rango de edad de 1 a 18 años (Cuadro 4.5).

De acuerdo a los resultados de análisis de varianza, no se rechaza la hipótesis nula de igualdad en las predicciones y se procede a la prueba de Tukey para comprobar que no hay diferencias en las medias de volumen evaluadas (Cuadro 4.5). Recordando que medias con letra igual no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Cuadro 4.5. Comparación de medias de volumen para los métodos evaluados.

Agrupamiento Tukey	Vol. Medio (m^3ha^{-1})	N	Método
A	154.34	18	Predicción Explícita
A	156.34	18	Implícita de Weibull
A	158.21	18	Implícita de Borders

Donde: N es el número de observaciones por cada método.

4.5.5. Comparación de la distribución de productos

El modelo de volumen comercial vía modelo de razones de volumen permite la distribución de productos a partir de un volumen total estimado. En la Figura 4.7-a) se muestra la predicción de volumen comercial total para los tres índices de sitio abordados. De tal manera que en los sitios de alta productividad; IS-37, al turno de cosecha (5 años) tienen respecto al índice de sitio medio (IS-30) 51% más del volumen total estimado en estos últimos, y a su vez, éstos poseen 70% más del volumen que se obtendría en los sitios de calidad regular (IS-23). Respecto al volumen de aserrío por índice de sitio, en el de 37 m es posible tener existencias volumétricas del orden de $24 m^3ha^{-1}$, mientras que en el IS de

30 m apenas se dispone de 2 m³ha⁻¹, y en el de 23 m aún no se tiene de ese producto.

Por su parte, los sitios ricos tienen en volumen de astilla 48% más que los sitios de productividad media. Y referente a la celulosa, los sitios de índice de sitio promedio pueden tener 9% más volumen útil para este fin que los sitios regulares.

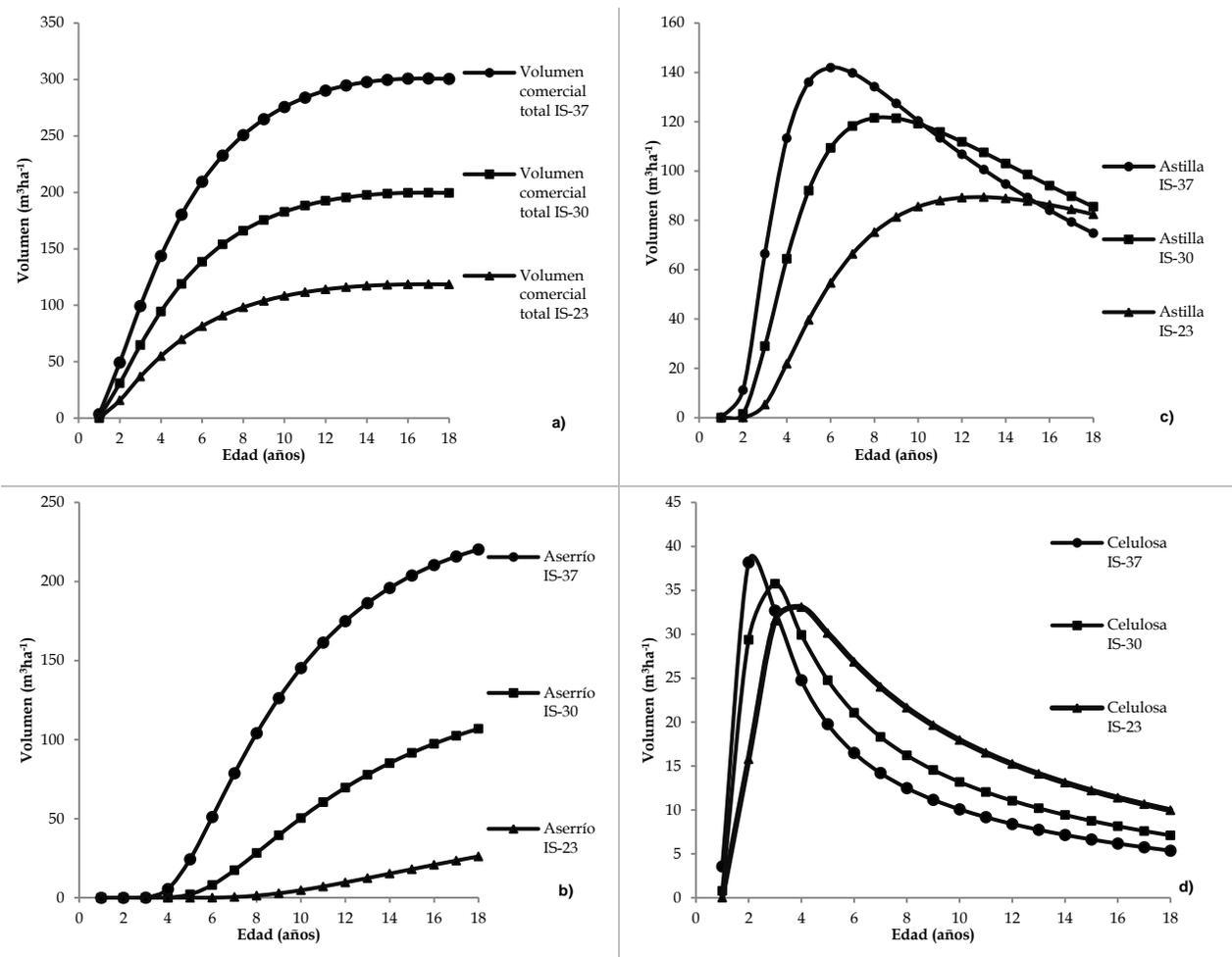


Figura 4.7. Distribución de productos vía modelo de razones: **a)** Volumen comercial total para los tres índices de sitio. **b)** Volumen de aserrio para los tres índices de sitio. **c)** Volumen de astilla para los tres índices de sitio. **d)** Volumen de celulosa para los tres índices de sitio.

Los volúmenes estimados por producto por los métodos implícito y explícito muestran que en el caso de la astilla la predicción vía el modelo de razones de

volumen es más optimista a edades tempranas de la plantación, y después de este periodo la estimación es la más conservadora. Sucede lo contrario cuando se estima el volumen de aserrío, lo cual es lógico pues se complementan entre sí para el volumen total comercial. Por su parte, la predicción implícita de Weibull se ubica en punto intermedio de los otros dos métodos para estimar el volumen de astilla y es más conservadora para el aserrío (Figura 4.8).

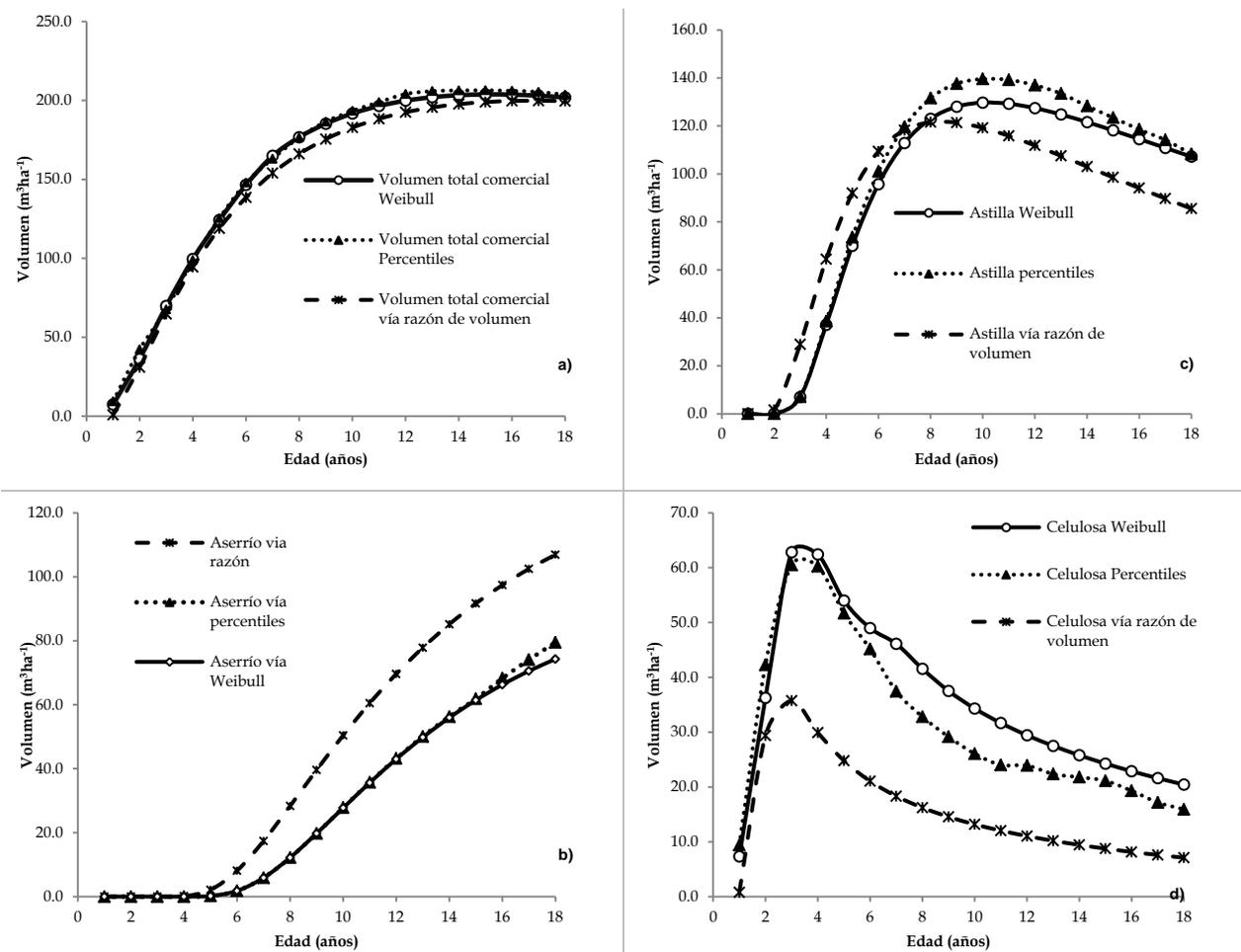


Figura 4.8. Distribución de productos por métodos implícitos y explícitos: **a)** Volumen comercial total para los tres métodos. **b)** Volumen de aserrío para los tres métodos. **c)** Volumen de astilla para los tres métodos. **d)** Volumen de celulosa para los tres métodos.

En términos prácticos la predicción implícita mediante la fdp de Weibull es la más eficiente en términos de cálculos y si bien resulta conservadora en sus

estimaciones para productos en edades mayores a 7 años, produce resultados muy similares al método de percentiles. Indudablemente se requiere de una base de datos independientes que permitan validar los métodos utilizados y evaluar las diferentes particiones de productos (Borders y Patterson, 1990; Vallejos *et al.*, 2009).

4.6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las plantaciones de eucalipto de la empresa FOMEX, con base en la estimación de volumen comercial por tipo de producto, muestran gran potencial de negocio ya que en las categorías diamétricas más grandes tienen altos porcentajes de volumen útil para la obtención de madera para aserrío, producto de alto valor económico que puede incrementar el ingreso al momento de la cosecha.

Según el reporte trimestral del precio de productos forestales del 2011 (CONAFOR y SEMARNAT, 2011), el precio por metro cúbico de madera de eucalipto en pie para celulosa es de \$160.00, para astilla de \$150.80 y para madera aserrada de calidad selecta tiene un costo de \$9.28 por pie tabla mientas que de calidad normal de \$8.12 por cada pie tabla. Utilizando un factor de conversión de 423.7 pies tabla por m³ para aserrío, y bajo un escenario de cosecha para producir madera aserrada (hasta los 18 años), considerando el IS-30, el cual es el promedio de los predios evaluados y con base a la predicción implícita de Weibull por ser la más eficiente y conservadora es sus estimaciones, así como los precios de venta mencionados, se tiene que por la venta de la madera por tipo de producto, los ingresos sin descuento se incrementan de manera importante después del año 7 (Figura 4.9: a) y b)).

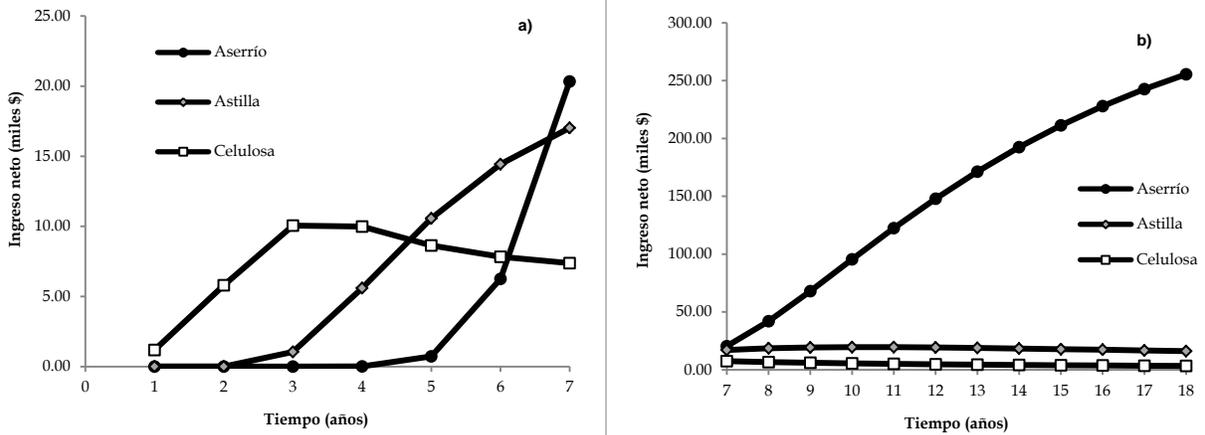


Figura 4.9. Diferenciación de ingreso por tipo de producto de madera cosechado. **a)** periodo de 1 a 7 años. **b)** periodo de 7 a 18 años.

La variación por vender madera considerando distribución de productos (celulosa, astilla y aserrío) con diferenciación en el precio para cada uno y sin considerarla, es decir, venta de volumen total al mismo precio, implica una diferencia en el ingreso no descontado de 4.78 veces más al final del periodo evaluado (18 años), o sea, 378.4% mayor (Figura 4.10: a) y b)).

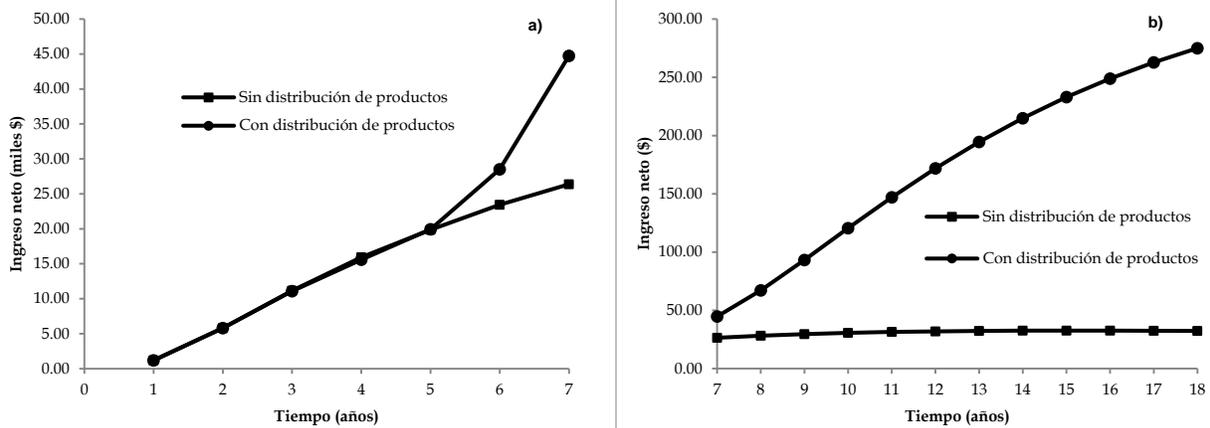


Figura 4.10. Variación del ingreso con y sin distribución de producto de madera. **a)** periodo de 1 a 7 años. **b)** periodo de 7 a 18 años.

Para conocer el volumen útil (comercial sin corteza), es necesario implementar en el sistema generando modelos que descuenten la corteza o bien, generar otro sistema para volumen comercial sin corteza y contar con ambos.

4.7. LITERATURA CITADA

- Acosta, M. M., J. M. Torres R. y C. Rodríguez F. 1997. Predicción del rendimiento en *Pinus montezumae* Lamb. usando modelos de distribuciones diamétricas. Rev. Ciencia Forestal en México. 22 (81): 71-89.
- Amateis, R. L., H. E. Burkhart and T. E. Burk. 1986. A ratio approach to predicting merchantable yields of unthinned loblolly pine plantations. Forest Science. 32(2): 287-296.
- Avery, T. E. and H. E. Burkhart. 1983. Forest measurements. McGraw-Hill, Nueva York. USA. 331 p.
- Bailey, R. L. and T. R. Dell. 1973. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. Forest Science. 19: 97-104.
- Borders, B. E., R. A. Souter, R. L. Bailey and K. D. Ware. 1987. Percentile-based distributions characterize forest stand tables. Forest Science. 33: 570-576.
- Borders, B. E. and W. D. Patterson. 1990. Projecting stand tables: a comparison of the Weibull diameter distribution method, a percentile-based projection method, and a basal area growth projection method. Forest Science. 36 (2):413-424.
- Bueno, L. S. W. y E. Bevilacqua. 2011. Desarrollando un sistema de predicción de distribuciones diamétricas para *Pinus occidentalis*, Sw. En la Sierra, República Dominicana. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 17(1): 115-132.
- Burkhart, H. E. and M. Tomé. 2012. Modeling forest trees and stands. Springer Science+Business Media Dordrecht. Springer Dordrecht Heidelberg. New York. London. 547 p.
- Cao, Q. V. 2004. Predicting parameters of a Weibull function for modeling diameter distribution. Forest Science. 50: 682-685.
- Chauchard, B. L. M. 2000. Crecimiento y producción de repoblaciones de *Pinus radiata* D. Don en la Provincia de Guipúzcoa (País Vasco). Tesis doctoral.

- Departamento de Economía y Gestión de las Explotaciones e Industrias Forestales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 184 p.
- Clutter, J. L., J. C. Forston, L. V. Pienaar, G. H. Brister and R.L. Bailey. 1983. Timber management: a quantitative approach. John Wiley & sons, Inc. New York. 333 p.
- CONAFOR, 2001. Programa estratégico forestal para México 2025. Comisión Nacional Forestal. México. 191 p.
- CONAFOR y SEMARNAT, 2011. Precios de productos forestales maderables. Reporte trimestral. Abril-Junio. Comisión Nacional Forestal. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (www.conafor.gob.mx: 23 abril 2013).
- De la Fuente, E. A., A. Velázquez 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. Ciencia Forestal en México. 23 (84): 3-8.
- Diéguez-Aranda, U., F. Castedo-Dorado, J. G. Álvarez-González and A. Rojo. 2006. Compatible taper function for Scots pine plantations in Northwestern Spain. Can. J. For. Res. 36: 1190-1205.
- Fonweban, J., B. Gardiner and D. Auty. 2012. Variable-top merchantable volume equations for Scots pine (*Pinus sylvestris*) and Sitka spruce (*Picea sitchensis* Bong. Carr.) in Northern Britain. Forestry, Vol. 85, No. 2. Forest Research, Northern Research Station, Roslin, Midlothian EH25 9SY, Scotland, UK.
- Gadow, V. K., S. Sánchez O. y J. G. Álvarez G. 2007. Estructura y crecimiento del bosque. 287 p.
- Galán, L. R., H. M. De los Santos P. y J. I. Valdez H. 2008. Crecimiento y rendimiento maderable de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. Madera y Bosques. 14 (2): 65-82.

- García, M. E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen; 4ta. Edición. México. 217 p.
- García, G. C., N. Cañadas y G. Montero. 2002. Modelización de la distribución diamétrica de las masas de *Pinus pinea* L. de Valladolid (España) mediante la función Weibull. Invest. Agr. Recur. For. 11 (2). 263-282.
- Kibet, Y. S. 2009. Diameter distribution prediction models for thinned slash and loblolly pine plantations in the southeast. Doctor's thesis. School of Forest Resources, University of Georgia. 177 p.
- Magaña, T. O. S., J. M. Torres R., C. Rodríguez F., H. Aguirre D. y A. M. Fierros G. 2008. Predicción de la producción y rendimiento de *Pinus rudis* Endl. en Aloapan, Oaxaca. Madera y Bosques. 14(1): 5-19.
- Martínez, R. R., H. S. Azpiroz R., J. L. Rodríguez De la O., V. M. Cetina A. y M. A. Gutiérrez E. 2006. Importancia de las plantaciones forestales de *Eucalyptus*. Ra Ximhai. Universidad Autónoma Indígena de México. Septiembre-diciembre. 2(3): 815-846.
- Méndez, L., B. 2007. Sistema de cubicación en pie para árboles provenientes de semillas y clones de eucalipto en FOMEX. Tesis de Licenciatura Inédita. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Méndez, M. J. T., S. E. García D., B. Don Juan M., L. Ángel A. 2008. Diagnóstico fitosanitario en plantaciones forestales comerciales en Las Choapas, Veracruz y Huimanguillo, Tabasco. Comisión Nacional Forestal. Gerencia Nacional de Sanidad. Universidad Autónoma Chapingo. México. 97 p.
- Miranda, F. y E, Hernández X, 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. Boletín de la Sociedad Botánica de México.
- Mora, F. y W. Hernández. 2007. Estimación del volumen comercial por producto para rodales de teca en el pacífico de Costa Rica. Nota técnica. Agronomía Costarricense. 31(1): 101-112.
- Pompa, G. M. y R. Solís M. 2008. Ecuación de volumen para el género *Quercus* en la región noroeste de Chihuahua, México. Quebracho. 16: 84-93.

- Pienaar, L. V., W. M. Harrison and J. W. Rheney. 1990. A stand level growth model for unthinned plantations. *In*: PMRC Yield prediction system for slash pine plantations in The Atlantic Coastal Flatwoods. PMRC Technical Report 1990-3. Daniel B. Warnell School of Forest Resources. The University of Georgia.
- Pienaar, L. V., B. D. Shiver and J. W. Rheney. 1996. Yield prediction for mechanically site-prepared slash pine plantations in The Southeastern Coastal Plain. PMRC Technical Report 1996-3. Daniel B. Warnell School of Forest Resources. The University of Georgia.
- Reyes, V. J. R. 2006. Sistema de cubicación para *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en los estados de Veracruz y Oaxaca. Tesis de Licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 79 p.
- Rentería, A. J. B. 1995. Sistema de cubicación para *Pinus cooperi* Blanco mediante ecuaciones de ahusamiento en Durango. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Méx. 77 p.
- Rojo, A., X. Perales, F. Sánchez R., J. G. Álvarez G. y K. von Gadow. 2005. Stem taper functions for maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Galicia (Northwestern Spain). *Eur. J. For. Res.* 124: 177-186.
- Roldán, C. M. A., H. M. De Los Santos P, J. R. Valdez L., H. Ramírez M., G. Ángeles P. y A. Velázquez M. 2013. Crecimiento y rendimiento maderable de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake con datos de inventarios operativos. *In Press*.
- Santiago, G. W., H. M. De los Santos P., G. Ángeles P., J. R. Valdez L., D. H. Del Valle P. y J. J. Corral R. 2012. Predicción del rendimiento maderable de *Pinus patula* a través de modelos de distribuciones diamétricas. *In Press*.
- SAS Institute Inc. 2002. SAS/STAT® 9.0 User's Guide. SAS Institute Inc. NC.

- Tang, S., Wang Y., Zhang L. and Meng C. H. 1997. A distribution-independent approach to predicting stand diameter distribution. *Forest Science*. 43(4), 491-500.
- Torres, R. J. M. y O. S. Magaña T. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Editorial Limusa. Primera reimpression. México. 472 p.
- Vallejos, B. O. S., D. Aedo O., P. N. Izquierdo O. y M. A. Vásquez S. 2009. Evaluación de procedimientos de ajuste óptimo de todos los parámetros de Weibull 3P para modelar la estructura horizontal en plantaciones de *Pinus taeda*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 15(2): 101-108.
- Velázquez, M. A., A. M. Fierros G., A. Aldrete, A. Gómez G., H. M. De los Santos, M. González G., J. López U., T. Llanderal O. y S. Fernández C. 2009. Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. Comisión Nacional Forestal - Colegio de Postgraduados. México. 429 p.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

5.1. INVENTARIO FORESTAL

Con la intensidad de muestreo utilizada por la empresa (1%) todos los estimadores evaluados garantizan el nivel de precisión fijado por la propia empresa del 5% (con excepción del estimador de MSA en el año 2008 que lo rebasa en un 1%). Sin embargo la evaluación de los estimadores sugiere que el uso de estimadores de razón estratificada permiten aumentar la precisión en todos los casos y en consecuencia reducir la cantidad de sitios de muestreo. De manera aplicada se sugiere establecer al menos tres unidades de muestreo por unidad de manejo básica (definidas por la empresa) ya sea a nivel de predios o de orden de plantación. Los estimadores de razón y regresión entre volumen y edad permiten estimar el crecimiento a partir de una proporción muestral que representa el incremento medio anual y con ello actualizar el inventario de manera rápida y precisa.

La implementación del muestreo con Relascopio (sitios de dimensiones variables) cuando el área basal es la variable auxiliar es recomendable sobretodo para la cuantificación en las plantaciones de mayor edad cuando la vegetación secundaria dificulta el acceso o como complemento en la estratificación ya que se mide de manera extensiva en más sitios que la variable principal. Una de las recomendaciones para reducir la intensidad del muestreo en el inventario de un año a otro consiste en la remediación de una parte de los sitios de inventario establecidos (sitios permanentes). Con este esquema, es posible conocer la tasa de crecimiento de las plantaciones sin la necesidad de implementar año con año un inventario tan extenso y tardado; y cuyos resultados deben ser al menos iguales pero en general mejores en lugar de poner nuevamente la red de sitios en toda la superficie. Resultados (no incluidos en esta tesis) provenientes de sitios de remediación establecidos por

FOMEX del año 2012 al 2013 sugieren que la remediación de 100 de los sitios establecidos permite actualizar el inventario forestal con precisiones por debajo del 5%. En términos de trabajo de campo es necesario mejorar los protocolos de medición y marcado de árboles para obtener mejores estimaciones.

5.2. SISTEMA DE CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO MADERABLE

El sistema es totalmente compatible con los datos de inventario y permite la estimación del crecimiento y el rendimiento maderable en tiempo actual y futuro, inclusive permite determinar estados previos de crecimiento de las plantaciones forestales. Con un número mayor de sitios con remediación sería posible ajustar de manera simultánea el sistema predicción/proyección para todos los componentes.

El SCRM sugiere un turno técnico promedio de 5 años para todos los predios plantados, menor en dos años al que actualmente se utiliza. Este valor sugiere que la ordenación de las superficies es crítica pues para cubrir el ciclo plantación/cosecha/replantación se requiere de agilizar los procesos que van desde la producción de planta y preparación de terreno, hasta el mantenimiento y cosecha de las mismas. De lo contrario el potencial productivo de terrenos con altos niveles de producción es subutilizado.

Los resultados del SCRM sugieren que mejores prácticas silvícolas aunadas a mejores materiales vegetales y mejor elección de sitios, permitirían en el corto plazo la definición de un paquete tecnológico que permita lograr rendimientos competitivos a nivel mundial. Los SCRM son derivados a partir de sitios experimentales cuidadosamente establecidos y medidos por lo que el establecimiento y seguimiento de estos lotes experimentales con manejo operativo es parte de los costos para evaluar el desempeño de la silvicultura de manera biológica y financiera.

Una de las tareas pendientes del estudio es la evaluación de los clones utilizados. Evidentemente la silvicultura clonal es la dirección a la que se dirige la empresa, pero es necesario contar con datos experimentales que permitan evaluar objetivamente las fuentes vegetales.

5.3. DISTRIBUCIÓN DIAMÉTRICA PARA ESTIMAR CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO

El factor que rige razonablemente la prolongación del turno sugerido por el SCRM explícito es la obtención de volumen comercial por tipo de producto. Si bien al año 5, la mayor proporción corresponde a madera útil para astilla y celulosa, el aserrío es casi imperceptible, no obstante, en el año 7 el aserrío casi triplica el valor de los otros productos. Tales inferencias se lograron hacer eficientemente a través de los métodos implícitos (Distribución diamétrica basada en la fdp Weibull y la distribución libre basada en percentiles) así como con el modelo de volumen comercial vía razones de volumen propuesto por Amateís *et al.* (1986).

Los resultados encontrados, considerando el valor por tipo de producto, permiten visualizar el valor de las plantaciones más allá del volumen total, lo cual sin duda es de interés para el gestor y el inversionista forestal.