



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN
DE RESINA Y MADERA EN
PLANTACIONES DE PINOS EN
LAS CHOAPAS, VERACRUZ**

MAYRA ROCÍO RAMÍREZ VARGAS

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

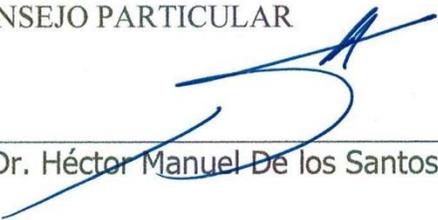
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **Escenarios de producción de resina y madera en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz**, realizada por la estudiante: **Mayra Rocío Ramírez Vargas** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO


Dr. Héctor Manuel De los Santos Posadas

ASESOR


Dr. José René Valdez Lazalde

ASESOR


Dr. Valentín José Reyes Hernández

ASESOR


Dr. J. Carmeh Ayala Sosa

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2022

ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN DE RESINA Y MADERA EN PLANTACIONES DE PINOS EN LAS CHOAPAS, VERACRUZ

Mayra Rocío Ramírez Vargas, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

El efecto de la resinación en especies de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H. Barrett & Golfari y el híbrido de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* × *Pinus elliottii* var. *elliottii* se analizó mediante el factor de forma y modelos de ahusamiento integrando variables categóricas en su estructura. También se actualizó el sistema de crecimiento y rendimiento maderable (SCYRM) explícito e implícito, utilizando 271 sitios de inventarios forestales 2016 a 2020. El sistema emplea un modelo de altura dominante tipo Schumacher & Korf, modelos compatibles de predicción para las variables de mortalidad, área basal y volumen. El sistema implícito modela la distribución diamétrica mediante la distribución Weibull de tres parámetros. Se estimó la producción de resina ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$) en dos etapas de producción (6 y 10 años) y la tasa de acumulación de carbono atmosférico utilizando la proporción carbono-volumen en ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Los resultados sugieren que la resinación produce un efecto focalizado en la base del fuste, disminuyendo el ahusamiento. Los SCYRM definieron cinco índices de sitio (IS): 11, 13, 15, 17 y 19 m a una edad base de 7 años. El turno técnico maderable para el IS promedio (15 m) es a los 10 años con un volumen de $221.4 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ y un incremento medio anual (IMA) de $22.28 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. Una tasa promedio de acumulación de C de $5.16 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ a los 5 años; una producción de resina promedio a los 13 años de $13.5 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Estas predicciones se utilizaron para realizar la evaluación financiera bajo cuatro escenarios de producción: madera (M), madera y carbono (MC), madera y resina (MR) y madera, carbono y resina (MCR). El turno financiero para el IS promedio (15 m, 7.5%) en los escenarios M, MC, MR, MCR ocurre a los 10 años, la edad óptima de cosecha a los 11 años (M) y 11.5 años (MC, MR, MCR) con valores de valor actual neto (VAN) de \$14,759, \$48,262, \$647,987 y \$ 681,490, TIR de 3.7 %, 15.9 %, 60.9% y 67.9 % y una R B/C de 1.36, 2.16, 2.86 y 2.96 respectivamente.

Palabras clave: Sistema de crecimiento y rendimiento maderable, ahusamiento, resinación, rentabilidad financiera, *Pinus caribaea*, *Pinus elliottii*.

RESIN AND TIMBER PRODUCTION SCENARIOS IN PINE PLANTATIONS IN LAS CHOAPAS, VERACRUZ

Mayra Rocío Ramírez Vargas, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

The effect of resin tapping in *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H. Barrett & Golfari, *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii* and the hybrid of these species was analyzed using the form factor and taper models integrating categorical variables in their structure. The explicit and implicit timber growth and yield system (GYS) was updated using forest inventories from 2016 to 2020 with 271 sites. The system employs the Schumacher & Korf type dominant height model, compatible prediction models for mortality, basal area, and volume variables. The implicit system modeled the diameter distribution using the three-parameter Weibull distribution, resin production ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$) was estimated at two production stages (6 and 10 years), the rate of atmospheric carbon accumulation using the carbon-volume ratio in ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). The results suggest that resin tapping produces a focused effect at the base of the stem, decreasing taper. GYS defined five site indices (SI): 11, 13, 15, 15, 17 and 19 m at a base age of 7 years. The technical time for the average SI (15 m) is at 10 years with a volume of $221.4 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ and a mean annual increment (MAI) of $22.28 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$, a C accumulation rate of $5.16 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ at 5 years. In SI 15 resin production $13.5 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ at 13 years. These projections were used to perform the financial evaluation under three production scenarios (timber (T), timber plus C accumulation benefits (TC), timber plus and resin harvesting (TR) and timber, C and resin harvesting (TCR)). The financial turn for the average SI (15 m, 7.5%) in the scenarios T, TC, TR and TCR occurs at 10 years, optimum harvesting age 11 (T) and 11.5 years (TC, TR, TCR), with NPV of \$14,759, \$48,262, \$647,987, \$ 681,490, IRR of 3.7 %, 15.9 %, 60.9% and 67.9 % and a BCR of 1.36, 2.16, 2.86 and 2.96 respectively.

Keywords: Stem taper, the explicit and implicit timber growth and yield system, financial profitability, resin *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus elliottii*.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo por la oportunidad de ser alumna y becaria. Al personal académico y administrativo del Posgrado en Ciencias Forestales por brindarme su apoyo durante el tiempo en esta noble institución.

Al Dr. Héctor Manuel De los Santos Posadas por darme la oportunidad de ser parte del grupo de estudiantes a su cargo y dirigir el proyecto de investigación. Por sus valiosas aportaciones, sugerencias y correcciones que enriquecieron el tema de investigación y mi formación profesional y personal, pero sobre todo por compartir sus amplios conocimientos y enorme experiencia profesional.

Al Dr. René Valdez Lazalde por su colaboración en mi preparación académica y sus correcciones y comentarios muy acertados para la mejora del trabajo de investigación.

Al Dr. Valentín Reyes Hernández por su accesibilidad y disposición para participar en esta investigación, su empatía durante la misma, sus valiosos comentarios y correcciones al documento.

Al Dr. J Carmen Ayala Sosa por su incondicional, valiosos comentarios, disposición en la investigación, colaborar en mi preparación académica y por brindarme siempre su amistad tan indispensable en mi formación académica y personal.

Al equipo de trabajo de Uumbal Agroforestal Veracruz por permitirme realizar el trabajo de investigación en sus instalaciones.

Al M.C. Franco Armando Guerrero Valencia por su invaluable apoyo en la toma de datos en campo y asesoría en esta investigación. Por brindarme su apoyo incondicional y alentarme en mi desarrollo profesional.

Agradezco a mi familia por su paciencia, apoyo y palabras de afecto durante la etapa de estudios y realización de este trabajo de investigación. A mis amigos y conocidos que estuvieron apoyándome incondicionalmente lo cual fue indispensable para la realización de este trabajo.

Infinitas gracias a todos.

DEDICATORIA

A Dios.

Cuando tú encuentres un diamante que no pertenezca a nadie, te pertenecerá a ti.

En aquel momento tendrás que ir a ver de nuevo a las rosas. Comprenderás entonces que la tuya es única en el mundo.

Pero antes de que todo eso suceda, por las noches cuando mires al cielo, estaré en una de esas estrellas; y como yo reiré te parecerá que todas las estrellas ríen para ti. ¡Tú tendrás estrellas que saben reír!

Antoine de Saint-Exupéry.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
LISTA DE CUADROS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Generalidades.....	1
Área de estudio.....	3
Localización geográfica.....	3
Agroforestal Uumbal Veracruz	4
Especies utilizadas.....	4
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	4
<i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	5
Los híbridos de <i>P. caribaea</i> × <i>P. elliottii</i>	6
Establecimiento de la PFC.....	6
Estudios generados.....	7
Biometría forestal.....	7
Modelos de volumen	7
Modelos compatibles de ahusamiento volumen comercial	8
Sistemas de crecimiento y rendimiento maderable	10
Modelos de crecimiento en volumen.....	10
Calidad de estación.....	11
Sistema de crecimiento y rendimiento maderable implícito.....	12
Modelos de producción de resina	12
Biomasa y carbono en las Plantaciones Forestales Comerciales.....	13
Evaluación financiera de las PFC.....	13
Objetivos 15	
Objetivo general	15

Objetivos específicos.....	15
CAPÍTULO I. MODELOS DE AHUSAMIENTO Y VOLUMEN COMERCIAL PARA	
PINOS TROPICALES EN PLANTACIONES DESTINADAS A LA	
PRODUCCIÓN DE RESINA.....	16
1.1 RESUMEN.....	16
1.2 ABSTRACT.....	17
1.3 INTRODUCCIÓN	18
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS	19
1.4.1 Área de estudio.....	19
1.4.2 Datos de campo y estimación de volumen de madera.....	20
1.4.3 Evaluación del efecto de la resinación y las procedencias en el factor de forma y	
volumen	22
1.4.4 Evaluación del efecto de la resinación y las procedencias en el ahusamiento	23
1.4.5 Estrategia de ajuste.....	25
1.5 RESULTADOS.....	27
1.5.1 Efecto de la resinación en el volumen total entre árboles resinados y no resinados	
.....	27
1.5.2 Comparación del efecto de la resinación y las procedencias en el factor de forma	
.....	29
1.5.3 Efecto de la resinación y las procedencias en el ahusamiento	33
1.5.4 Efecto de la resinación y las procedencias en el sistema de ahusamiento-volumen	
comercial	34
1.5.5 Evaluación del efecto del tamaño del árbol en el ahusamiento y volumen	
comercial	38
1.6 DISCUSIÓN	41
1.6.1 Efecto de la resinación en el factor de forma	41
1.6.2 Efecto de la resinación en el ahusamiento.....	41
1.6.3 Efecto de la resinación en el volumen maderable	42
1.7 CONCLUSIONES	43

CAPÍTULO II. MODELOS PARA ESTIMAR LA PRODUCCIÓN DE RESINA EN PLANTACIONES DE PINOS TROPICALES EN VERACRUZ	45
2.1 RESUMEN.....	45
2.2 ABSTRACT.....	46
2.3 INTRODUCCIÓN	47
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS	49
2.4.1 Área de estudio.....	49
2.4.2 Registro del rendimiento de resina.....	49
2.4.3 Estrategia de ajuste.....	53
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
2.5.1 Coeficientes de correlación	57
2.5.2 Modelos de estimación de producción de resina por árbol	57
2.6 CONCLUSIONES	66
CAPÍTULO III. SISTEMA DE CRECIMIENTO PARA PINOS TROPICALES Y ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN COMBINADA RESINA-MADERA- CARBONO: UN ENFOQUE INICIAL.....	67
3.1 RESUMEN.....	67
3.2 ABSTRACT.....	68
3.3 INTRODUCCIÓN	69
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS	70
3.4.1 Área de estudio.....	70
3.4.2. Datos dasométricos.....	70
3.4.3 Sistema de crecimiento explícito.....	74
3.4.3.1 Modelos de crecimiento en altura dominante.....	74
3.4.3.2 Modelación de las variables NA, AB y Volumen	75
3.4.4 Estrategia de ajuste.....	76
3.4.5 Sistema de crecimiento implícito por fdp Weibull.....	77
3.4.5.1 Cálculo de las variables de estado por categoría diamétrica	79
3.4.6 Estimación de carbono capturado.....	81
3.4.7 Estimación de la producción de resina utilizando el SCYRM implícito.....	82

3.4.8 Comparación de escenarios de producción de madera, madera-carbono, madera-carbono-resina y madera-resina mediante indicadores financieros.....	83
3.4.8.1 Estimación de la edad óptima de aprovechamiento bajo diferentes escenarios de producción.....	89
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	91
3.5.1 SCYRM EXPLÍCITO	91
3.5.1.1 Modelos de altura dominante.....	91
3.5.1.2 Área basal, volumen y mortalidad.....	94
3.5.2 Sistema de crecimiento implícito con la fdp Weibull	98
3.5.3 Comparación del sistema explícito e implícito	99
3.5.4 Estimación de la producción maderable.....	101
3.5.5 Estimación de carbono capturado.....	104
3.5.6 Estimación de la producción de resina en la plantación.....	105
3.5.7 Comparación de escenarios de producción de madera, madera-carbono, madera-carbono-resina y madera-resina mediante indicadores financieros.....	106
3.5.8 Valor de la producción del crecimiento en la plantación para el aprovechamiento de madera, carbono y resina.	107
3.5.9 Rentabilidad financiera en escenarios de producción de madera, madera-carbono, madera-carbono-resina y madera-resina.....	110
3.6 CONCLUSIONES	119
CONCLUSIONES GENERALES.....	120
LITERATURA CITADA	121
ANEXOS	134
Anexo I. Ecuaciones específicas de ahusamiento y volumen total generadas a partir del modelo de Demaerschalk 1972, para los seis grupos bajo estudio.	134
Anexo II. Distribución de productos maderables por índice de sitio para plantaciones de pinos destinadas a la producción de resina y madera en Veracruz, México.	136
Anexo III. Número de árboles por hectárea por categoría diamétrica por IS (Weibull) y distribución de árboles para resinación por IS.	146
Anexo IV. Datos análisis de rentabilidad IS 11 para la tasa de 7.5 %	151

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1. Características de las procedencias utilizadas en el estudio.....	20
Cuadro 1.2. Promedio del factor de forma y de volumen total para pinos en plantaciones forestales comerciales en Las Choapas, Veracruz.	27
Cuadro 1.3. Modelos de volumen total ajustados para pinos resinados y no resinados en plantaciones dedicadas a la producción de resina y madera en Las Choapas, Veracruz, México.....	28
Cuadro 1.4. Resultados del ajuste del modelo de la variable combinada lineal con variables indicadoras para diferenciar entre procedencias y entre árboles resinados y no resinados.....	29
Cuadro 1.5. Resultados del ajuste del modelo reducido de volumen total de Spurr con las variables indicadoras para diferenciar entre procedencias y entre árboles resinados y no resinados	31
Cuadro 1.6. Resultados del ajuste de regresión con variables indicadoras para categorizar entre procedencias y entre árboles resinados y no resinados en modelo de ahusamiento Demaerschalk (1972).....	33
Cuadro 1.7. Resultados del ajuste con variables indicadoras en el sistema compatible ahusamiento-volumen comercial con base en el modelo de ahusamiento de Demaerschalk (1972).	35
Cuadro 2.1. Estadísticas descriptivas de los árboles para cuantificar la producción de resina de pinos en el municipio de Las Choapas, Veracruz.	50
Cuadro 2.2. Funciones matemáticas ajustadas para estimar la producción de resina por árbol en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.	55
Cuadro 2.3. Estadísticas descriptivas de las variables dendrométricas y de producción de resina de pinos en Las Choapas, Veracruz.....	56
Cuadro 2.4. Coeficientes de correlación de Pearson de las variables dasométricas y de producción de resina de la muestra de 196 pinos en Las Choapas, Veracruz.....	57
Cuadro 2.5. Estadísticos de ajuste de los modelos lineales y no lineales evaluados para la estimación de la producción de resina por árbol para pinos en plantaciones de Las Choapas, Veracruz.	58

Cuadro 2.6. Estimación de la producción promedio mensual de resina en gramos por árbol por especie mediante el uso de modelos lineales y no lineales ajustados para pinos de Las Choapas, Veracruz, México.....	61
Cuadro 3.1. Características de los inventarios utilizados en el ajuste del SCYRM.....	71
Cuadro 3.2. Modelos biométricos ajustados para modelar el crecimiento en altura dominante de pinos en las Choapas, Veracruz, México.	74
Cuadro 3.3. Ecuaciones utilizadas para modelar la altura dominante de proyección y generar las familias de curvas de índice de sitio para plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz.	75
Cuadro 3.4. Modelos de área basal ajustados en plantaciones de pinos en las Choapas, Veracruz.	76
Cuadro 3.5. Densidad de la madera, contenido de carbono en biomasa y proporción de carbono-volumen en el fuste.	82
Cuadro 3.6. Precios nominales y constantes (deflactados al 2019) de carbono, madera y resina de pino.	84
Cuadro 3.7. Actividades y costos promedio ($\$ \cdot \text{ha}^{-1}$) para una plantación forestal comercial de pinos para producción de madera en Las Choapas, Veracruz, México.....	86
Cuadro 3.8. Actividades y costos promedio ($\$ \cdot \text{ha}^{-1}$) para una plantación forestal comercial de pinos para producción madera y resina en Veracruz, México.	87
Cuadro 3.9. Resultado del ajuste de los modelos genéricos de curva guía para crecimiento en altura dominante en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz.....	92
Cuadro 3.10. Resultado del ajuste de regresión de las curvas guía anamórficas y polimórficas de los modelos Schumacher & Korf y Chapman-Richards para altura dominante en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz.	93
Cuadro 3.11. Resultado del ajuste de las variables estado mediante regresión no lineal AB, NA y V para plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz.....	95
Cuadro 3.12. Resultado del ajuste simultáneo de las variables estado (AB, NA y V) mediante regresión no lineal aparentemente no relacionada (SUR) para plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz.	97

Cuadro 3.13. Resultado de la bondad de ajuste de los modelos de percentiles para la función Weibull para pinos en plantaciones de Las Choapas, Veracruz.	98
Cuadro 3.14. Tabla de crecimiento y rendimiento en NA, AB y Volumen por calidad de estación para plantaciones de pinos en las Choapas, Veracruz, México.	102
Cuadro 3.15. Almacenamiento de C ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) por IS en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.	104
Cuadro 3.16. Producción potencial de resina por calidad de estación en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.	106
Cuadro 3.17. Distribución de productos ($\text{m}^3\cdot\text{rollo}\cdot\text{ha}^{-1}$) estimado en plantaciones de pinos, con IS 15 y 19 a una edad base de 7 años, en Las Choapas, Veracruz, México.	107
Cuadro 3.18. Valor constante de la producción de madera ($\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}$) para cada tipo de producto, para el IS 15 y 19 a una edad base de 7 años, en Las Choapas, Veracruz, México.	108
Cuadro 3.19. Producción estimada de resina en ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$), tasa de secuestro de C ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y valor constante de la producción de resina y C para el IS 15 y 19 en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.	109
Cuadro 3.20. Indicadores financieros con tasas de descuento 6.49, 7.5 y 8.8 % para los escenarios de producción: madera, madera-carbono, madera-resina y madera-carbono-resina para plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio, municipio Las Choapas, Veracruz, México	3
Figura 1.1. A) Alturas parciales en función de los diámetros parciales, y B) Dispersión de las alturas relativas respecto a los diámetros relativos de los 198 árboles resinados y no resinados incluidos en el ajuste de las funciones de ahusamiento-volumen comercial.....	21
Figura 1.2. A) Volumen comercial en función de la altura de fuste para la muestra en general y B) Dispersión de las observaciones de diámetro normal-altura total.....	21
Figura 1.3. A) Gráfico de residuales del volumen total del modelo de Bruce y Schumacher (1942). B) y para el modelo de Spurr (1963) con la corrección por heteroscedasticidad.	28
Figura 1.4. A). Gráfico de residuales del volumen total del modelo de Bruce y Schumacher (1942) con corrección por heteroscedasticidad. B) Ajuste del modelo de volumen total entre los valores observados y predichos en m ³	30
Figura 1.5. A) Gráfico de residuales contra los valores predichos del modelo de Spurr (1963) para estimar el volumen total con corteza (m ³) incluyendo variables indicadoras para diferenciar entre procedencias y entre resinados y no resinados. B) Gráfico de ajuste entre los valores observados y predichos de volumen total (m ³)......	32
Figura 1.6. A) Gráfico de residuales del ahusamiento contra los valores predichos del diámetro (cm). B) Gráfico de residuales contra valores predichos del Vc (m ³) del modelo de Demaerschalk (1972).	36
Figura 1.7. A) Comportamiento del ahusamiento en altura y diámetro (escala relativa o porcentual) y B) en volumen acumulado (m ³) en árboles resinados y no resinados para L5nr, L5r, L4nr, L4r, L1nr y L1.	39
Figura 1.8. Comportamiento del sesgo promedio absoluto a lo largo del fuste utilizando el modelo de ahusamiento de Demaerschalk (1972) entre arboles resinados, no resinados A) y en el volumen comercial entre resinados y no resinados B).....	40
Figura 2.1. A) Dispersión de las observaciones de diámetro normal-altura total de la muestra de árboles para medir la producción de resina en plantaciones de pino de Las Choapas, Veracruz.	52
Figura 2.2. Producción observada de resina en g·mes·árbol por especie en plantaciones de Las Choapas, Veracruz, México.	52

Figura 2.3. Método americano de resinación en plantaciones de Las Choapas, Veracruz, México.	53
Figura 2.4. Estimación de la producción promedio mensual de resina en gramos por árbol y por especie presentando el modelo 1 y 2 de individuos de pinos en Las Choapas, Veracruz.	62
Figura 2.5. A) Gráfico de residuales de la producción de resina para el modelo 1. B) Ajuste de la producción observada contra la producción predicha para el modelo 1. C) Gráfico de residuales de la producción de resina para el modelo 2. D) Ajuste de la producción observada contra la producción predicha para el modelo 2.	64
Figura 3.1. Dispersión de la altura dominante por sitio y edad observados en plantaciones forestales comerciales de pinos en las Choapas, Veracruz, México.	72
Figura 3.2. Número de árboles por sitio y edad.	72
Figura 3.3. Comportamiento del área basal por sitio y edad.	73
Figura 3.4. Comportamiento del volumen por sitio y edad.	73
Figura 3.5. Curvas promedio de crecimiento en altura dominante para calidad de estación contra el patrón de crecimiento de los datos observados en la plantación de pinos en las Choapas, Veracruz.	91
Figura 3.6. Familia de curvas anamórficas Schumacher & Korf A) y Chapman-Richards C). Curvas polimórficas: Schumacher & Korf B) y Chapman-Richards D) para el crecimiento en altura dominante para 5 calidades de estación contra el patrón de datos observados en sitios de plantaciones de pino en Las Choapas, Veracruz.	94
Figura 3.7. Comparación del comportamiento de los modelos de predicción de Área basal por hectárea para una plantación de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.	96
Figura 3.8. A) área basal predicha contra datos observados. B) Volumen total predicho contra datos observados de inventarios 2016-2020 para el IS (15 m) promedio a una edad base de 7 años.	98
Figura 3.9. A) Distribución diamétrica estimada de 1-14 años para el IS 15 con la fdp Weibull. B) Rendimiento maderable ($m^3 \cdot \text{año}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$) para el IS 15: <15= volumen total maderable en árboles menores a 15 cm DN; 15 a 25= volumen total maderable para árboles entre 15 y 25 cm de DN; y >30= volumen total maderable para árboles de DN mayores a 25 cm y Vol. total= rendimiento en volumen	

acumulado integrando todas las clases diamétricas, para plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz.....	99
Figura 3.10. Comparación de los SCYRM Implícito y Explícito (utilizando los modelos de Chapan-Richards y Schumacher & Korf para proyección de Altura dominante y Área basal) en IMA e ICA para el IS 15 promedio a una edad base de 7 años en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz.	100
Figura 3.11. Comparación de los SCYRM Implícito y Explícito en volumen maderable en $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ en el IS 15 promedio a una edad base de 7.	100
Figura 3.12. A) Modelación del crecimiento en volumen por calidad de estación en contraste con los datos observados de los inventarios 2016-2020. B) Tasa de incremento Medio y Corriente Anual (IMA e ICA) por calidad de estación.	103
Figura 3.13. Tendencia del flujo del valor actual neto (VAN) de la producción: M, MC, MR y MCR con tasas de descuento 6.49, 7.5 y 8.8 % para los IS 15 y 19 m para plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.	114
Figura 3.14. Edad óptima de cosecha (BM=CM) en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.	116
Figura 3.15. Valor actual neto (VAN) en la edad óptima de cosecha (BM=CM) para tres escenarios de producción en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.	117
Figura 3.16. Relación Beneficio/Costo para tres escenarios de producción en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.	118

INTRODUCCIÓN GENERAL

Generalidades

Las plantaciones forestales están tomando una importancia cada vez mayor en México, ya que reducen el plazo para la obtención de materias primas y permiten reconvertir terrenos cuyo uso previo era agrícola o pecuario de baja rentabilidad, creando fuentes de empleo diversas (FRA, 2020).

De las 11.3 millones de hectáreas (ha) identificadas por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) como terrenos aptos para establecer plantaciones forestales comerciales (PFC) en México, 3.8 se encuentran en el sureste del país, siendo esta región la que ostenta las mejores características para efectuar proyectos de PFC tales como alto potencial agroecológico, infraestructura cercana (viveros tecnificados, puertos y transporte), mercados, asistencia técnica especializada, paquetes tecnológicos especializados para distintas especies forestales, y un desarrollo histórico de las PFC en la región (CONAFOR, 2020).

En las décadas de 2000 a 2020 CONAFOR proporcionó incentivos financieros al establecimiento de 237,139 ha de PFC para producción de madera como materia prima para diversas industrias, además 27,564 ha para PFC doble propósito (productos maderables y no maderables) extrayendo en una etapa inicial látex y resina, dejando para el final del turno la madera. En el periodo 2000 a 2018 destinó apoyos para el establecimiento de 10,619 ha de PFC no maderables como fibras, ceras, aceites, follaje, entre otros. Las PFC de doble propósito se han establecido en los estados de Veracruz con 12,639 ha, Chiapas con 6,813 ha, Tabasco con 3,559 ha y en Oaxaca con 2,619 ha. En el estado de Veracruz se reporta 6,790 ha de pinos resineros establecidas como PFC (CONAFOR, 2020).

En el año 2011 inició un proyecto de plantación forestal de doble propósito con la finalidad de aprovechar resina y madera por parte de la empresa Agroforestal Uumbal en el sureste Mexicano; utilizando en una primera etapa semillas de procedencias geográficas como Australia y Brasil para posteriormente utilizar aquellos clones que presentaran la mejor expresión genética *in situ* para la producción de resina y madera. Las especies utilizadas son *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H. Barret & Golfari y *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm e híbridos de estas (Torres,

2018). La gestión de un proyecto de este tipo requiere de herramientas biométricas para la mejor administración del proceso conjunto de producción de resina y de madera.

Los modelos de predicción-proyección del crecimiento de los árboles en un horizonte de tiempo permite la administración adecuada de las PFC, siendo una de las herramientas más útiles en este tipo de proyectos al permitir obtener los turnos financieros y las edades de óptimas de cosecha bajo diferentes tasas de descuento (Téllez *et al.*, 2008; Parra, 2016).

En México la CONAFOR y los Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA) ha destinado recursos económicos para el financiamiento de PFC (Ramírez, 2011) y evaluaciones financieras de las mismas proponiendo tasas de descuento que van del 5 a 11 %, a partir del 7% las tasas incluyen el riesgo (Parra, 2016; Zaragoza, 2018).

La evaluación financiera de las PFC requiere conocimiento previo de la producción y costos asociados a la actividad. Con ello se calculan indicadores financieros como la relación beneficio/costo (*RB/C*), el valor actual neto (*VAN*), la tasa interna de retorno (*TIR*) y el periodo de retorno de la inversión inicial (*PR*). Indicadores que incluyen los ingresos de la producción, subsidios otorgados y los costos generados (Parra, 2016; Zaragoza, 2018; Telles, 2019).

En el presente trabajo de tesis se evaluó el rendimiento financiero de PFC bajo diferentes escenarios de producción: producción de madera para aserrío al final del turno (*M*), producción de madera y beneficios por acumulación de carbono atmosférico (*MC*), producción de madera y resina (*MR*), y la combinación de madera beneficios de carbono y aprovechamiento de resina (*MCR*). Para lograr el propósito, previamente se abordaron los temas específicos siguientes 1) se evaluó el efecto de la resinación en la producción maderable de árboles mediante un modelo de ahusamiento, 2) se evaluó el efecto de variables dasométricas relevantes sobre la producción de resina a nivel árbol, 3) se generaron funciones matemáticas para estimar la producción de resina a nivel árbol individual y 4) se actualizó el sistema de crecimiento y rendimiento maderable (*SCYRM*) existente para la plantación.

Área de estudio

Localización geográfica

Se localiza en las plantaciones forestales comerciales para producción de resina en Las Choapas, Veracruz, México, pertenecientes al proyecto Agroforestal Uumbal, Veracruz entre las coordenadas $17^{\circ} 49' 50.59''$ Latitud Norte y $94^{\circ} 6' 11.84''$ Longitud Oeste, a una altitud media de 100 m (**Figura 1**). El clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y cálido húmedo con lluvias todo el año, precipitación anual de 2400 a 3100 mm, temperatura mínima de 22°C y máxima 30°C . La fisiografía se compone por llanuras aluviales con lomeríos, llanuras aluviales costeras inundables y valles abiertos con lomeríos. Los suelos que predominan son luvisoles y cambisoles (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2009).

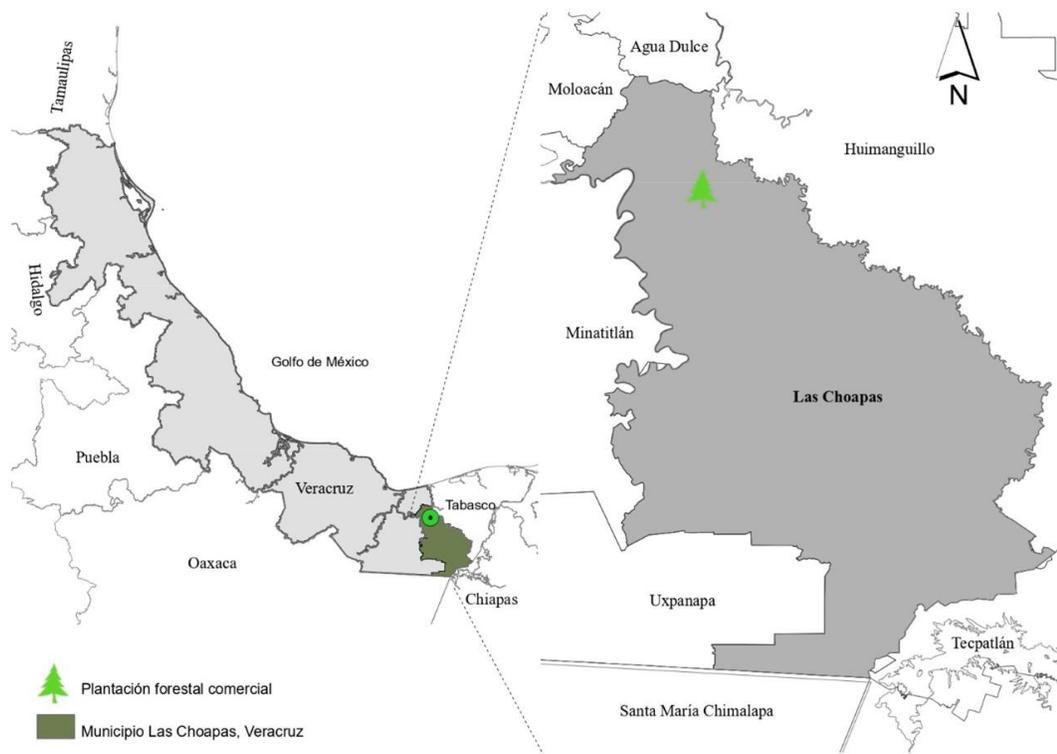


Figura 1. Ubicación del área de estudio, municipio Las Choapas, Veracruz, México

Agroforestal Uumbal Veracruz

Es uno de los proyectos pioneros en México para la producción conjunta de madera y resina. Establecida entre 2011 y 2015, adquiriendo 7,029 ha de tierras que se encontraban previamente utilizadas como potreros o terrenos agrícolas, las cuales se localizan distribuidas en diferentes fincas en el municipio de Las Chopas, Moloacán, Texistepec y Sayula de Alemán en el sureste del estado de Veracruz. Las fincas “Pericos”, “El Centenario”, “Chicoapillas”, “Santa Elena” y “La Piedra” pertenecen a Las Choapas, la finca “El Tigre” en el municipio de Moloacán y las fincas “Ceiba 1” al municipio de Texistepec, “Ceiba 2” y “Ceiba 3” al municipio de Sayula de Alemán.

Se comenzaron con plantaciones de pinos tropicales de procedencias de Australia y Brasil propagándolas mediante semilla en 2011, para posteriormente implementar la clonación a partir de los materiales que expresarán mejor su potencial genético y sobre todo adaptados a la región, además de conservar sus procedencias mezcladas con semillas importadas cumpliendo la normatividad de inspección y certificación internacional. En 2018 se comienza con el establecimiento de plantaciones clonales en algunas áreas de las fincas en donde se realizó la resinación y posterior cosecha del primer establecimiento de la plantación.

Especies utilizadas

En las plantaciones forestales comerciales para producción de resina y madera, se han utilizado *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus elliottii* var. *elliottii* e híbridos entre *Pinus caribaea* y *Pinus elliottii*; el propósito de dicha plantación es la producción de resina para el abastecimiento de materia prima a una planta de destilación en donde se obtiene brea y aguarrás además del aprovechamiento maderable.

Pinus caribaea* var. *hondurensis

Pinus caribaea var. *hondurensis* es de gran importancia económica para la región de América central ya que durante los últimos 70 años ha sido usada de manera extensiva en plantaciones comerciales, dentro y fuera de su área de distribución natural (Zheng y Ennos, 1999). Alcanza, en la etapa adulta, una altura promedio de 45 m, el diámetro normal varía de 25 a 75 cm y excepcionalmente hasta 1.35 m, su fuste es generalmente recto, bien formado y limpio de ramas

en los primeros 12 m, las ramas inferiores son grandes y horizontales, mientras que las ramas superiores son ascendentes, lo que da paso a una copa piramidal (Vidakovic, 1999; Zheng y Ennos, 1999). La corteza de árboles adultos es gruesa, pardo rojizo, en árboles jóvenes es rojiza, áspera y escamosa con profundas fisuras verticales y horizontales (Cordero y Boshier, 2003). La altitud en la que se adapta va desde el nivel del mar hasta los 1,200 m (Poynton, 1997), en un rango de temperatura de 20 hasta 27° C, con precipitaciones entre los 600 y 4000 mm.

Los suelos pueden ser de baja fertilidad y bien drenados, arenosos o de grava (Rojas y Ortiz, 1991), puede habitar en bosques cercanos a manglares o sabanas (Rebolledo, 2010). De forma natural se encuentra en el sureste en el estado de Quintana Roo, Belice, Norte de Guatemala, Honduras, Nicaragua hasta el Salvador, se caracteriza por ser la variedad con más amplia distribución geográfica (Perera, 1999) y finalmente es considerada como la única especie de pino que crece en clima cálido húmedo en México y América Central (Perry, 1991). Su uso industrial es amplio: los árboles se han utilizado para obtener resina, oleoresina, terpentina, látex y productos medicinales; su madera se utiliza en forma de vigas, madera de contrachapado, tableros de partículas, paneles, contenedores, cajas, estacas, garrochas, para pisos, muebles, cubiertas de barcos, tablas para exportación, mangos, en construcción de casas, postes, carbón y sus astillas son flexibles para obtener papel (Muginga y Van Wyk, 2003).

Pinus elliottii* var. *elliottii

El *Pinus elliottii* var. *elliottii* es un pino muy ramificado y de acículas largas, es nativo del Golfo y Atlántico desde el noreste de Louisiana hasta la región sur de Carolina del Sur, Estados Unidos. Crece a una altura de 22 a 35 m, con un diámetro de 60 a 90 cm, las ramas no se inclinan y su corteza es de color rojo marrón y surcada cuando es joven, luego presenta escamas sueltas y delgadas que se desprenden para dar paso a un color naranja oscuro, su copa es de forma piramidal, tiene algunas ramas pesadas y más abiertas que la mayoría de los pinos, se ha utilizado de manera intensiva en Australia, Nueva Zelanda, Argentina, Colombia, Sudáfrica, China (Yuan *et al.*, 2013) se adapta a climas de sitios cálidos cerca de llanuras costeras, en suelos arenosos, con abundante agua, los suelos mal drenados pueden ocasionarle dificultades, posee un rápido crecimiento de tallo y ramas, sus raíces suelen ser sólidas y firmes, se hibrida con otros pinos donde su rango se superpone con: Pino loblolly (*P. taeda*) de Florida del Sur, *P. elliottii* var. *densa*, *P. clausa*, *P.*

palustris, *P. echinata*, *P. rigida* y *P. caribaea* (Coder, 2017). Este árbol se utiliza ampliamente para la producción de madera, contrachapados, pulpa y resina (tiendas navales), leña, construcción de casas, pegamento, sillas, postes; en el uso medicinal para el dolor muscular.

Los híbridos de *P. caribea* × *P. elliotii*

Los híbridos *P. caribea* × *P. elliotii* fueron desarrollados en Australia desde la década de 1950, estos híbridos crecen bien en sitios cálidos de llanuras costeras con abundante agua; pero suelen presentar dificultades en áreas húmedas con suelos mal drenados (Gauchat *et al.*, 2003). Por su capacidad de adaptabilidad han sido plantados en países como Nueva Zelanda, Colombia, Sudáfrica, Australia, Argentina y recientemente en México (Coder, 2017; Torres, 2018). Han sido utilizadas en la industria de la madera y además para la extracción de resina debido a su adaptabilidad, baja tasa de cristalización de resina y alto contenido de trementina (Lai *et al.*, 2020). El híbrido ha mostrado una gran capacidad de producción de resina y buena calidad en la madera. La producción del híbrido combina las características sobresalientes de cada especie, sin embargo, no todos los híbridos generados muestran características sobresalientes de sus respectivas fuentes parentales, y su expresión *in situ* depende del vigor híbrido y complementariedad de características, la cruce ha mostrado superioridad con respecto a sus progenitores y a otros pinos como *P. taeda*, con tasas de crecimiento semejantes, pero con una mejor proporción de su fuste y arquitectura de su copa, resistencia a suelos inundables y bajas temperaturas (Cappa *et al.*, 2013).

Establecimiento de la PFC

En una etapa inicial se realiza la preparación del terreno con subsoladores para la limpia y desinfección de éste, posterior a la siembra se implementan micorrizas y fertilizaciones.

Se inició con una densidad de plantación de 1,244 árboles por hectárea (2.3 x 2.3 m) en 2011, teniendo un turno de 18 a 25 años, podas para retirar ramas bajas para instalar caras de resinación (6 y 10 años) y dos aclareos como tratamientos intermedios y prediciendo un incremento medio anual (IMA) de madera de 25 a 28 m³. ha⁻¹. año⁻¹ y 506 kg. ha⁻¹. año⁻¹ de resina. El aprovechamiento de la resina se basa en el método americano que permite buen aprovechamiento de resina mientras preserva la estructura baja del fuste. La resina se colecta en bolsas de plástico negro las cuales se colocan en el árbol sujetas mediante hilos maleables de plástico. La producción

de resina se almacena en toneles a pie de camino en las áreas de cosecha de la plantación y posteriormente son transportados al almacén y enviados principalmente a Industrias Alen de Monterrey Nuevo León, México.

Estudios generados

Para estas plantaciones existe un estudio biométrico realizado por Torres *et al.* (2018) que abarca diferentes aspectos, desde la construcción de un sistema de cubicación en pie hasta un sistema de crecimiento y rendimiento maderable de la plantación. A partir de los modelos de volumen fue posible obtener los factores de forma en donde se destaca el híbrido de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* × *Pinus elliottii* var. *elliottii* procedente de Australia como el mejor conformado con un $ff=0.48$ cercano al paraboloides. El sistema de crecimiento permitió estimar que el turno técnico en volumen para el índice de sitio (IS) promedio (IS=15 m, edad base=7 años) se logra a los 9 años con un IMA de $25 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ y un rendimiento del volumen total de $226 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$.

Biometría forestal

Los sistemas biométricos forestales son una herramienta que usa modelos estadísticos y matemáticos, dinámicos o estáticos, para analizar la productividad y crecimiento de las masas forestales (Vargas *et al.*, 2017). Salas *et al.* (2018) mencionan que la biometría forestal evalúa cuantitativamente los bosques naturales y las plantaciones forestales. Los modelos desarrollados tienen el propósito de facilitar el manejo de los ecosistemas forestales y guiarlos hacia la sustentabilidad. Estos conforman un sistema de ecuaciones, que pueden pronosticar el crecimiento de un bosque o un árbol y que junto con el ambiente (factores bióticos y abióticos), las características genéticas y la competencia determinan el crecimiento de árboles y rodales (Salas *et al.*, 2016).

Modelos de volumen

En plantaciones forestales, dichos modelos se centran en la cuantificación de las existencias volumétricas en un horizonte de tiempo bien definido (Vásquez *et al.*, 2016). Para determinar el volumen total de un árbol se utilizan funciones específicas por especie y lugar, las variables que usan comúnmente son el diámetro normal y la altura total ya que son variables fáciles de medir en

el inventario forestal operativo (Torres y Magaña, 2001). La expresión genética de los árboles además de su potencial biológico depende de las condiciones del ambiente donde se desarrolla, por lo que es recomendable el ajuste de modelos que estimen su volumen y factor de forma (ff) a una escala local (Vázquez *et al.*, 2016). Dichos modelos se ajustan mediante regresión lineal y no lineal utilizando el criterio de mínimos cuadrados ordinarios y se califican utilizando criterios estadísticos de bondad de ajuste como el coeficiente de determinación ajustada R^2_{Adj} el cual mide el porcentaje de variabilidad explicada por el modelo, la suma de cuadrados del error (SCE), el cuadrado medio del error (CME) ofrecen una medida de la variabilidad del modelo y los datos además de ofrecer un promedio cuadrático de las desviaciones; se examina además el cumplimiento de la homocedasticidad y autocorrelación en el análisis de regresión y de forma gráfica (Burkhardt y Tomé, 2012; Ramírez *et al.*, 2018). El primero se refiere a que la varianza del error sea constante con una media cero, el segundo, a que no exista correlación entre los términos del error, estos deben ser aleatorios (Montoya, 2008).

Modelos compatibles de ahusamiento volumen comercial

Las ecuaciones de ahusamiento se usan para predecir la tasa de cambio absoluta o relativa en el diámetro con o sin corteza a lo largo del perfil fustal de un árbol y para calcular la altura correspondiente en un diámetro en particular (Mehtätalo y Lappi, 2020). Una implicación importante de estas funciones es que pueden ser utilizadas para estimar el volumen comercial y total del árbol (Salekin *et al.*, 2021). Los árboles pueden ser considerados como una combinación de cuerpos geométricos (cilindro, paraboloides y cono), esto varía según las especies, edad del árbol, y escenarios ambientales. Se han desarrollado diferentes tipos de funciones de ahusamiento para diversas especies de árboles. En términos generales, una función de ahusamiento toma la siguiente forma:

$$d_i = f(D, H, h_i)$$

donde d_i es el diámetro a la altura h_i en el fuste para un árbol con diámetro normal D y una altura total H (Burkhardt y Tomé, 2012) y pueden ser utilizadas para calcular la altura a un diámetro especificado si se invierte la ecuación anterior. Tales ecuaciones permiten la estimación de alturas

comerciales a diámetros superiores específicos y el cálculo de la longitud para productos específicos, es decir, a qué altura sucede cierto diámetro (Burkhart y Tomé, 2012).

Para obtener el volumen de una sección dada del fuste, la expresión para calcular el área de la sección transversal se integra en la longitud deseada. Si se asume que la sección transversal tiene una forma circular, entonces su área g_i en unidades cuadradas para un diámetro d_i es:

$$g_i = \frac{\pi}{40000} d_i^2 = k d_i^2$$

donde k es $\frac{\pi}{40000}$ para producir el área basal g_i en m^2 cuando el d_i esta en cm (Burkhart y Tomé, 2012).

Integrando la expresión para el cálculo del área en unidades cuadradas sobre una longitud deseada se obtiene el volumen en unidades cúbicas para ese segmento:

$$V_{h_1-h_2}(m^3) = k \int_{h_1}^{h_2} d_i^2 \delta h = k \int_{h_1}^{h_2} f(D, H, h_i)^2 \delta h$$

donde $V_{h_1-h_2}$ es el volumen para el segmento entre h_1 y h_2 , k es un factor constante dependiendo de las unidades y h_1 y h_2 denotan los límites de integración (Burkhart y Tomé, 2012).

Debido a su nivel de precisión y alta flexibilidad las ecuaciones de ahusamiento se han vuelto un método estándar para la estimación del volumen en las décadas recientes (Weiskittel, 2014).

Desde 1960, ha existido una preferencia por modelos matemáticamente consistentes que ofrecen la flexibilidad necesaria para estimar adecuadamente el ahusamiento desde la base hasta la punta del árbol. La mayoría de las ecuaciones de ahusamiento se basan principalmente en tres variables predictoras: la altura relativa o absoluta en el fuste, el diámetro normal y la altura total (Sakici *et al.*, 2008). Para fines práctico se han establecido tres grandes grupos: Funciones de ahusamiento simples, segmentadas y modelos de tipo exponente-variable. Las funciones de ahusamiento simples describen el perfil fustal completo de un árbol mediante una sola ecuación. No obstante, la forma del fuste es altamente variable, por lo que describirlo con una ecuación sencilla se torna una tarea complicada (Brooks *et al.*, 2008; Sakici *et al.*, 2008). Las funciones segmentadas consisten en submodelos que describen diferentes porciones del fuste; estos submodelos son

unidos de tal modo que modelan el fuste completo. Los modelos de tipo exponente-variable consisten en funciones continuas que describen el perfil fustal desde el suelo hasta la punta mediante el uso de exponentes que cambian y describen la forma de la parte baja (neiloide), media (paraboloide) y alta (cono) específicamente (Burkhart y Tomé, 2012).

Sistemas de crecimiento y rendimiento maderable

Modelos de crecimiento en volumen

La planificación apropiada del uso o beneficio de un bosque hace necesario que sus administradores cuenten con herramientas silvícolas cuantitativas confiables, que les permitan pronosticar el crecimiento y el rendimiento maderable esperado. Entre estas herramientas, se encuentran los sistemas de crecimiento y rendimiento maderable (SCYRM) (Santiago *et al.*, 2015; Weiskittel, 2014).

Un SCYRM es un conjunto de modelos estadístico-matemáticos que describen de manera cuantitativa la dinámica del crecimiento de un bosque o rodal en función del tiempo (Peng, 2000). Esta dinámica es reflejada en los cambios de magnitud de las variables del rodal como la altura dominante, el diámetro promedio de los árboles, el área basal, el número de árboles por unidad de superficie y el volumen (Santiago *et al.*, 2015). En un SCYRM cada ecuación describe una relación diferente entre un conjunto de variables, pero se asume que todas las relaciones ocurren simultáneamente.

De este modo, los SCYRM facilitan la toma de decisiones debido a que permiten planear la cosecha, evaluar regímenes o tratamientos de manejo alternativos y pueden usarse como una herramienta básica para la evaluación financiera (Fierros *et al.*, 2017). La generación y actualización de un SCYRM para una plantación, en particular, que integre como componentes los modelos resultantes de estudios previos, dará mayor certidumbre a las proyecciones de los rendimientos que se estimen (Tamarit *et al.*, 2019).

Para construir el sistema se utilizan las técnicas de mínimos cuadrados ordinarios y regresión aparentemente no relacionada, ésta última logra mayor compatibilidad entre los modelos de predicción y proyección de las variables; y mejoran la estimación de los parámetros de los modelos

al minimizar la suma de cuadrados del error. Las ecuaciones que integran el sistema deben cumplir también con características como el comportamiento sigmoide, que presente un punto de inflexión delimitado por una asíntota horizontal, el cual corresponde matemáticamente al crecimiento total del individuo con respecto a cierta variable (altura total, volumen, área basal); interpretación biológica adecuada, el cual se refiere al crecimiento que depende del potencial biótico del individuo más las restricciones del mismo por el entorno en el que se desarrolla, transividad y parsimonia (Zaragoza, 2018).

A partir de las ecuaciones de IS se modelan los cambios en densidad vía mortalidad (NA) y área basal (AB) para después integrar estas variables en un modelo de volumen por unidad de superficie (V) (Torres, 2018).

Calidad de estación

La calidad de estación es un referente de la productividad en las áreas forestales. Es una herramienta que permite la clasificación de los rodales de la cual parte su administración silvícola, al conocer el ritmo de crecimiento en altura con respecto a cierta edad (E) de las especies arbóreas. Comúnmente se utiliza el indicador conocido como índice de sitio (IS) como una medida cuantitativa para evaluar y clasificar la productividad potencial de áreas forestales y estimar su rentabilidad (García *et al.*, 2021). El IS se define como la altura dominante (Hdom) que alcanza una especie forestal, en el caso de las PFC de interés comercial, en un rodal a una determinada edad (edad base o de referencia) y el incremento en Hdom es una variable que está correlacionada con la producción maderable (Volumen) (Clutter *et al.*, 1980).

Para estimar el IS se utilizan estructuras matemáticas que describen el crecimiento promedio de la Hdom y a partir de estas se elaboran curvas de calidad de estación (cada curva representa una clase de productividad). Los patrones de crecimiento de este tipo de curvas cubren dos grandes casos: curvas anamórficas, es decir proporcionales entre IS con tasas de crecimiento relativo iguales, o polimórficas que describen tasas de crecimiento relativo diferente entre calidades de estación (Torres y Magaña, 2001; Torres, 2018).

Sistema de crecimiento y rendimiento maderable implícito

Este sistema permite la modelación del número de árboles por categoría diamétrica a lo largo del tiempo (edad de los rodales). Lo cual permite: la estimación de la distribución de los productos maderables con respecto a un mercado definido (productos maderables primarios, secundarios, celulósicos, entre otros), la planificación de la silvicultura a aplicar para aumentar el valor de los productos maderables (Uranga, 2014), la modelación de la producción de resina, la cual está relacionada directamente con el diámetro y la altura de los árboles, además de que el inicio del estriado del fuste para la cosecha de resina está condicionado por un diámetro mínimo resinable (Ayala *et al.*, 1998).

La función de probabilidad aplicada con mayor frecuencia en proyección forestal es Weibull de tres parámetros, ya que es relativamente sencilla de utilizar en masas forestales homogéneas como es el caso de PFC (Torres-Rojo, 2000).

Modelos de producción de resina

Los estudios relacionados con la producción de resina que proponen la elaboración de modelos utilizando variables dasométricas son escasos. Las variables que se han propuesto para este fin son el diámetro normal (cm), la altura de fuste limpio (m), el diámetro de copa (m), la longitud de copa (m); las variables de producción son el número de caras vivas en el fuste del árbol, la longitud de la cara, la profundidad de la estría, la distancia entre caras, la altura de cara o panel de producción de resina (Ayala *et al.*, 1992; Reyes *et al.*, 2019; López, 2021).

Las variables dasométricas de los árboles potenciales para el aprovechamiento de resina pueden utilizarse para generar una función matemática para la predicción de la cantidad de resina a obtener por árbol. Mediante regresión lineal y no lineal, utilizando mínimos cuadrados ordinarios, se ajusta la ecuación de producción; la variable respuesta o dependiente corresponde a la producción de resina por árbol y las variables independientes o explicativas corresponden a las variables dasométricas o una combinación de estas (Ayala *et al.*, 1992; Zamora-Martínez, 2013).

Ayala *et al.* (1992) ajustaron un modelo de predicción de resina mediante el método americano que utiliza en su estructura la variable combinada diámetro-altura (D^2H), lo que lo hace compatible con los *SCYRM* (Torres, 2018), la estructura de la ecuación es:

$$Y_i = e^{\alpha_0 - \alpha_1 \cdot DN^2HT} \cdot DN^2H^{\alpha_2}$$

donde:

Y_i = Producción de resina del árbol i

e = función exponencial

α_i = parámetros a estimar mediante regresión

DN^2H = variable combinada diámetro normal en cm, y altura total en m para el i -ésimo individuo.

Biomasa y carbono en las Plantaciones Forestales Comerciales

Las PFC son proyectos viables para la fijación de Carbono (C), bajo un régimen silvícola intensivo maximizan la biomasa por unidad de área. Martínez *et al.* (2019) reportaron que la madera obtenida de las PFC es generalmente transformada en productos que perduran y esto da paso a que el C estará almacenado en estos productos por un periodo de tiempo extenso, por lo que, el almacén de carbono en la madera es un área de oportunidad al potencial productivo de las especies utilizadas en las PFC ante el cambio climático. Se han realizado estudios sobre la distribución del C en la biomasa de los árboles mediante el uso de variables dasométricas, con metodologías que utilizan el IS y los *SCYRM* (Telles, 2019).

Evaluación financiera de las PFC

La evaluación de la rentabilidad de los proyectos forestales comerciales es esencial para el manejo adecuado de las actividades de las PFC. Diferentes actividades se presentan en un proyecto forestal, los costos incluyen la planeación, la adquisición de material genético de calidad (plántulas, semillas), adquisición o renta de maquinaria para la preparación del terreno, delimitación de los sitios a plantar, construcción de vías de acceso, protección forestal (manejo de plagas y enfermedades, brechas cortafuego, entre otros), monitoreo (inventarios), cortas, podas,

salarios, gastos administrativos y todas estas actividades deben de estar cuidadosamente planeadas e inspeccionadas ya que suceden a través de periodos de varios años (Imaña-Encinas *et al.*, 2022).

Los propietarios forestales necesitan obtener información pertinente al rendimiento de los productos que derivan de su plan de manejo, con las actividades propias del mismo (ingresos y costos). De este modo la evaluación financiera es precisa para tener certeza del valor de los productos generados y para la toma de decisiones apropiadas para alcanzar los objetivos establecidos (Ruíz *et al.*, 2006).

Es necesario obtener los indicadores financieros que permitan analizar el rendimiento neto del proyecto y realizar el análisis de sensibilidad con tasas de descuento que consideren el riesgo de la inversión (Parra, 2016). En el caso de las plantaciones de pinos tropicales para producción de resina y madera en el sureste mexicano, el rendimiento corresponde al volumen maderable del bosque en crecimiento, la tasa de acumulación de C y la tasa de producción de resina en un horizonte de planeación de estas PFC.

OBJETIVOS

Considerando que las especies de interés para la plantación son *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H.G.K y el híbrido de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* x *Pinus elliottii* var. *elliottii* para la producción conjunta de resina y madera en el sureste mexicano, se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general

- Realizar la evaluación financiera bajo diferentes escenarios de producción de resina y madera en plantaciones de pinos tropicales en Las Choapas, Veracruz, México.

Objetivos específicos

- Elaborar modelos de ahusamiento-volumen comercial para los árboles resinados y no resinados de la plantación.
- Elaborar funciones para estimar la producción de resina a nivel árbol individual compatible con el *SCYRM*.
- Actualizar el *SCYR* maderable explícito y el *SCYRM* implícito mediante la función de distribución de probabilidad (*fdp*) de Weibull para determinar las distribuciones diamétricas.
- Definir con base en la producción estimada de resina y madera escenarios que permitan maximizar el ingreso del productor mediante la evaluación financiera con indicadores aplicados a proyectos de inversión.

CAPÍTULO I. MODELOS DE AHUSAMIENTO Y VOLUMEN COMERCIAL PARA PINOS TROPICALES EN PLANTACIONES DESTINADAS A LA PRODUCCIÓN DE RESINA

1.1 RESUMEN

Para la descripción cuantitativa y cualitativa de la forma del fuste de un árbol se utilizan factores de forma y funciones de ahusamiento. En el sureste de México se establecieron plantaciones de *Pinus caribaea*, *Pinus elliottii* y el híbrido entre estas especies con el propósito de producir simultáneamente resina y madera. Los productores requieren saber si la práctica de resinación a muerte tiene efectos adversos en la forma de los árboles y si afecta el volumen de madera producida. Para responder esos cuestionamientos este estudio comparó los factores de forma, el ahusamiento y el volumen entre árboles resinados y no resinados para tres procedencias de pinos tropicales. Se midieron 198 árboles (99 resinados y 99 sin resinar) en todas las categorías diamétricas de la plantación. Mediante análisis de regresión lineal y no lineal se ajustaron modelos de volumen total y un sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial variable. Al incluir variables indicadoras (*dummy*) y pruebas de adicionalidad en los modelos, se identificó efecto de las procedencias y la resinación en el factor de forma y ahusamiento. Los árboles no resinados acumularon más volumen comercial que los resinados. En contraste, el factor de forma (ff) de los árboles resinados fue mayor que el correspondiente a los no resinados, $ff= 0.51$ y $ff=0.45$ respectivamente. El aumento del factor de forma varió entre 4 y 7% en función de la procedencia, siendo el híbrido de *Pinus caribaea* × *Pinus elliottii* el que presentó la geometría del fuste más deseable, tanto en árboles resinados como en no resinados, con base en el modelo de Demaerschalk, que estima un 99 y 97 % la variabilidad en volumen comercial y el ahusamiento.

Palabras clave: *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus elliottii* var. *elliottii*, factor de forma, sistema compatible, variables *dummy*, resina.

TAPER AND MERCHANTABLE VOLUME MODELS FOR TROPICAL PINES IN PLANTATIONS FOR RESIN PRODUCTION

1.2 ABSTRACT

Form factors and taper functions are used for the quantitative and qualitative description of a tree's stem form. In southeastern Mexico, plantations of *Pinus caribaea*, *Pinus elliottii*, and the hybrid between these species have been established to simultaneously produce resin and timber. Producers need to know if the practice of resin tapping to death has adverse effects on the shape of the trees and if it affects the volume of wood produced. To answer these questions, this study compared form factors, taper, and volume between tapped and non-tapped trees for three tropical pine provenances. A total of 198 trees (99 tapped and 99 non-tapped) were measured in all diameter categories of the plantation. Linear and nonlinear regression analyses were used to fit total volume models and a compatible system of taper and variable merchantable volume. By including indicator variables (*dummy*) and additionality tests in the models, the effect of provenances and resin tapping on the form factor and taper was identified. Non-tapped trees accumulated more commercial volume than tapped trees. In contrast, the form factor (*ff*) of tapped trees was higher than that of non-tapped trees, $ff=0.51$ and $ff=0.45$ respectively. The increase in form factor varied between 4 and 7% depending on the provenance, with the *Pinus caribaea* × *Pinus elliottii* hybrid having the most desirable stem geometry in both tapped and non-tapped trees, based on the Demaerschalk's model, which estimates 99 and 97 % variability in merchantable volume and taper.

Keywords: *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus elliottii* var. *elliottii*, form factor, compatible system, *dummy* variables, resin.

1.3 INTRODUCCIÓN

La resina de pino es un producto industrial no maderable valioso (Vázquez *et al.*, 2021), cuyos componentes se utilizan como aditivos en diferentes productos alimentarios, farmacéuticos, agroquímicos y medicamentos (Lai *et al.*, 2020). En años recientes sus derivados han cobrado importancia para sustituir combustibles y productos químicos obtenidos del petróleo (Kelkar *et al.*, 2006; Neis *et al.*, 2019; Vázquez *et al.*, 2021), lo que convierte a la resina en una alternativa natural renovable en el sector industrial.

En el 2011 se establecieron plantaciones de pino en Las Choapas, Veracruz para producir resina como parte del proyecto Agroforestal Uumbal (Torres *et al.*, 2020), con diferentes procedencias geográficas de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H. Barret y Golfari y *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm. Estas especies se utilizan en la industria del aserrío y para la de extracción de resina debido a su adaptabilidad, y a la baja tasa de cristalización y alto contenido de trementina de su resina (Lai *et al.*, 2020).

La capacidad productiva combinada (resina-madera) de las especies plantadas en las Choapas es desconocida, por ello un objetivo paralelo de las plantaciones fue identificar las procedencias con mayor potencial productivo combinado (Torres *et al.*, 2020), para después proceder con su propagación clonal, aprovechar los materiales genéticos con características sobresalientes y homogeneizar el arbolado y productos.

A nivel mundial, la investigación respecto al efecto de la resinación en el crecimiento y la acumulación de volumen de los árboles es limitada (Tomusiak y Magnuszewski, 2009). La mayoría de los trabajos han analizado patrones de crecimiento mediante estudios dendrocronológicos en árboles resinados y no resinados para determinar el crecimiento en el diámetro normal, la acumulación de la resina en la madera y la sensibilidad de los árboles a las condiciones climáticas por el aprovechamiento de resina (Chen *et al.*, 2015; Van der Maaten *et al.*, 2017; Zeng *et al.*, 2021). Algunos estudios realizados en China con *Pinus elliottii* abordan el impacto de la resinación en las propiedades de la madera, la partición de los carbohidratos no estructurales entre la extracción de resina y la producción de madera, y el crecimiento de los rodales sometidos a resinación para proporcionar una referencia para la mejora genética (Du *et al.*,

2022; Wu *et al.*, 2022). Otros se han enfocado en el estudio de las propiedades mecánicas de la madera en árboles resinados y la factibilidad de aprovechar madera-resina en plantaciones de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Ayala *et al.*, 1992; Ayala *et al.*, 1998; Gallis *et al.*, 2011; Reyes *et al.*, 2012).

Dado que en las plantaciones de Agroforestal Uumbal no todos los árboles se resinan (los árboles más rentables para producir madera no son intervenidos), surge la necesidad de comparar la geometría de los fustes entre ambos tipos de arbolado para determinar el efecto de la resinación en el volumen y forma de los árboles. La geometría y el perfil fustal se pueden evaluar a través de modelos matemáticos que describan el factor de forma y el ahusamiento (Tlaxcala *et al.*, 2016). El factor de forma se describe como la razón entre el volumen de un árbol y el de un cilindro con el mismo diámetro y la misma altura. Conocer dicho factor permite calcular fácilmente el volumen individual del fuste (Da Silva *et al.*, 1994). Por otro lado, el ahusamiento refiere a la variación del diámetro del fuste a lo largo de su longitud, misma que puede estimarse mediante ecuaciones que simulen el perfil del fuste de los árboles (Hernández-Pérez *et al.*, 2018).

Esta investigación plantea la hipótesis de que la geometría del fuste y el factor de forma pueden verse afectados por la resinación que se aplica a los árboles, y que esto a su vez podría modificar el volumen total y la distribución de productos del volumen comercial. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la resinación en la acumulación de volumen de madera comercial de árboles de *P. caribaea* var. *hondurensis*, *P. elliottii* var. *elliottii*, y el híbrido entre estas especies plantados en Las Choapas, Veracruz, México, a partir de la variación en el factor de forma y su ahusamiento-volumen comercial.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 Área de estudio

Se localiza en las plantaciones forestales comerciales para producción de resina en Las Choapas, Veracruz, México, pertenecientes al proyecto Agroforestal Uumbal, Veracruz entre las coordenadas 17° 49' 50.59" Latitud Norte y 94° 6' 11.84" Longitud Oeste, a una altitud media de 100 m. El clima es cálido húmedo con lluvias todo el año y abundantes en verano, la precipitación anual varía de 2400 a 3100 mm, la temperatura mínima es 22 °C y la máxima 30° C. La fisiografía

se compone por llanuras aluviales con lomeríos, llanuras aluviales costeras inundables y valles abiertos con lomeríos. Los suelos que predominan son luvisoles y cambisoles (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2009).

1.4.2 Datos de campo y estimación de volumen de madera

Se seleccionaron 198 árboles, 99 resinados (*r*) y 99 no resinados (*nr*), de edades entre 8 y 9 años (**Cuadro 1.1**). La resinación de los árboles se realizó en dos caras utilizando el método americano, comenzando desde la altura de tocón (0.1 m) hasta una altura de 2.60 a 3 m en el fuste. Los árboles seleccionados se derribaron para obtener datos precisos de los diámetros a diferentes alturas del fuste utilizando la metodología de análisis troncal (Hernández-Ramos *et al.*, 2017; Torres *et al.*, 2020).

Cuadro 1.1. Características de las procedencias utilizadas en el estudio.

Procedencias	Especie	Origen	Edad	n	
				<i>r</i>	<i>nr</i>
L1	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	Brasil	8	33	33
L4	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	Australia	9	33	33
L5	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> x <i>Pinus elliottii</i> var. <i>elliottii</i>	Australia	8	33	33

n=tamaño de muestra; *r*= árboles resinados y *nr*= árboles no resinados.

Se obtuvieron 3030 pares de observaciones diámetro-altura (**Figura 1.1 A**). El comportamiento en altura relativa respecto al diámetro relativo por sección del fuste de cada árbol dentro de la muestra sigue un comportamiento lógico (**Figura 1.1 B**).

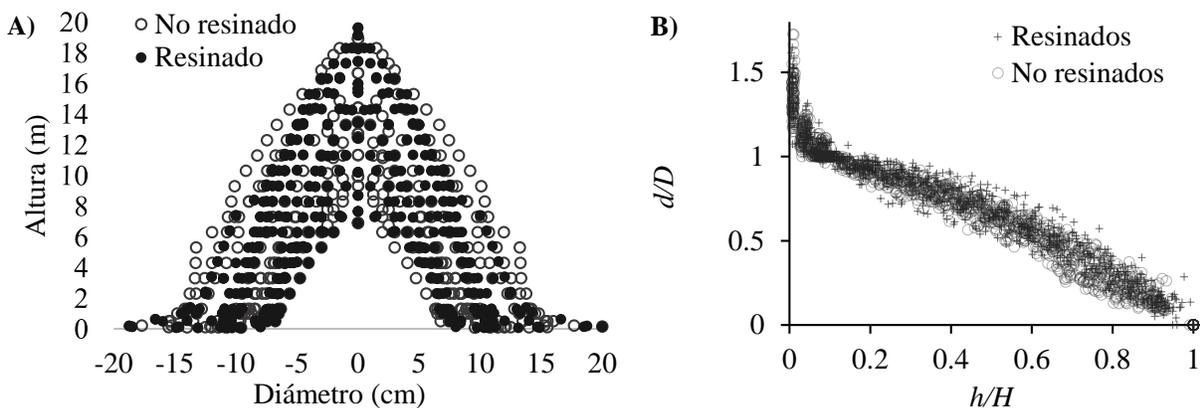


Figura 1.1. A) Alturas parciales en función de los diámetros parciales, y B) Dispersión de las alturas relativas respecto a los diámetros relativos de los 198 árboles resinados y no resinados incluidos en el ajuste de las funciones de ahusamiento-volumen comercial.

Para calcular el volumen de las secciones bajas y medias del fuste se usó la fórmula de Newton y el método del centroide (Wiant *et al.*, 1992), para la punta del árbol la fórmula del cono; de esta forma se obtuvo el volumen comercial acumulado de los árboles muestreados (**Figura 1.2 A**). El volumen total del fuste se calculó con el método de trozas traslapadas desarrollado por Bailey (1995) debido a su precisión (Torres *et al.*, 2020). Los árboles resinados se concentraron en categorías de 15 a 20 cm de diámetro normal, mientras que los no resinados se agruparon en las categorías de 20 a 35 cm (**Figura 1.2 B**).

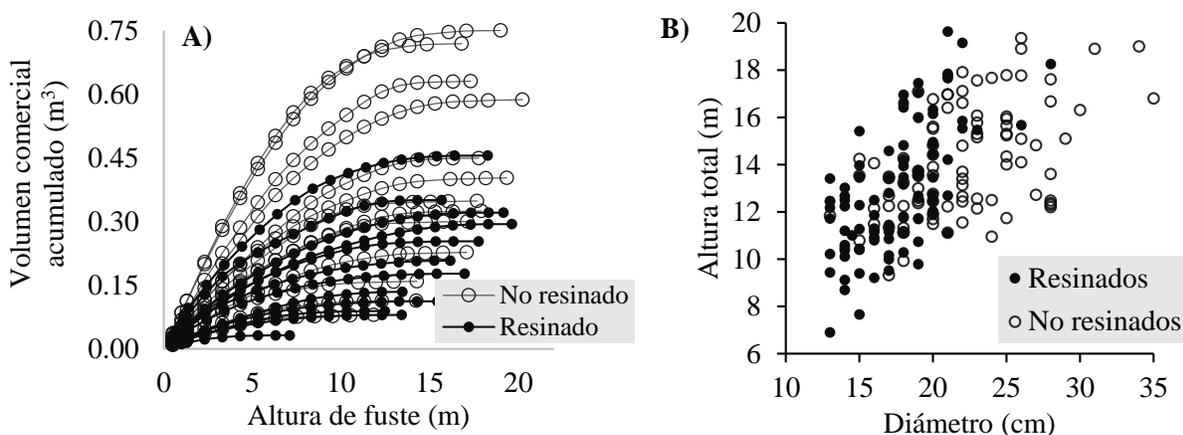


Figura 1.2. A) Volumen comercial en función de la altura de fuste para la muestra en general y B) Dispersión de las observaciones de diámetro normal-altura total.

1.4.3 Evaluación del efecto de la resinación y las procedencias en el factor de forma y volumen

Con base en los resultados obtenidos por Torres *et al.* (2020) para estimar el factor de forma, se partió de un modelo de volumen total de fuste del tipo variable combinada dado por la expresión: $V = \alpha + \beta \cdot D^2 H$ (Bruce y Schumacher, 1942), donde el parámetro α (i.e. intercepto) se interpreta como el volumen mínimo inventariado y β es el factor de forma implícito de la función, D representa el diámetro normal (cm), H la altura total (m) y V el volumen maderable total del fuste con corteza (m^3). Puesto que $\beta = ff \cdot \pi / 40,000$ entonces el factor de forma respecto al cilindro es $ff = \beta / (\pi / 40,000)$.

Se utilizaron variables indicadoras (*dummy*) en el análisis estadístico para determinar si las diferencias en los factores de forma por procedencia y por efecto de la resinación son estadísticamente significativas. Estas variables tienen la característica de generar categorías tomando valores de cero o uno (Montgomery y Peck, 2012), dependiendo si la observación pertenece a alguna procedencia y si está resinada o no. Se tomaron como base los árboles *nr* para estimar los demás parámetros en el análisis de regresión, incluyendo las variables indicadoras en el parámetro β del siguiente modo: $V = \alpha + (\beta_{10} + X_1\beta_{11}) D^2H$.

Donde:

$$X_1 = \{1, \text{si pertenece a un árbol resinado } 0, \text{de otro modo}\}$$

La prueba de hipótesis se presenta en el efecto de resinación $H_0: \beta_{11} = 0$ contra $H_A: \beta_{11} \neq 0$.

Se elaboró un modelo único de regresión considerando todos los árboles (*r* y *nr*) de las tres procedencias para probar la hipótesis del factor de forma entre ellas. De esta forma se tienen seis categorías: *L1r* (procedencia 1, resinado), *L1nr* (procedencia 1, no resinado), *L4r*, *L4nr*, *L5r* y *L5nr*. Para lograr que los parámetros sean estimables se tomó a la procedencia *L5* no resinada (*L5nr*) como base en el análisis de regresión. El resto de los parámetros son aditivos a este modelo, de tal forma que la función general incluyendo las variables indicadoras se define como: $V = \alpha + (\beta_{10} + X_1\beta_{11} + Z_1\beta_{20} + Z_1 X_1\beta_{21} + Z_2\beta_{30} + Z_2 X_1\beta_{31}) D^2H$.

Donde:

$$Z_1 = \{1, \text{si pertenece a la procedencia L1 0, de otro modo}\}$$

$$Z_2 = \{1, \text{si pertenece a la procedencia L4 0, de otro modo}\}$$

La prueba de que el parámetro $H_0: \beta_{10} = 0$ es trivial en este caso pues sabemos que existe una función de regresión general descrita por α y β_{10} . Lo que es relevante ver es si existe adicinalidad significativa por parte de los parámetros que representan el efecto de resinación y de las procedencias. Por ello la hipótesis nula relevante es que: $H_0: \beta_{11} = \beta_{20} = \beta_{21} = \beta_{30} = \beta_{31} = 0$ contra H_A : al menos una de ellas diferente de cero.

Para ampliar la prueba se utilizó, además del modelo de forma constante sugerido, el modelo de Spurr $V = \alpha_0 (D^2 H)^{\beta_1}$ (Husch, 1963) que además de su bondad de ajuste, es un modelo de forma variable y se ajustó como un modelo no lineal. Para detectar cambios en el volumen total entre r y nr se redefinieron los parámetros α_0 y β_1 : $\alpha_0 = \alpha_{01} + X_1 \alpha_{02}$ y $\beta_1 = \beta_{11} + X_1 \beta_{12}$ utilizando los nr como base para estimar los demás parámetros que muestran el efecto de la resinación, probando la hipótesis $H_0: \alpha_{02} = \beta_{12} = 0$ contra H_A : al menos una de ellas diferente de cero, los parámetros α_0 y β_1 se replantearon en función de las variables indicadoras tomando como base L5nr del siguiente modo:

$$\alpha_0 = \alpha_{01} + X_1 \alpha_{02} + Z_1 \alpha_{03} + Z_1 X_1 \alpha_{04} + Z_2 \alpha_{05} + Z_2 X_1 \alpha_{06}$$

$$\beta_1 = \beta_{11} + X_1 \beta_{12} + Z_1 \beta_{13} + Z_1 X_1 \beta_{14} + Z_2 \beta_{15} + Z_2 X_1 \beta_{16}.$$

Al igual que el modelo previo se probó la hipótesis $H_0: \alpha_{02} = \alpha_{03} = \alpha_{04} = \alpha_{05} = \alpha_{06} = \beta_{12} = \beta_{13} = \beta_{14} = \beta_{15} = \beta_{16} = 0$ contra H_A : al menos una de ellas diferente de cero.

1.4.4 Evaluación del efecto de la resinación y las procedencias en el ahusamiento

Pruebas iniciales con varios modelos de ahusamiento permitieron identificar al modelo de Demaerschalk (1972), ajustado por Torres *et al.* (2020) para datos de las plantaciones y

procedencias estudiadas, como el más eficiente por su bondad de ajuste. Este modelo se enuncia como:

$$\left(\frac{d}{D}\right)^2 = \theta_0 \left(\frac{1}{D^2 H}\right) X^{\theta_1} + \theta_2 X^{\theta_3}$$

donde: d= diámetro (cm) con corteza de la i-ésima sección a la altura h (m), D= diámetro normal (cm), H= altura total en m, X= (H-h / H); θ_i = parámetros a estimar del modelo.

Las ecuaciones que constituyen el sistema compatible de ahusamiento-volumen total-volumen comercial generadas a partir de integración son las siguientes (Torres *et al.*, 2020):

$$V = k \left(-\frac{\theta_0 \left(\frac{H-h}{H}\right)^{\theta_1+1}}{\theta_1+1} - \frac{\theta_2 D^2 H \left(\frac{H-h}{H}\right)^{\theta_3+1}}{\theta_3+1} \right) \Big|_{h_2=H}^{h_1=0} = \frac{k\theta_0}{\theta_1+1} + \frac{k\theta_2}{\theta_3+1} D^2 H$$

$$V_{comercial} = k \left(-\frac{\theta_0}{\theta_1+1} \left(\left(\frac{H-h_c}{H}\right)^{\theta_1+1} - \left(\frac{H-h_t}{H}\right)^{\theta_1+1} \right) - \frac{\theta_2 D^2 H}{\theta_3+1} \left(\left(\frac{H-h_c}{H}\right)^{\theta_3+1} - \left(\frac{H-h_t}{H}\right)^{\theta_3+1} \right) \right)$$

donde: k= es la constante usada cuando los diámetros se expresan en cm y las longitudes en m, hi= altura (m) de la i-ésima sección a un cierto diámetro (cm), hc= altura (m) sobre el tocón a la que se da el volumen comercial; ht = altura (m) del tocón.

El modelo de volumen total implícito es de tipo variable combinada (forma constante):

$$V = \frac{k\theta_0}{\theta_1+1} + \frac{k\theta_2}{\theta_3+1} D^2 H$$

Para proponer el modelo que pruebe las hipótesis del efecto de las procedencias y de la resinación, éste se reescribe con base en los parámetros θ_2 y θ_3 , tomando como base a la procedencia L5nr:

$$\theta_2 = \theta_{20} + X_1 \theta_{21} + Z_1 \theta_{22} + X_1 Z_1 \theta_{23} + Z_2 \theta_{24} + X_1 Z_2 \theta_{25}$$

$$\theta_3 = \theta_{30} + X_1 \theta_{31} + Z_1 \theta_{32} + X_1 Z_1 \theta_{33} + Z_2 \theta_{34} + X_1 Z_2 \theta_{35}$$

De manera análoga a las pruebas de hipótesis de factor de forma y volumen total, la hipótesis nula para el ahusamiento se prueba sobre los parámetros que indican los efectos de procedencias y de resinación, por lo que $H_0: \theta_{21} = \theta_{22} = \theta_{23} = \theta_{24} = \theta_{25} = \theta_{31} = \theta_{32} = \theta_{33} = \theta_{34} = \theta_{35} = 0$ vs H_A : al menos una de ellas es diferente de cero.

Asimismo, se prueba si los parámetros θ_0 y θ_1 , que son los que representan el intercepto en esta ecuación de ahusamiento son diferentes entre árboles resinados y no resinados, tomando como base a los árboles *nr* para estimar los demás parámetros en el análisis de regresión, incluyendo las variables indicadoras en θ_0 y θ_1 :

$$\theta_0 = \theta_{00} + X_1\theta_{01} \text{ y } \theta_1 = \theta_{10} + X_1\theta_{11}.$$

Donde:

$$X_1 = \{1, \text{ si pertenece a un árbol resinado } 0, \text{ de otro modo}\}$$

La prueba de hipótesis nula se presenta en el efecto de resinación $H_0: \theta_{01} = \theta_{11} = 0$ vs $H_A: \theta_{01} \neq \theta_{11} \neq 0$.

1.4.5 Estrategia de ajuste

La estimación de los parámetros de los modelos de la variable combinada lineal, volumen total de Spurr y de ahusamiento, se hizo mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios con el procedimiento MODEL de SAS[®] 9.0 (SAS Institute Inc, 2004) incluyendo la estimación simultánea con máxima verosimilitud con información completa (FIML) para el ajuste del sistema compatible de ahusamiento-volumen comercial (Hernández-Ramos *et al.*, 2017; Avendaño, 2021). Se revisó el cumplimiento de los supuestos de homocedasticidad y autocorrelación en el análisis de regresión (Montoya, 2008; Ramírez-Martínez *et al.*, 2018) mediante un análisis gráfico de los residuales.

Se examinaron los supuestos de homocedasticidad y autocorrelación en el análisis de regresión mediante un análisis gráfico de los residuos, para corregir el problema de heteroscedasticidad asociado al volumen total y comercial se utilizó una función de potencia de la varianza del residual $\sigma_i^2 = (D^2H)^\Phi$. El valor Φ se estimó mediante el método propuesto por Harvey (1976) que

consiste en usar los errores sin ponderar como variable dependiente en el modelo potencial de varianza del error.

La estimación de dichas funciones se realizó usando la función ponderada con la opción $resid.VT = resid.VT/((D^2H)^\Phi)^{0.5}$ del procedimiento SAS® 9.0. Donde: VT = volumen total a estimar por el modelo, $\Phi = 1.815$ para el modelo VT entre r y nr , y $\Phi = 1.82$ incluyendo el efecto debido a las procedencias y entre r y nr para obtener el factor de forma en el modelo (Bruce y Schumacher, 1942) respectivamente. En el modelo de Spurr (Husch, 1963) $\Phi = 1.65$ para VT y $\Phi = 1.8$ para el ajuste incluyendo el efecto por procedencias r y nr en VT.

Puesto que los datos utilizados para ajustar las funciones de ahusamiento contienen múltiples observaciones de un mismo árbol (datos jerárquicos), es razonable esperar que los residuales de cada individuo presenten autocorrelación, lo cual infringe el supuesto de independencia del error, por lo que se utilizó una estructura autorregresiva continua de segundo orden (CAR 2) en el ajuste de los modelos de ahusamiento y ahusamiento-volumen comercial de Demaerschalk (1972) para corregirlos. El modelo autorregresivo expande los términos del error de la siguiente forma (Zimmerman y Núñez-Antón, 2001): $e_{ij} = d_1\rho_1^{h_{ij}-h_{ij-1}}e_{ij-1} + d_2\rho_2^{h_{ij}-h_{ij-2}}e_{ij-2} + \varepsilon_{ij}$. Donde: e_{ij} = residual ordinario en el árbol i , $d_i=1$ para $j > 1$, $d_i=0$ para $j=1$, ρ_i =parámetro autorregresivo de orden i , $h_{ij} - h_{ij-1}$ =distancia de separación de la j a la $j-1$ observación dentro de cada árbol, $h_{ij} > h_{ij-1}$.

Para elegir los modelos de mejor ajuste se utilizaron los siguientes criterios estadísticos: el coeficiente de determinación ajustado R^2_{Adj} el cual mide el porcentaje de variabilidad explicada por el modelo. La suma de cuadrados del error (SCE) que es la sumatoria de las diferencias al cuadrado entre los valores observados y los predichos por el modelo. La raíz del cuadrado medio del error (RCME) que es la raíz de la suma de cuadrados del error dividido entre sus correspondientes grados de libertad y estima el promedio del error entre los valores observados y predichos del modelo.

$$R^2_{Adj} = 1 - (n - 1) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$$

$$SCE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}$$

donde: $y_i, \underline{y}, \hat{y}_i$ = valor observado de la variable respuesta, medio y predicho; n = número de observaciones de la muestra; p = número de parámetros en el sistema.

1.5 RESULTADOS

1.5.1 Efecto de la resinación en el volumen total entre árboles resinados y no resinados

El ff promedio para los árboles resinados (r) resultó ligeramente mayor en las procedencias L4 y L1, mientras que en L5 los árboles no resinados (nr) presentaron un ff promedio mayor que los r (**Cuadro 1.2**). Los árboles nr de L5 y L4 mostraron, en promedio, un mayor volumen total, mientras que los árboles resinados de procedencia L1 presentaron mayor volumen que los nr (**Cuadro 1.2**).

Cuadro 1.2. Promedio del factor de forma y de volumen total para pinos en plantaciones forestales comerciales en Las Choapas, Veracruz.

Variable	L5		L4		L1	
	nr	r	nr	r	nr	r
Factor de forma ff	0.54	0.53	0.48	0.50	0.52	0.55
Volumen total m^3	0.119	0.112	0.237	0.229	0.113	0.162

nr=árbol resinado, r= árbol no resinado

Al analizar el efecto de la resinación en el modelo de Spurr muestra un $R^2_{Adj} = 0.98$ mayor que le modelo de Bruce y Schumacher, sin embargo, en el modelo de Spurr no se detecta un efecto de la resinación debido a que los parámetros α_{11} y β_{11} ($p > 0.05$) en contraste con el parámetro β_{11} ($p < 0.01$) del modelo de Bruce y Schumacher, que indica adicionalidad positiva por efecto de la resinación (**Cuadro 1.3**).

Cuadro 1.3. Modelos de volumen total ajustados para pinos resinados y no resinados en plantaciones dedicadas a la producción de resina y madera en Las Choapas, Veracruz, México.

Modelo	Parámetro	Valor	EE	Valor t	Pr > t	SCE	RCME	R ² _{Adj}
Spurr	α_{10}	0.000072	0.000003092	23.37	<.0001	0.119	0.0173	0.98
	α_{11}	0.000013	0.000011	1.17	0.2446			
	β_{10}	0.923703	0.00516	179.1	<.0001			
	β_{11}	-0.01114	0.016	-0.7	0.4869			
Bruce y Schumacher	α	0.002917	0.000177	16.46	<.0001	0.167	0.0206	0.97
	β_{10}	0.000037	0.0000002519	148	<.0001			
	β_{11}	0.000003317	0.0000004373	7.59	<.0001			

EE = error estándar, SCE = suma de cuadrados del error, RCME = raíz del cuadrado medio del error, R²_{Adj} = coeficiente de determinación ajustado, α = intercepto en común; α_{10} y β_{10} = parámetros de regresión de la procedencia base, α_{11} y β_{11} = parámetros de las variables indicadoras debido al efecto de la resinación.

En la **Figura 1.3** se observa el comportamiento gráfico de los residuos para el modelo de Bruce y Schumacher (A) y el modelo de Spurr (B). Se aprecia un comportamiento homogéneo de los residuales, la corrección de la heterocedasticidad de estos se realiza para hacer más sensibles las pruebas de hipótesis, en este caso, detectar el efecto de la resinación en el volumen total entre árboles *r* y *nr*.

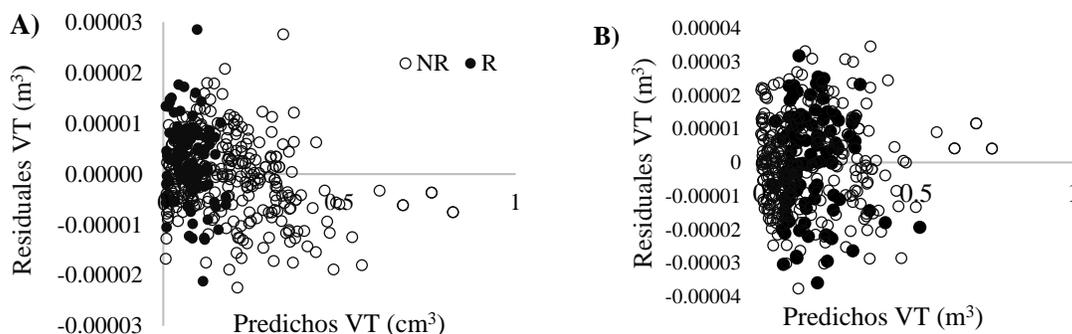


Figura 1. 3. A) Gráfico de residuales del volumen total del modelo de Bruce y Schumacher (1942). B) y para el modelo de Spurr (1963) con la corrección por heteroscedasticidad.

1.5.2 Comparación del efecto de la resinación y las procedencias en el factor de forma

Al detectar efectos de la resinación en el volumen total con el modelo de Bruce y Schumacher (1942) éste se utilizó para hacer la comparación en el factor de forma para las tres procedencias incluyendo el efecto por la resinación (**Cuadro 1.4**).

Cuadro 1.4. Resultados del ajuste del modelo de la variable combinada lineal con variables indicadoras para diferenciar entre procedencias y entre árboles resinados y no resinados.

Procedencia	P	Valor	A	<i>ff</i>	Error Estándar	Valor de t	Pr> t	SCE	RCME	R ² _{Adj}
Intercepto	α	0.002715	2.715E-03	----	0.000148	18.35	<.0001			
L5nr	β_{10}	0.000039	3.9E-05	0.5	3.649E-07	106.6	<.0001			
L5r	β_{11}	0.000001908	4.1E-05	0.52	5.847E-07	3.26	0.0012			
L1nr	β_{20}	-0.00000104	3.8E-05	0.48	5.587E-07	-1.86	0.0631	0.140	0.019	0.98
L1r	β_{21}	0.0000027	4.3E-05	0.54	9.084E-07	2.97	0.0031			
L4nr	β_{30}	-0.00000315	3.6E-05	0.46	5.083E-07	-6.19	<.0001			
L4r	β_{31}	0.000001178	3.9E-05	0.5	8.416E-07	1.4	0.1623			

P= parámetros, A=adicionalidad, *ff*= factores de forma, SCE= suma de cuadrados del error, RCME= raíz del cuadrado medio del error, R²_{Adj}= coeficiente de determinación ajustado, α = intercepto en común, β_{10} = parámetro de regresión de la procedencia base L5nr, β_{11} , β_{20} , β_{21} , β_{30} y β_{31} = parámetros que muestran el efecto de la resinación y la procedencia.

El parámetro β que define el *ff* para cada grupo bajo estudio se obtiene de la siguiente manera ya que así está definida la adicionalidad del modelo:

$$L5_{nr} = \beta_{10}$$

$$L5_r = \beta_{10} + \beta_{11}$$

$$L1_{nr} = \beta_{10} + \beta_{20}$$

$$L1_r = \beta_{10} + \beta_{11} + \beta_{20} + \beta_{21}$$

$$L4_{nr} = \beta_{10} + \beta_{30}$$

$$L4_r = \beta_{10} + \beta_{11} + \beta_{30} + \beta_{31}$$

Se aprecia que para los árboles no resinados la procedencia base (L5nr) es la que tiene el mayor factor de forma, y que los parámetros asociados al efecto de la resinación indican siempre un aumento en el ff (**Cuadro 1.4**). Este efecto se extiende entre procedencias, aunque para la procedencia L4 el efecto específico de resinación no es estadísticamente diferente del efecto de resinación en L5.

En la **Figura 1.4** se observa el comportamiento de los residuales del modelo A) y del ajuste de los valores observados con respecto a los predichos B) con corrección por heterocedasticidad.

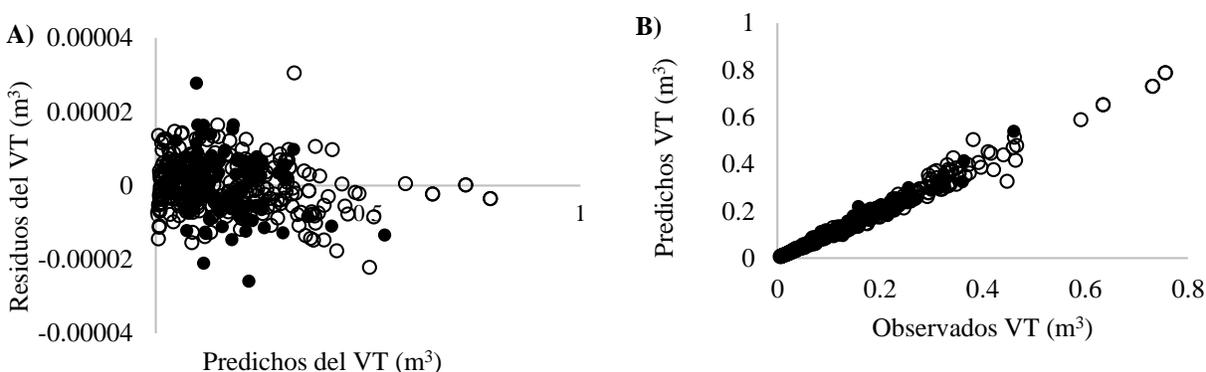


Figura 1.4. A). Gráfico de residuales del volumen total del modelo de Bruce y Schumacher (1942) con corrección por heteroscedasticidad. B) Ajuste del modelo de volumen total entre los valores observados y predichos en m^3 .

Finalmente, se ajustó el modelo de Spurr $V = \alpha \cdot (D^2H)^\beta$ (Husch, 1963) para comparar entre árboles r y nr por procedencias en volumen total (**Cuadro 1.5**). En este caso se presenta solo el modelo reducido, ya que la colinealidad entre parámetros cuando se usa el modelo totalmente parametrizado no permite detectar el efecto entre procedencias que incluyan el efecto de resinación. En el parámetro α se detectaron diferencias en volumen total entre procedencias, pero no se detectó el efecto de la resinación; en el parámetro β se detectaron diferencias entre procedencias y entre árboles resinados y no resinados para las procedencias L5 y L1, sin embargo, para la procedencia L4 solo se detectó la diferencia por efecto de la procedencia con respecto a la procedencia base.

Cuadro 1.5. Resultados del ajuste del modelo reducido de volumen total de Spurr con las variables indicadoras para diferenciar entre procedencias y entre árboles resinados y no resinados

Procedencia	P	Valor	Error estándar	Valor de t	Pr> t	SCE	RCME	R ² _{Adj}
L5 _{nr}	α_{01}	0.000092	3.96E-06	23.33	<.0001			
L1 _{nr}	α_{03}	-0.00003	5.92E-06	-4.52	<.0001			
L4 _{nr}	α_{05}	-0.00003	6.75E-06	-4.76	<.0001			
L5 _{nr}	β_{11}	0.894541	0.00579	154.48	<.0001	0.1116	0.0169	0.98
L5 _r	β_{12}	0.006358	0.00131	4.87	<.0001			
L1 _{nr}	β_{13}	0.040942	0.0103	3.96	<.0001			
L1 _r	β_{14}	0.007116	0.0024	2.97	0.0032			
L4 _{nr}	β_{15}	0.048293	0.012	4.03	<.0001			

P=parámetros, nr=árbol no resinado, r=árbol resinado, α_{01} , β_{11} = parámetros de regresión de la procedencia base, α_{03} , α_{05} , β_{12} , β_{13} , β_{14} , β_{15} = parámetros de las variables indicadoras debido a la procedencia y al efecto de la resinación, SCE = suma de cuadrados del error, RCME = raíz cuadrado medio del error, R²_{Adj}= coeficiente de determinación ajustado.

Los parámetros específicos para estimar el volumen a partir de la parametrización completa de Spurr (1963) para cada grupo bajo estudio se obtuvieron de la siguiente manera:

$$L5_{nr} = \alpha_{01}$$

$$L5_r = \alpha_{01} + \alpha_{02}$$

$$L4_{nr} = \alpha_{01} + \alpha_{05}$$

$$L4_r = \alpha_{01} + \alpha_{02}, \alpha_{05} + \alpha_{06}$$

$$L1_{nr} = \alpha_{01} + \alpha_{03}$$

$$L1_r = \alpha_{01} + \alpha_{02}, \alpha_{03} + \alpha_{04}$$

en el parámetro β :

$$L5_{nr} = \beta_{11},$$

$$L5_r = \beta_{11} + \beta_{12},$$

$$L4_{nr} = \beta_{11} + \beta_{15},$$

$$L4_r = \beta_{11} + \beta_{12}, \beta_{15} + \beta_{16},$$

$$L1_{nr} = \beta_{11} + \beta_{13}$$

$$L1_r = \beta_{11} + \beta_{12}, \beta_{13} + \beta_{14}.$$

Las ecuaciones generadas para obtener el volumen total con corteza generadas a partir del ajuste del modelo reducido de Spurr con variables indicadoras (**Cuadro 1.5**) son:

$$VT_{L5nr} = 0.000092 \cdot (D^2H)^{0.894541}$$

$$VT_{L5r} = 0.000092 \cdot (D^2H)^{0.900899}$$

$$VT_{L4nr} = 0.000062 \cdot (D^2H)^{0.942834}$$

$$VT_{L4r} = 0.000062 \cdot (D^2H)^{0.942834}$$

$$VT_{L1nr} = 0.000062 \cdot (D^2H)^{0.935483}$$

$$VT_{L1r} = 0.000062 \cdot (D^2H)^{0.942599}$$

Los residuales presentan una distribución aleatoria de estos en el ajuste (**Figura 1.5**) observando un buen comportamiento del modelo.

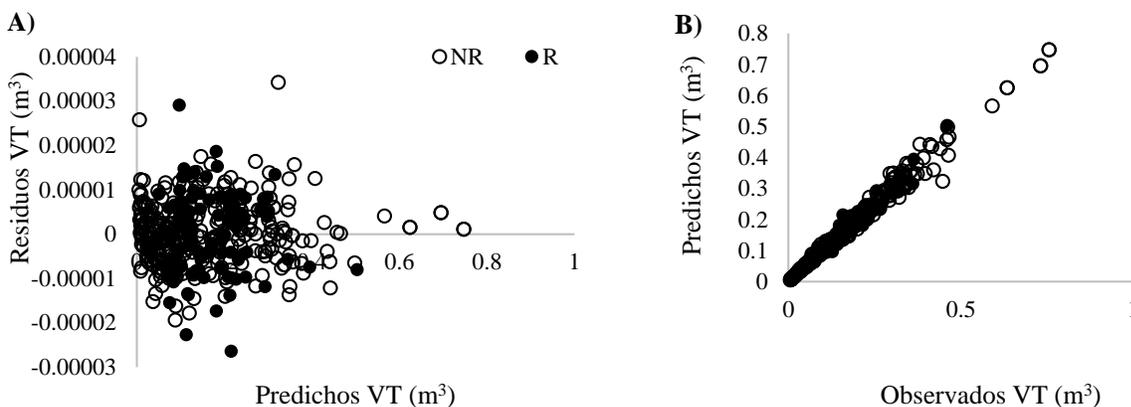


Figura 1.5. A) Gráfico de residuales contra los valores predichos del modelo de Spurr (1963) para estimar el volumen total con corteza (m^3) incluyendo variables indicadoras para diferenciar entre procedencias y entre resinados y no resinados. B) Gráfico de ajuste entre los valores observados y predichos de volumen total (m^3).

1.5.3 Efecto de la resinación y las procedencias en el ahusamiento

En el ajuste del modelo de ahusamiento de Demaerschalk (1972), se observó que los parámetros θ_0 y θ_1 se mantienen estables entre las procedencias, sin embargo, son afectados por efecto de la resinación por lo que se categorizaron entre árboles r y nr ; en los parámetros θ_2 y θ_3 se realizó la diferencia específica entre procedencias y árboles r y nr (**Cuadro 1.6**).

Cuadro 1.6. Resultados del ajuste de regresión con variables indicadoras para categorizar entre procedencias y entre árboles resinados y no resinados en modelo de ahusamiento Demaerschalk (1972).

Procedencias	P	Valor	Error estándar	Valor de t	Pr > t	SCE	RCME	R ² _{Adj.}
nr	θ_{00}	5216.101	1337.6	3.9	<.0001	7031.3	1.5574	0.96
r	θ_{01}	-1609.01	1367.1	-1.18	0.2393			
nr	θ_{10}	107.1844	30.3537	3.53	0.0004			
r	θ_{11}	-59.2977	31.0156	-1.91	0.056			
L5 _{nr}	θ_{20}	1.29402	0.0191	67.7	<.0001			
L5 _r	θ_{21}	-0.00183	0.0318	-0.06	0.954			
L1 _{nr}	θ_{22}	-0.09607	0.0247	-3.89	0.0001			
L1 _r	θ_{23}	0.138912	0.0396	3.5	0.0005			
L4 _{nr}	θ_{24}	-0.14663	0.0225	-6.52	<.0001			
L4 _r	θ_{25}	0.107795	0.0368	2.93	0.0034			
L5 _{nr}	θ_{30}	1.710631	0.0253	67.72	<.0001			
L5 _r	θ_{31}	-0.22228	0.0362	-6.13	<.0001			
L1 _{nr}	θ_{32}	-0.24293	0.0337	-7.2	<.0001			
L1 _r	θ_{33}	0.219841	0.0474	4.64	<.0001			
L4 _{nr}	θ_{34}	-0.25405	0.0306	-8.3	<.0001			
L4 _r	θ_{35}	0.263518	0.0442	5.97	<.0001			

P= parámetros, nr = árbol no resinado, r = árbol resinado; θ_{00} y θ_{10} = parámetros de regresión base para el intercepto de árboles no resinados, θ_{01} y θ_{11} = parámetros que indican la adicionalidad por efecto de la resinación en el intercepto, θ_{20} y θ_{30} = parámetros de regresión de la procedencia base, θ_{21} , θ_{22} , θ_{23} , θ_{24} , θ_{25} , θ_{31} , θ_{32} , θ_{33} , θ_{34} , θ_{35} = parámetros de las variables indicadoras debido a la procedencia y al efecto de la resinación, SCE = suma de cuadrados del error, RCME = raíz del cuadrado medio del error, R²_{Adj.}= coeficiente de determinación ajustado.

1.5.4 Efecto de la resinación y las procedencias en el sistema de ahusamiento-volumen comercial

El uso del sistema de ecuaciones mejora la detección de diferencias entre procedencias y efecto por resinación, en comparación con el ajuste de la función de ahusamiento únicamente (**Cuadro 1.6**). En los parámetros que se refieren al intercepto θ_0 y θ_1 se detectan adiccionalidades por efecto de la resinación ($p < 0.01$), de modo que, se deben de considerar los valores para diferenciar las ecuaciones entre árboles r y nr en esta parte de la ecuación, así mismo, se observa que los parámetros θ_{21-25} y θ_{31-35} sugieren adiccionalidades por procedencia y por efecto de la resinación ($p < 0.01$); por lo que los valores de sus parámetros se adicionan a los valores de los parámetros de la procedencia base $L5nr$ (θ_{20} y θ_{30}) para obtener los valores específicos por procedencia y por árbol r y nr para elaborar las ecuaciones de ahusamiento-volumen comercial-volumen total específica (**Cuadro 1.7**).

Cuadro 1.7. Resultados del ajuste con variables indicadoras en el sistema compatible ahusamiento-volumen comercial con base en el modelo de ahusamiento de Demaerschalk (1972).

Pd	P	Valor	EE	Valor de t	Pr > t	SCE	RCME	R ² _{Adj}	Modelo
nr	θ_{00}	6630.315	206.7	32.08	<.0001				
r	θ_{01}	-2498.86	288.4	-8.67	<.0001				
nr	θ_{10}	40.89109	2.1428	19.08	<.0001				
r	θ_{11}	11.70114	4.7097	2.48	0.013				
L5 _{nr}	θ_{20}	1.250531	0.00715	175	<.0001	0.3469	0.0106	0.99	Volumen comercial
L5 _r	θ_{21}	0.049363	0.0162	3.05	0.0023				
L1 _{nr}	θ_{22}	-0.07242	0.00897	-8.07	<.0001				
L1 _r	θ_{23}	0.115286	0.0176	6.56	<.0001				
L4 _{nr}	θ_{24}	-0.13458	0.00711	-18.94	<.0001				
L4 _r	θ_{25}	0.065639	0.0162	4.05	<.0001				
L5 _{nr}	θ_{30}	1.755071	0.0154	114.14	<.0001				
L5 _r	θ_{31}	-0.2196	0.0201	-10.91	<.0001	6284.9	1.4232	0.97	Ahusamiento
L1 _{nr}	θ_{32}	-0.26655	0.0223	-11.96	<.0001				
L1 _r	θ_{33}	0.234483	0.0283	8.28	<.0001				
L4 _{nr}	θ_{34}	-0.2913	0.0179	-16.25	<.0001				
L4 _r	θ_{35}	0.289685	0.0248	11.67	<.0001				

Pd= procedencia, P=parámetros, EE=error estándar, nr=árbol no resinado, r=árbol resinado, θ_{00} y θ_{10} = parámetros de regresión base para el intercepto de árboles no resinados, θ_{01} y θ_{11} = parámetros que indican la adicionalidad por efecto de la resinación en el intercepto, θ_{20} y θ_{30} = parámetros de regresión de la procedencia base, θ_{21} , θ_{22} , θ_{23} , θ_{24} , θ_{25} , θ_{31} , θ_{32} , θ_{33} , θ_{34} , θ_{35} = parámetros de las variables indicadoras debido a la procedencia y al efecto de la resinación, SCE = suma de cuadrados del error, RCME = raíz del cuadrado medio del error, R²_{Adj}= coeficiente de determinación ajustado.

Se revisó el cumplimiento de la homocedasticidad e independencia de los errores (**Figura 1.6**) donde se muestra el comportamiento de los residuales de la función de ahusamiento (**A**) y para el volumen comercial (**B**) respectivamente.

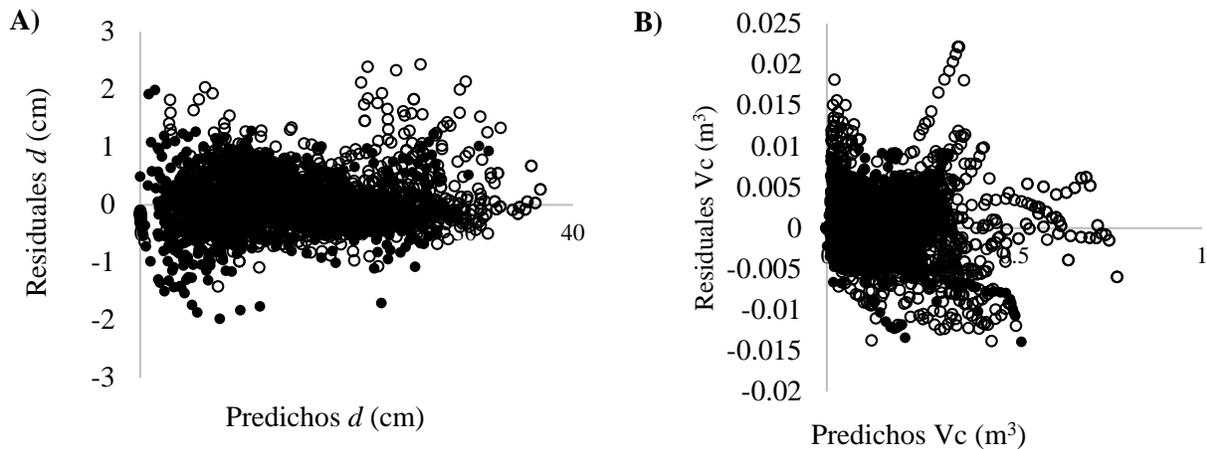


Figura 1.6. A) Gráfico de residuales del ahusamiento contra los valores predichos del diámetro (cm). B) Gráfico de residuales contra valores predichos del V_c (m^3) del modelo de Demaerschalk (1972).

A partir de los modelos de ahusamiento-volumen comercial, es posible detectar diferencias en el factor de forma y ahusamiento entre árboles resinados y no resinados y entre procedencias ya que se cuenta con más observaciones por árbol en comparación con los modelos de volumen total, donde sólo se cuenta con una observación por árbol (Tlaxcala *et al.*, 2016). Los resultados del ajuste indicaron que existen diferencias en ahusamiento y volumen comercial entre los árboles resinados y los no resinados en las tres procedencias; por lo anterior, se utilizaron los parámetros obtenidos del ajuste del sistema compatible (**Cuadro 1.7**) para elaborar ecuaciones específicas para cada procedencia bajo estudio y se obtuvo el ff constante; los árboles resinados presentaron un mayor ff que los árboles no resinados en las tres procedencias (**Cuadro 1.8**).

Cuadro 1.8. Parámetros estimados para el modelo simultáneo ahusamiento-volumen comercial de Demaerschalk (1972) y ff para pinos en plantaciones de producción de resina en Las Choapas, Veracruz, México.

Parámetros	Pd	Árboles no resinados	Árboles resinados	ff_{nr}	ff_r
θ_0		6630.315	4131.455		
θ_1		40.89109	52.59223		
θ_2	L5	1.250531	1.299894	0.45	0.51
θ_3		1.755071	1.535471		
θ_0		6630.315	4131.455		
θ_1		40.89109	52.59223		
θ_2	L4	1.115951	1.230953	0.45	0.49
θ_3		1.463771	1.533856		
θ_0		6630.315	4131.455		
θ_1		40.89109	52.59223		
θ_2	L1	1.178111	1.34276	0.47	0.54
θ_3		1.488521	1.503404		

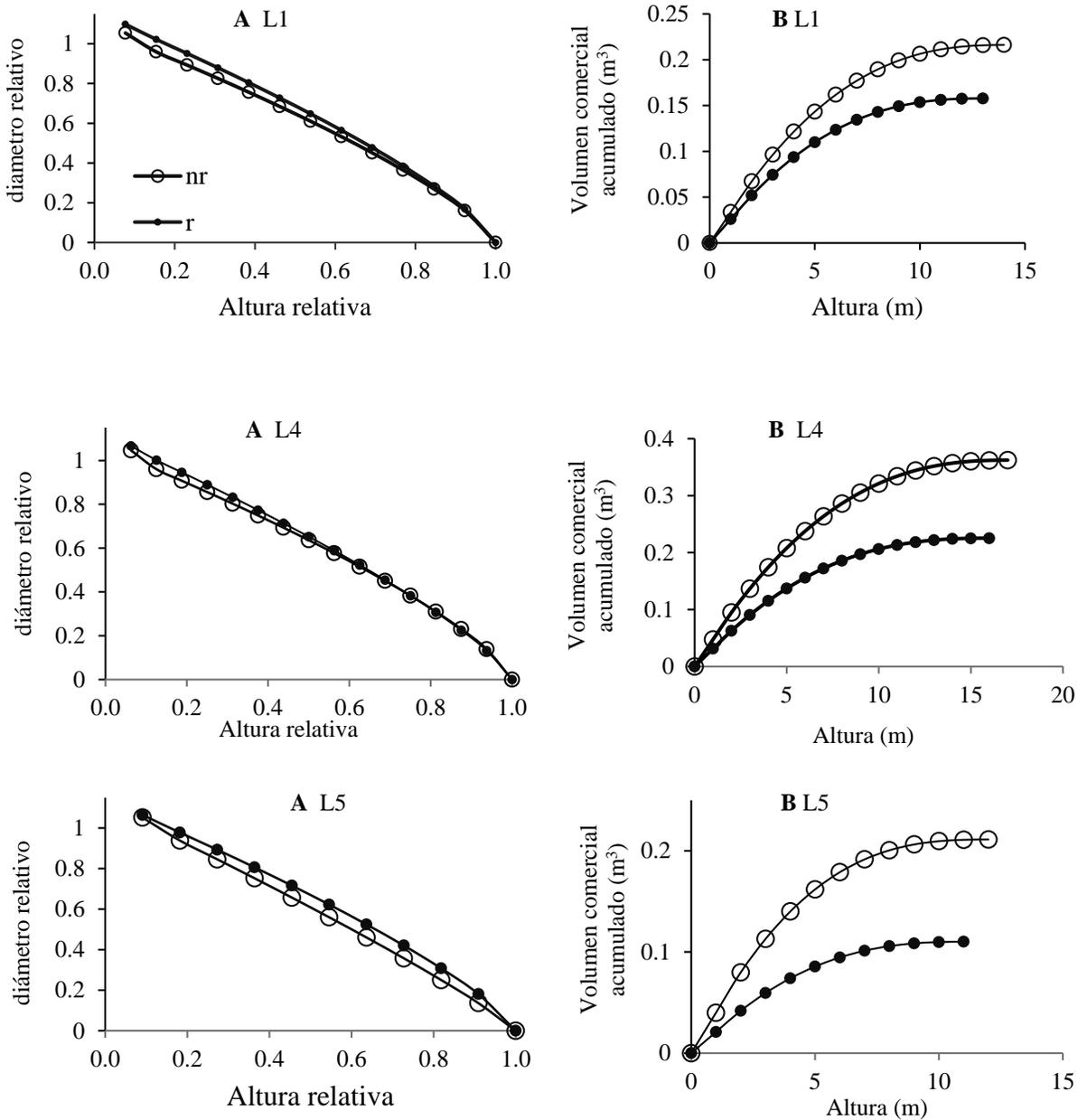
Pd= procedencia, θ_i = parámetros de regresión del modelo de ahusamiento / volumen comercial de Demaerschalk (1972), nr= árboles no resinados, r= árboles resinados, ff = factor de forma.

El ff para los árboles nr de la procedencia L5 fue 0.45, mientras que para los árboles r fue de 0.51, lo que representa un aumento del 6% (**Cuadro 1.8**). De manera similar se pueden estimar incrementos en el ff para las procedencias L4 y L1, mismas que corresponden a 4 y 7%, respectivamente. Torres *et al.* (2020) reportaron ff semejantes para árboles nr de estas mismas plantaciones: 0.48 para L5, 0.44 para L4 y 0.45 para L1. Estos resultados indican que la geometría de fuste de los árboles resinados cambió en las tres procedencias, si bien para L4 el ff apenas se aproxima a 0.5, para L1 y L5 este valor es mayor.

1.5.5 Evaluación del efecto del tamaño del árbol en el ahusamiento y volumen comercial

Los resultados obtenidos a partir de los modelos de volumen total y ahusamiento-volumen comercial sugieren que la resinación modifica la geometría del fuste, específicamente, aumentó el ff en las tres procedencias. Sin embargo, es necesario incorporar al análisis el tamaño medio del árbol para hacer una comparación más eficaz. Lo anterior debido a que, en general, los árboles resinados tienen menor diámetro y altura total que los árboles no resinados, resultado de que se eligen los árboles suprimidos para resinar. Así, los árboles resinados se ubican en categorías diamétricas de 15-20 cm, mientras que los árboles no resinados se agrupan en categorías de 20 a 35 cm (**Figura 1.2 B**).

El resultado inicial de los promedios volumen total y ff sugieren que los árboles seleccionados para resinación corresponden a árboles que también se han marcado para realizar un aclareo. La empresa propietaria de las plantaciones realiza aclareos por lo bajo (i.e. seleccionando árboles suprimidos e intermedios), por ello en la **Figura 1.2 A** se observa que el volumen comercial acumulado es mayor en la muestra de árboles no resinados, aumentando sustancialmente su valor en productos maderables. Para ilustrar el efecto de la resinación en el ahusamiento y en el volumen comercial acumulado para cada procedencia, se construyeron gráficas a partir de los valores promedio de los diámetros normales y alturas totales de la muestra tomada en la plantación (**Figura 1.7**), utilizando los valores específicos de los parámetros obtenidos en el ajuste (**Cuadro 1.8**).



A) Ahusamiento relativo de L1, L4 y L5 para árboles resinados y no resinados B) Volumen comercial acumulado en m³ de L1, L4 y L5 para árboles resinados y no resinados

Figura 1.7. A) Comportamiento del ahusamiento en altura y diámetro (escala relativa o porcentual) y B) en volumen acumulado (m³) en árboles resinados y no resinados para L5nr, L5r, L4nr, L4r, L1nr y L1.

En las tres procedencias, los árboles resinados tienden a disminuir la forma de neiloide que toma la base del fuste y tiende a la forma de paraboloides (0 a 0.8) y en forma cónica de 0.8 a 1, mientras que los árboles no resinados presentan la forma de neiloide en la base (0 a 0.2) en altura relativa,

su forma se trunca para tomar forma de paraboloides (0.2 a 0.8) y en la punta del árbol toma una forma cónica (0.8 a 1) (**Figura 1.7 A**). En volumen comercial acumulado (m^3) las tres procedencias resinadas acumulan menos volumen que su contraparte no resinada (**Figura 1.7 B**), debido a que los árboles marcados para resinación (a muerte) son los mismos que se eligen para ser cortados en el aclareo, mientras que los árboles que no se resinan son los dominantes y codominantes.

Se graficó el sesgo para el modelo compatible ahusamiento volumen comercial de Demaerschalk (1972) ajustado con las variables indicadoras *dummy* (**Figura 1.8**).

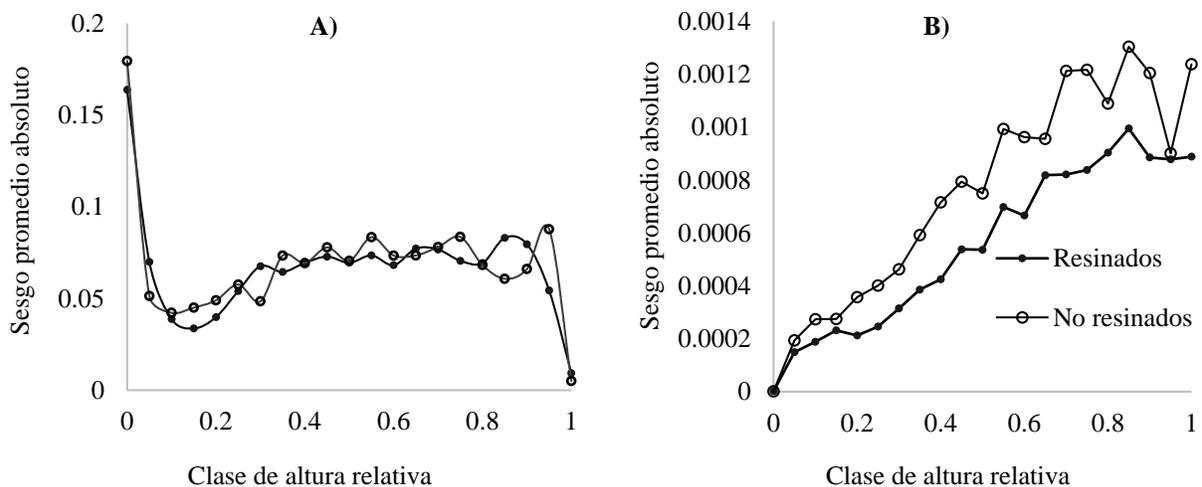


Figura 1.8. Comportamiento del sesgo promedio absoluto a lo largo del fuste utilizando el modelo de ahusamiento de Demaerschalk (1972) entre árboles resinados, no resinados A) y en el volumen comercial entre resinados y no resinados B).

En la **Figura 1.8 A)** en la base donde el árbol tiene forma de neiloide el sesgo tiende a ser más elevado, mientras que en donde asemeja un paraboloides se mantiene aproximadamente homogéneo y en la punta es muy pequeño. Sin embargo, con respecto al volumen comercial se refleja más sesgo en los árboles no resinados que en los resinados (**Figura 1.8 B**).

1.6 DISCUSIÓN

1.6.1 Efecto de la resinación en el factor de forma

De las tres procedencias analizadas el híbrido de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* x *Pinus elliottii* var *elliottii* (L5) presentó el mejor comportamiento en su factor de forma, al ser el menos ahusado y con geometría cercana al paraboloides, Dieters *et al.* (2007) y Torres *et al.* (2020) mencionan que este comportamiento puede cambiar en situaciones de estrés hídrico en áreas geográficas donde se marcan las estaciones de lluvias y de secas. Los árboles mejor conformados son deseables en la industria del aserrío debido a que se pueden obtener más opciones de procesamiento de la madera (Torres *et al.*, 2020). Allen (1993) obtuvo factores de forma para *Pinus caribaea*, *Pinus elliottii* y el híbrido entre estas especies: $ff = 0.68$, 0.69 y 0.68 respectivamente, utilizando diámetros a una altura relativa de 30 % mediante funciones de conicidad y datos de árboles individuales, en plantaciones de Australia, dichos ff indican una forma de paraboloides para los árboles de estas plantaciones; parte de las variaciones con este estudio pueden deberse a factores ambientales, el tamaño de los árboles y a diferencias genéticas. Los árboles resinados presentaron un aumento significativo en su factor de forma con respecto a los árboles no resinados, el ff es considerado como una característica o rasgo observable de cada procedencia, el cual es afectado por el ambiente en el que se desarrolla, su potencial genético, la incidencia de plagas de barrenadores en etapas juveniles propiciaron fustes más cilíndricos (Tlaxcala *et al.*, 2020) y por efecto de la de resinación como sugieren los resultados de este estudio.

1.6.2 Efecto de la resinación en el ahusamiento

Debido a que la geometría del fuste de las tres procedencias es cercana al paraboloides (Allen, 1993), el modelo de Demaerschalk es el más apropiado para describirlo (Torres *et al.*, 2020). Este modelo mostró que existen diferencias en el ff y en ahusamiento debidos a la procedencia y al efecto de la resinación. Tlaxcala *et al.* (2016) y Hernández-Pérez *et al.* (2018) mencionan que es atribuible a que los modelos de ahusamiento cuentan con más observaciones por árbol, mientras que en los modelos de volumen total como el de la variable combinada y de Spurr (1952) se tiene una observación por árbol, por lo que los modelos de ahusamiento tienden a ser más sensibles a las pruebas de hipótesis, elementalmente porque se analiza la geometría del fuste, más

observaciones permiten tener más grados de libertad en el error y esto posibilita experimentar con más éxito las hipótesis en los parámetros de ahusamiento. Los resultados muestran que $L4nr$, $L4r$, $L1nr$, $L1r$ y $L5r$ por adición a $L5nr$ expresan diferente ahusamiento, esto debido a que al realizar la prueba de adicionalidad por efecto de la resinación (X) y la procedencia (Z) en los parámetros ($\theta_{21} \neq \theta_{22} \neq \theta_{23} \neq \theta_{24} \neq \theta_{25} \neq \theta_{31} \neq \theta_{32} \neq \theta_{33}$, $\theta_{34} \neq \theta_{35}$, $p \leq 0.05$) indican que el efecto de las variables indicadoras X y Z son significativos, esta metodología fue utilizada por Tlaxcala *et al.* (2016) para encontrar diferencias en el ahusamiento utilizando variables indicadoras para diferenciar entre siete procedencias geográficas de *Cedrela odorata* L. en México indicando que todos presentaron diferente ahusamiento debido a la interacción genotipo-ambiente y al estrés provocado por la incidencia de barrenadores.

1.6.3 Efecto de la resinación en el volumen maderable

Los estudios se han encaminado a evaluar el efecto de la resinación en el crecimiento de los árboles utilizando el enfoque dendrocronológico en su mayoría, pero aún no se cuenta con estudios sobre la afectación de la resinación en el ahusamiento de los árboles; por ejemplo, el efecto de la resinación sobre el crecimiento radial de *Pinus massoniana* en el sur de China reportados por Williams *et al.* (2017), indicaron que en árboles resinados el crecimiento es mayor que en los árboles no resinados, sin presentar diferencias significativas, por su parte, Du *et al.* (2021) mencionan que en *Pinus elliottii* el efecto de la resinación es focalizado y que el estriado no tuvo efecto significativo en los incrementos radiales anuales, Wu *et al.* (2022) encontraron que la resinación inhibe el crecimiento del rodal cuando el aprovechamiento es intensivo y Chen *et al.* (2015) que el efecto negativo en el crecimiento radial se presentó especialmente en los árboles viejos.

Van der Maaten *et al.* (2017) mostró que para *P. sylvestris* L. la resinación tiene un efecto positivo en el crecimiento del árbol a la altura del diámetro normal, sugieren que probablemente esto se debe a que la formación de madera se concentra en la parte viva del fuste (i.e. después del estriado no hay crecimiento en la cara de resinación debido al daño mecánico causado al cambium), esperaban que los árboles resinados presentaran anillos anuales más pequeños, ya que posiblemente los carbohidratos se invierten más en la producción de resina que en la formación de madera y que fueran más propensos al estrés por sequía debido a que parte del sistema de transporte

de agua se ve afectado, sin embargo los árboles resinados presentaron niveles de crecimiento ligeramente más altos 30 años después de la extracción de resina, concluyeron que el aprovechamiento de resina no alteró el crecimiento del pino en años con condiciones climáticas extremas como las sequías y que no se revelaron diferencias significativas entre árboles resinados y no resinados ni en el periodo anterior ni posterior a la resinación.

Un estudio más amplio de 1967 a 2017 realizado por Zeng *et al.* (2021) en *P. tabuliformis* en China mostró que los árboles resinados tuvieron variaciones interanuales consistentes con las de los no resinados, aunque presentaron valores significativamente más bajos después de la extracción de resina, los cuales después del aprovechamiento de resina volvieron a la normalidad, el análisis de la respuesta climática identificó que el crecimiento de los anillos de los árboles *r* y *nr*, se vio afectado negativamente por las temperaturas mensuales durante el inicio de la temporada de crecimiento (mayo-julio) en el periodo posterior a la extracción de resina, por lo que el crecimiento de los anillos de los árboles resinados fueron vulnerables a la sequía, estas variaciones se deben a que en el área estudiada presenta estacionalidad marcada de secas y de lluvias. En el área de este estudio los árboles resinados son los que se encuentra suprimidos o codominantes, por lo que esto influye en la acumulación de volumen comercial, presentando 35% menos volumen acumulado aproximadamente a los 15 m de altura total que los árboles no resinados.

1.7 CONCLUSIONES

La resinación no ocasionó un efecto negativo en el factor de forma de las tres procedencias geográficas, la procedencia mejor conformada es el híbrido (L5) tanto en árboles resinados como en no resinados presentando una forma menos ahusada o más cilíndrica seguido de la procedencia L1, siendo la procedencia L4 la más ahusada.

La resinación cambia la forma del fuste en la base del árbol haciéndolo parecido a un paraboloide, *i.e.*, menos ahusado con respecto a árboles no resinados. Los árboles no resinados de las tres procedencias acumularon mayor volumen comercial con respecto a los no resinados, esto se debe a que los árboles seleccionados para resinar corresponden a los suprimidos e intermedios.

Los modelos ajustados con variables indicadoras (*dummy*) permitieron encontrar diferencias en el factor de forma utilizando la metodología de ahusamiento de árboles resinados y no resinados de

las tres procedencias analizadas debido a que se cuentan con más observaciones por árbol en contraste con los modelos de volumen total en donde se tiene solo una observación por árbol.

El sistema compatible de ahusamiento-volumen comercial permitió sensibilizar las pruebas de hipótesis y encontrar las diferencias por efecto de la resinación y procedencias en el grupo bajo estudio en ahusamiento y ff . Es importante recalcar que para utilizar los parámetros obtenidos en estos análisis se debe de tomar en cuenta el cumplimiento de los supuestos del análisis de regresión, y en caso de no cumplirse recurrir a metodologías que permitan mejorar el comportamiento de los residuales como la estructura autorregresiva y funciones de potencia de la varianza de los residuales.

CAPÍTULO II. MODELOS PARA ESTIMAR LA PRODUCCIÓN DE RESINA EN PLANTACIONES DE PINOS TROPICALES EN VERACRUZ

2.1 RESUMEN

La plantación forestal comercial de pinos en Las Choapas, Veracruz es pionera en México en la combinación de productos finales al producir conjuntamente resina y madera. La producción de resina se puede explicar mediante el uso de variables dendrométricas en modelos lineales y no lineales. El objetivo del presente estudio fue analizar las características dendrométricas y productivas que se correlacionen con la producción de resina para elaborar un modelo que estime la producción promedio mensual a nivel árbol individual. A partir de una muestra de 196 árboles (98 por cada especie) seleccionados en el área de ensayo de la plantación, los cuales se distribuyeron en tres categorías diamétricas de 15 a 25 cm, altura total de 7 a 20 m y diámetros de copa de 2.5 a 6 metros con una producción media mensual por árbol de 0.550 kg en *P. caribaea* y 0.625 kg en el híbrido. Se empleó el método americano de resinación con dos caras por cada árbol y la aplicación de pasta estimulante. Las variables que resultaron tener una correlación significativa con la producción de la resina fueron el diámetro normal (DN), el diámetro de copa (DC), altura total (HT) y altura de fuste limpio (AFL), la superficie de producción no presentó correlación con el rendimiento de resina. Se utilizó el método de mínimos cuadrados ordinarios para el ajuste de las funciones matemáticas que utilizan estas variables dasométricas. Las ecuaciones para *P. caribaea* $P_{(g)} = 1339.485 - 11964.8DN^{-1} + 249.43DC^{-1} - 3045.65HT^{-1}$ y para el híbrido $P_{(g)} = 1949.338 - 11964.8DN^{-1} - 1743.96DC^{-1} - 3045.65HT^{-1}$ presentaron un ajuste de $R^2_{Adj} = 0.37$.

Palabras clave: *Pinus caribaea*, *Pinus elliottii*, resinación, variables dendrométricas, análisis de regresión.

MODELS FOR ESTIMATING RESIN PRODUCTION IN TROPICAL PINE PLANTATIONS IN VERACRUZ.

2.2 ABSTRACT

The commercial pine forest plantation in Las Choapas, Veracruz is a pioneer in Mexico in the combination of final products by jointly producing resin and wood, using germplasm of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and the hybrid *P. caribaea* var. *hondurensis* x *P. elliottii* var. *elliottii*. Resin production can be explained by using dendrometric variables in linear and nonlinear models. The objective of the present study was to analyze the dendrometric and productive characteristics that correlate with resin production to develop a model that estimates the average monthly production at the individual tree level. From a sample of 196 trees (98 for each species) selected in the test area of the plantation, which were distributed in three diameter categories from 15 to 25 cm, a total height from 7 to 20 m and crown diameters from 2.5 to 6 meters with an average monthly production per tree of 0.550 kg in *P. caribaea* and 0.625 kg in the hybrid. The American method of resin tapping was used with two tapped faces per tree and the application of stimulant paste. The variables that were found to have a significant correlation with resin production were diameter at breast height (DBH), crown diameter (CD), total height (HT), and clean bole height (CBH); the production area did not correlate with resin yield. The ordinary least squares method was used to fit the mathematical functions using these dendrometric variables. The fitted equations for *P. caribaea* $P_{(g)} = 1339.485 - 11964.8DN^{-1} + 249.43DC^{-1} - 3045.65HT^{-1}$ and for the hybrid $P_{(g)} = 1949.338 - 11964.8DN^{-1} - 1743.96DC^{-1} - 3045.65HT^{-1}$ presented a fit of $R^2_{Adj} = 0.37$.

Keywords: *Pinus caribaea*, *Pinus elliottii*, resin tapping, dendrometric variables, regression analysis.

2.3 INTRODUCCIÓN

La resina de pino es un producto forestal no maderable valioso (PFNM) organosoluble que se obtiene de la exudación de algunas especies de Pináceas, la cual fluye en forma de oleo- resina lustrosa de granos finos, esta es una solución de resina característica llamada brea o colofonia, diluida en un aceite esencial llamado aguarrás o esencia de trementina (Romahn, 1992; Conafor, 2012; Vázquez *et al.*, 2021). Industrialmente se le describe como una sustancia viscosa que fluye del tronco de especies de *Pinus* y *Abies*, naturalmente o por medio de corte. Sus componentes son una compleja mezcla de terpenos, ácidos resínicos y sustancias neutras (Langenheim, 2003). Es considerada un PFNM de suma importancia como materia prima para la industria con más de 400 usos, sus componentes son utilizados en la industria alimentaria para elaborar aditivos de sabores y fragancias, en la industria química para productos higiénicos, disolventes, pegamentos, tinta para impresión, insecticidas, y biocombustibles entre otros, y se ha considerado como una alternativa natural de los productos derivados del petróleo como combustibles y químicos (Langenheim, 2003; Kelkar *et al.*, 2006; López, 2019; Peralta *et al.*, 2012).

El 69 % proviene de la producción mundial de resina proviene de árboles en pie (Miera: resina en bruto), 30% del “Tall-oil” (subproducto del proceso de la pulpa Kraft) y el 1% a través de solventes (Baumassy, 2012). Se estima que se producen 1,300,000 toneladas de resina de pino anualmente a nivel mundial , que se destina a la obtención de colofonia y trementina, y que dicha producción se concentra en China, Brasil e Indonesia (alrededor del 90% del total), mientras que Argentina, India y México aportan un 7.7 % (Cunningham, 2009; Conafor, 2012; Reyes *et al.*, 2019). México aporta un estimado de 20 000 t·año⁻¹ que se obtienen en los estados de Michoacán, Oaxaca, Jalisco y Estado de México (Semarnat, 2013).

Los estudios sobre la resina se han enfocado en la mejora genética para incrementar la producción y en el análisis de sus componentes (monoterpenos y sesquiterpenos de la trementina, y ácidos resínicos diterpénicos de la colofonia) (Squillace, 1961; Neis *et al.*, 2019; Lai *et al.*, 2020; Vázquez *et al.*, 2021), en la anatomía y fisiología especializada en la defensa ante el ataque de plagas y enfermedades (Zulak & Bohlman, 2010; Raffa, 2014; Neis *et al.*, 2018; Reyes *et al.*, 2019) y en la influencia de la resinación en el contenido de resina de la madera, sus propiedades físicas y el

crecimiento en diámetro-altura de los árboles (Ayala *et al.*, 1998; Rodrigues *et al.*, 2008; Reyes *et al.*, 2012; Rodríguez *et al.*, 2013; Zas *et al.*, 2020).

Son pocos los trabajos orientados a estudiar la relación entre la producción de resina y las variables dasométricas y ambientales (Reyes *et al.*, 2019). Las variables frecuentemente utilizadas en la elaboración de los modelos de predicción de resina en México son el diámetro normal, la altura total (Reynoso-Santos *et al.*, 2018), altura de fuste limpio, número de caras vivas (Reyes *et al.*, 2019) y la variable combinada diámetro normal-altura total (Ayala *et al.*, 1992); mientras que en países como China y España se han utilizado el porcentaje de la copa viva, diámetro y superficie de copa, así como el diámetro normal y la altura total (Rodríguez *et al.*, 2014; Chunhui *et al.*, 2020).

En el año 2011 se estableció una plantación de pinos en Veracruz, México con el objetivo de producir resina y madera, se utilizaron las especies de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H. Barrett & Golfari, *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii* y el híbrido de *Pinus caribaea* y *Pinus elliottii*. Debido a que la plantación tiene el objetivo de producir resina para abastecer la industria, por lo que surgió la necesidad de generar modelos de predicción por especie para estimar la posibilidad de producción promedio mensual, utilizando las variables que se registran en un inventario tradicional (e. g: diámetro normal y el diámetro de copa) que faciliten su aplicación, las cuales se correlacionan positivamente con la cosecha de resina (Rodríguez *et al.*, 2013; Reyes *et al.*, 2019; Lai *et al.*, 2020; Vázquez *et al.*, 2021).

La hipótesis planteada en el presente capítulo es que las variables dasométricas como el diámetro normal, el diámetro de copa, la altura de fuste limpio, la altura total y la superficie de producción de resina contribuyen a explicar la producción de ésta mediante funciones lineales y no lineales. Así el objetivo de fue generar funciones matemáticas que permitan estimar la producción promedio mensual de resina a nivel árbol individual en las especies utilizadas en las plantaciones de las Choapas, Veracruz.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Área de estudio

Se localiza en las plantaciones forestales comerciales para producción de resina en Las Choapas, Veracruz, México, pertenecientes al proyecto Agroforestal Uumbal, entre las coordenadas 17° 49' 50.59" Latitud Norte y 94° 6' 11.84" Longitud Oeste, a una altitud media de 100 m. El clima es cálido húmedo con lluvias todo el año, aunque abundantes en verano, la precipitación anual varía de 2400 a 3100 mm, temperatura mínima de 22 °C y máxima de 30° C. La fisiografía se compone por llanuras aluviales con lomeríos, llanuras aluviales costeras inundables y valles abiertos con lomeríos. Los suelos que predominan son luvisoles y cambisoles (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2009).

2.4.2 Registro del rendimiento de resina

Las especies utilizadas en este estudio se encuentran distribuidas en dos lotes adyacentes de 1 ha dentro del área de ensayo de la plantación diseñadas por el área de Investigación y Desarrollo como parte de un programa de mejora de la extracción de resina y prueba de pastas estimulantes. Se registró la producción de resina, durante un mes, en 98 árboles de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* y 98 árboles *P. caribaea* var. *hondurensis* × *P. elliottii* var. *elliottii* de 7 años, distribuidos en las tres categorías diamétricas del área de ensayo (**Cuadro 2.1**).

Ambas especies se comenzaron a resinar con el método americano a los 6 años, colocando una cara a la altura del tocón y 8 meses después se colocó la segunda cara. El método consiste en colocar las caras de resinación desde la base del árbol hasta los 2.60 o 3 metros sobre el fuste, realizando incisiones horizontales progresivas en la corteza cada 7 días mediante el estriado (eliminación de la corteza y el floema y aplicación de pasta estimulante) avanzando hacia la parte superior del árbol. La superficie de producción de resina en los fustes de los árboles varió según el diámetro; en la primera cara se encontraron alturas de 10 a 63 cm con anchos de 11 a 30 cm y en la segunda cara se registraron alturas de 13 a 45 cm con anchos de 10 a 22 cm.

Cuadro 2.1. Estadísticas descriptivas de los árboles para cuantificar la producción de resina de pinos en el municipio de Las Choapas, Veracruz.

Variable	Fuente	n	Diámetro normal con corteza (cm)	Altura de fuste limpio	Altura total (m)	Producción total (g)	Superficie de producción total (cm ²)	Diámetro de copa (m)
Máximo			28.8	4.9	18.1	1397	2565	5.95
Promedio	L4	98	20.25	3.7	11.62	550.367	1239.39	4.2
Mínimo			15.6	2	8.1	186	635	3.05
Desviación estándar			2.54	0.67	1.3	217.99	332.67	0.58
Máximo			28	5.2	14.1	1489	3645	6.3
Promedio	L5		19.88	3.9	10.3	624.69	1082.3	4.25
Mínimo			15.3	2.8	7	158	775	2.6
Desviación estándar			2.573	0.42	1.44	239.96	330.38	0.66

L4: *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, L5: *Pinus caribaea* var. *hondurensis* x *Pinus elliottii* var. *elliottii*

A cada árbol de la muestra se le midió el diámetro normal con corteza (cm), altura total (m), diámetro de copa (m) superficie de producción por cara (cm²), y producción neta de resina (g) por cara y panel; además, se calculó la superficie de fuste total y la superficie de copa utilizando las siguientes expresiones:

$$SFT = k \cdot dbf \cdot ht \cdot ff$$

donde:

SFT= superficie de fuste total

dbf= diámetro a la base del fuste donde se inicia la cara de resinación en cm

ht= altura total del árbol en m

ff= factor de forma de la especie

$$SC = k \cdot dbc \cdot LC \cdot 0.3$$

donde:

SC= superficie de la copa

dbc = diámetro a la base de la copa en cm

LC = longitud que se va de la altura de fuste limpio a la altura total del árbol en m

Se utilizó la constante $k = \pi/20000$ porque se utilizan los diámetros en cm y la altura en m, en la expresión de SC se consideró una arquitectura piramidal de la copa por lo que se multiplicó por 0.3 para asemejar a un prisma cónico.

Para obtener los dbf y dbc de cada árbol de la muestra se utilizaron las expresiones de ahusamiento de Demaerschalk (1972) ajustadas para estas especies resinadas en el Capítulo I de este trabajo:

$$di_{L4r} = \sqrt{4131.455 \cdot \left(\frac{1}{D^2H}\right) \cdot X^{52.59223} + 1.230953 \cdot X^{1.533856}}$$

donde:

di =diámetro con corteza (cm) a la i -ésima sección a la altura h (m)

H = altura total del árbol en m

D = diámetro normal en cm

$L4_r$ = L4 *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Australia) resinado

$$di_{L5r} = \sqrt{4131.455 \cdot \left(\frac{1}{D^2H}\right) \cdot X^{52.59223} + 1.299894 \cdot X^{1.535471}}$$

$$X = \frac{H - h}{H}$$

donde:

di =diámetro con corteza (cm) a la i -ésima sección a la altura h (m)

H = altura total del árbol en m

D =diámetro normal en cm

$L5_r$ = *Pinus caribaea* var. *hondurensis* x *Pinus elliottii* var. *elliottii* (Australia) resinado

El estriado se realiza para propiciar que la resina fluya del fuste del árbol, con una profundidad máxima de 5 mm; la bolsa de plástico se fijó a tres estrías debajo de la última estría realizada, y en ella se almacenó la producción de resina durante un mes. Para contabilizar la producción por árbol, la resina de ambas caras y paneles se agrupó y se obtuvo el peso neto de la resina con una báscula digital Truper® modelo BASE-5EP. En **Figura 2.1** se observa el rango de los datos diámetro-altura de los árboles bajo estudio.

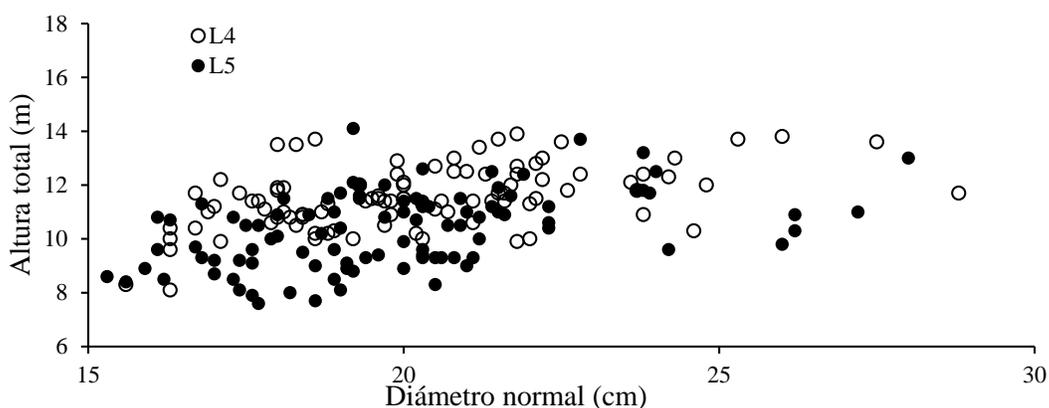


Figura 2.1. A) Dispersión de las observaciones de diámetro normal-altura total de la muestra de árboles para medir la producción de resina en plantaciones de pino de Las Choapas, Veracruz.

En la **Figura 2.2** se observa la producción de resina por especie y categoría diamétrica de la muestra de árboles.

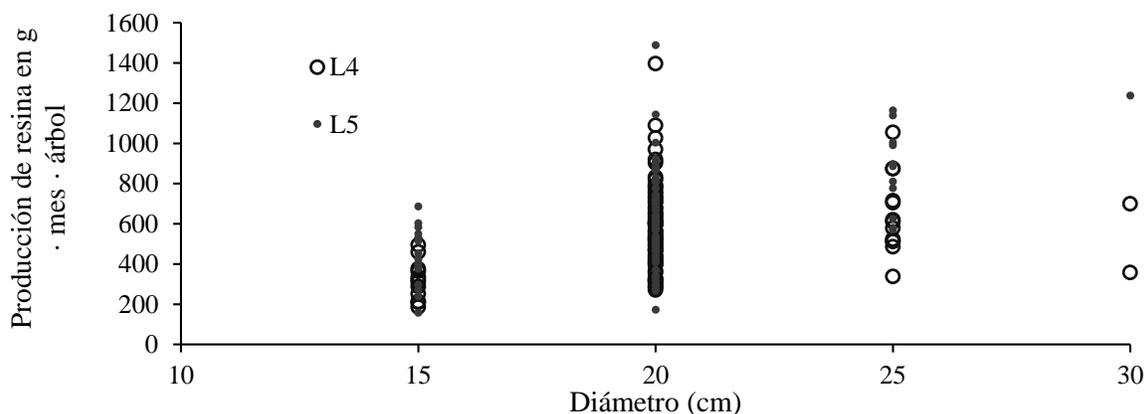


Figura 2.2. Producción observada de resina en g·mes·árbol por especie en plantaciones de Las Choapas, Veracruz, México.

En la **Figura 2.3** se observa el método americano de resinación en el área de ensayo de la plantación, en individuos de 7 años, donde: C es la cara de resinación que se compone de el panel

y la estría; P es el panel que se compone por las estrías de producción y E es la estría que es una incisión de 5 mm de profundidad de longitud equivalente a un tercio del diámetro normal y de 2.3 a 3 cm de ancho.



Figura 2.3. Método americano de resinación en plantaciones de Las Choapas, Veracruz, México.

2.4.3 Estrategia de ajuste

Se realizó un análisis de correlación de Pearson entre la producción de resina y las variables dasométricas (Reyes *et al.*, 2019; Lai *et al.*, 2020; Vázquez *et al.*, 2021) con el procedimiento CORR de SAS/ETS^(R), usando los datos de producción por árbol individual por mes; las variables con correlación significativa ($p < 0.05$) se utilizaron para ajustar modelos de regresión lineal y no lineal (Chunhui *et al.*, 2020; Sood *et al.*, 2019; Zamora-Martínez *et al.*, 2013) y otras funciones propuestas en este estudio (**Cuadro 2.2**). Se utilizó el procedimiento MODEL de SAS/ETS®, incluyendo variables indicadoras (*dummy*) para diferenciar entre especies (SAS Institute Inc., 2002). Se revisó que se cumplieran los supuestos de normalidad y de homocedasticidad en los modelos con un análisis gráfico de residuales (Barreto *et al.*, 2012; García *et al.*, 2019).

Los parámetros de los modelos lineales y no lineales se replantearon en función de variables indicadoras (*dummy*) para adecuar parámetros por especie (Montgomery y Peck, 2012) tomando como base la fuente L5, de tal manera que se redefinieron como se muestra a continuación:

$$\beta_0 = \beta_{00} + Z_1\beta_{01} \quad \text{Donde:}$$

$$\beta_1 = \beta_{10} + Z_1\beta_{11} \quad Z_1 = \{1, \text{ si pertenece a la procedencia L4 } 0, \text{ de otro modo}$$

$$\beta_2 = \beta_{20} + Z_1\beta_{21}$$

$$\beta_3 = \beta_{30} + Z_1\beta_{31}$$

La prueba de que los parámetros $H_0: \beta_{00}, \beta_{10}, \beta_{20}$ y $\beta_{30} = 0$ es insustancial en estos modelos. Lo importante es ver si existe adicionalidad significativa de los parámetros, que represente el efecto de la procedencia L4 en las variables explicativas de los modelos. Por ello la hipótesis nula es que: $H_0: \beta_{01} = \beta_{11} = \beta_{21} = \beta_{31} = 0$ contra H_A : al menos una de ellas es diferente de cero.

Cuadro 2.2. Funciones matemáticas ajustadas para estimar la producción de resina por árbol en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.

No	Ecuación	PR	Referencia
1	$P_{(g)} = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{DN} + \beta_2 \frac{1}{DC} + \beta_3 \frac{1}{HT}$	β_0 y β_2	E
2	$P_{(g)} = \beta_0 + \beta_1 DN^2 + \beta_2 DN + \beta_3 HT + \beta_4 DC$	β_0, β_3 y β_4	E
3	$\ln P_{(g)} =$	β_2	E
4	$P_{(g)} = e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot DN^2 HT} \cdot DC^{\beta_2}$	β_2	E
5	$P_{(g)} = e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot DN^2 HT} \cdot SC^{\beta_2}$	β_1	E
6	$P_{(g)} = e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot DN^2 HT} \cdot DN^2 HT^{\beta_2}$	β_2	Ayala <i>et al.</i> (1992)
7	$P_{(g)} = \beta_0 HT + \beta_1 DN^2 HT + \beta_2 SFT$	---	Sood <i>et al.</i> (2019)
8	$P_{(g)} = \beta_0 + \beta_1 DN + \beta_2 SC$	β_0 y β_2	Zamora-Martínez <i>et al.</i> (2013)
9	$P_{(g)} = \beta_0 + \beta_1 DN + \beta_2 HT + \beta_3 SC + \beta_4 DC$	β_4	Chunhui <i>et al.</i> (2020)

PR= Parámetros redefinidos (*dummy*), E = Este estudio, DN= diámetro normal (cm), HT= altura total (m), DC= diámetro de copa (m), SFT= superficie de fuste total, SC= superficie de copa, β_i =parámetros estimables, $e = 2.718\dots$, \ln = logaritmo natural.

Los modelos se compararon a partir de los resultados estadísticos obtenidos en el ajuste; se utilizaron el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{Adj}), la raíz de los cuadrados medios del error (RCME), y la suma de cuadrados del error (SCE) (Basuki *et al.*, 2009; Barreto *et al.*, 2012; García *et al.*, 2019; Reyes *et al.*, 2019).

Para seleccionar los modelos con mejor ajuste se realizó una jerarquización con base en los estadísticos de ajuste, asignando valores de uno a tres, el uno se asignó como el mejor valor del estadístico y el tres el menor, por lo que la sumatoria representó el valor final de cada modelo. El modelo con el menor valor final se seleccionó como el principal (García *et al.*, 2019; Reyes *et al.*, 2019; Tamarit *et al.*, 2014).

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las estadísticas descriptivas de las variables dasométricas utilizadas para formular las funciones de producción de resina por árbol se muestran en el **Cuadro 2.3**. Las superficies de fuste total y de fuste de copa utilizaron los diámetros calculados a la base del árbol y a la altura de fuste limpio mediante la función de ahusamiento Demaerschalk (1972) ajustado en el Capítulo I de este estudio.

Cuadro 2.3. Estadísticas descriptivas de las variables dendrométricas y de producción de resina de pinos en Las Choapas, Veracruz.

Fuente	Variable	n	Media	D.E	Mínimo	Máximo
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> (Australia) L4	DN (cm)		20.3	2.5	15.6	28.8
	HT (m)		11.6	1.3	8.1	18.1
	DC (m)		4.2	0.6	3.1	6
	AFL (m)		3.7	0.7	2	4.9
	LC (m)	98	7.9	1.4	4.2	14.1
	SFT (m ²)		0.048	0.008	0.029	0.077
	SFC (m ²)		0.011	0.002	0.005	0.02
	SC(m ²)		34.73	8.08	15.39	57.71
PROD (g)		550.37	218	186	1397	
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> x <i>Pinus</i> <i>elliottii</i> var. <i>elliottii</i> (Australia) L5	DN (cm)		19.9	2.6	15.3	28
	HT (m)		10.3	1.4	7.6	14.1
	DC (m)		4.3	0.7	2.6	6.3
	AFL (m)		4	0.4	2.8	5.2
	LC (m)	98	6.4	1.4	3.5	10
	SFT (m ²)		0.043	0.008	0.029	0.07
	SFC (m ²)		0.009	0.002	0.004	0.015
	SC(m ²)		28.77	8.93	10.74	48.82
PROD (g)		624.69	239.97	158	1489	

n= tamaño muestral, D.E.=desviación estándar, DN= diámetro normal, HT= altura total, DC= diámetro de copa, AFL= altura de fuste limpio, LC= longitud de copa, SFT= superficie total del fuste; SFC= superficie del fuste de la copa, SC= superficie de la copa, PROD= producción de resina en g por árbol.

2.5.1 Coeficientes de correlación

El diámetro normal (DN), el diámetro de copa (DC), la superficie total de fuste (SFT), la superficie de fuste de copa (SFC), y la superficie de copa (SC) (**Cuadro 2.4**) tuvieron una correlación altamente significativa ($p \leq 0.0001$) con la producción de resina, mientras que altura total (HT), altura de fuste limpio (AFL) y longitud de copa (LC), tuvieron correlación significativa ($p \leq 0.05$); el DN se correlacionó con todas las variables dasométricas excepto la AFL.

Cuadro 2.4. Coeficientes de correlación de Pearson de las variables dasométricas y de producción de resina de la muestra de 196 pinos en Las Choapas, Veracruz.

	DN (m)	HT (m)	DC (m)	AFL (m)	LC (m)	SFT (m ²)	SFC (m ²)	SCOPA (m ²)	PROD (g)
DN (m)	1	0.4399 5	0.43155	0.07302	0.39025	0.79878	0.67505	0.51487	0.42893
		<.0001	<.0001	0.3091	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
HT (m)		1	0.26454	0.03721	0.93329	0.88663	0.90467	0.83824	0.25503
			0.0002	0.6046	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0003
DC (m)			1	0.06864	0.22576	0.39183	0.33121	0.66915	0.35218
				0.3391	0.0015	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
AFL (m)				1	-0.32415	0.07622	-0.22908	-0.2055	0.18323
					<.0001	0.2883	0.0012	0.0039	0.0102
LC (m)					1	0.81195	0.93874	0.86738	0.17558
						<.0001	<.0001	<.0001	0.0138
SFT (m ²)						1	0.94442	0.81469	0.39509
							<.0001	<.0001	<.0001
SFC (m ²)							1	0.8787	0.29745
								<.0001	<.0001
SC (m ²)								1	0.29859
									<.0001
PROD (g)									1

DN= diámetro normal, HT= altura total, DC= diámetro de copa, AFL= altura de fuste limpio, LC= longitud de copa, SFT= superficie total del fuste; SFC= superficie del fuste de la copa, SC= superficie de la copa, PROD= producción de resina en g por árbol.

2.5.2 Modelos de estimación de producción de resina por árbol

En el **Cuadro 2.5** se presentan los ajustes de los modelos lineales y no lineales evaluados, se observa que la R^2_{Adj} osciló entre 0.25 y 0.37 y la función logarítmica (3) presentó un ajuste de 0.35 de la variabilidad en los predichos con respecto a los observados. El mejor ajuste lo presenta el modelo 1 con una $R^2_{Adj}=0.37$.

Cuadro 2.5. Estadísticos de ajuste de los modelos lineales y no lineales evaluados para la estimación de la producción de resina por árbol para pinos en plantaciones de Las Choapas, Veracruz.

No	variable	Parámetro	valor	EE	Valor t	Pr > t	SSE	RCME	R ² _{Adj}
1	Intercepto	β_{0L5}	1949.338	132.9	14.67	<.0001	5380938	170	0.37
		β_{0L4}	-609.853	165.6	-3.68	0.0003			
	1/DN	β_1	-11964.8	2404.8	-4.98	<.0001			
	1/DC	β_{2L5}	-1743.96	489.3	-3.56	0.0005			
		β_{2L4}	1993.39	688.3	2.9	0.0042			
	1/HT	β_3	-3045.65	1243.8	-2.45	0.0153			
2	Intercepto	β_{0L5}	-1836.36	579.3	-3.17	0.0018	5353860	170	0.36
		β_{0L4}	621.8815	237.2	2.62	0.0095			
	DN ²	β_1	-2.53366	1.3121	-1.93	0.055			
	DN	β_2	135.8723	56.2204	2.42	0.0166			
		β_{3L5}	35.11266	14.5218	2.42	0.0166			
	HT	β_{3L4}	-23.567	19.4193	-1.21	0.2265			
		β_{4L5}	95.83441	31.3082	3.06	0.0025			
DC	β_{4L4}	-115.044	42.3236	-2.72	0.0072				
3	Intercepto	β_0	0.884899	0.5899	1.5	0.1352	19.0295	0.318	0.35
	Ln (DN)	β_1	1.022021	0.2228	4.59	<.0001			
	Ln (DC)	β_{2L5}	0.518634	0.1721	3.01	0.0029			
		β_{2L4}	-0.17593	0.0357	-4.93	<.0001			
	Ln (HT)	β_3	0.722409	0.2085	3.46	0.0007			
4	Intercepto	β_0	5.2205	0.2486	21.00	<.0001	7654933	199.7	0.257
	DN ² HT	β_1	0.000078	0.000015	5.37	<.0001			
		β_{2L5}	0.615919	0.1800	3.42	0.0008			
	DC	β_{2L4}	-0.1428	0.0338	-4.23	<.0001			
5	Intercepto	β_0	5.165969	0.3432	15.05	<.0001	7728341	200.6	0.250
	DN ² HT	B_{1L5}	0.000093	0.000018	5.17	<.0001			
		B_{1L4}	-0.00005	9.102E-6	-5.30	<.0001			
	SC	B_2	0.260256	0.1131	2.30	0.0224			

No	variable	Parámetro	valor	EE	Valor t	Pr > t	SSE	RCME	R ² _{Adj}
6	DN ² _{HT}	β_0^*	0.15*						
		β_1	-0.00005	0.000016	-3.03	0.0028			
		β_{2L5}	0.7813	0.00978	79.9	<.0001	7598934	198	0.27
		β_{2L4}	-0.02645	0.0057	-4.64	<.0001			
7	HT	β_0	-414.08	63.69	-6.50	<.0001			
	DN ² _{HT}	β_1	-0.53	0.08	-6.39	<.0001	7313054	195	0.29
	SFT	β_2	416298.80	59146.40	7.04	<.0001			
8	Intercepto	β_{0L5}	-313.89	119.4	-2.63	0.0092			
		β_{0L4}	303.5125	110.1	2.76	0.0064			
	DN	β_1	30.94833	6.4139	4.83	<.0001	7263820	195	0.29
	SC	β_{3L5}	11.22831	2.4308	4.62	<.0001			
		β_{3L4}	-13.1272	3.3056	-3.97	0.0001			
	Intercepto	β_0	-996.079	275.4	-3.62	0.0004			
9	DN	β_1	26.10749	6.5755	3.97	0.0001			
	HT	β_2	75.7024	25.4164	2.98	0.0033	7293586	196	0.28
	SC	β_3	-11.1392	5.5826	-2	0.0474			
	DC	β_{4L5}	151.4311	46.1267	3.28	0.0012			
		β_{4L4}	-27.6974	7.4551	-3.72	0.0003			

DN= diámetro normal (cm), HT= altura total (m), DC= diámetro de copa (m), SFT= superficie de fuste total, SC= superficie de copa, β_i =parámetros estimables en la regresión, β_{iL4}, β_{iL5} efecto de la procedencia en el parámetro, ln= logaritmo natural, SCE = suma de cuadrados del error, RCME = raíz del cuadrado medio del error, R²_{Adj} = coeficiente de determinación ajustado, β_0^* = parámetro fijado de la ecuación de Ayala et al., 1992 para *Pinus caribaea*.

Reyes *et al.* (2019) utilizaron varias unidades ambientales, número de caras vivas y altura de fuste limpio para elaborar un modelo logarítmico para estimar la producción de resina promedio mensual en *Pinus oocarpa* en Michoacán, México; si bien su muestra tuvo una distribución más amplia que abarcó dos unidades climáticas, dos tipos de suelo y árboles en categorías diamétricas de 30 a 80 cm, alturas de 9 a 27 m en edades de 29 a 89 años. Rodríguez *et al.* (2014) en Segovia, España probaron las correlaciones entre el rendimiento quincenal de resina en *Pinus pinaster* y los valores promedio de las variables climáticas (temperatura, déficit hídrico, evapotranspiración y

radiación) y longitud de los canales resiníferos, encontrando que el crecimiento de los canales resiníferos acumulado durante el verano favoreció el rendimiento de resina.

El modelo que utiliza en su estructura el inverso del diámetro normal, diámetro de copa y altura total (modelo 1) fue el que presentó la mayor $R^2_{Adj}= 0.37$; los parámetros que se redefinieron utilizando variables *dummy* fueron el intercepto (β_0), y el diámetro de copa (β_2) por lo que se especificó un valor al construir la ecuación para cada especie; el intercepto β_0 se interpreta como la producción máxima de resina mensual, 1,949.338 g para la procedencia L5 y 1,339.485 g para L4; β_1 , β_2 y β_3 como parámetros de sustracción de la producción inicial, indican que entre más grandes sean los árboles menor será la cantidad descontada por estos parámetros, debido a que la función es inversamente proporcional.

El modelo 2 con $R^2_{Adj}= 0.36$ sugiere una parábola respecto al diámetro normal, en la cual el valor de máxima producción con respecto al diámetro se da cuando este alcanza un diámetro de 26.8 cm ($\beta_2/(2\beta_1)$). La contribución lineal del *DN* sugiere que la producción de resina cambia marginalmente a la tasa $135 - 5.06 \cdot DN$ g en ambas especies. El parámetro asociado a la altura (β_{3L5}) sugiere que por cada metro que L5 incrementa en altura total produce 35 g mientras que (β_{3L4}) que L4 produce 23.5 g menos que L5 ya que la hipótesis plantea que los parámetros son aditivos. Por su parte β_{4L5} sugiere que por cada unidad que L5 incrementa en diámetro de copa produce 95 g mientras que β_{4L4} que L4 disminuye en 115 g la producción con respecto al aumento de L5, ya que estos parámetros están asociados en el modelo.

Los valores de producción y variables independientes se transformaron con el logaritmo natural en el modelo 3, y se obtuvo una $R^2_{Adj}= 0.35$; para obtener la producción en g se utiliza la función exponencial con los *ln* en cada variable independiente. El modelo 4 es no lineal, obteniéndose una $R^2_{Adj}= 0.25$, el intercepto (β_0) es positivo, β_1 se asocia a la variable combinada ($DN^2 HT$) que está relacionada con el volumen del árbol, y los parámetros β_{2L5} y β_{2L4} muestran el efecto de la especie; si L4 y L5 presentaran las mismas dimensiones de DC, L5 produciría 0.615 g al aumentar la copa en 1m y L4 0.473 g. EL modelo 5 utiliza también $DN^2 HT$ y la superficie de copa (SC), los parámetros β_{1L5} y β_{1L4} indican la razón de incremento en la producción con respecto al volumen.

El modelo 6 utiliza la variable combinada por lo que puede ser aplicado en los sistemas de crecimiento y rendimiento maderable y en la distribución Weibull para modelar la producción de resina por edad y categoría diamétrica solo con el diámetro normal y la altura total (Ayala *et al.*, 1992); el ajuste de este modelo fue de $R^2_{Adj} = 0.27$. Los modelos 4, 5, 7, 8 y 9 utilizan la superficie de fuste total (SFT), de copa (SC) y el diámetro de copa (DC) en su estructura, aunque se obtuvo una R^2_{Adj} de 0.25-0.29.

Se estimó la producción promedio mensual de resina (g) por árbol por categoría diamétrica utilizando los modelos 1-3. (**Cuadro 2.6**). Se observa que la producción de resina es menor en las categorías de 15 cm para ambas especies; sin embargo, en las CD 20-30 sobresale el híbrido (L5), y en la CD de 30 las estimaciones tuvieron mayor variabilidad, lo cual puede deberse a que la información de producción es escasa en esta categoría diamétrica.

Cuadro 2.6. Estimación de la producción promedio mensual de resina en gramos por árbol por especie mediante el uso de modelos lineales y no lineales ajustados para pinos de Las Choapas, Veracruz, México.

No. Modelo	Modelo 1 lineal		Modelo 2 cuadrático		Modelo 3 logarítmico	
R^2_{Adj}	0.37		0.36		0.35	
CD	M1 L4	M1 L5	M2 L4	M2 L5	M3 L4	M3 L5
15	244.27	164.28	288.27	182.50	252.469	292.348
20	538.53	646.20	542.98	637.98	497.842	592.638
25	705.82	926.28	672.09	973.27	809.146	991.327
30	803.42	1057.69	663.38	1058.36	1117.566	1376.344

R^2_{Adj} = coeficiente de determinación ajustado, No. Modelo= número jerarquizado asignado a los modelos ajustados, CD = categoría diamétrica (cm), L4 = *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, L5= *Pinus caribaea* var. *hondurensis* x *Pinus elliottii* var. *elliottii*.

Ayala *et al.*, (1992) analizaron diferentes métodos de resinación en una plantación de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de 17 años de edad en producción mensual de resina, obteniendo una producción mensual promedio por árbol de 242.41 g, cabe señalar que el método de resinación es determinante en la producción de resina, ya que en ese estudio el método franco americano sin estimulante mostró una producción mensual por árbol de 308.85 g mientras que el método americano estimulado presentó 251 g; los resultados obtenidos en este trabajo para la CD 15 cm son semejantes a los obtenidos por dichos autores; al hacer la selección de árboles a resinar se podría tener una aproximación de la producción de resina esperada en una categoría determinada.

López (2021) realizó un análisis de producción de resina en árboles plus de *Pinus leiophylla* en Michoacán; sus resultados indicaron que la temperatura influyó en el rendimiento de la resina, ya que fue en el mes de junio cuando se obtuvo una producción promedio de 0.742 kg por árbol, y la temperatura más alta se registró en dicho mes (36° C), mientras que en los demás meses en promedio fue de 0.600 kg. En dicha investigación se destaca que los árboles presentaron mayor producción de resina a partir de los 45 cm de diámetro normal, y que la producción promedio mensual se estabiliza hasta los 70 cm; y el aprovechamiento en la zona va de los 35 a los 75 años, alcanzando la mayor producción a los 55 años.

El comportamiento de M1 y M2, con respecto a los datos promedio de producción mensual de resina por árbol observada en campo, y las ecuaciones con los parámetros específicos para cada especie, se presentan en la **Figura 2.4**.

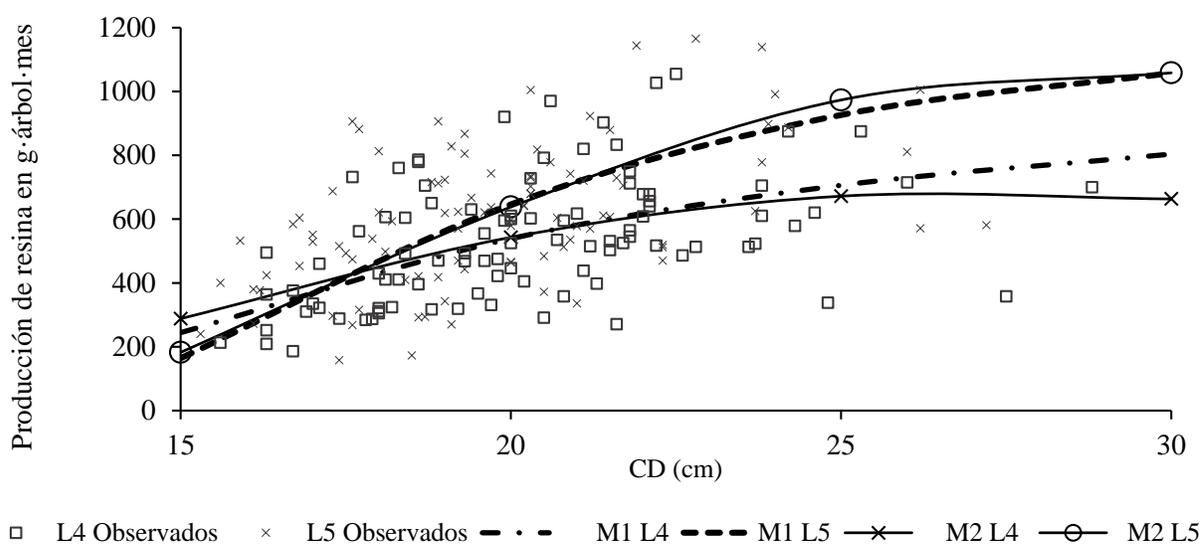


Figura 2.4. Estimación de la producción promedio mensual de resina en gramos por árbol y por especie presentando el modelo 1 y 2 de individuos de pinos en Las Choapas, Veracruz.

Los modelos específicos para cada especie son:

$$\text{L4 M1} \quad P_{(g)} = 1339.485 - 11964.8DN^{-1} + 249.43DC^{-1} - 3045.65HT^{-1}$$

$$\text{L5 M1} \quad P_{(g)} = 1949.338 - 11964.8DN^{-1} - 1743.96DC^{-1} - 3045.65HT^{-1}$$

$$\text{L4 M2} \quad P_{(g)} = -1214.48 - 2.53366DN^2 + 135.8723DN + 11.54566HT - 19.20959DC$$

$$\text{L5 M2} \quad P_{(g)} = -1836.36 - 2.53366DN^2 + 135.8723DN + 35.11266HT + 95.83441DC$$

Se observa un comportamiento homogéneo de los residuos para los modelos 1 (M1) y 2 (M2) (**Figura 2.5 A y C**), lo que significa que se pueden interpretar de manera correcta las propiedades estadísticas de éstos; asimismo, el comportamiento de la producción observada de resina vs producción predicha por dichos modelos (**Figura 2.5 B y D**) presentó resultados similares siguiendo el comportamiento de la naturaleza de los datos, lo cual sugiere un indicador aceptable.

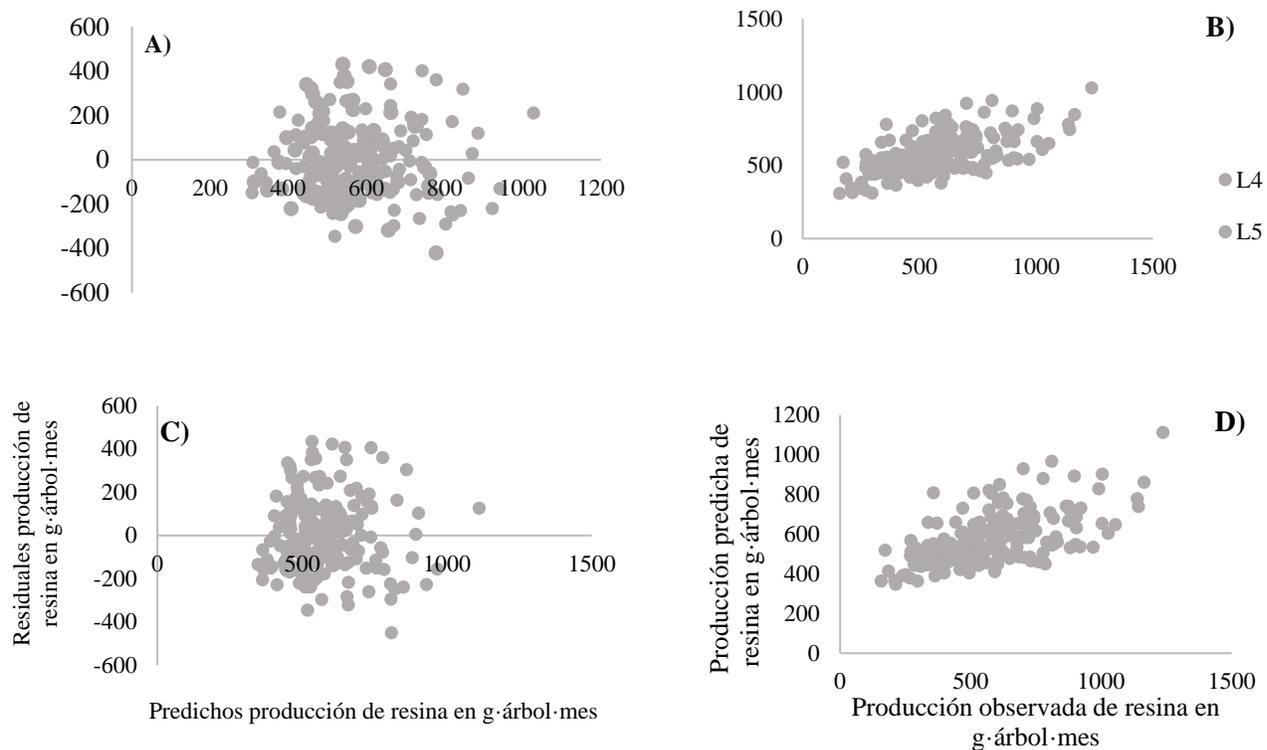


Figura 2.5. A) Gráfico de residuales de la producción de resina para el modelo 1. B) Ajuste de la producción observada contra la producción predicha para el modelo 1. C) Gráfico de residuales de la producción de resina para el modelo 2. D) Ajuste de la producción observada contra la producción predicha para el modelo 2.

Trabajos en *P. oocarpa* (Reyes *et al.*, 2019) reportan modelos de estimación de producción de resina por árbol, con $R^2_{Adj} = 0.6$, éstos incluyen variables de unidad climática, número de caras vivas y altura de fuste limpio, otros modelos para *Pinus pinaster* con $R^2_{Adj} = 0.38$; utilizando el diámetro normal y $R^2_{Adj} = 0.23$ con la frecuencia de los canales resiníferos (Rodríguez *et al.*, 2014). Si bien estos ajustes parecen ser relativamente bajos, los resultados de este trabajo son similares ($R^2_{Adj} = 0.25- 0.37$) a los generados en los estudios citados.

Algunos trabajos con *P. pinaster* en España indican que el rendimiento de resina por árbol es mayor en rodales menos densos, y que el diámetro normal y el porcentaje de copa viva se correlacionan con el rendimiento (Rodríguez *et al.*, 2014); Wang *et al.* (2006) mencionan que el rendimiento de resina está determinado por la especie, su diámetro, edad, método de extracción y el uso de estimulantes. En el caso de *Pinus oocarpa*, Reyes *et al.* (2019) reportan que, en rodales naturales, los árboles de categorías superiores de diámetro de copa (DC) y DN producen una mayor

producción de resina; Chunhui *et al.* (2020) probaron la relación entre el crecimiento, las características de la copa y el rendimiento de resina en *P. elliottii*, obteniendo un modelo de regresión lineal en el que el ancho de la copa y su superficie tuvieron el mayor impacto en la producción de resina.

En este estudio el DN, el DC y la HT se correlacionaron de forma significativa con la producción individual de resina. Se obtuvieron ajustes de R^2_{Adj} (0.25-0.29) al utilizar las superficies de copa, de fuste de copa y de fuste total del árbol que es donde se sintetiza y fluye la resina (Wu y Hu, 1997; Rodríguez *et al.*, 2013) en contraste con los modelos que utilizan en su estructura variables dasométricas que se registran en el inventario tradicional con R^2_{Adj} de (0.35-0.37).

Ayala *et al.* (1992) desarrollaron un modelo de producción de resina utilizando la variable combinada y su logaritmo, el cual explicó el 25.06% de la variabilidad de la producción; dichos autores, además, compararon el modelo con diferentes métodos de resinación y uso de pastas estimulantes. El método de resinación explicó el 11.97 % de la variabilidad total, mientras que el efecto general del modelo expresado a través de la media (condiciones ambientales del ensayo) explicó el 62.15 %. Por lo anterior, concluyeron que el comportamiento de la producción de resina es parecido a los sistemas de producción agrícola, en los cuales las condiciones específicas del sitio determinan en gran medida la variabilidad de los procesos o fenómenos.

Reynoso-Santos *et al.* (2018) utilizaron un modelo de regresión lineal múltiple con las variables dasométricas diámetro normal y altura total para estimar la producción de resina de *Pinus oocarpa* en un bosque bajo manejo en Chiapas; en el arbolado en las categorías diamétricas de 25 a 50 cm y alturas de 10 a 32 m, estimaron una producción promedio mensual por árbol de 276 g, en las categorías de 35 a 40 cm de 550 g, y en categorías superiores a 45 se alcanzó una producción de 850 g. Estos resultados y los obtenidos en este estudio sugieren que las dimensiones de los árboles determinan la producción de resina, por lo que el diámetro normal, diámetro de copa y altura total ayudan a explicar la variación en la producción de resina.

Susaeta *et al.* (2010) obtuvieron rendimientos mensuales de resina por árbol para *P. elliottii* en categorías de 23 a 33 cm de diámetro normal de 1.4 a 2.2 kg y concluyeron que varían según la

temperatura, la precipitación, el diámetro normal, el diámetro de copa, la procedencia genética, la longitud de las caras y el método de resinación empleado.

2.6 CONCLUSIONES

La especie que presentó mayor rendimiento de resina es el híbrido L5 (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* x *Pinus elliottii* var. *elliottii*) con una estimación mayor de producción promedio mensual de resina por árbol y categoría diamétrica con respecto a la especie L4 (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*). Por lo que es adecuado estimar la producción de resina con modelos específicos para cada especie.

Las variables DN, DC y HT pueden tomarse como explicativas en función del rendimiento de resina para estas especies. Por ende, se puede tomar en cuenta el DN y DC como variables importantes que explican la productividad de resina por árbol y estas se relacionan directamente con el manejo de la densidad de la plantación. Para aumentar el R^2_{Adj} es recomendable establecer unidades muestrales que se monitoreen durante al menos un año, incluyendo variables climáticas como la temperatura promedio mensual y precipitación.

CAPÍTULO III. SISTEMA DE CRECIMIENTO PARA PINOS TROPICALES Y ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN COMBINADA RESINA-MADERA-CARBONO: UN ENFOQUE INICIAL

3.1 RESUMEN

Se actualizó el sistema de crecimiento y rendimiento maderable (*SCYRM*) para plantaciones de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* y *Pinus caribaea* var. *hondurensis* × *Pinus elliottii* var. *elliottii*, establecidas con fines de producción de resina y madera en el sureste de Veracruz, México. Se utilizaron datos de 271 sitios de inventario forestal del año 2016 al 2020. El *SCYRM* explícito se ajustó mediante regresión aparentemente no relacionada utilizando modelos compatibles de predicción para las variables de mortalidad, área basal y volumen, el modelo de altura dominante se generó a través de diferencia algebraica. El *SCYRM* implícito se realizó mediante la función de probabilidades de Weibull de tres parámetros. A partir de este sistema se estimó la producción de resina bajo escenarios de producción *ad hoc* y la distribución de productos maderables mediante el modelo de ahusamiento de Demaerschalk. Estas estimaciones sirvieron de base para realizar un análisis financiero de las plantaciones bajo escenarios de producción (madera para aserrío (*M*), madera más beneficios por acumulación de carbono (*MC*), madera y cosecha de resina (*MR*) y madera, carbono y cosecha de resina (*MCR*)). La modelación de la altura dominante utilizando el modelo Schumacher-Korf sugiere cinco clases de IS a una edad base de 7 años (11, 13, 15, 17 y 19 m) con turnos técnicos en volumen de 12, 11, 10, 9 y 8 años respectivamente y un volumen probable de 222.3, 247.4, 271.1, 293.7 y 315.4 m³·ha⁻¹ a los 14 años. La tasa de acumulación de C es de 5.16 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ a los 5 años; una producción de resina promedio a los 13 años de 13.5 ton·ha⁻¹ en el IS 15. El turno financiero para el IS promedio (15 m, 7.5%) en los escenarios M, MC, MR, MCR ocurre a los 10 años, la edad óptima de cosecha 11(M) y 11.5 años (MC, MR, MCR), con valores de Valor Actual Neto \$14,759, \$48,262, \$647,987 y \$ 681,490, Tasa Interna de Retorno de 3.7 %, 15.9 %, 60.9 % y 67.9 % y una Relación Beneficio/Costo de 1.36, 2.16, 2.86 y 2.96 respectivamente.

Palabras clave: Modelo Schumacher-Korf, evaluación financiera, VAN, TIR, *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus elliottii*, plantación forestal, producción conjunta.

TROPICAL PINES GROWTH SYSTEM AND COMBINED RESIN-WOOD-CARBON PRODUCTION SCENARIOS: AN INITIAL APPROACH

3.2 ABSTRACT

We adjusted and updated the timber growth and yield system (GYS) for pine plantations (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* × *Pinus elliottii* var. *elliottii*) established for resin and wood production in southeastern Veracruz, Mexico. Data from 271 sampling sites with remeasurements from forest inventories from 2016 to 2020 were used. The explicit GYS was fitted by seemingly unrelated regression using compatible projection and prediction models generated through algebraic difference approach for the dominant height, mortality, basal area, and volume variables. Implicit GYS was performed using the three-parameter Weibull likelihood function; from this system, resin production was estimated under *ad hoc* production scenarios to select 460 trees at 6 and 10 years; product distribution was performed using the Demaerschalk's stem taper model. For the financial evaluation of the plantation under three production scenarios (sawtimber (T), timber plus C accumulation benefits (TC), timber plus and resin harvest (TR) and timber, C, resin harvest (TCR)) the financial indicators were calculated: benefit-cost ratio (BCR), net present value (NPV), payback period (PP), internal rate of return (IRR) and soil expectation value (SEV); financial turn (FT) and optimum cutting age (CA) with three discount rates (6.49, 7.5 y 8.8 %). Modeling of dominant height using the Schumacher-Korf model suggests five SI classes at a base age of 7 years (11, 13, 15, 15, 17 and 19 m) with technical times in volume of 12, 11, 10, 9 and 8 years respectively and a probable volume of 222.3, 247.4, 271.1, 293.7 and 315.4 m³·ha⁻¹ at 14 years. The C accumulation rate is 5.11 Mg·ha⁻¹·yr⁻¹ at 5 years. In SI 15 resin production 13.5 ton·ha⁻¹·yr⁻¹ at 13 years. These projections were used to perform the financial evaluation under three production scenarios (timber (T), timber plus C accumulation benefits (TC), timber plus and resin harvesting (TR) and timber, C, resin harvesting (TCR)). The financial turn for the average SI (15 m, 7.5%) in the scenarios T, TC, TR and TCR occurs at 10 years, optimum harvesting age 11 (T) and 11.5 years (TC, TR, TCR), with NPV of \$14,759, \$48,262, \$647,987, \$ 681,490, IRR of 3.7 %, 15.9 %, 60.9 % and 67.9 % and a BCR of 1.36, 2.16, 2.86 and 2.96 respectively

Keywords: Financial indicators, NPV, IRR, *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, *Pinus elliottii*, combined production, resin.

3.3 INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales comerciales (PFC) son sistemas de producción que permiten una rápida generación de materias primas (Cuevas *et al.*, 2022). Estas, al igual que los bosques naturales, pueden gestionarse para producir múltiples bienes y servicios para la sociedad. Su carácter multifuncional debe integrarse explícitamente en la toma de decisiones que implica su administración (Téllez, 2008).

Para evaluar la eficiencia de las PFC como sistemas productivos generalmente se recurre al cálculo del turno técnico y financiero (o económico). Este último fue definido por Faustmann (1849) como la edad a la cual se maximiza el valor actual neto (VAN) de la inversión considerando que la rotación de la cosecha se puede dar en infinitos ciclos de corta.

Las plantaciones de pinos tropicales de Las Choapas, Veracruz, México se caracterizan por ser de doble propósito, para el aprovechamiento de resina como producto principal y para la cosecha de madera al terminar la etapa de resinación de los árboles. Estos proyectos implican inversiones fuertes y a largo plazo, por lo que se requiere certeza sobre su rendimiento físico y financiero bajo diferentes escenarios de producción: madera para aserrío al final del turno, madera y beneficios por acumulación de carbono atmosférico (C), madera y aprovechamiento de resina y la combinación de madera, beneficios de C y resina. La predicción y proyección del crecimiento de los árboles a lo largo del proceso productivo facilita la administración de las PFC (Parra, 2016), por ello se han generado para estas plantaciones sistemas de crecimiento y rendimiento explícito e implícito obteniendo resultados adecuados (Torres, 2018).

En las últimas tres décadas el gobierno de México, a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y el Fideicomiso Instituido en Relación con la Agricultura (FIRA), ha destinado recursos económicos para el financiamiento de PFC (Ramírez, 2011) y para su evaluación financiera utilizando tasas de descuento que van del 5 a 11 % (Parra, 2016; Zaragoza, 2018).

La evaluación de las plantaciones implica convertir las tasas de acumulación madera, de C y de resina en valores monetarios. A partir de ello se calculan indicadores financieros como la relación beneficio/costo (RB/C), el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), entre otros,

mismos que pueden incluir los ingresos por la venta de productos y subsidios gubernamentales, además de los costos de producción (Téllez, 2008; Parra, 2018; Zaragoza, 2018).

El presente trabajo tuvo como objetivos: 1) actualizar el *SCYRM* de plantaciones de pinos establecidas en Las Choapas, Veracruz, México con base en mediciones recientes realizadas la empresa Agroforestal Uumbal, 2) estimar la producción de resina de las plantaciones mediante un modelo de resina compatible con el *SCYRM* y 3) evaluar el rendimiento financiero de las plantaciones bajo escenarios diferentes de producción: madera (M), madera-carbono (MC), madera-resina (MR) y madera-carbono-resina (MCR).

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Área de estudio

Se analizaron datos de las plantaciones forestales comerciales para producción de resina establecidas en Las Choapas, Veracruz, México pertenecientes al proyecto Agroforestal Uumbal, Veracruz. Estas se ubican entre las coordenadas 17° 49' 50.59" Latitud Norte y 94° 6' 11.84" Longitud Oeste, a una altitud media de 100 m. El clima es cálido húmedo con lluvias todo el año y abundantes en verano, la precipitación anual varía de 2400 a 3100 mm, la temperatura mínima es 22 °C y la máxima 30° C. La fisiografía se compone por llanuras aluviales con lomeríos, llanuras aluviales costeras inundables y valles abiertos con lomeríos. Los suelos que predominan son luvisoles y cambisoles (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2009).

3.4.2. Datos dasométricos

Se conformó una base de datos a partir de la medición de 271 sitios de muestreo realizada como sigue: 41 sitios fueron levantados en el inventario del año 2016, 85 en el inventario de 2017, 89 en el inventario 2018, 14 en el inventario 2019 y 42 en el inventario 2020 (**Cuadro 3.1**).

Cuadro 3.1. Características de los inventarios utilizados en el ajuste del SCYRM.

Inventario	Procedencia	Edad (años) de la plantación	Superficie de los sitios (ha)	No. de sitios
2016	L1	3.0	0.02	24
	L4	4.8	0.02	12
	L5	3.0	0.02	5
2017	L1	4.0	0.03	58
	L4	5.9	0.03	4
	L5	4.0	0.03	23
2018	L1	4.6	0.03	51
	L4	6.4	0.05	15
	L5	4.7	0.04	23
2019	L4	7.4	0.05	14
2020	L1	6.5	0.05	9
	L4	8.3	0.05	21
	L5	6.6	0.05	12

L1 = *Pinus caribaea* var. *hondurensis*; L4 = *Pinus caribaea* var. *hondurensis*; L5 = *Pinus caribaea* var. *hondurensis* × *Pinus elliottii* var. *elliottii*.

Los inventarios registraron variables de estado de las plantaciones: A: altura dominante (m), AB: área basal (m²), V: volumen (m³) y número de árboles vivos (NA) para observar el comportamiento en crono-secuencia como se muestra en las **Figura 3.1** a la **Figura 3.4** . La densidad inicial media de los sitios fue de 1244 árboles por hectárea. Se observa variabilidad en la densidad (árboles·ha⁻¹) debido a que en algunos sitios se realizó un aclareo a los siete años.

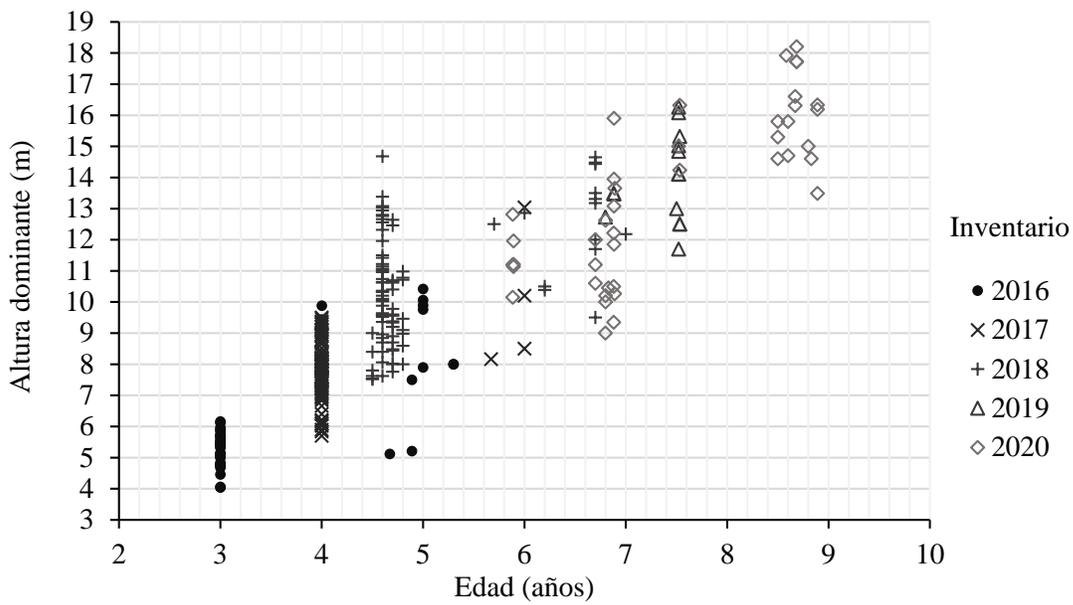


Figura 3.1. Dispersión de la altura dominante por sitio y edad observados en plantaciones forestales comerciales de pinos en las Choapas, Veracruz, México.

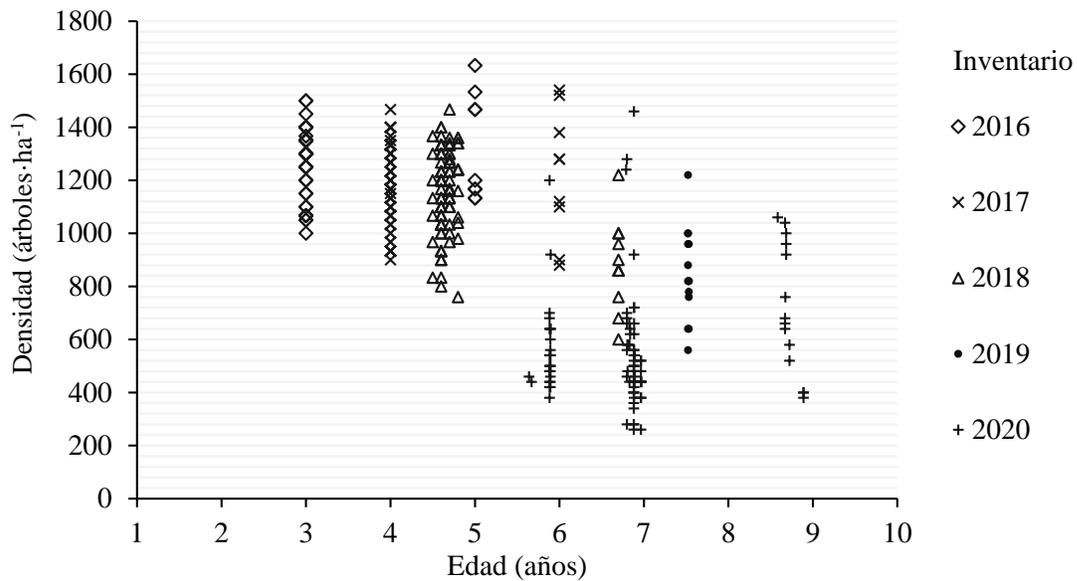


Figura 3.2. Número de árboles por sitio y edad.

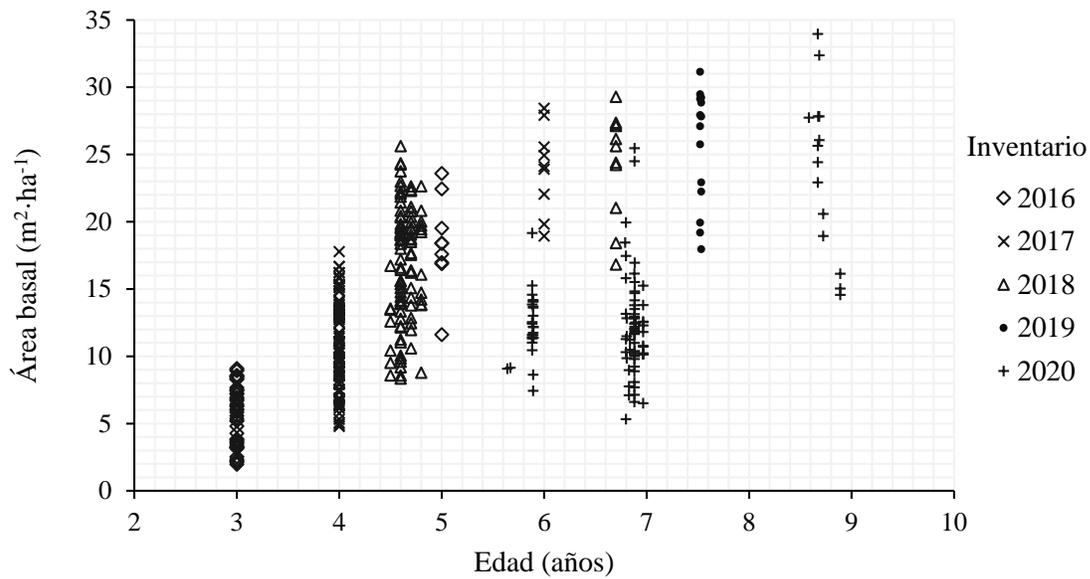


Figura 3.3. Comportamiento del área basal por sitio y edad.

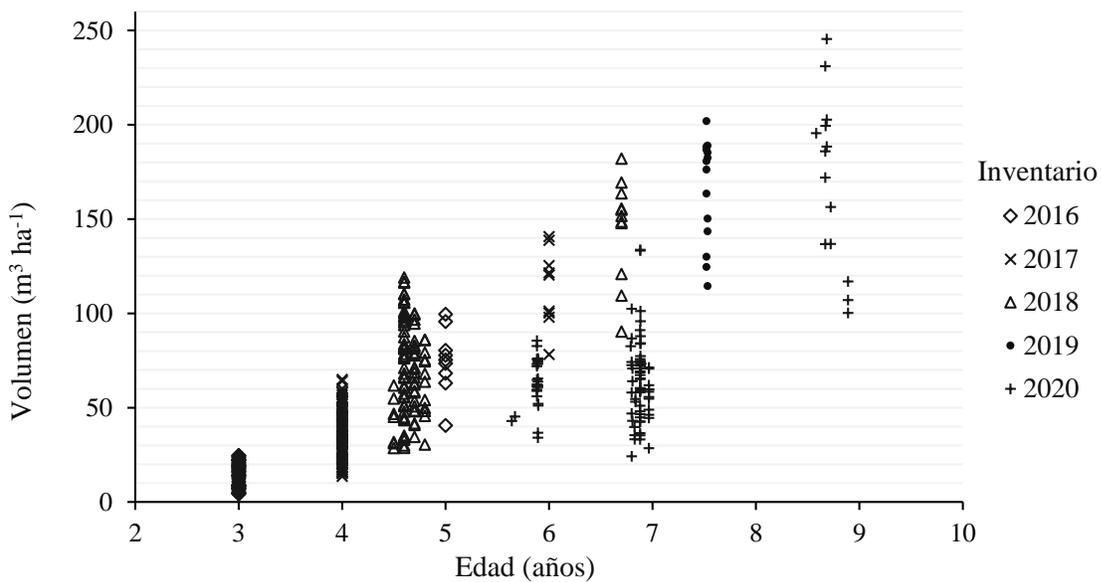


Figura 3.4. Comportamiento del volumen por sitio y edad.

Como puede observarse el comportamiento de la crono-secuencia es adecuado para el ajuste de modelos de crecimiento que estimen el rendimiento maderable y el rendimiento potencial de resina.

3.4.3 Sistema de crecimiento explícito

El sistema de crecimiento se conformó con modelos de predicción para cada variable de estado A, AB, V y NA, dichas variables posibilitan estimar el rendimiento futuro por hectárea de la plantación.

3.4.3.1 Modelos de crecimiento en altura dominante

El sistema de crecimiento dio inicio con el ajuste de modelos de altura dominante, para ello se utilizaron los cinco árboles dominantes por sitio y edad, se ajustaron cinco estructuras matemáticas (**Cuadro 3.2**) para obtener la curva guía.

Cuadro 3.2. Modelos biométricos ajustados para modelar el crecimiento en altura dominante de pinos en las Choapas, Veracruz, México.

Modelo	Expresión (Curva guía)	Referencia
Schumacher	$A = \alpha_0 e^{\frac{-\alpha_1}{E}}$	Schumacher, 1939
Hossfeld IV	$A = \frac{\alpha_0}{1 + e^{\alpha_1 \cdot E^{-\alpha_2}}}$	Hossfeld, 1822
Gompertz	$A = \alpha_0 e^{-\alpha_1 e^{-\alpha_2 \cdot E}}$	Gompertz, 1825
Schumacher y Korf	$A = \alpha_0 e^{\frac{-\alpha_1}{E^{\alpha_2}}}$	Korf, 1939
Chapman Richards	$A = \alpha_0 [1 - e^{(-\alpha_1 \cdot E)^{\alpha_2}}]$	Richards, 1959

A=Altura dominante (metros), E=Edad del sitio (años) α_i =Parámetros a estimar, e=función exponencial

Se utilizó el método de diferencia algebraica (ADA) para el ajuste de los modelos. Este requiere de sitios de muestreo con remediciones para describir de mejor manera las tasas de cambio del sistema en cualquier punto del tiempo en función del estado actual. Esta metodología admite una hipótesis de crecimiento respecto a los parámetros, se tiene una sola asíntota común en los modelos polimórficos y la tasa de crecimiento cambia en función del sitio; en los modelos anamórficos las tasas de crecimiento permanecen constantes entre calidades de estación con asíntotas variables, e involucran esencialmente la sustitución de un parámetro del modelo base para expresarlo como

una función de sitio. En la estructura anamórfica se despeja el parámetro asociado a la asíntota y en la polimórfica el relacionado con la tasa de crecimiento (Bailey & Clutter, 1974; Cieszewski & Bailey, 2000).

Se seleccionaron dos modelos de altura dominante con el mejor ajuste y comportamiento gráfico lógico con respecto a los datos observados, siendo los modelos de Schumacher-Korf y Chapman-Richards los que se eligieron para la construcción de modelos de proyección mediante familias de curvas anamórficas y polimórficas (**Cuadro 3.3**).

Cuadro 3.3. Ecuaciones utilizadas para modelar la altura dominante de proyección y generar las familias de curvas de índice de sitio para plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz.

Modelo	Anamórfica	Polimórfica-1
Schumacher y Korf	$A_2 = A_1 \left[\frac{e^{(\alpha_1 \cdot E_2^{-\alpha_2})}}{e^{(\alpha_1 \cdot E_1^{-\alpha_2})}} \right]$	$A_2 = \beta_0 \cdot e^{\left[\left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{\beta_2} \cdot \ln \left(\frac{A_1}{\beta_0} \right) \right]}$
Chapman Richards	$A_2 = A_1 \left[\frac{1 - e^{\gamma_1 \cdot E_2}}{1 - e^{\gamma_1 \cdot E_1}} \right]^{\gamma_2}$	$A_2 = \theta_0 \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{A_1}{\theta_0} \right)^{\frac{1}{\theta_2}} \right) \cdot \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \right)^{\theta_2}$

A_1 =Altura dominante a la edad inicial (m), A_2 =Altura dominante a la edad proyectada (m), E_1 =Edad inicial o edad base (7 años), E_2 = Edad de proyección, α_i , β_i , γ_i y θ_i =Parámetros a estimar, e=función exponencial, ln= logaritmo natural.

Finalmente, al comparar estos dos modelos se seleccionó el de Schumacher-Korf para curva guía y en su forma polimórfica-1 (Schumacher, 1939) con el fin de construir el sistema de crecimiento y rendimiento maderable.

3.4.3.2 Modelación de las variables NA, AB y Volumen

Se modeló la mortalidad como una de las principales variables que definen al sistema, ya que esta determina la cantidad de árboles (NA) en un horizonte de tiempo que mueren por competencia intraespecífica. Y esta tasa de cambio en el número de árboles influye en la proyección del volumen y área basal. Se ajustó el modelo de NA eliminando aquellos sitios en los que se realizó aclareo a los siete años, debido a que esto podría influir en el ajuste y es recomendable contar solo con aquellos sitios no intervenidos para modelar la mortalidad que ocurre de forma natural (Torres,

2018). Se utilizó la densidad inicial de 1244 árboles por hectárea, la cual es la reportada por la empresa. Se utilizó la función:

$$NA = \xi_0 \cdot e^{-\xi_1 \cdot E}$$

donde: NA= Número de árboles por hectárea, E= edad, ξ_0 =Densidad inicial de 1244 árboles, ξ_1 =Tasa de mortalidad del modelo y e =Función exponencial.

La variable área basal presenta una correlación positiva con el volumen presente en el sitio y es un indicador de la densidad. Para modelarla se evaluaron los modelos de Schumacher y Chapman-Richards (**Cuadro 3.4**) debido a que son las funciones que se han ajustado para estas plantaciones y son flexibles en la modificación de sus estructuras (Torres, 2018). Se corroboró su ajuste y comportamiento gráfico en la predicción del AB en un horizonte de edad de 1 a 14 años.

Cuadro 3.4. Modelos de área basal ajustados en plantaciones de pinos en las Choapas, Veracruz.

Modelo	Estructura
Schumacher	$AB = e^{\beta_0} \cdot A^{\beta_1} \cdot NA^{\beta_2} \cdot e^{\frac{\beta_3}{E}}$
Chapman Richards	$AB = e^{\gamma_0} \cdot A^{\gamma_1} \cdot NA^{\gamma_2} \cdot (1 - e^{\gamma_3 E})^{\gamma_4}$

AB, A, NA, E= área basal, altura dominante, número de árboles (ha) y edad. β_i, γ_i =Parámetros a estimar, e =función exponencial.

Para completar el sistema de crecimiento y rendimiento maderable se ajustó un modelo de volumen tipo Schumacher, el cual se muestra a continuación:

$$V = \theta_0 \cdot AB^{\theta_1} \cdot A^{\theta_2} e^{\frac{\theta_3}{E}}$$

donde: AB, A, E= área basal, altura dominante y edad, e =Función exponencial, θ_0 = Parámetros a ser estimados.

3.4.4 Estrategia de ajuste

Para la estimación de los parámetros de los modelos de las variables estado A, NA, AB y Volumen se utilizó el método de mínimos cuadrados ordinarios con el procedimiento MODEL de SAS[®] 9.0

(SAS Institute Inc, 2004). Para el sistema de ajuste simultaneo del sistema de ecuaciones se utilizó estimación simultanea con máxima verosimilitud con información completa (FIML), de este modo se estiman los parámetros maximizando la función de verosimilitud sujeta a las restricciones del sistema de ecuaciones, es decir que los parámetros estimados deben ser tal que el valor numérico observado de la muestra tenga probabilidad máxima (Montoya, 2008; Ramírez *et al.*, 2018, Torres, 2018).

Para elegir los modelos se utilizaron los siguientes criterios estadísticos: el coeficiente de determinación ajustado R^2_{Adj} el cual mide el porcentaje de variabilidad explicada por el modelo, la suma de cuadrados del error (SCE) que es la sumatoria de las diferencias al cuadrado entre los valores observados y los predichos por el modelo y la raíz del cuadrado medio del error (RCME) que es la raíz de la suma de cuadrados del error dividido entre sus correspondientes grados de libertad y estima el promedio del error entre los valores observados y predichos del modelo.

La significancia de los estimadores de los parámetros se evaluó con un alfa (α) < 0.05, con las hipótesis $H_0: \theta_i = 0$ y $H_a: \theta_i \neq 0$. Siendo θ_i los parámetros de los modelos (A, AB, NA y V) a estimar en las regresiones.

3.4.5 Sistema de crecimiento implícito por fdp Weibull

Para estimar los parámetros de la función de distribución de probabilidad (*fdp*) de Weibull a través de percentiles se utilizaron las variables: Altura dominante de los árboles (A) en metros, número de árboles·ha⁻¹ (NA), Área basal en m²·ha⁻¹ y diámetro cuadrático (*DQ*). Esta estimación tiene como objetivo modelar la distribución de las clases diamétricas y es necesario contar con al menos dos percentiles (Torres-Rojo *et al.*, 2000, Santiago *et al.*, 2015) y está dada por la siguiente función de probabilidad Weibull de tres parámetros:

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

dónde:

$f(x)$ = es a probabilidad de ocurrencia del diámetro normal (x), con valores de 0 a 1

$e=$ es la función exponencial

$a=$ el parámetro de localización

$b=$ el parámetro de escala

$c=$ el parámetro de forma

Los parámetros b y c toman valores positivos, mientras que a , puede tomar valores positivos y negativos o cero. El parámetro a se relaciona directamente con el diámetro mínimo del sitio por lo que; se limita a ser positivo para representar una correcta distribución de diámetros (Clutter *et al.*, 1983).

Los parámetros se obtuvieron con el método de momentos (Pienaar y Rheney, 1993) el cual ha dado distribuciones con buenos resultados (Santiago-García *et al.*, 2015; Pastor-Parra, 2016; Torres, 2018), las funciones utilizadas son las siguientes:

Parámetro de localización a :

$$a = \{ \text{si } P_0 \geq 2.5 \text{ entonces } a = P_0 - 2.5, \text{ de otra forma } a = \frac{P_0}{2.5}$$

Al conocer el parámetro a se determina el parámetro c (parámetro de forma):

$$c = \ln \frac{\frac{-\ln \ln (1 - 0.95)}{-\ln \ln (1 - 0.63)}}{\ln \frac{P_{95} - a}{P_{63} - a}}$$

Al obtener los parámetros a y c se procedió a calcular el parámetro b (parámetro de escala) y se utilizó la siguiente expresión:

$$b = a \cdot \frac{\Gamma_1}{\Gamma_2} + \left[\left(\left(\frac{a}{\Gamma_2} \right)^2 \cdot (\Gamma_1^2 - \Gamma_2) + \frac{DQ^2}{\Gamma_2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

donde:

Γ =función Gamma

$$\Gamma_1 = \Gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{c}\right)$$

$$\Gamma_2 = \Gamma \cdot \left(1 + \frac{2}{c}\right)$$

$$DQ = \sqrt{\frac{40000}{\pi} \cdot \frac{AB}{NA}}$$

Se modelaron los percentiles de la distribución diamétrica de los datos observados los cuales se calcularon de la siguiente forma: $P_0 = \delta_0 \cdot DQ^{\delta_1} \cdot A^{\delta_2}$, $P_{63} = \partial_0 \cdot DQ^{\partial_1} \cdot A^{\partial_2}$ y $P_{95} = \theta_0 \cdot DQ^{\theta_1} \cdot A^{\theta_2}$, donde P_0 , P_{63} , P_{95} , son los percentiles 0, 63 y 95 de la distribución diamétrica, δ_i , ∂_i y θ_i son los parámetros a estimar en el sistema de percentiles; DQ es el diámetro cuadrático definido anteriormente y A es la altura promedio de los árboles dominante en metros.

La distribución acumulada de la función Weibull en su forma cerrada está dada por:

$f(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c}$ ($\alpha \leq x < \infty$); =0, de otra forma y conociendo los parámetros a , b y c se puede obtener la función de densidad para un intervalo: $P(L < X < U) = e^{-\left[\left(\frac{L-a}{b}\right)^c - \left(\frac{U-a}{b}\right)^c\right]}$ donde P es la proporción de árboles de la clase diamétrica que se precise, L y U son el límite inferior y superior, e es la función exponencial y X es el centro de la categoría diamétrica asignada.

3.4.5.1 Cálculo de las variables de estado por categoría diamétrica

Inicialmente se realizó el cálculo del número de árboles por clase o categoría diamétrica mediante el producto de la predicción del NA (obtenido en el sistema de crecimiento y rendimiento explícito) por la función de distribución de probabilidad de Weibull en su forma cerrada, evaluada en los intervalos de las categorías diamétricas y en edades de 1 a 14 años.

Para obtener el volumen total (VT) por categoría diamétrica se utilizó la siguiente función:

$$VT = 0.000072 \cdot (DN^2 H)^{0.95317}$$

donde:

DN= Diámetro medio de la n categoría diamétrica en cm

H= altura total en m

La altura total del árbol en m: H se calculó por medio de la ecuación:

$$H = 2.004099 \cdot \hat{A}^{0.7518} \cdot (1 - e^{-0.096783 \cdot D})$$

donde:

\hat{A} = altura dominante en metros ajustada mediante el modelo Schumacher y Korf (Polimorfica-1).

$$\hat{A} = 25.87922 \cdot e^{\left[\left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{1.129126} \cdot \ln\left(\frac{A_1}{25.87922}\right)\right]}$$

Para la distribución de productos a nivel árbol se utilizó el modelo de volumen comercial de Demaerschalk (1972) ajustado por Torres (2018) como se muestra a continuación con los valores de los parámetros de regresión:

$$V_{comercial} = k \left(-\frac{\theta_0}{\theta_1+1} \left(\left(\frac{H-h_c}{H} \right)^{\theta_1+1} - \left(\frac{H-h_t}{H} \right)^{\theta_1+1} \right) - \frac{\theta_2 D^2 H}{\theta_3+1} \left(\left(\frac{H-h_c}{H} \right)^{\theta_3+1} - \left(\frac{H-h_t}{H} \right)^{\theta_3+1} \right) \right)$$

$k = (\pi/4000)$ constante utilizada cuando el diámetro se expresa en cm y la longitud en m, h_c = altura sobre el tocón a la que se da el volumen comercial, h_t = altura del tocón, $\theta_0=1814.017$, $\theta_1=105.615$, $\theta_2=1.412$ y $\theta_3=1.894$; D= diámetro normal en cm, H= altura total del árbol en metros.

Para calcular la altura sobre el fuste a la que sucede cierto diámetro se utilizó la función: $h = H \left(1 - X_i \right)$

$$X_i \text{ donde } X_i = \left(\frac{\left(\frac{d}{D} \right)^2 - \frac{\theta_0 X_0 \theta_1}{D^2 H}}{\theta_2} \right)^{\frac{1}{\theta_3}}$$

donde:

D= diámetro normal (cm) con corteza

d= diámetro (cm) con corteza de la i-ésima sección a la altura h (m),

H= altura total del árbol (m).

$X_0 = 0-1$, que se utiliza para generar iterativamente una serie de valores

El volumen total por hectárea por categoría diamétrica se calculó multiplicando el número de árboles por hectárea (NA) por el volumen del fuste. Posteriormente se realizó la sumatoria del *VT* por categoría diamétrica en cada edad para obtener la producción total por hectárea. Este procedimiento se repitió para calidad de sitio (IS) en el horizonte de planeación de 1 a 14 años.

3.4.6 Estimación de carbono capturado

A partir del volumen total del fuste, calculado como se indicó en el apartado anterior, se estimó la biomasa y el carbono secuestrado por hectárea para los cinco IS previamente definidos.

Se utilizó la metodología descrita por Téllez (2008) considerando la densidad de la madera y el contenido en biomasa como se observa en el **Cuadro 3.5**.

Cuadro 3.5. Densidad de la madera, contenido de carbono en biomasa y proporción de carbono-volumen en el fuste.

Variable	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>
Densidad (t·m ⁻³) *	0.48
Contenido de carbono en biomasa (% en forma decimal) +	0.5
Proporción carbono-volumen (tC·m ⁻³)	0.24

*: Oluwafemi (2007)

+: Acosta-Mireles *et al.* (2009)

Primero se convirtió el rendimiento volumétrico a biomasa utilizando la densidad (t·m⁻³), es decir, se multiplico el *VT* x 0.48. El valor resultante se multiplicó por 0.5 para obtener el contenido de C en biomasa; la tasa de acumulación de carbono por edad se calculó mediante el incremento anual a partir del segundo año de plantación.

3.4.7 Estimación de la producción de resina utilizando el SCYRM implícito

Se utilizó el sistema implícito para estimar la producción de resina por categoría diamétrica en un horizonte de 6 a 14 años. En la plantación se inicia la resinación en árboles con diámetros a partir de 15 cm. El modelo que se utilizó para la estimación del rendimiento de resina por árbol es el modelo 6 presentado en el Capítulo II de este trabajo, el cual se ajustó sin la incorporación de variables categóricas para utilizarlo como un modelo general sin especificación por especie en este apartado:

$$R_i = e^{0.15-0.00006 \cdot DN^2 H} \cdot DN^2 \hat{A}^{0.676958}$$

donde:

R_i = Producción de resina del árbol en *i*-ésima categoría diamétrica

e = función exponencial

$DN^2 H$ = variable combinada diámetro normal en cm, y altura total en m para el *i*-ésimo árbol

\hat{A} = altura dominante en metros ajustada mediante el modelo Schumacher y Korf (Polimorfica-1).

$$\hat{A} = 25.87922 \cdot e^{\left[\left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{1.129126} \cdot \ln\left(\frac{A_1}{25.87922}\right)\right]}$$

Para estimar la producción por categoría diamétrica por hectárea se multiplicó el resultado de R_i por la estimación del número de árboles por ha en esa categoría diamétrica. Posteriormente se suman los valores de producción de resina estimadas por categoría diamétrica en cada edad para obtener la producción total por hectárea. Este procedimiento se repitió para calidad de sitio (IS) en el horizonte de planeación de 6 a 14 años.

3.4.8 Comparación de escenarios de producción de madera, madera-carbono, madera-carbono-resina y madera-resina mediante indicadores financieros

Se caracterizaron las actividades y costos unitarios por hectárea promedio de la plantación de pinos tropicales, entre ellas, la evaluación de costos de establecimiento y mantenimiento (Maldonado-Ramírez, 2011; Hernández-Díaz *et al.*, 2019). Para las actividades referentes a la extracción de resina se tomó información de la operatividad de esta empresa.

Se definieron costos fijos para las etapas de establecimiento y mantenimiento de la plantación, contrariamente, se consideraron los costos variables para las actividades de aprovechamiento de madera y resina. Los ingresos (valores de la producción de madera, carbono, resina) se presentan en precios nominales y en precios constantes los cuales toman en cuenta la tasa de inflación por tipo de producto a obtener deflactados al 2019 (año base) con respecto al índice nacional de precios al productor (INPP) (**Cuadro 3.6**) consultado en INEGI (2022). El precio del carbono se consultó en SENDECO₂ (2022), dichos valores corresponden a los precios establecidos por el Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS).

Cuadro 3.6. Precios nominales y constantes (deflactados al 2019) de carbono, madera y resina de pino.

Año	INPP	Precio nominal					Precio constante				
		Pr	Se	Ce	Resina	C	Pr	Se	Ce	Resina	C
2008	55.60	689.37	451.94	145.80	5.00	479.38	1239.87	812.84	262.23	8.99	862.19
2009	60.03	860.89	568.87	146.85	5.30	284.32	1434.10	947.64	244.63	8.83	473.62
2010	61.12	873.69	503.96	133.72	5.30	311.75	1,429.55	824.59	218.80	8.67	510.08
2011	67.15	843.59	463.77	144.09	6.50	280.62	1,256.35	690.69	214.59	9.68	417.92
2012	72.05	901.23	603.19	309.30	7.10	159.14	1,250.85	837.19	429.29	9.85	220.87
2013	73.77	944.60	565.09	140.00	7.9	96.88	1,280.39	765.97	189.77	10.71	131.31
2014	75.36	945.36	671.70	203.09	8.00	129.75	1,254.44	891.31	269.49	10.62	172.17
2015	78.57	1,014.23	606.20	212.45	12.00	167.19	1,290.82	771.52	270.39	15.27	212.79
2016	84.84	1,065.4	783.28	236.05	18.00	116.47	1,255.75	923.22	278.22	21.22	137.28
2017	90.27	1,182.86	767.08	158	18.5	117.12	1,310.35	849.76	175.03	20.49	129.75
2018	93.45	1,057.83	801.89	239.2	19.00	345.71	1,131.99	858.11	255.97	20.33	369.94

Año	INPP	Precio nominal					Precio constante				
		Pr	Se	Ce	Resina	C	Pr	Se	Ce	Resina	C
2019	100.00	1,237.63	872.80	265.04	21.50	540.77	1,237.63	872.80	265.04	21.50	540.77
2020	103.15	1,395.88	1,044.48	265.04	21.50	538.81	1,353.25	1,012.58	256.95	20.84	522.35
2021	107.55	1,443.29	1,063.33	211.09	22.00	1,165.78	1,341.91	988.64	196.26	20.45	1083.90
2022	115.56	1,485.18	1,161.40	365.25	22.00	1,802.99	1,285.15	1,004.98	316.06	19.04	1560.15

INPP= índice nacional de precios al productor con año base 2019, Pr= Productos primarios (\$·m³·rollo), Se= Productos secundarios (\$·m³·rollo), Ce= Productos celulósicos (\$·m³·rollo) (Precios a pie de brecha). Resina (\$·kg) y C= carbono (\$·ton).

Los costos nominales de las actividades de la plantación para madera se deflactaron utilizando el año base 2019 como se presenta en el **Cuadro 3.7**.

Cuadro 3.7. Actividades y costos promedio (\$·ha⁻¹) para una plantación forestal comercial de pinos para producción de madera en Las Choapas, Veracruz, México.

Actividades	Edad del árbol	Año de operación	Valor nominal	Valor constante
Establecimiento	1	0	20,845.80	18,038.17
Mantenimiento inicial	2	1	3,711.00	3,211.18
Mantenimiento inicial	3	2	3,711.00	3,211.18
Mantenimiento caminos y brechas cortafuego	4	3	2,850.00	2,466.15
Mantenimiento y monitoreo	5	4	3,753.43	3,247.90
Mantenimiento y aclareo	6	5	5,197.48	4,497.46
Mantenimiento	7	6	1,700.00	1,471.03
Mantenimiento caminos y brechas cortafuego	8	7	2,850.00	2,466.15
Mantenimiento y monitoreo	9	8	3,753.43	3,247.90
Mantenimiento	10	9	1,700.00	1,471.03
Mantenimiento y monitoreo	11	10	3,753.43	3,247.90
Mantenimiento	12	11	1,700.00	1,471.03
Mantenimiento caminos y brechas cortafuego	13	12	2,850.00	2,466.15
Cosecha	14	13	5,323.94	4,606.89

Valor constante año base 2019 utilizando el INPP= índice nacional de precios al productor.

En el **Cuadro 3.8** se caracterizaron las actividades de la plantación incluyendo los costos por la resinación de los árboles. En el año cuatro de operación se realiza la poda y el aclareo, en el año

cinco se instalan los 450 árboles para resinación a dos caras y al año nueve finalizan su producción, por lo que en ese año se realiza la segunda instalación de los árboles que quedan sin resinar (450) finalizando su producción al año 12 de operación y en el año 13 se realiza el aprovechamiento de madera.

Cuadro 3.8. Actividades y costos promedio ($\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}$) para una plantación forestal comercial de pinos para producción madera y resina en Veracruz, México.

Actividades	Edad del árbol	Año de operación	Valor nominal	Valor constante
Establecimiento	1	0	\$20,845.80	18,038.17
Mantenimiento inicial	2	1	\$3,711.00	3,211.18
Mantenimiento inicial	3	2	\$3,711.00	3,211.18
Mantenimiento caminos y brechas cortafuego	4	3	\$2,850.00	2,466.15
Mantenimiento (aclareo y poda)	5	4	\$3,497.48	3,026.42
Mantenimiento y establecimiento de la resinación y aprovechamiento de resina	6	5	\$87,270.34	75,516.29
Mantenimiento y aprovechamiento de resina	7	6	\$81,645.10	70,648.69
Mantenimiento y aprovechamiento de resina	8	7	\$82,795.10	71,643.80
Mantenimiento y aprovechamiento de resina	9	8	\$83,698.53	72,425.56
Mantenimiento y establecimiento de la resinación y aprovechamiento de resina	10	9	\$87,085.12	75,356.02
Mantenimiento y aprovechamiento de resina	11	10	\$83,525.49	72,275.82
Mantenimiento y aprovechamiento de resina	12	11	\$81,472.05	70,498.96
Mantenimiento y aprovechamiento de resina	13	12	\$82,622.05	71,494.07
Cosecha de madera	14	13	5,323.94	4,606.89

Valor constante año base 2019 utilizando el INPP= índice nacional de precios al productor.

Parra (2016), menciona que la tasa de rendimiento mínima aceptable (*TREMA*) oscila en un rango de 5 a 9% para inversiones productivas primarias forestales, mientras que Zaragoza-Peralta (2018) refiere que esta tasa de descuento varía del 3 al 9 % a nivel internacional. Para este estudio se utilizaron: la máxima tasa de inflación del segundo trimestre del 2022 de 7.5 %, la tasa de los

certificados de la Tesorería (CETES) a 28 días promedio anual con un valor de 6.49 % y la tasa de descuento de crédito hipotecario que tiene un valor promedio de 8.8 %. (BANXICO, 2022).

Se actualizaron los costos de producción y precio de productos con las siguientes formulas:

$C_t = \frac{C_r}{(1+i)^t}$, donde = C_t : costo actualizado (MXN), C_r : costo constante, i : tasa de interés (7.5, 6.49 y 8.8 %) y t : número de años a partir del presente al año en que se registra la producción final.

El valor presente (VP) de la producción se estimó por tipo de producto y se actualizó al año (base 2019) a una tasa de interés i : $VP = \frac{Pr \cdot Q}{(1+i)^t}$, donde= VP: valor presente de la producción deflactado al año base (2019) (\$ MXN), Pr: precio constante por tipo de producto (MXN·m³·rollo), Q: cantidad de producción (m³·rollo) primarios, secundarios y celulósicos, cantidad de resina en (ton·ha⁻¹), cantidad de C acumulado (Mg·ha⁻¹·año⁻¹), i : tasa de interés (7.5, 6.49 y 8.8 %) y t : número de años a partir del presente al año en que se registra la producción.

Los indicadores financieros que se utilizaron se muestran a continuación: el valor actual neto:

$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{I_t - C_t}{(1+i)^t}$; la tasa interna de retorno: $TIR = \sum_{t=0}^n \frac{I_t - C_t}{(1+i)^t} = 0$, y la relación beneficio

costo (RBC): $RBC = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{I_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}}$ dónde: I_t =ingresos del proyecto en el periodo de tiempo t;

C_t =costos del proyecto en el periodo t, t= tiempo en años, "i"= tasa que iguala a cero el flujo de efectivo.

El periodo de retorno (Pr) es el número de años requerido para recuperar la inversión inicial considerando un flujo de efectivo y se define como:

$$Pr = \frac{VAN}{inversion\ inicial} \geq 1$$

El valor esperado del suelo (VES) (Faustmann, 1995), se refiere al valor máximo que un inversionista estaría dispuesto a pagar por una determinada cantidad de tierra, de forma tal que reciba las ganancias a una tasa mínima de interés y se expresa mediante la siguiente función:

$$VES_{\infty} = \frac{\sum_{t=0}^n I_t((1+i)^{r-t}) - \sum_{t=0}^n C_t((1+i)^{r-t})}{(1+i)^r - 1} + \frac{a-c}{i}$$

donde: VES_{∞} : valor esperado del suelo a perpetuidad ($\$ \cdot \text{ha}^{-1}$), I_t : ingresos en el año t por raleos y corta final ($\$ \cdot \text{ha}^{-1}$), C_t : costos en el año t ; a : ingreso anual constante ($\$ \cdot \text{ha}^{-1}$), c : costo anual constante ($\$ \cdot \text{ha}^{-1}$), i : tasa de descuento, r : edad de rotación o turno en años y t : año en que incurre el costo o ingreso ($\$ \cdot \text{ha}^{-1}$).

3.4.8.1 Estimación de la edad óptima de aprovechamiento bajo diferentes escenarios de producción

Se utilizó el criterio de equimarginalidad el cual se refiere a calcular el beneficio y costo marginal asociados a la cosecha en los tres escenarios propuestos; la edad de cosecha o aprovechamiento óptimo sucede cuando estos indicadores son iguales (Téllez *et al.*, 2008). Definiendo a la edad óptima de cosecha cuando el beneficio y el costo marginales se igualan (BM=CM).

Para calcular el beneficio marginal (BM) y el costo marginal (CM) se utilizaron las siguientes expresiones (Téllez *et al.*, 2008):

Producción de madera para aserrío:

$$BM = (p_c \cdot V'(T))$$

$$CM = i \cdot (p_c \cdot V(T)) + i \cdot VAN$$

Producción de madera para aserrío y carbono:

$$BM = (p_c \cdot V'(T)) + (p_c \cdot C'(T))$$

$$CM = i \cdot (p_c \cdot V(T)) + i \cdot VAN$$

Producción de madera para aserrío y resina:

$$BM = (p_c \cdot V'(T)) + (p_c \cdot R'(T))$$

$$CM = i \cdot (p_c \cdot V(T)) + i \cdot VAN$$

Producción de madera para aserrío, carbono y cosecha de resina

$$BM = (p_c \cdot V'(T)) + (p_c \cdot C'(T)) + (p_c \cdot R'(T))$$

$$CM = i \cdot (p_c \cdot V(T)) + i \cdot VAN$$

donde:

p_c = precio constante por tipo de producto

$V'(T)$ =incremento marginal del volumen (primarios, secundarios y celulósicos) de la plantación

$C'(T)$ =incremento marginal del carbono acumulado en la plantación

$R'(T)$ =incremento marginal de la producción de resina en la plantación

$V(T)$ = volumen (primarios, secundarios y celulósicos) del fuste al final del horizonte de planeación.

Se consideraron apoyos para el establecimiento y mantenimiento inicial de la plantación (0 y 1 año de operación) otorgados por la Comisión Nacional Forestal en su componente II: Plantaciones forestales comerciales (PFC) del programa apoyos para el desarrollo forestal sustentable en su concepto PFC.3: Doble propósito (CONAFOR, 2021). El monto de apoyo promedio fue de \$7,171.66 ha⁻¹.

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1 SCYRM EXPLÍCITO

3.5.1.1 Modelos de altura dominante

El ajuste de las cinco estructuras matemáticas utilizando la técnica de la curva guía mediante modelos genéricos de predicción de altura dominante se muestran en el **Cuadro 3.9**. Los modelos de Schumacher-Korf (S&K) y Chapman-Richards (C-R) se seleccionaron por su ajuste R^2_{Adj} (0.74 y 0.73) y la RCME de (1.66 y 1.67). Cabe mencionar que el modelo C-R fue utilizado anteriormente por Torres (2018) para elaborar el SCYRM de estas plantaciones con datos observados de 4-7 años. El parámetro α_0 que define la asíntota de crecimiento para estos modelos va de 19.4 m (C-R) y 28.2 m (S&K). A continuación, se muestra el comportamiento gráfico de los cinco modelos inicialmente ajustados para estos datos (**Figura 3.5**).

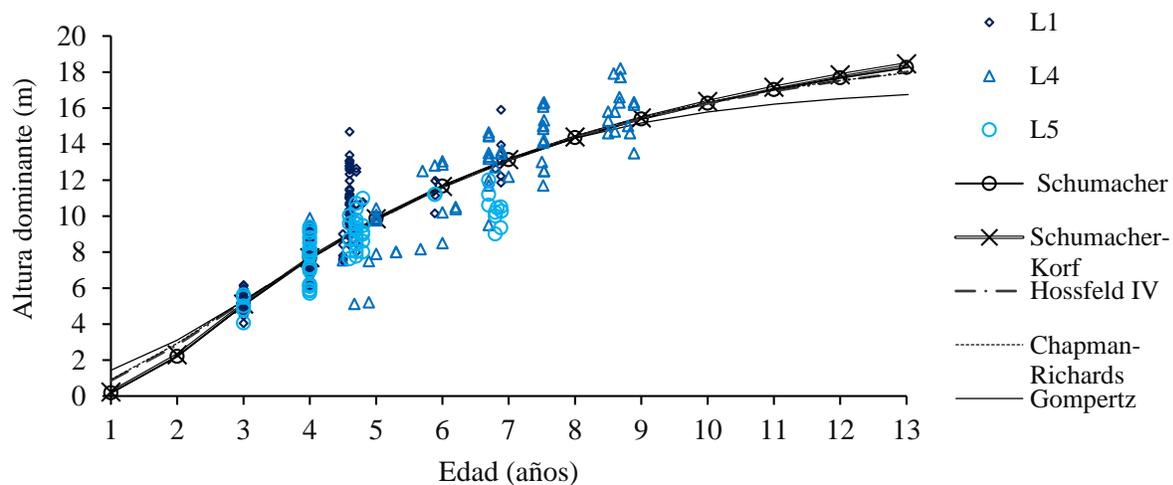


Figura 3.5. Curvas promedio de crecimiento en altura dominante para calidad de estación contra el patrón de crecimiento de los datos observados en la plantación de pinos en las Choapas, Veracruz.

Cuadro 3.9. Resultado del ajuste de los modelos genéricos de curva guía para crecimiento en altura dominante en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz.

Modelo genérico	Parámetro	Estimación	E. E	Valor t	Pr>t	SCE	RCME	R ² _{Adj.}
Schumacher	α_0	26.80786	0.3756	71.38	<.0001	5282.5	1.669	0.74
	α_1	4.996461	0.0742	67.31	<.0001			
Hossfeld IV	α_0	21.72502	1.3545	16.04	<.0001	5343.4	1.6739	0.74
	α_1	3.176901	0.0681	46.67	<.0001			
	α_2	1.852976	0.1097	16.89	<.0001			
Gompertz	α_0	17.23253	0.4686	36.78	<.0001	5424.8	1.6866	0.73
	α_1	3.596705	0.1982	18.15	<.0001			
	α_2	0.371142	0.0213	17.46	<.0001			
Schumacher & Korf	α_0	28.26472	2.9493	9.58	<.0001	5281.9	1.6643	0.74
	α_1	4.84594	0.2760	17.56	<.0001			
	α_2	0.947737	0.0972	9.75	<.0001			
Chapman Richards	α_0	19.49376	0.9941	19.61	<.0001	5358.6	1.673	0.73
	α_1	0.247453	0.0282	8.77	<.0001			
	α_2	2.013608	0.1842	10.93	<.0001			

α_i = parámetros a estimar, E.E. = error estándar, SCE = suma de cuadrados del error; RCME = raíz del cuadrado medio del error; R²_{Adj.}= coeficiente de determinación ajustado.

El ajuste de los modelos de S&K y C-R para generar familias de curvas anamórficas y polimórficas se observa en el **Cuadro 3.10**, dichos modelos describen de forma correcta el patrón de crecimiento de los sitios observados y presentan asíntotas más amplias de altura dominante. Se

derivaron cinco calidades de estación por el índice de sitio (*IS*) a una edad base de 7 años, siendo el *IS*= 11 m para rodales de baja productividad, el *IS*= 15 m para rodales de productividad media e *IS*= 19 m para aquellos rodales de mayor potencial productivo.

Cuadro 3.10. Resultado del ajuste de regresión de las curvas guía anamórficas y polimórficas de los modelos Schumacher & Korf y Chapman-Richards para altura dominante en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz.

Tipo	Modelo	Parámetro	Estimación	E. E	Valor t	Pr>t	SCE	RCME	R ² _{adj}
anamórfica	Schumacher & Korf	α_1	-6.84552	0.2643	-25.90	<.0001	83.5329	0.6148	0.91
		α_2	1.044768	0.0715	14.61	<.0001			
	Chapman Richards	γ_1	0.354038	0.0221	15.99	<.0001	87.348	0.6287	0.90
		γ_2	3.752381	0.2387	15.72	<.0001			
polimórfica	Schumacher & Korf	β_0	25.87922	2.3851	10.85	<.0001	70.5052	0.5648	0.92
		β_2	1.129126	0.0825	13.68	<.0001			
	Chapman Richards	θ_0	20.36034	0.6102	26.43	<.0001	74.5513	0.5795	0.92
		θ_2	4.788291	0.2593	14.6	<.0001			

E.E. = error estándar, SCE = suma de cuadrados del error; RCME = raíz del cuadrado medio del error; R²_{Adj}= coeficiente de determinación ajustado, α_i , β_i , γ_i y θ_i =Parámetros estimados por regresión no lineal.

En el modelo polimórfico S&K el parámetro β_0 estima una altura máxima esperada de 25 metros para los árboles de la plantación, mientras que el modelo polimórfico C-R el parámetro θ_0 estima 20 metros de altura máxima (**Cuadro 3.10**). Todos los modelos estimaron parámetros altamente significativos ($p < 0.01$), ambos modelos en su forma anamórfica presentan un ajuste menor (R²_{Adj}= 0.90-91) que en su forma polimórfica R²_{Adj} = 0.92. En la **Figura 3.6** se observa la

proyección de las curvas de IS anamórficas y polimórficas contra los datos de altura dominante observados.

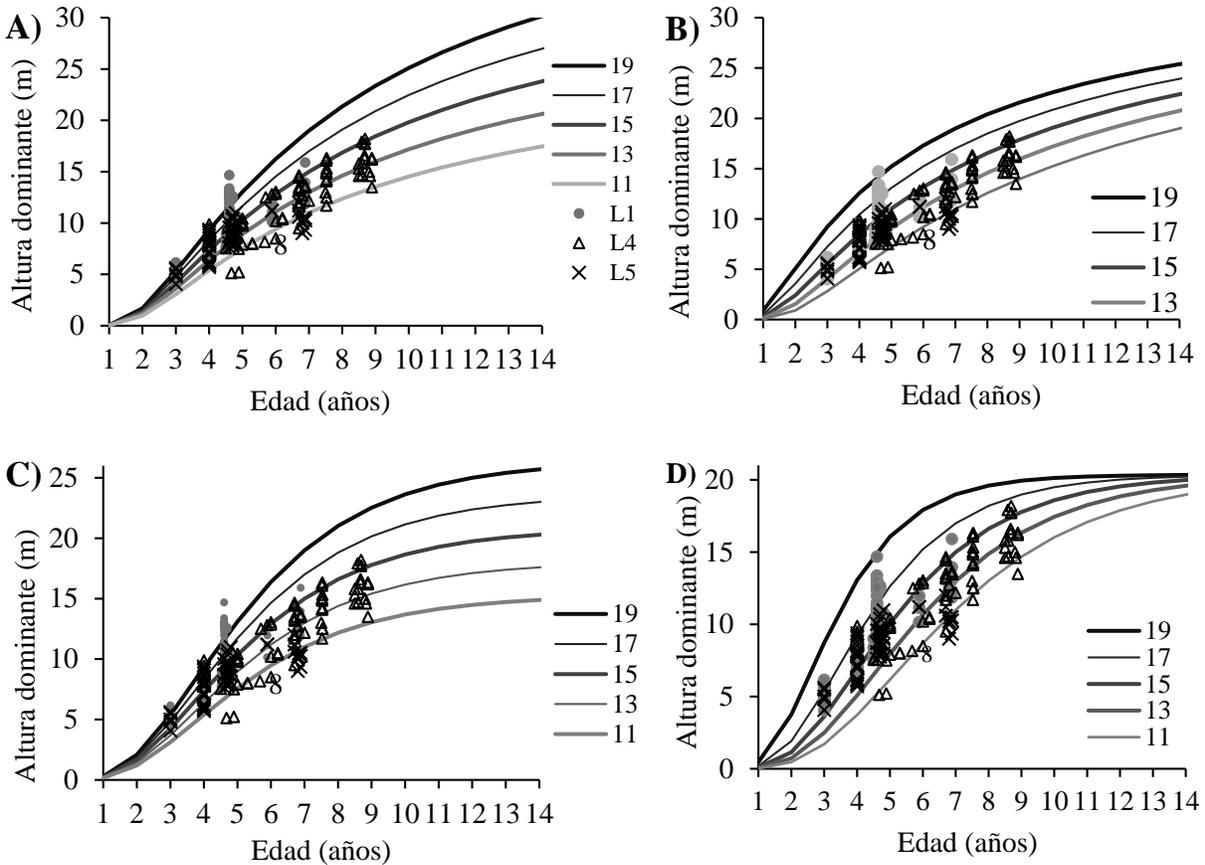


Figura 3.6. Familia de curvas anamórficas Schumacher & Korf A) y Chapman-Richards C). Curvas polimórficas: Schumacher & Korf B) y Chapman-Richards D) para el crecimiento en altura dominante para 5 calidades de estación contra el patrón de datos observados en sitios de plantaciones de pino en Las Choapas, Veracruz.

3.5.1.2 Área basal, volumen y mortalidad

A partir de los modelos de predicción de NA, AB y Volumen se presenta el ajuste de estos de manera individual (**Cuadro 3.11**). Todos los modelos presentaron parámetros altamente significativos ($p < 0.01$). El modelo que tuvo mayor ajuste en área basal fue el modelo tipo Schumacher ($R^2_{Adj} = 0.81$); el primer *SCYR* para estas plantaciones utilizó el modelo de AB tipo Chapman-Richards ($R^2_{Adj} = 0.83$) (Torres, 2018); el ajuste que se realizó en 2018 contó con observaciones de inventarios 2016-2018 y para esta actualización del *SCYRM* se utilizaron datos

de 2016-2020, lo cual agregó más información acerca del crecimiento de la plantación en estas variables de estado.

Cuadro 3.11. Resultado del ajuste de las variables estado mediante regresión no lineal AB, NA y V para plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz.

Variable	Modelo	Parámetro	Estimación	E. E	Valor t	Pr>t	SCE	RCME	R ² _{adj}
Área basal AB	Schumacher	β_0	-3.56601	0.2745	-12.99	<.0001	2900.5	2.8	0.81
		β_1	0.719364	0.065	11.07	<.0001			
		β_2	0.792729	0.0326	24.32	<.0001			
		β_3	4.408372	0.4222	10.44	<.0001			
	Chapman Richards	γ_0	-4.05613	0.2545	-15.92	<.0001	2966.6	2.8	0.80
		γ_1	0.735451	0.0632	11.63	<.0001			
		γ_2	0.781376	0.0326	23.93	<.0001			
		γ_3	0.554535	0.0803	6.9	<.0001			
		γ_4	5.010074	1.3858	3.61	0.0003			
		ξ_0	1244	*					
Número de árboles por ha NA	ξ_1	0.03860	0.00132	37.5	<.0001	1.57E+08	287	0.25	
Volumen V		θ_0	1.296592	0.1049	12.36	<.0001	8379.6	4.7	0.99
		θ_1	1.012534	0.0112	90.16	<.0001			
		θ_2	0.641651	0.0253	25.39	<.0001			
		θ_3	-1.72273	0.1361	-12.66	<.0001			

E.E. = error estándar, SCE = suma de cuadrados del error; RCME = raíz del cuadrado medio del error; R²_{Adj}= coeficiente de determinación ajustado, β_i , γ_i , θ_i y ξ_i = Parámetros estimados por regresión no lineal, ξ_0 = densidad inicial de la plantación 1244 árboles por ha.

En la **Figura 3.7** se observa que los modelos de AB para el sistema 2018 tienden a subestimar la predicción de 1-4 años y el modelo tipo Schumacher (2018) sobreestima a partir de los 8 años y, predice a la edad de 14 años $50 \text{ m}^2 \cdot \text{AB} \cdot \text{ha}^{-1}$; el modelo C-R (2018) presenta un decaimiento a partir de los 12 años. En cambio, los mismos modelos con más datos se ajustan a los puntos medios de las observaciones, el modelo de tipo Schumacher para el sistema 2020 predice $30 \text{ m}^2 \cdot \text{AB} \cdot \text{ha}^{-1}$ a los 14 años, mientras que, el modelo C-R decae a partir del año 9, esto puede estar relacionado con la estimación precisa de los parámetros solo para el horizonte de edad observada (3-9 años). Al considerar estos puntos y considerar el comportamiento lógico de los valores predichos contra los observados se decidió utilizar el modelo tipo Schumacher para la predicción del área basal en esta actualización. La premisa del *SCYRM* postula que las variables estado del sitio suceden de manera simultánea, por lo que, la predicción del área basal afecta directamente la estimación del volumen maderable

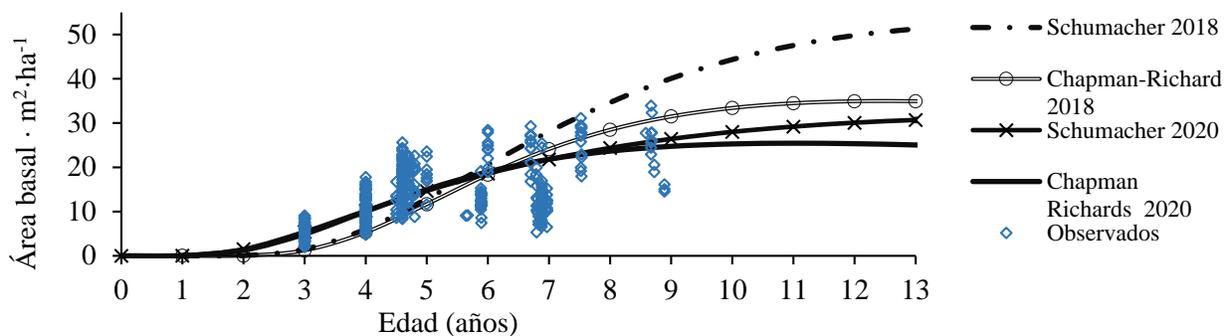


Figura 3.7. Comparación del comportamiento de los modelos de predicción de Área basal por hectárea para una plantación de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.

Posteriormente, se realizó el ajuste simultáneo de estas ecuaciones (AB, NA y V) mediante regresión no lineal aparentemente no relacionada (SUR), **Cuadro 3.12**.

Cuadro 3.12. Resultado del ajuste simultáneo de las variables estado (AB, NA y V) mediante regresión no lineal aparentemente no relacionada (SUR) para plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz.

Variable	Modelo	Parámetro	Estimación	E. E	Valor t	Pr>t	SCE	RCME	R ² _{Adj}
		β_0	-4.40633	0.2789	-15.8	<.0001			
Área basal AB	Schumacher	β_1	0.720228	0.0639	11.27	<.0001	3111.1	2.9	0.8
		β_2	0.921383	0.0322	28.66	<.0001			
		β_3	4.631998	0.4096	11.31	<.0001			
Número de árboles por ha NA		ξ_0	1244	*			3.30E+07	107.6	0.49
		ξ_1	0.03866	0.00127	30.55	<.0001			
		θ_0	1.289797	0.1082	11.92	<.0001			
Volumen V		θ_1	0.953324	0.0111	85.96	<.0001	9200.9	4.9	0.99
		θ_2	0.7138	0.0259	27.55	<.0001			
		θ_3	-1.77475	0.1414	-12.55	<.0001			

E.E. = error estándar, SCE = suma de cuadrados del error; RCME = raíz del cuadrado medio del error; R²_{Adj}= coeficiente de determinación ajustado, β_i , θ_i y ξ_1 = Parámetros estimados por regresión no lineal, ξ_0 = densidad inicial de la plantación 1244 árboles por ha.

El ajuste de estos modelos presentó una estimación altamente significativa de sus parámetros ($p < 0.01$), a partir de estas ecuaciones y la familia de curvas polimórficas S&K se graficó el comportamiento de los datos observados contra los predichos para las variables AB y V en la calidad de sitio promedio (IS=15), utilizando una edad base de 7 años y se asumió $\xi_0=1244$ árboles en el año uno, que es la densidad inicial para estas plantaciones (**Figura 3.8**).

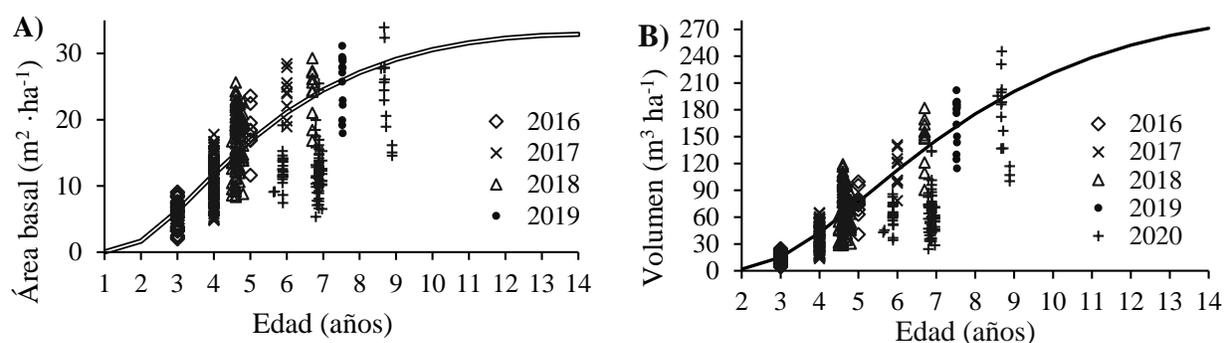


Figura 3.8. A) Área basal predicha contra datos observados. B) Volumen total predicho contra datos observados de inventarios 2016-2020 para el IS (15 m) promedio a una edad base de 7 años.

3.5.2 Sistema de crecimiento implícito con la fdp Weibull

El **Cuadro 3.13** muestra la prueba de bondad de ajuste y los valores estimados para cada parámetro de las ecuaciones que predicen a los percentiles (P_0 , P_{63} y P_{95}), dichos parámetros permitieron la estimación de los parámetros de la distribución Weibull, para estas plantaciones.

Cuadro 3.13. Resultado de la bondad de ajuste de los modelos de percentiles para la función Weibull para pinos en plantaciones de Las Choapas, Veracruz.

Percentil	Parámetro	Estimación	E. E	Valor t	Pr > t	SCE	RCME	R^2_{adj}
0	δ_0	0.042788	0.00758	5.38	<.0001			
	δ_1	2.248735	0.1118	19.84	<.0001	1591	4.1325	0.7608
	δ_2	-0.37322	0.0893	-3.58	0.0004			
63	∂_0	1.173581	0.0228	51.52	<.0001			
	∂_1	0.945406	0.0144	66.02	<.0001	105.6	0.2742	0.9843
	∂_2	0.016005	0.0126	0.91	0.3634			
95	θ_0	1.749149	0.0651	27.11	<.0001			
	θ_1	0.818866	0.0278	29.58	<.0001	619.5	1.6091	0.9373
	θ_2	0.087075	0.0246	3.22	0.0014			

E.E. = error estándar, SCE = suma de cuadrados del error; RCME = raíz del cuadrado medio del error; R^2_{Adj} = coeficiente de determinación ajustado, δ_i , ω_i , ∂_i y θ_i = parámetros estimados mediante regresión no lineal.

Los percentiles se estimaron de forma eficiente con excepción del parámetro θ_2 en el percentil 63. El P_0 se utiliza para el parámetro (a) de localización, el 63 y 95 son para el parámetro (c) de forma. El parámetro (b) de escala utiliza el parámetro (a) el diámetro cuadrático y la función gamma que implícitamente contiene el parámetro (c). Al establecer estas variables se calculó el número de árboles por categoría diamétrica de 1 a 14 años en los índices de sitio (11, 13, 15, 17 y 19). En la **Figura 3.9** se muestra esta distribución y el rendimiento maderable para el IS 15 promedio de la plantación.

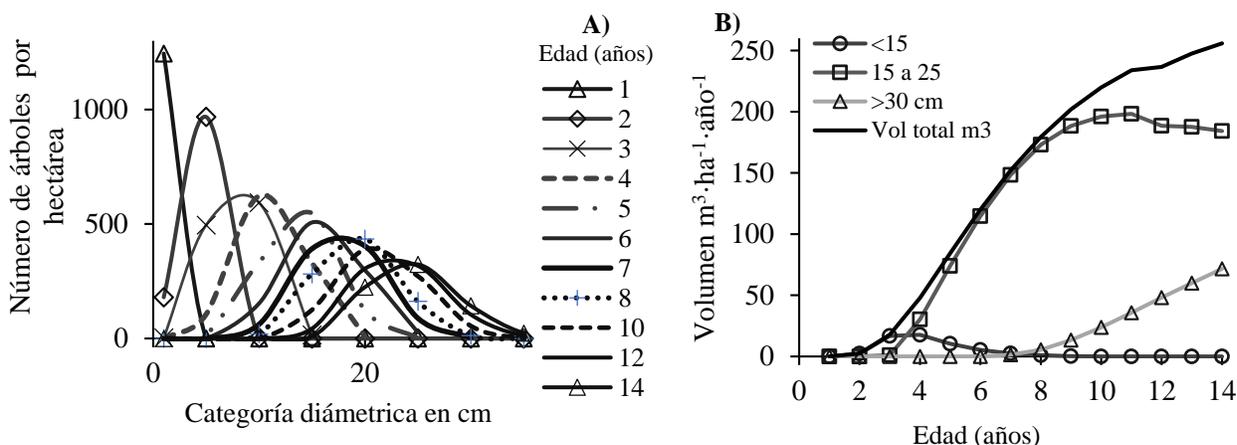


Figura 3.9. A) Distribución diamétrica estimada de 1-14 años para el IS 15 con la fdp Weibull. B) Rendimiento maderable ($m^3 \cdot año^{-1} \cdot ha^{-1}$) para el IS 15: <15= volumen total maderable en árboles menores a 15 cm DN; 15 a 25= volumen total maderable para árboles entre 15 y 25 cm de DN; y >30= volumen total maderable para árboles de DN mayores a 25 cm y Vol. Total (m^3)= rendimiento en volumen acumulado integrando todas las clases diamétricas, para plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz.

3.5.3 Comparación del sistema explícito e implícito

En la **Figura 3.10** se muestra la comparación gráfica de los sistemas explícito e implícito utilizando para la proyección de la variable Altura dominante (A) las funciones polimórficas de Chapman-Richards (C-R) y Schumacher-Korf (S&K); y para la proyección del Área basal (AB) las funciones análogas. Para ello se contrastó el incremento medio anual (IMA) y el incremento corriente anual (ICA) y la predicción del rendimiento maderable en $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$.

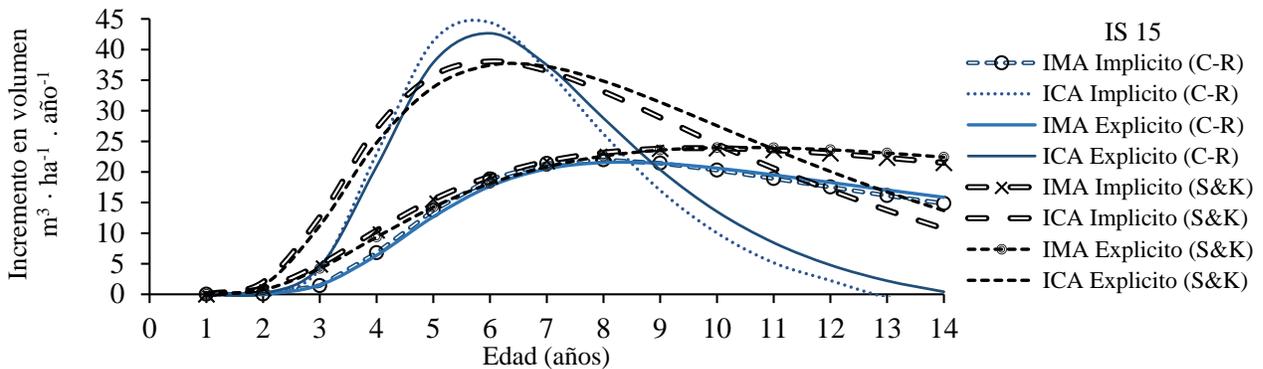


Figura 3.10. Comparación de los SCYRM Implícito y Explícito (utilizando los modelos de Chapan-Richards y Schumacher & Korf para proyección de Altura dominante y Área basal) en IMA e ICA para el IS 15 promedio a una edad base de 7 años en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz.

Como se observa en la **Figura 3.10** para el índice de sitio promedio (IS 15) a una edad base de 7 años los modelos Implícito y Explícito (S&K) tienen turnos técnicos maderables más amplios (10-11 años) en contraste con sus homólogos (C-R), los cuales presentan turnos más cortos (8-9 años); el uso del modelo C-R para la modelación del AB y A en estas plantaciones fue aplicado por Torres (2018) reportando el turno a los 8 años (IS 15) con un incremento de $24.95 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Torres (2018) menciona que hay una relación directa entre el crecimiento de los árboles y la producción de resina por lo que es viable ampliar el turno técnico maderable y de este modo aprovechar en un mayor lapso la producción de resina. Por su parte Wang *et al.* (2006) menciona que la producción de resina aumenta con la edad del árbol y por ello es recomendable extender el turno técnico. Se observó también el comportamiento del volumen total por sistema (**Figura 3.11**).

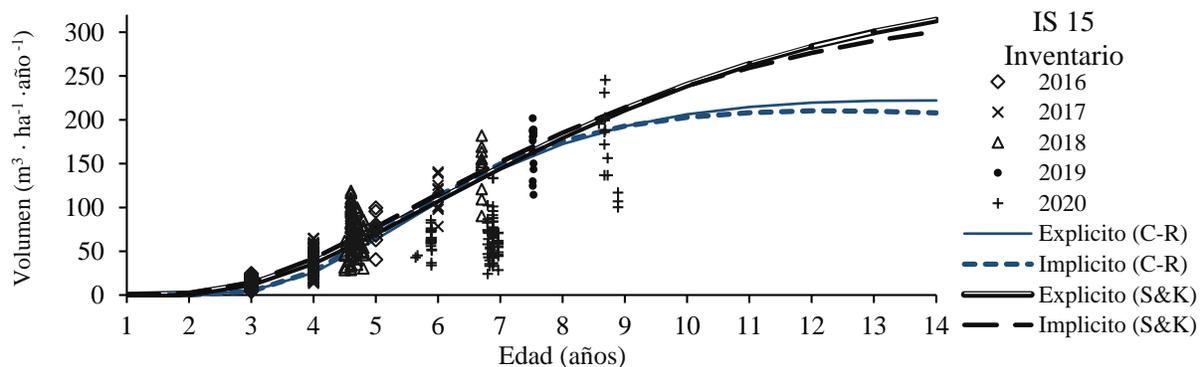


Figura 3.11. Comparación de los SCYRM Implícito y Explícito en volumen maderable en $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ en el IS 15 promedio a una edad base de 7.

En la **Figura 3.11** se puede apreciar que los sistemas que utilizan los modelos tipo Chapman-Richards para la altura y el área basal presentan una tasa de decrecimiento en volumen total, a partir de los 11 años, lo cual repercute en la predicción del volumen en las edades consecuentes, esto podría deberse al modelo para estimar la altura dominante, el modelo de C-R estima una asíntota horizontal de 20 m mientras que el de tipo S&K presenta un techo más amplio de 25 m.

Pastor-Parra (2016) menciona que las curvas de índice de sitio son la base y las que determinan el comportamiento de las demás variables de estado del rodal. En los sistemas explícito e implícito que utilizan los modelos tipo S&K el crecimiento se mantiene constante y presenta una tasa de crecimiento de acuerdo con la edad. La diferencia en la predicción de estos sistemas C-R y S&K es contrastante y puede deberse a que Torres (2018) contó con datos de inventario de 2016-2018 y en el presente se robusteció el ajuste al incorporarse datos de inventario 2019 y 2020.

3.5.4 Estimación de la producción maderable

Se utilizó el SCYRM explícito con el modelo de altura dominante tipo Schumacher & Korf para realizar la estimación *ad hoc* del volumen total y número de árboles por hectárea que se generan en la plantación de acuerdo con su desarrollo y madurez para ser aprovechados. Las variables que lo conforman son: Altura dominante (IS), de Área basal, Número de árboles por hectárea (NA) y volumen comercial maderable (VC).

En el **Cuadro 3.14** y **Figura 3.12** se observan las tablas de rendimiento maderable por calidad de estación, asumiéndose una densidad inicial de $\xi_0=1244$ árboles por hectárea en el modelo de NA.

Cuadro 3.14. Tabla de crecimiento y rendimiento en NA, AB y Volumen por calidad de estación para plantaciones de pinos en las Choapas, Veracruz, México.

Edad (años)	NA	Área basal (m ² ·ha ⁻¹)						Volumen maderable (m ³ ·ha ⁻¹)					
		IS 11	IS 13	IS 15	IS 17	IS 19	AB	IS 11	IS 13	IS 15	IS 17	IS 19	V
1	1244	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1151	0.7	1.1	1.6	2.4	3.3	1.8	0.3	0.8	1.8	3.6	6.9	2.7
3	1108	3.5	4.8	6.2	7.9	9.7	6.4	4.9	9.0	15.1	23.9	35.8	17.7
4	1066	7.7	9.7	11.7	13.9	16.2	11.8	18.8	29.1	42.5	59.1	79.2	45.7
5	1025	12.1	14.5	16.8	19.2	21.6	16.9	40.8	57.5	77.1	99.6	125.1	80.0
6	986	16.2	18.7	21.1	23.5	25.8	21.1	67.2	88.8	112.7	138.9	167.1	114.9
7	949	19.6	22.1	24.5	26.8	29.1	24.4	94.6	119.5	146.0	174.0	203.3	147.5
8	913	22.4	24.8	27.1	29.3	31.4	27.0	120.7	147.6	175.4	203.9	233.2	176.2
9	878	24.6	27.0	29.1	31.2	33.1	29.0	144.6	172.4	200.5	228.8	257.3	200.7
10	845	26.3	28.6	30.6	32.5	34.3	30.5	165.6	193.7	221.4	249.0	276.3	221.2
11	813	27.7	29.7	31.6	33.4	35.0	31.5	183.8	211.5	238.5	265.0	291.0	238.0
12	782	28.6	30.6	32.3	33.9	35.5	32.2	199.2	226.2	252.2	277.5	302.0	251.4
13	753	29.3	31.1	32.7	34.2	35.6	32.6	211.9	238.0	263.0	286.9	310.0	262.0
14	724	29.7	31.4	32.9	34.3	35.6	32.8	222.3	247.4	271.1	293.7	315.4	270.0

NA = número de árboles por hectárea, IS= índice de sitio por calidad de estación, AB= Área basal promedio (m²·ha⁻¹) y V = Volumen maderable promedio (m³·ha⁻¹).

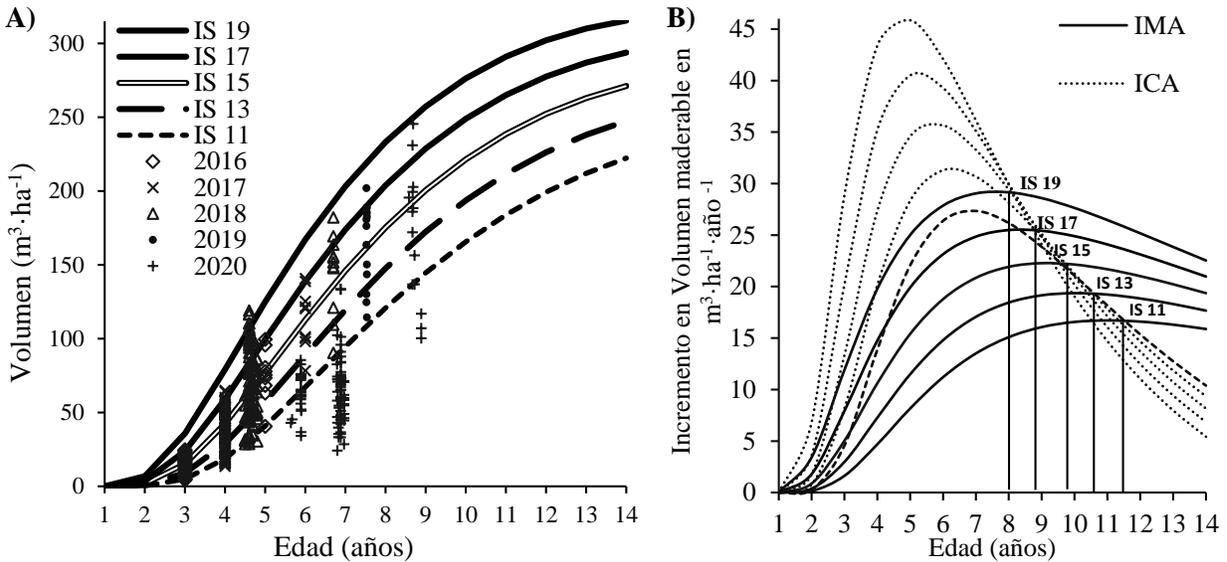


Figura 3.12. A) Modelación del crecimiento en volumen por calidad de estación en contraste con los datos observados de los inventarios 2016-2020. B) Tasa de incremento Medio y Corriente Anual (IMA e ICA) por calidad de estación.

En la **Figura 3.12** se presenta el turno técnico para cada uno de los índices de sitio, para el IS (15) es de 10 años. Este sistema de crecimiento explícito sugiere que a la edad de 7 años para las calidades de estación (IS 11, 13, 15, 17 y 19) se estima: un área basal de 19.6, 22.1, 24.5, 26.8 y 29.1 $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$; un volumen de 94.6, 119.5, 146, 174 y 203 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$.

Torres (2018) calculó, a los 7 años en las mismas calidades de sitio, un área basal de 21.23, 24.71, 28.15, 31.64 y 34.90 $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$; volumen de 94.79, 126.8, 165.70, 207.59 y 253.62 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ y un turno técnico a los 9 años para el IS 15. Estas estimaciones son ligeramente mayores en área basal y volumen; esto se puede atribuir al modelo de altura dominante utilizado para elaborar las familias de curvas de crecimiento para las diferentes calidades de estación y también influye la cantidad de observaciones que se tiene; en esta actualización se aumentó el número de observaciones los cuales ayudan a describir mejor el crecimiento como lo menciona Parra (2016) quien realiza una actualización del sistema de crecimiento y rendimiento en plantaciones de *Pinus Patula* Schiede. *ex* Schlttdl. *et* Cham. en Zacualpan, Veracruz.

3.5.5 Estimación de carbono capturado

En el **Cuadro 3.15** se presenta la estimación del carbono acumulado por IS en un lapso de 14 años en volumen maderable de la plantación.

Cuadro 3.15. Almacenamiento de C ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) por IS en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.

Edad (años)	Carbono almacenado en ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)						Tasa promedio de C acumulado ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
	IS 11	IS 13	IS 15	IS 17	IS 19	Promedio	
1	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0
2	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00
3	0.71	1.7	2.9	4.7	5.9	3.16	3.16
4	3.49	4.8	6.9	9.1	13.2	7.51	4.35
5	7.11	9.3	12.0	15.5	19.5	12.68	5.16
6	10.56	13.4	16.6	20.4	24.2	17.04	4.36
7	13.37	16.8	20.5	24.4	28.6	20.73	3.69
8	16.60	20.1	23.8	27.7	31.6	23.98	3.24
9	19.15	22.8	26.5	30.4	34.3	26.61	2.64
10	21.36	25.0	28.7	32.4	36.2	28.73	2.12
11	23.25	26.8	30.4	34.0	37.6	30.43	1.70
12	24.83	26.8	30.6	35.2	38.6	31.20	0.77
13	26.15	28.5	32.1	36.2	39.4	32.48	1.28
14	27.22	29.8	33.3	36.9	39.9	33.41	0.93

IS=índice de sitio, C=Carbono.

Rojas (2014) estimó el C almacenado en plantaciones de *P. caribaea* y menciona que el fuste almacena el 79.6 % del total del C, el follaje representa un porcentaje de 3.5 %, mientras que la raíz representa el 9.8 % aproximadamente. El carbono que se almacena en las PF está directamente relacionado con el rendimiento volumétrico, por lo que también se ve afectado por las calidades de estación, la especie, el manejo silvícola, la edad y las condiciones ambientales específicas en las que se encuentran establecidas (Rojas, 2014). En el **Cuadro 3.15** se muestra que la mayor tasa de acumulación de C se presenta a los cinco años con $5.16 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, similar a lo reportado por Ordóñez *et al.* (2021), para un bosque natural con turno de 50 años de *P. pseudostrobus*, con $4.66 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$, con respecto al C almacenado por hectárea reportó $49 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en volumen maderable

ligeramente mayor al C almacenado promedio en estas PF de 38.7 Mg·ha⁻¹ en volumen comercial. En PF jóvenes de *P. greggi* Pacheco *et al.* (2007) reporta 37.5 Mg·ha⁻¹ y Méndez *et al.* (2011) para *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* Mg·ha⁻¹.

Para esta especie se ha calculado una tasa de acumulación de 0.05 Mg · árbol en etapa joven (CD 10-20) y hasta 1.66 Mg · árbol en su madurez (CD 40-50) (Rojas, 2014). Para el mismo género la tasa de acumulación de C calculada por Navarro (2010) es de 3.6 Mg·ha⁻¹ a los 25 años tomando en cuenta el C acumulado en la raíz y en el follaje de *Pinus Patula* en Hidalgo, México, por su parte Lopera y Gutiérrez (2000) encontraron una tasa de acumulación de 8.1 a 9.8 Mg· ha⁻¹ en plantaciones de *P. Patula* de 20 años integrando raíces, fuste, ramas, follaje del árbol y la necro masa y para *P. teocote* y *P. oocarpa* Ríos-Camey *et al.* (2021) encontró 2.81 Mg·ha⁻¹ y 3.64 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ en bosques naturales.

En este sentido las PFC pueden funcionar como una herramienta para mitigar el cambio climático ya que secuestran carbono de la atmósfera (Ipinza y Barros, 2011) y se pueden considerar como una oportunidad de ingresos para los plantadores forestales (Brown *et al.*, 1996; Mund, 2004). Dameron *et al.* (2009) mencionan que las PFC de corta duración y densidad alta en rotaciones de 8 años, en climas cálidos húmedos, pueden contribuir a la disminución del CO₂ atmosférico y González (2008) indica que las PFC de doble propósito logran un efecto adicional al papel como sumideros de C y que dichos proyectos deben de considerar la trazabilidad de sus productos para obtener el valor real de estos.

3.5.6 Estimación de la producción de resina en la plantación

En el **Cuadro 3.16** se muestra la estimación de la producción de resina por calidad de estación (IS), retomando el criterio operativo de la plantación, se estimó la producción de resina en diámetros > 15 cm; a partir de los 6 y hasta los 13 años con 450 árboles en resinación por año.

Cuadro 3.16. Producción potencial de resina por calidad de estación en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.

Edad (años)	NHA	Producción potencial de resina (ton·ha ⁻¹)					Promedio en (ton·ha ⁻¹)
		IS 11	IS 13	IS 15	IS 17	IS 19	
6	450	6.3	6.1	7.7	8.4	7.7	7.2
7	450	6.8	8.8	9.8	10.3	9.9	9.1
8	450	8.2	9.7	10.7	11.3	12.9	10.6
9	450	10.0	10.5	11.6	11.4	13.8	11.4
10	450	11.3	11.6	12.4	13.3	14.2	12.6
11	450	12.6	12.5	13.1	13.7	14.5	13.3
12	450	13.1	13.1	13.3	14.1	14.6	13.6
13	450	13.5	13.6	14.0	14.1	14.6	14.0

NAH= número de árboles en resinación por año.

La producción de resina varía por calidad de estación como se muestra en el anterior.

Con base en la modelación y existencia de los datos de rendimiento maderable, la estimación de la tasa de acumulación de C y la estimación de la producción de resina es posible realizar el análisis financiero de la producción que se tienen en la plantación, lo cual se muestra en el siguiente apartado.

3.5.7 Comparación de escenarios de producción de madera, madera-carbono, madera-carbono-resina y madera-resina mediante indicadores financieros

Se definieron cuatro escenarios de producción en la plantación: I) producción de madera (M), II) producción de madera y beneficios por acumulación de carbono (MC), III) producción de madera, carbono y resina (MCR) y IV) madera-resina (MR) en un horizonte de 13 años de planeación (1-14 años de los árboles) con tres tasas de descuento *i*: 6.49, 7.5 y 8.8 %. El valor de la producción maderable, tasa de incremento de C y el valor de producción de resina se utilizó para obtener los indicadores financieros, dichos valores fueron descontados al año base 2019 denominado como “presente” con una tasa de descuento predefinida (*i*: 6.49, 7.5 y 8.8 %). Esta comparación se realizó en el IS promedio de 15 m y el más productivo 19 m.

3.5.8 Valor de la producción del crecimiento en la plantación para el aprovechamiento de madera, carbono y resina.

En el **Cuadro 3.17** se resumen los volúmenes estimados por tipo de producto mediante la función de volumen comercial de Demaerschalk (1972) para los IS 15 y 19 a una edad base de 7 años.

Cuadro 3.17. Distribución de productos ($\text{m}^3 \cdot \text{rollo} \cdot \text{ha}^{-1}$) estimado en plantaciones de pinos, con IS 15 y 19 a una edad base de 7 años, en Las Choapas, Veracruz, México.

Edad	IS 15			IS 19		
	Pr	Se	Ce	Pr	Se	Ce
	$\text{m}^3 \cdot \text{rollo} \cdot \text{ha}^{-1}$					
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.42	0.75	10.76	1.35	3.94	19.29
4	1.87	6.48	20.61	5.10	11.14	38.69
5	5.45	11.60	32.82	11.62	19.33	50.27
6	10.53	16.90	41.63	19.08	26.64	55.09
7	16.77	22.32	46.35	29.65	32.63	56.80
8	23.74	26.95	48.38	38.94	36.55	56.33
9	31.12	30.51	48.78	48.80	39.14	54.96
10	38.33	33.03	48.17	57.10	40.60	53.05
11	45.11	34.70	47.03	64.32	41.28	51.02
12	50.84	35.14	41.47	70.42	41.38	48.97
13	56.44	35.84	41.49	76.23	41.09	47.00
14	61.58	36.07	41.07	80.62	40.44	45.04

Pr= Producto primario para aserrío, Se= Producto secundario de cortas dimensiones, Ce= Producto para astilla o celulosa, IS=índice de sitio.

En el **Cuadro 3.18** y **3.19** se presenta el valor constante de la producción por tipo de producto para los IS 15 y 19.

Cuadro 3.18. Valor constante de la producción de madera ($\$ \cdot \text{ha}^{-1}$) para cada tipo de producto, para el IS 15 y 19 a una edad base de 7 años, en Las Choapas, Veracruz, México.

Edad	VP IS 15 ($\$ \cdot \text{ha}^{-1}$)				VP IS 19 ($\$ \cdot \text{ha}^{-1}$)			
	Pr	Se	Ce	VC	Pr	Se	Ce	VC
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	539	758	3,400	4,698	1,732	3,963	6,098	11,793
4	2,398	6,510	6,514	15,422	6,555	11,199	12,227	29,981
5	7,005	11,656	10,373	29,034	14,934	19,424	15,888	50,246
6	13,528	16,982	13,158	43,668	24,524	26,773	17,413	68,709
7	21,550	22,430	14,650	58,630	38,101	32,795	17,951	88,846
8	30,509	27,086	15,292	72,888	50,045	36,730	17,803	104,578
9	39,989	30,659	15,417	86,064	62,718	39,339	17,371	119,428
10	49,260	33,190	15,224	97,674	73,387	40,802	16,766	130,955
11	57,974	34,868	14,863	107,706	82,660	41,484	16,124	140,268
12	65,333	35,319	13,106	113,758	90,497	41,583	15,477	147,558
13	72,530	36,023	13,113	121,666	97,966	41,293	14,854	154,113
14	79,143	36,249	12,979	128,371	103,606	40,642	14,237	158,484

VP IS: valor constante de la producción para un índice de sitio \$, Pr: valor del producto primario para aserrío ($\$ \cdot \text{ha}^{-1}$), Se: valor del producto secundario de cortas dimensiones ($\$ \cdot \text{ha}^{-1}$), Ce: valor del producto para astilla o celulosa ($\$ \cdot \text{ha}^{-1}$), VC; valor del volumen comercial por año ($\$ \cdot \text{ha}^{-1}$), IS: Índice de sitio

Este sistema proyecta obtener productos primarios a la edad de 7 años refiriéndose a un diámetro normal mayor a 30 cm. El valor de la producción de madera del cuadro anterior se calculó en $\$ \cdot \text{MNX}$ contantes, los cuales se presentan en el **Cuadro 3.6**. El valor presente de la producción de productos primarios en este IS 15 promedio a la edad de 14 años es de \$79,143 y el ingreso total es de \$128,371 incluyendo los productos secundarios y para celulosa, en contraste con los valores de \$103,606 y \$158,484 respectivamente del IS 19. Cabe resaltar que de los 2 a los 4 años la plantación se encuentra en crecimiento y los productos que genera en mayor parte son para celulósicos y astillas.

Cuadro 3.19. Producción estimada de resina en ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$), tasa de secuestro de C ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y valor constante de la producción de resina y C para el IS 15 y 19 en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.

Edad	IS 15					IS 19				
	Resina ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$)	IMA	Resina ($\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Tasa de secuestro de C ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	C ($\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Resina ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$)	IMA	Resina ($\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Tasa de secuestro de C ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	C ($\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}$)
1	-	-	-	0.0	-	0.0	-	-	0.0	-
2	-	-	-	0.0	-	0.0	-	-	0.0	-
3	-	-	-	2.9	4,468	0.0	-	-	5.9	9,205
4	-	-	-	4.1	6,374	0.0	-	-	7.3	11,362
5	-	-	-	5.0	7,831	0.0	-	-	6.3	9,843
6	7.65	1.28	145,676	4.6	7,184	7.7	1.3	146,125	4.7	7,338
7	9.84	1.41	187,345	3.9	6,135	9.9	1.4	187,641	4.4	6,837
8	10.74	1.34	204,378	3.3	5,106	12.9	1.6	245,637	3.1	4,771
9	11.59	1.29	220,653	2.7	4,241	13.8	1.5	262,710	2.7	4,153
10	12.43	1.24	236,572	2.2	3,416	14.2	1.4	270,019	1.9	2,936
11	13.07	1.19	248,754	1.8	2,736	14.5	1.3	275,597	1.4	2,196
12	13.30	1.11	253,263	0.1	230	14.6	1.2	277,868	1.0	1,554
13	13.99	1.08	266,374	1.5	2,368	14.6	1.1	277,635	0.9	1,329
14	-	-	-	1.2	1,852	0.0	-	-	0.4	670

IMA= incremento medio anual de la producción de resina.

Mediante la *fdp* Weibull se obtuvo la cantidad de árboles en diferentes categorías diamétricas de 1 a 14 años, lo cual permitió estimar la producción de resina en ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$). En la plantación se colocan 450 árboles a los 6 años finalizando la resinación a los 9 años cuando el estriado (incisión que se realiza en la corteza de manera horizontal cada 7 días para estimular la producción de resina) llega a los 2.5 y 3 m de alto, posteriormente se colocan 450 árboles para la segunda etapa de resinación a los 10 años y se terminan de resinar a los 13; finalmente se aprovecha la madera en el año 14. Los árboles para resinar se seleccionan “por lo bajo” lo cual se describe como la selección de los árboles suprimidos e intermedios (CD 15 a 25), dejando los árboles de mejor porte para el aprovechamiento maderable.

Los valores de la producción forestal se utilizaron para obtener los indicadores financieros. En el horizonte de planeación de los tres escenarios, los valores de la producción maderable a los 14 años y los subsidios gubernamentales representaron los ingresos al proyecto. Los costos variables se presentan en la corta final y los costos fijos se presentan en el establecimiento y mantenimiento de la plantación. Para el escenario II MC se adiciona el valor presente de la tasa de acumulación de carbono por edad como ingreso al valor de la producción de madera para aserrío, a partir del año 2 de operación. En el escenario de producción III de MCR se adiciona, al valor de la madera y el C, el valor presente de la producción estimada de resina (6 a los 13 años) y en el IV MR se utilizan los valores presentes de la madera y de la producción de resina, en estos dos últimos escenarios se incluyen costos variables de cosecha, recolección y transporte de resina del año 6 al año 13 y costos fijos de establecimiento de árboles para resinar en el año 6 y 10 respectivamente.

3.5.9 Rentabilidad financiera en escenarios de producción de madera, madera-carbono, madera-carbono-resina y madera-resina.

Se realizó la comparación financiera de los cuatro escenarios de producción en dos índices de sitios (15 m y 19 m) con tasa de descuento de 6.49, 7.5 y 8.8 % (**Cuadro 3.20**).

Cuadro 3.20. Indicadores financieros con tasas de descuento 6.49, 7.5 y 8.8 % para los escenarios de producción: madera, madera-carbono, madera-resina y madera-carbono-resina para plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.

IS	<i>i</i>	Escenario	VAN	TIR	R B/C	TF	Max VAN	Edad óptima de cosecha	PR	VES
	6.5%	M	\$ 19,982	4.7%	1.47	12	\$ 56,225	11	12	\$ 170,984
	7.5%	M	\$ 14,759	3.7%	1.36	10	\$ 50,682	11	12	\$ 144,912
	8.8%	M	\$ 9,046	2.5%	1.23	10	\$ 45,033	10	12	\$ 6,979
	6.5%	MC	\$ 55,222	17.0%	2.29	13	\$ 57,163	11.5	12	\$ 255,910
	7.5%	MC	\$ 48,262	15.9%	2.16	10	\$ 52,010	11.5	12	\$ 215,731
	8.8%	MC	\$ 40,486	14.5%	2.01	10	\$ 46,632	11	12	\$ 175,259
15	6.5%	MR	\$ 710,007	71.8%	2.90	11	\$ 151,534	11.5	4	\$ 2,347,108
	7.5%	MR	\$ 647,987	60.9%	2.86	10	\$ 137,884	11.5	4	\$ 1,966,396
	8.8%	MR	\$ 579,536	58.9%	2.82	10	\$ 122,267	11.5	4	\$ 1,287,069
	6.5%	MCR	\$ 742,855	76.3%	2.99	11	\$ 152,993	12	4	\$ 2,432,034
	7.5%	MCR	\$ 681,490	67.9%	2.96	10	\$ 139,212	11.5	4	\$ 2,037,215
	8.8%	MCR	\$ 610,976	65.9%	2.92	10	\$ 123,445	11.5	4	\$ 1,332,092

IS	<i>i</i>	Escenario	VAN	TIR	R B/C	TF	Max VAN	Edad óptima de cosecha	PR	VES
19	6.5%	M	\$ 33,278	7.0%	1.78	10	\$ 73,525	10.5	12	\$ 230,485
	7.5%	M	\$ 26,520	6.0%	1.64	9	\$ 67,537	10	12	\$ 195,095
	8.8%	M	\$ 19,106	4.7%	1.48	9	\$ 60,611	9	12	\$ 9,619
	6.5%	MC	\$ 78,331	25.5%	2.83	10	\$ 75,192	11	12	\$ 333,551
	7.5%	MC	\$ 69,605	24.3%	2.68	9	\$ 69,068	11	12	\$ 280,993
	8.8%	MC	\$ 59,840	22.9%	2.50	9	\$ 61,986	10	12	\$ 226,545
	6.5%	MR	\$ 826,756	67.5%	3.21	9	\$ 187,279	10.5	4	\$ 2,730,891
	7.5%	MR	\$ 755,007	63.6%	3.17	8	\$ 173,657	10	4	\$ 2,287,857
	8.8%	MR	\$ 675,379	61.6%	3.12	8	\$ 157,735	10	4	\$ 1,497,268
	6.5%	MCR	\$ 869,415	76.8%	3.32	9	\$ 189,790	11	4	\$ 2,833,956
	7.5%	MCR	\$ 798,092	75.1%	3.29	8	\$ 175,985	10.5	4	\$ 2,373,754
	8.8%	MCR	\$ 716,113	73.0%	3.25	8	\$ 159,850	10	4	\$ 1,552,147

i: tasa de descuento (6.49, 7.5 y 8.8 %), M: producción de madera aserrío, MC: producción de madera para aserrío y beneficios por captura de carbono, MR: producción de madera y resina y MCR: producción de madera para aserrío, beneficios por captura de carbono y aprovechamiento de resina, VAN: valor actual neto en \$·ha⁻¹, TIR: tasa interna de retorno en %, RB/C: relación beneficio costo, Max VAN: valor máximo que produce el turno financiero, TF: turno financiero en años, PR: periodo de retorno de la inversión inicial en años, VES: valor esperado del suelo a perpetuidad en \$·ha⁻¹.

Los escenarios propuestos para esta plantación indican que el turno financiero (TF) y la edad óptima de cosecha se presentan en edades diferentes; mientras que el *TF* sucede cuando el *VAN* es máximo en los tres escenarios, la edad óptima de cosecha ocurre cuando el beneficio marginal y costo marginal asociados a la producción son iguales ($BM=CM$) en los cuatro escenarios definidos (Téllez *et al.*, 2008); para el IS 15 la edad óptima de cosecha en el escenario M es a los 11 años con $i = 7.5 \%$, disminuye a 10 años con $i=8.8 \%$; para el escenario MC con $i=6.49$ y 7.5% es de 11.5 años y con $i=8.8\%$ es de 11 años; para el escenario MR y MCR se adicionan costos de establecimiento de las caras de resinación en los árboles, de cosecha y transporte, la generación de ingresos por esta actividad mantiene las edades óptimas de cosecha en 11.5 años ($i=6.5$ y 7.5%) y se extiende a 12 años para $i= 6.49 \%$ en el escenario MCR. Sin embargo, el *VES* que considera el mismo sistema de producción, al finalizar el horizonte de planeación, manteniéndolo a perpetuidad aumenta sustancialmente al agregar el aprovechamiento de resina y el periodo de retorno de la inversión inicial sucede a partir de los 4 años, en contraste con el periodo de retorno de 12 años de los escenarios M y MC.

En el escenario M la *RBC* es menor en ambos IS 15 (1.23-1.47) y 19 (1.48-1.78) al combinar madera y carbono el beneficio aumenta de (2.01-2.29) y (2.5-2.83), y al agregar resina este beneficio llega a hasta 2.99 para el IS 15 y 3.32 para el IS 19 en las 3 tasas de descuento. La TIR también presenta un comportamiento similar en las tres tasas de descuento ($i=6.49, 7.5$ y 8.8%) para el IS 15 para M es de 4.7, 3.7 y 2.5 %, con MC aumenta a 17, 15.9 y 14.5 %, MR de 71.8, 60.9 y 58.9 % y MCR llega a 76.3, 67.9 y 65.9 %.

La **Figura 3.13** muestra la tendencia del *VAN* para los IS 15 y 19 m que son la calidad promedio y las más productiva respectivamente con tasas de $i=6.49, 7.5$ y 8.8% .

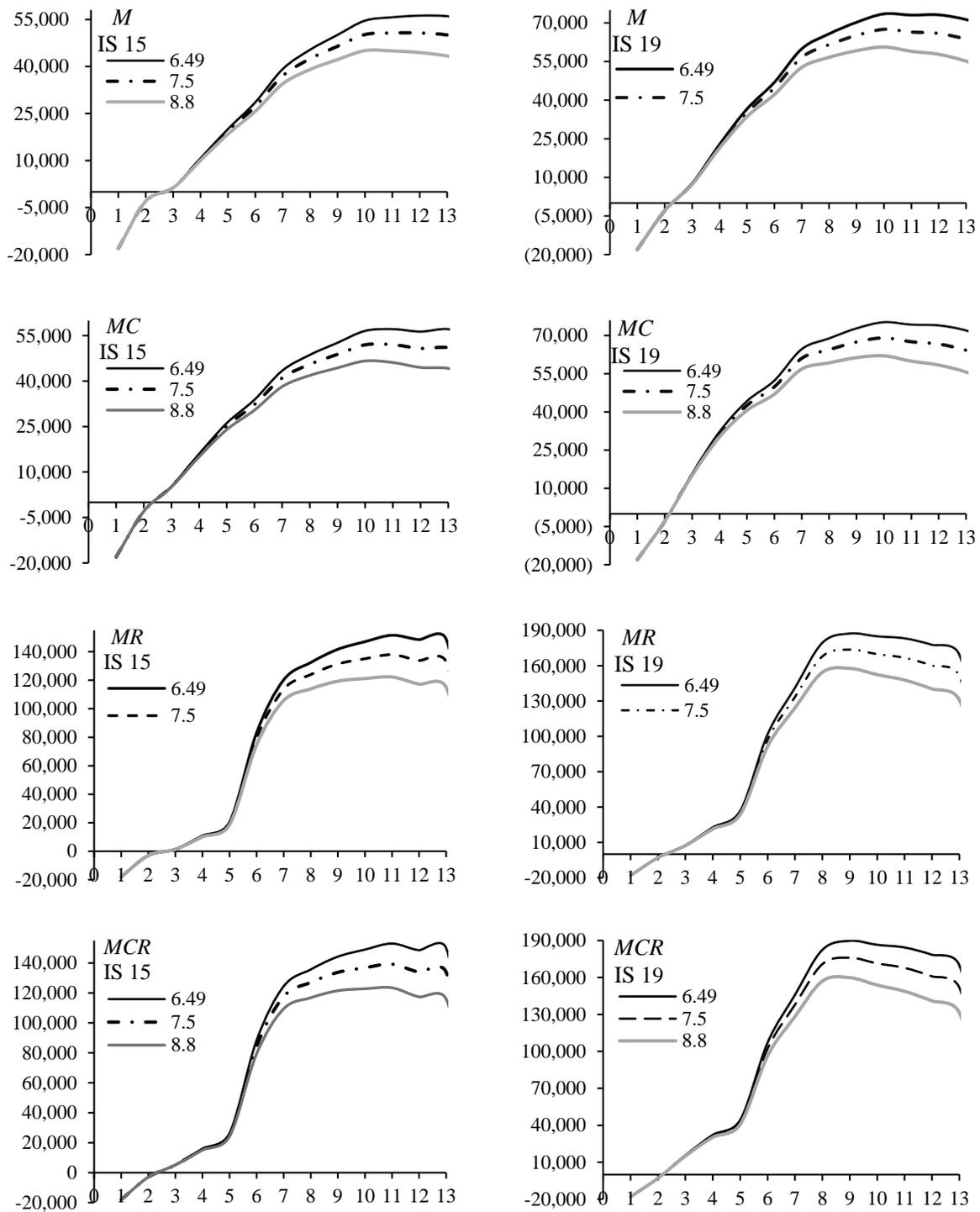


Figura 3.13. Tendencia del flujo del valor actual neto (VAN) de la producción: M, MC, MR y MCR con tasas de descuento 6.49, 7.5 y 8.8 % para los IS 15 y 19 m para plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.

El VAN se ve afectado por la tasa de descuento en cada uno de los escenarios de producción, la tendencia hacia la baja en el año 12 de operación en los escenarios MR y MCR para ambos IS es debido a que se terminan los ingresos por aprovechamiento de resina al concluir la resinación de los árboles en la ha de planeación. En este sentido el analizar la producción conjunta de madera y resina representa cierta complejidad, el aprovechamiento maderable se determina principalmente por el crecimiento de la biomasa del árbol, mientras que en la cosecha de resina la rotación se determina por el tiempo en el que se alcanzan los 2.5 a 3 m de estriado en el árbol, lo cual toma de 3.5 a 4 años en esta plantación, por lo que para extender el aprovechamiento se seleccionan 450 árboles a la edad de 6 años y 450 en el año 10 así se extiende el aprovechamiento hasta los 13 años del árbol, con el objetivo de producir la misma cantidad en todos los años y teniendo como premisa que las actividades de extracción de la resina sean realizadas siempre que los ingresos excedan el costo operativo de su extracción.

Al estimar la producción de resina se presenta una relación directamente proporcional con las dimensiones de los árboles, esto mantiene la misma producción de resina en las edades en las que se realiza el aprovechamiento, sin embargo, la producción de madera comienza a decaer con el tiempo, el turno técnico de madera en el IS 15 se presenta a los 10 años, y en el IS 19 a los 8. Al representar la producción en términos de valor y afectados por una tasa de descuento el turno óptimo de cosecha en los escenarios MR y MCR se presenta a los 11.5 para las tres tasas de descuento, excepto para la tasa de 6.5% en MCR donde llega a 12 años, el IS 15 y para el IS 19 m las edades óptimas de cosecha para MR (10.5, 10, 10), MCR (11,10.5,10) para $i=6.49, 7.5$ y 8.8% , siendo esas edades superiores a la edad del turno técnico en ambos índices de sitio.

Tanto el turno óptimo de cosecha como el financiero rebasan la edad del turno técnico en volumen maderable, pero estos son menores a la edad de producción de madera y resina que se tiene en la operatividad de la plantación que es de 13 años para la finalización del aprovechamiento de resina y a los 14 años del árbol (a los 13 años de operatividad del proyecto) para el aprovechamiento maderable. Para extender la edad de aprovechamiento de resina se puede indagar en el uso de guías de densidad, para influir en las dimensiones del diámetro cuadrático y por ende en la biomasa de la plantación como lo indica Parra (2016), mediante el uso de modelos de respuesta en área basal a los aclareos, obtuvo una extensión en la edad de la cosecha final de 11 y 21 años sin aclareos a

una edad de 20 y 25 años utilizando un régimen silvícola con aclareos, al realizar la comparación financiera los indicadores de rentabilidad en el régimen con aclareos resultaron superiores a los obtenidos en el crecimiento sin aclareos. Esto puede influir también en el aumento de la producción de resina por árbol, debido a que la producción de resina está relacionada con el diámetro normal y el diámetro de copa como se muestra en el Capítulo III de este trabajo, donde los árboles resinados de categorías diamétricas de 25 cm presentan mayor producción de resina por individuo que los de categorías inferiores.

En la **Figura 3.14** se presenta la edad óptima de cosecha definida como $BM=CM$ para cada uno de los escenarios de producción analizados y en la **Figura 3.15** el VAN correspondiente a estas edades óptimas de cosecha con las tasas de descuento de $i=6.49, 7.5$ y 8.8% .

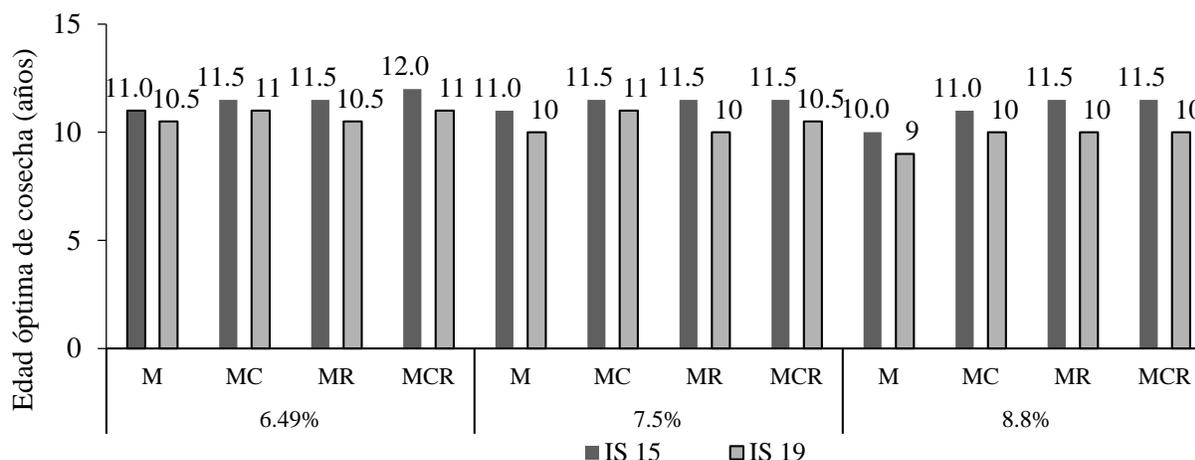


Figura 3.14. Edad óptima de cosecha ($BM=CM$) en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.

Al adicionar el aprovechamiento de resina y los beneficios por captura de carbono se extiende la edad óptima de cosecha en contraste con el aprovechamiento de madera para aserrío únicamente. De manera similar, los valores de VAN incrementan al incluir estos productos y también se ven afectados por el IS y la tasa de descuento, presentándose el valor máximo en el IS 19 m ($i=6.5 \%$) con un VAN de \$ 184,382 (MCR) y el menor valor en el IS 15 m con $i=8.8 \%$ de \$ 45,033 (M) (**Figura 3.15**).

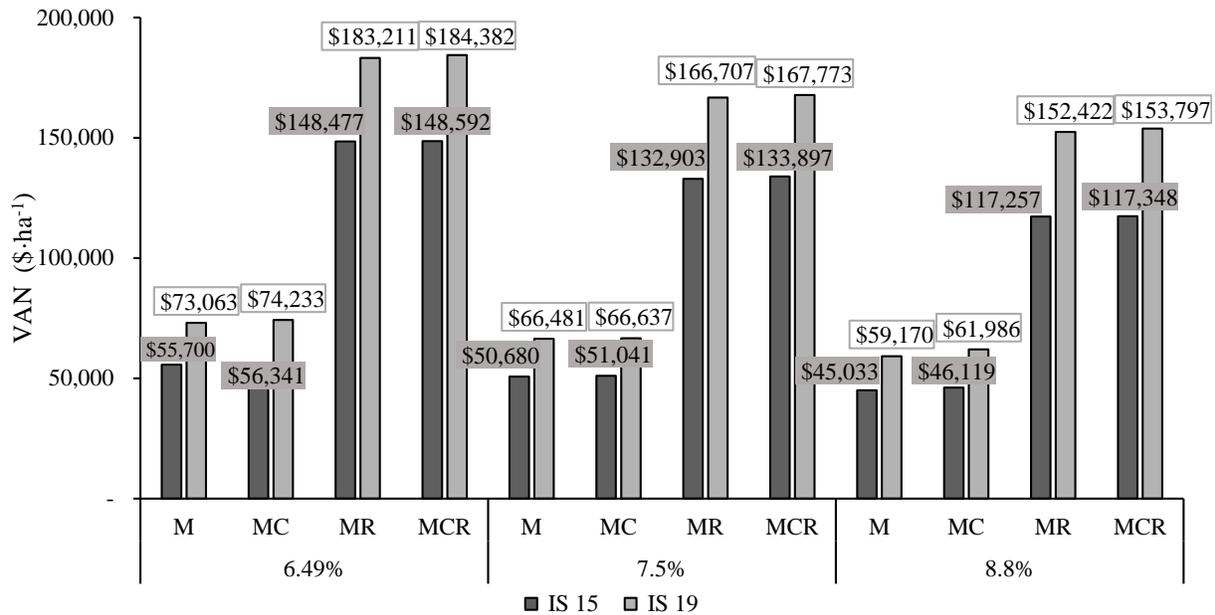


Figura 3.15. Valor actual neto (VAN) en la edad óptima de cosecha (BM=CM) para tres escenarios de producción en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.

Al incluir los beneficios por cosecha de resina el VAN incrementa considerablemente duplicando su valor, pero la edad óptima de cosecha es similar al escenario (MC) (**Figura 3.14**). Esta tendencia es debido a que si la rotación se prolonga al incluir el aprovechamiento de resina los incrementos en los ingresos totales no son constantes, el crecimiento en biomasa comienza a disminuir con el tiempo, y no podrían compensar el incremento en los costos totales de la plantación y es debido a ello que se presentan tasas de rentabilidad *RBC* similares al escenario (MC), pero mayores al escenario (M) en las tres tasas de descuento analizadas (**Figura 3.16**). Estudios similares presentan la extensión de la rotación de cosecha al incorporar beneficios por captura de carbono en plantaciones (Stainback y Alavalapati, 2005; Téllez *et al.*, 2008) y al incorporar otros productos como la cosecha de resina (Johnson, 1998; Díaz-Balteiro, 1998) mencionan que el turno técnico aumenta ligeramente con la combinación de más productos en las PFC.

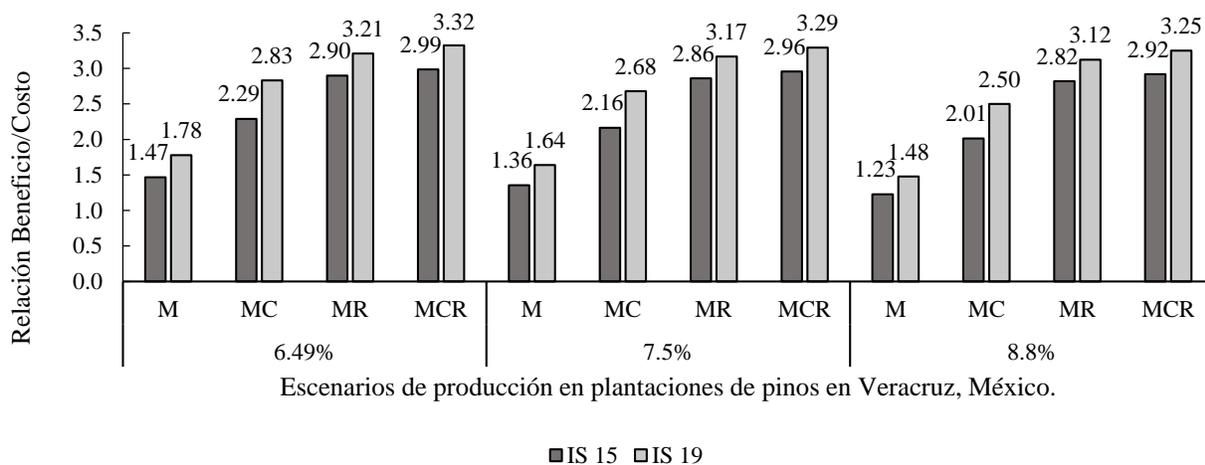


Figura 3.16. Relación Beneficio/Costo para tres escenarios de producción en plantaciones de pinos en Las Choapas, Veracruz, México.

Al incluir la resina como producto de la plantación se generan costos adicionales al mantenimiento como: costos de producción y extracción que incluye el marcado de los árboles, estriado para inducir la exudación de la resina, almacenamiento en las bolsas contenedoras, recolección de la resina en toneles y el transporte a la planta de almacenamiento. El principal costo de estas operaciones se da en la adquisición de bolsas contenedoras, pastas estimulantes, herramientas de estriado y recolección de resina, calzado y cascos de protección, seguido del transporte y pago de mano de obra para la recolección y transporte de la resina al almacén. Los costos menores se dan en la administración y materiales para evitar contingencias como plagas e incendios o accidentes en el área de trabajo, esto influye directamente en la rentabilidad de la inversión (Upadhyay, 2008).

Trilica *et al.* (2021) mencionan que la preparación del sitio, el control de las malezas, la fertilización y los genotipos mejorados de las plántulas en las PFC son variables que permiten administrar la productividad, sin embargo, no están claros los efectos combinados sobre los rendimientos financieros y que las PFC tienen más probabilidades de ser económicamente atractivas si se minimizan los costos de establecimiento y mantenimiento de estas. Susaeta *et al.* (2014) analizaron los beneficios económicos de la extracción de oleorresina en plantaciones de *Pinus elliotii* var. *elliotii* en el sur de Estados Unidos, los resultados arrojaron que los productores se pueden beneficiar de la extracción de resina y madera, sin embargo, la mayor contribución a los rendimientos totales se da en los rodales con potencial genético mejorado seguido de los rodales

con crecimientos más rápidos principalmente porque estos rodales pueden aprovecharse a edades más tempranas. Los ingresos adicionales por la extracción de resina compensan las pérdidas del valor de la madera que se producen cuando las rotaciones se extienden 3 o 4 años más allá del nivel óptimo de cosecha maderable. Al considerar la producción conjunta de resina y madera condujo a un escenario con mayores ingresos y aumento el valor esperado del suelo (VES) en comparación con el aprovechamiento de madera para aserrío solamente, sin embargo, el mayor rendimiento económico lo obtuvieron al plantear el escenario donde se aumentó la producción de resina (incluyendo a todos los árboles en una etapa de resinación), sin realizar cambios en el material genético y en la silvicultura de la plantación. Proponen que la extracción de resina mejora los rendimientos económicos de los propietarios debido a que los beneficios se incrementan al aprovechar resina y madera conjuntamente.

3.6 CONCLUSIONES

Los sistemas de crecimiento y rendimiento maderable explícito e implícito ajustados para las plantaciones comerciales de pino permitieron estimar de manera confiable la producción de madera para aserrío y resina. Lo anterior, debido en parte al modelo de ahusamiento definido para estimar con mayor precisión la distribución de productos maderables. Esas estimaciones, en conjunto con datos de precios de productos y costos de producción, fueron la base para implementar el análisis financiero de diferentes escenarios de producción: madera para aserrío, madera y captura de carbono, y madera, carbono y resina.

La producción combinada de resina, carbono y madera en las plantaciones generan mayores beneficios que solamente la cosecha de madera al final del turno.

La evaluación financiera de los proyectos de plantaciones forestales da certeza a los productores de que los beneficios potenciales por este tipo de inversiones, capitalmente intensivas, combinando productos es rentable.

CONCLUSIONES GENERALES

El efecto de la resinación en el ahusamiento y el factor de forma de los pinos de esta plantación tiende a generar árboles mucho menos ahusados. El uso específico de los modelos de ahusamiento es relevante para estimar el volumen en pie en gran escala. Las variables dasométricas que tuvieron alta correlación con la producción de resina son el diámetro normal, el diámetro de copa y la altura total. Los modelos de producción de resina sugieren que para una mejor estimación de la producción es necesario que los datos de inventario cuenten con información de la copa. Al contar con un mayor rango de datos es posible ver que el *SCRYM* propuesto es un poco más conservador que el sistema inicial de Torres (2018) tanto para el rendimiento maderable como para las proyecciones de producción de resina.

La evaluación financiera de la PFC utilizando los *SCYRM* ajustados y tres tasas de descuento (6.49, 7.5 y 8.8 %) permitieron estimar los indicadores VAN, TIR, R B/C, mismos que sirvieron de base para definir los turnos financieros y la edad óptima de cosecha. El análisis sugiere que el proyecto es viable en los tres escenarios de producción propuestos: madera para aserrío (M), madera para aserrío más los beneficios obtenidos por la acumulación de carbono atmosférico (MC), madera y resina (MR) y madera, carbono, y resina (MCR).

La incorporación de los beneficios por acumulación de carbono atmosférico permitió extender los plazos de cosecha, así mismo el aprovechamiento de resina, aunque, los costos que se adicionan por su extracción son mayores que al aprovechar madera para aserrío únicamente, la rentabilidad del proyecto es mayor.

El monitoreo de parcelas permanentes de producción de resina y demás variables biométricas representan un desafío, por ello, es conveniente resaltar la importancia de establecer sitios de muestreo ya que estos permiten obtener la información necesaria para la actualización de los modelos que sirven de herramienta para dar respuesta a situaciones específicas del crecimiento y desarrollo de la plantación, sirviendo éstas como base en el manejo y administración de la plantación como la evaluación de la rentabilidad, la cual es importante para valorar también los programas de subsidios ofertados por diferentes instancias gubernamentales tales como FIRA y CONAFOR a estos proyectos forestales.

LITERATURA CITADA

- Allen, P. J.(1993). Stem profile and form factor comparisons for *Pinus elliottii*, *P. caribaea* and their F1 hybrid. *Australian Forestry* 56 (2): 140–44. <https://doi.org/10.1080/00049158.1993.10674600>.
- Avendaño, L. B. (2021). Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham. en el sur de Nuevo León. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. 58 p.
- Ayala, S. J.C., Galeote, R. M.A., Zamudio, S. F.J. (1992). Factibilidad de aprovechamientos resineros en una plantación joven de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. *Agrociencia*. 2(3): 47-61.
- Ayala, S. J.C., y García, S. A. (1998). Influencia de la resinación en el contenido de resina de la madera de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. IV (2): 297-300 pp.
- Bailey, R. L. (1995). Upper stem volumes from stem analysis data: an overlapping bolts method. *Canadian Journal of Forest Research* 25(1): 170-173 pp.
- BANXICO (2022). Banco de México. Consultado el 25 de marzo de 2022 en: <http://www.banxico.org.mx>. Consultado el 25-05-2022.
- Barreto, M. H.D., Álvarez, L., Alonso, T. (2012). Modelos del perfil de fuste para *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la provincia Pinar del Río. *Rev. Científica Avances* 14: 259-268
- Basuki, T. M., P. E. van Laake, A. K. Skidmore, and Y. A. Hussin. (2009). Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *For. Ecol. Manage.* 257: 1684-1694
- Baumassy, M. (2012). China gum rosin trade conference: Resin market outlook. Comisión Nacional Forestal. Guadalajara, Jalisco, México.
- Brooks, J.R., Jiang, L., Ozçelik, R. (2008). Compatible stem volume and taper equations for Brutian pine, Cedar of Lebanon, and Cilicica fir in Turkey. *J. For Ecol Manage.* 256:147-51. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2008.04.018>.
- Brown, S., Sathaye, J., Cannell, M., Kauppi, P. E. (1996). Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. In: R. T Watson, M. C. Zinyowera, and R. H. Moss (eds.), *Climate change 1995: impacts, adaptations, and mitigation of climate change: scientific analyses. Contribution of working group II to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 773-798
- Burkhart, H. y Tomé, M. (2012). *Modeling forest trees and stands*. New York London: Springer Dordrecht Heidelberg. doi: 10.1007/978-90-481-3170-9

- Cappa, E. P., M. A. Marcó, D. G. Nikles, and I. A. Last. (2013). Performance of *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea*, their F1, F2 and backcross hybrids and *Pinus taeda* to 10 years in the Mesopotamia region, Argentina. *New Forests* 44(2): 197-218.
- Chambel, M. R., Climent, J., Alía, R., and Valladares, F. (2005). Phenotypic plasticity: a useful framework for understanding adaptation in forest species. *Invest Agrar: Sist Recur For* 14(3): 334-344.
- Chen, F., Yuan, Y-J., Yu, S-L., Zhang, T-W. (2015). Erratum to: Influence of climate warming and resin collection on the growth of Masson pine (*Pinus massoniana*) in a subtropical forest, southern China. *Trees* 30, 1017. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1313-1>
- Chunhui, L., Lu, Z., Min, Y., Shiwu, S., Xiangying, J., Meng, L., (2020). Multipoint Genetic Correlation and Path Analysis of Resin Yield and Growth Traits and Crown Traits in Slash pine. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*: 34(7); 1598-1605. doi: 10.11869/j.issn.100-8551.2020.07.1598.
- Clutter, J. L. (1980). Development of taper functions from variable-top merchantable volume equations. *Forest Science* 26: 117–20.
- Coder, Kim. (2017). *Pinus elliottii*. Warnell School of Forestry & Natural Resources. University of Georgia. Georgia, USA.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2020). Estado que guarda el sector forestal en México. Zapopan, Jalisco, México. 423 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2021). Reportes semestrales, Sistemas de precios forestales, consultado en: <https://www.gob.mx/conafor/>. Consultado el 25-05-2022.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). (2012). La producción de resina de pino en México. Guadalajara, México.
- Cordero, J. y Boshier, D. H. (2003). Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). pp: 1091 <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Cuevas, X.G., Sáenz-Reyes, J.T., Muñoz-Flores, H. J., Hernández-Ramos, A., Hernández-Ramos, J., Rueda-Sánchez, A., y Orozco-Gutiérrez, G. (2022). Aportaciones científicas del Programa de Plantaciones Forestales en el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(70).
- Cunningham, A. P. (2009). Estado actual de la resinación. In: XIII Congreso Forestal Mundial. 18 - 23 Octubre 2009. Buenos Aires, Argentina. 7 p.
- Dameron, V., Barbier, C. y Riedacker A. (2009). World CO2 emission reduction by forest plantations on agricultural land up to 2050. *Les Cahiers du CLIP n°17*, IDDRI, Paris, 2005/09

- Demaerschalk, J. P. (1972). Converting volume equations to compatible taper equations. *Forest Science*, 18(3), 241-245. doi: 10.1093/forest science/18.3.241
- Diario Oficial de la Federación de México (DOF). (2013). Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Ciudad de México, México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Recuperado de http://www.profepa.gob.mx/ley_general_de_desarrollo_forestal_sustentable.pdf. Consultado el 20-05-2022.
- Diaz-Balteiro, L. (1998). Fundamentos económicos del turno forestal óptimo al incorporar bienes y servicios. *Revista española de estudios agrosociales y pesqueros*, ISSN 15751198, N° 184, 1998, 159-182 pp.
- Dieters, M. y Brawner, J. (2007). Productivity of *Pinus elliottii*, *P. caribaea* and their F1 and F2 hybrids to 15 years in Queensland, Australia. *Annals of Forest Science*, 64 (7): 691-698. doi: 10.1051/forest:2007049
- Du, B., Luan, Q., Ni, Z., Sun, H. y Jiang, J. (2021). Radial growth and non-structural carbohydrate partitioning response to resin tapping of slash pine (*Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii*). *Journal of Forestry Research*. 33: 423-433. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01357-1>
- Fabián, P. I. (2020). Estudio de caracteres que intervienen en la producción de resina y su posible control genético en *Pinus oocarpa*. Tesis Doctoral en Ciencias Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. Morelia, Michoacán. 149p.
- FAO, (2020). Global forest resource assessment 2020. FAO Forestry. Food and Agriculture Organization, Rome. (www.fao.org). Consultado el 25-05-2022.
- Faustmann, M. (1849). Berechnung des Wertes welchen Waldboden sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. *Allgemeine Forst und Jagd Zeitung*, 15. Reimpreso en: Faustmann, M. (1995). Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry. *Journal of Forest Economics* 1 (1): 7-44.
- Fierros-Mateo, R., De los Santos-Posadas, H. M., Fierros-González, M. A., & Cruz-Cobos, F. (2017). Crecimiento y rendimiento maderable en plantaciones de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. *Agrociencia*, 51(2), 201-214.
- Fox, J. (2016). Applied regression analysis and generalized linear models. 3rd ed. SAGE Publications, Inc.
- FRA, (2020). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020. Principales resultados. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. Doi.org/10.4060/ca8753es. Consultado el 25-05-2022.
- Gallis, C., Spyroglou, G., y Papajannopoulos, A. (2011). Linear regression models to predict special postproduction from logs of deresinated aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) trees. *Forest Products Journal*, 61(4):297-301.

- García, C. X., Toledo, C. C., Hernández, R., J. Mendoza, M. J. Á., y Hernández, R. A. (2021). Índice de sitio para plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. en Quintana Roo, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 12(64), 92-114.
- García, E. G.G., Aguirre, C. O. A., Vargas, L. B., Martínez, A. L., García, M. J.J., Hernández R. J. (2019). Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial de *Pinus pseudostrobus* Lindl. En Pueblo Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. *Agrociencia* 53: 115-131.
- Gauchat, M. E., Hernán, R. G., Belaver, H. Bischoff, D. (2003). *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *P. caribaea* var *hondurensis*: Híbridos de Alta productividad Combinado Crecimiento y Forma. *Idia*. XXI. Argentina. 162-164 pp.
- Gompertz, B. (1825). On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philos. T. Roy. Soc.* 115: 513-585.
- González, A. (2008). Extracción y reciclaje de nutrientes por cosecha de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus maidenii*. Tesis Magíster en Ciencias Agrarias. Montevideo. Uruguay. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 57 p.
- Hernández-Pérez D., de los Santos-Posadas H. M., Angeles-Perez G., Valdez-Lazalde J. R., y Volke-Haller V. H. (2018). Funciones de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus Patula* Schlttdl. Et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4 (16). México, ME:034-045. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i16.439>.
- Hernández-Ramos, J., De los Santos-Posadas, H. M., Valdez-Lazalde, J. R., Tamarit-Urias, J. C., Ángeles-Pérez, G., Hernández-Ramos, A., Peduzzi, A., y Carrero, O. (2017). Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Tabasco, México. *Acta Universitaria*, ISSN 0188-6266, 27(6): 40-52. doi: 10.15174/au.2017.1484
- Hetemäki, L. y Hurmekoski, E. (2017). Forest products markets under change: review and research implications. *Current Forestry Reports*, vol. 2, no. 3; 177-188.
- Hossfeld, J. W. (1822). *Mathematik für Forstmänner, Ökonomen und Cameralisten*. Gotha, 4. Bd., S. 310.
- Hurmekoski, E., Jonsson, R., Korhonen, J., Jänis, J., Mäkinen, M., Leskinen, P., and Hetemäki, L. (2018). Diversification of the forest industries: role of new wood-based products. *Canadian Journal of Forest Research* 48(12): 1417-1432.
- Husch, B. (1963). *Forest Mensuration and Statistics*. *Canadian Journal of Forest Research* 26(1): 51-65
- Imaña-Encinas, J., Riesco Muñoz, G., y Encinas-Blanco, O. (2022). *Introducción a la Ingeniería Forestal*. Brasília: Editora Departamento Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, 131p.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2009). Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. México D.F.
- Instituto Nacional de Estadística y geografía (Inegi). (2022). Índice nacional de precios al productor. Base Julio 2019=100 (SCIAN 2013), Producción total, según actividad económica, Actividades primarias, 11 Agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza. Fecha de descarga: 26/03/2022 13:58:21
- Ipinza, C. R. y Barros, A., S. (2011). El cambio climático: los bosques y la silvicultura. Instituto forestal Chile. 1 Edición ISBN N°956-318. 144p.
- Jhonson, R.N. (1998): Multiple products, community forestry and contract desing: The case of timber harvesting and resin tapping in Honduras. *Journal of Forest Economics*, 4(2) 127-145 pp.
- Kelkar, V. M., Geils, B. W., Becker, D. R., Overby, S. T., y Neary, D. G. (2006). How to recover more value from small pine trees: Essential oils and resins. *Biomass and Bioenergy* 30(4): 316-320.
- Korf, V. (1939). A mathematical definition of stand volume growth law. *Lesnicka Prace* 18:337-339
- Lai, M., Zhang, L., Lei, L., Liu, S., Jia, T., and Yi, M. (2020). Inheritance of resin yield and main resin components in *Pinus elliottii* Engelm. at three locations in southern China. *Industrial Crops and Products* 144: 112065.
- Langenheim, J. H. (2003). Plant resins: chemistry, evolution, ecology, and ethnobotany. Portland, Oregón, Estados Unidos: Timber Press. 420 p.
- Lopera, G. J. y Gutiérrez, V. H. (2021). Viabilidad técnica y económica de la utilización de plantaciones de *Pinus Patula* como sumideros de CO₂. Tesis de grado ingeniería forestal. Universidad Nacional de Colombia-Sede-Medellín. 184 p.
- López, G. X., Villari, C., Bonello, P., Borg K, A.K., Grivet, D., Sampedro, L., Zas, R. (2019). Genetic variation in the constitutive defensive metabolome and its inducibility are geographically structured and largely determined by demographic processes in maritime pine. *J. Ecol.* 107, 2464-2477
- López, O.M. (2021). Selección de árboles plus de *Pinus leiophylla* schl & chams altamente productores de resina en Michoacán, México (Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León). 71 p.
- López-Covarrubias, D., Díaz-Balteiro L. (2017).Proyectos de absorción de carbono en forestaciones: rentabilidad e implicaciones en cuanto a su gestión. *Montes* 130:26-30
- Martínez, A. L., De los Santos Posadas, H. M., Fierros González, A. M., Fierros Mateo, R., Pérez M, R., Hernández R, A., y Hernández R, J. (2019). Factores de expansión y sistema de partición de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(51), 107-132.

- Martínez-Ángel, L., De los Santos-Posadas HM, Fierros-González AM, Cruz-Cobos F, Quiñonez-Barraza G. (2019). Funciones compatibles de ahusamiento y volumen en una plantación forestal comercial de *Pinus Chiapensis* (Martínez) Andresen en Tlatlauquitepec, Puebla. *Agrociencia*; 53:381-401.
- Mehtätalo, L., Lappi, J. (2020). Taper curves. In *Biometry for Forestry and Environmental Data: With Examples in R*; CRC Press, Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA. pp. 377-378.
- Méndez, G. J., S. L. Luckie, N., M. A. Capó A. y J. A Nájera L. (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia* 45(4):479-491
- Montgomery, D. C., Peck E. A., Vining G. G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis*. 5th ed. John Wiley & Sons, Inc.
- Montoya, L. J.A. (2008). La verosimilitud perfil en la Inferencia Estadística. Centro de Investigación en Matemáticas CIMAT A. C. pp: 9-11
- Mugunga, C. P., y Van Wyk, G. (2003). Potential for genetic improvement of yield of exotic softwood tree species in Rwandan plantation forestry: research note. *Southern African Forestry Journal*, 2003(199), 65-75.
- Mund, M. (2004). Carbon Pools of European Beech Forests (*Fagus sylvatica*) under different silvicultural management. Ber. Forschungszentrum Waeldökosysteme, Göttingem, Reihe A, Bd. 189
- Navarro, C. M. (2010). Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus Patula* en el Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. México.
- Neis, F. A., de Costa, F., de Almeida, M. R., Colling, L. C., de Oliveira Junkes, C. F., Fett, J. P., and Fett-Neto, A. G. (2019). Resin exudation profile, chemical composition, and secretory canal characterization in contrasting yield phenotypes of *Pinus elliottii* Engelm. *Industrial Crops and Products* 132: 76-83.
- Neis, F. A., de Costa, F., Füller, T.N., de Lima, J.C., da Silva Rodrigues-Correa, K.C., Fett, J.P., Fett-Neto, A.G. (2018). Biomass yield of resin in adult *Pinus elliottii* Engelm. trees is differentially regulated by environmental factors and biochemical effectors. *Ind. Crops Prod.* 118, 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.027>. Mugunga, C. P., y Van Wyk, G. (2003). Potential for genetic improvement of yield of exotic softwood tree species in Rwandan plantation forestry: research note. *Southern African Forestry Journal*, 2003(199), 65-75.
- Nisbet, R., Miner, G., Yale K. (2018). Data Understanding and Preparation. In: Nisbet R, Miner G, Yale K, editors. *Handb. Stat. Anal. Data Min. Appl.* 2nd ed., Academic Press 13/10/2021-13/10/2021; p. 55-82. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416632-5.00004-9>.

- Ordóñez, J. A., Bernardus de Jong, H. J., Maser, O. (2001). Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques*, 7(2),27-47.[fecha de Consulta 15 de Junio de 2022]. ISSN: 1405-0471. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61770204>
- Pacheco, E. F., A. Alderete, A. Gómez G., A. Fierros, G., V. M. Cetina, A. y H. Vaquera.(2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggi* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30 (3): 251-254.
- Parra-Piedra, J.P. (2016). Crecimiento y evaluación financiera para plantaciones de *Pinus Patula* Schiede. ex Schltdl. et Cham. en Zacualpan, Veracruz. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. 127 p.
- Peng, C. (2000). Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present, and future. *Forest Ecology and Management*, 132(2-3), 259-279. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00229-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00229-7)
- Peralta-Yahya, P.P., Zhang, F.Z., del Cardayre, S.B., Keasling, J.D. (2012). Microbial engineering to produce advanced biofuels. *Nature*. 488 (7411), 320-328. <https://doi.org/10.1038/nature11478>.
- Perera, J. (1999). Estado del conocimiento de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Séneclauze) Barret y Golfari. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo.
- Perry, Jr. (1991). The pines of Mexico and America Central. Portland, Oregon: Timber Press. 450 p.
- Poyton, R. J. (1977). Tree planting in Southern Africa. Vol. 1. The Pines Forestry Research Institute Department of Forestry, Republic of South Africa 576 p.
- Raffa, K.F. (2014). Terpenes tell different tales at different scales: glimpses into the chemical ecology of conifer bark beetle microbial interactions. *J. Chem. Ecol.* 40, 1 20. <https://doi.org/10.1007/s10886-013-0368-y>.
- Ramírez, M. A., Santiago, G. W., Quiñonez, B. G., Ruiz A. F. y Antúnez, P. (2018). Modelación del perfil fustal y volumen total para *Pinus ayacahuite* Ehren. *Madera y Bosques* 24(2): <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421496>
- Ramírez-Maldonado, H. (2011). Evaluación de costos de establecimiento y mantenimiento de plantaciones forestales comerciales. Comisión Nacional Forestal, Jalisco, México. 71 p.
- Rebolledo, C., V. (2010). Variación y estructura genética del complejo de *Pinus caribaea* Morelet (Pinaceae). CICY A.C. Mérida, Yucatán, México. 94 p.
- Reyes, C., E. C., Molina, C., M., Will, V., S., Molina, J.L., Y. D. C., Betancourt, M., J. R. (2012). Propiedades físicas de la madera de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, resinado y no resinado de las plantaciones de Uverito, Monagas, Venezuela. *La Revista Forestal Venezolana*, 56(1), 21. doi: A466166117

- Reyes, R. A., Cruz L, J., Martínez, P., A., Lobit, P., C. M., Ambriz, P., J. E., Sánchez V., N. M. (2019). Caracteres ecológicos y dendrométricos que influyen en la producción de resina en *Pinus oocarpa* de Michoacán, México. *Madera y Bosques*, 25(1), e2511414. doi: 10.21829/myb.2019.2511414}
- Reyes, R. A., Sánchez, V, N. M., de León, J. C., Fabián, P, I. (2016). Mini resinación Temprana de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltld. en vivero. *Biológicas Revista de la DES Ciencias Biológico-Agropecuarias*, 18(2), 36-39.
- Reynoso, S. R., Hernández, R. J., Muñoz, F. H.J., López, B. W., Cadena, I. P., Cruz, S. E., Rodríguez, C. E.A. (2018). Modelos predictivos para la producción de productos forestales no maderables: resina de pino. INIFAP. C.E. Centro de Chiapas. Cintalapa de Figueroa, Chiapas. 59 p.
- Richards, F. J. (1959). A flexible growth function for empirical use. *J. Exp. Bot.* 10: 290-300.
- Ríos-Camey, J. M., Aguirre-Calderón O. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E. y De los Santos-Posadas, H. M. (2021). Crecimiento e incremento en biomasa y carbono de *Pinus teocote* Schltld. et Cham. y *Pinus oocarpa* Schiede., Guerrero, México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales* 12 (67): 82-108. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i67.997>.
- Rodrigues, K. C. S., Azevedo, P. C. N., Sobreiro, L. E., Pelissari, P., and Fett-Neto, A. G. (2008). Oleoresin yield of *Pinus elliottii* plantations in a subtropical climate: effect of tree diameter, wound shape and concentration of active adjuvants in resin stimulating paste. *Industrial Crops and Products*, 27(3), 322-327. doi: 10.1590/S1677-04202011000400009
- Rodríguez, G., A., López, R., R., Martín, G., J. A., Pinillos, F., Gil, L. (2013). Influencia de la anatomía de la madera, dendrometría y clima en la producción de resina-6CFE01-163. 6° Congreso Forestal Español, realizado en Vitoria-Gasteiz del 10 al 14 de junio de 2013. Sociedad Española de Ciencias Forestales. España.
- Rodriguez, G., A., Lopez, R., Martin, J.A., Pinillos, F., Gil, L. (2014). Resin yield in *Pinus pinaster* is related to tree dendrometry, stand density and tapping-induced systemic changes in xylem anatomy. *For. Ecol. Manage.* 313, 47-54.
- Rojas, F., y E. Ortíz. (1991). Pino Caribe: Especie de árbol de uso múltiple en América Central. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica.
- Rojas, M. (2014). Carbono almacenado en plantaciones forestales de *Pinus caribaea*, *Cupressus lusitanica* y *Eucalyptus deglupta* en el Proyecto Hidroeléctrico Cachí. *Revista de Ciencias Ambientales*, 47(1), 5-15.
- Romahn de la Vega, C. F. (1992). Principales productos forestales no maderables de México. División de Ciencias Forestales UACH. Chapingo, México. 376 p. ISBN 968-884-189-7
- Rongxia, Li, Weiskittel, A., Dick R, A., Kershaw A, J., Robert Jr., Seymour, S. (2012). Regional Stem Taper Equations for Eleven Conifer Species in the Acadian Region of North America:

- Development and Assessment. Northern Journal of Applied Forestry 29 (1): 5-14. <https://doi.org/10.5849/njaf.10-037>
- Rongxia, Li., Weiskittel R, A. (2010). Comparison of model forms for estimating stem taper and volume in the primary conifer species of the North American Acadian Region. 302 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest/2009109>
- Ruiz, R. M., Rojo, G. E., y Pérez, J. A. (2006). Evaluación Financiera de Las Plantaciones Forestales Comerciales. Silvicultura de plantaciones forestales comerciales. Universidad Autónoma Chapingo Km. 38.5 Carretera México-Texcoco 56230 Chapingo, Estado de México ISBN: 968-02-0301-. 111-126 p.
- Sakici, O., E., Misir, N., Yavuz H., Misir M. (2008). Stem taper functions for *Abies nordmanniana* subsp. *bornmulleriana* in Turkey. Scand J For Res; 23:522-33. <https://doi.org/10.1080/02827580802552453>.
- Salas, E., C. (2018). Biometría de los bosques naturales de Chile: estado del arte. 48 p.
- Salas, C., Gregoire, T. G., Craven, D. J., y Gilabert, H. (2016). Modelación del crecimiento de bosques: Estado del arte. Bosque,37(1),3-12. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000100000>
- Salekin, S.; Catalán, C.H.; Boczniewicz, D.; Phiri, D.; Morgenroth, J.; Meason, D.F.; Mason, E.G. (2021). Global Tree Taper Modelling: A Review of Applications, Methods, Functions, and Their Parameters. Forests. (12)913. <https://doi.org/10.3390/f12070913>
- Santiago-García, W., Ángeles-Pérez, G., Quiñonez-Barraza, G., De los Santos-Posadas, H. M., y Rodríguez-Ortiz, G. (2020). Avances y perspectivas en la modelación aplicada a la planeación forestal en México. Madera y Bosques, 26(2), e2622004. <https://doi.org/10.21829/MYB.2020.2622004>
- Santiago-García, W., De los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., Valdez-Lazalde, J. R., Corral-Rivas, J. J., Rodríguez-Ortiz, G., y Santiago-García, E. (2015). Modelos de crecimiento y rendimiento de totalidad del rodal para *Pinus Patula*. Madera y Bosques, 21(3), 95-110. <https://doi.org/10.21829/MYB.2015.213459>
- SAS Institute Inc. (2004). "SAS/ETS 9.1 User's Guide" Cary, NC.
- Schumacher, F. X. (1939). A new growth function curve and its application to timber-yield studies. J. Forestry 37: 819-820.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat] (2013). Anuario Estadístico de la Producción Forestal (1ª ed. 2014) México, D. F.: Semarnat.
- SEMARNAT (2021). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Anuario Estadístico de la Producción Forestal No Maderable. México. 2010-2021. Consultado el 25-05-2022
- SENDECO2-UE. (2022). Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea. Consultado en <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>. Consultado el 25-05-2022.

- Sheng, Z., W., Ru, Z., H., Zheng, T., S. (2011). Using the dummy variable model approach to construct compatible single-tree biomass equations at different scales - a case study for Masson pine (*Pinus massoniana*) in southern China. *Can J For Res*; 41:1547-54. <https://doi.org/10.1139/X11-068>.
- Sood, Y., Mahajan, P.K., Bharti & Gupta, R.K. (2019). Correlation and Regression Studies on Estimation of Resin Yield in *Pinus roxburghii*, *Ind. J. Pure App. Biosci.* 7(6), 63-66. doi: <http://dx.doi.org/10.18782/2582-2845.7438>
- Squillace, A. E., & Bengston, G. W. (1961). Inheritance of gum yield and other characteristics of slash pine. In: Proc. 6th Southern Conference on Forest Tree Improvement. Savannah: United States Department of Agriculture-USDA, Forest Service Research Publications.
- Stainback, G. A., Alavalapati, J., R. R. (2002). Economic analysis of slash pine forest carbon sequestration in pine forest carbon sequestration in the southern U. S. *J. For. Econ.* 8:105-11
- Susaeta, A., Peter, G. F., Hodges, A. W., y Carter, D. R. (2014). Oleoresin tapping of planted slash pine (*Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii*) adds value and management flexibility to landowners in the southern United States. *Biomass and Bioenergy*, 68, 55-61.
- Tamarit, U., J. C., H. M. De los Santos P., A. Aldrete, J. R. Valdez L., H. Ramírez M., y V. Guerra C. (2014). Sistema de cubicación para árboles individuales de *Tectona grandis* L. f. mediante funciones compatibles de ahusamiento - volumen. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales.* 5: 58-74.
- Tamarit-Urías, J. C., De los Santos-Posadas, H. M., Aldrete, A., Valdez-Lazalde, J. R., Ramírez-Maldonado, H., y Guerra-De la Cruz, V. (2019). Sistema de crecimiento y rendimiento maderable para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) en Campeche, México. *Madera y Bosques*, 25(3), e2531908. <https://doi.org/10.21829/MYB.2019.2531908>
- Telles, A., R. (2019). Estimación del rendimiento forestal con información espacialmente explícita de una plantación forestal comercial en México (Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León). 120 p.
- Téllez-Mejía, E., González-Guillén, M. de J., De los Santos-Posadas, H.M., Fierros-González, A.M., Lilieholm, R. J., Gómez-Guerrero, A. (2008). Rotación óptima en plantaciones de Eucalipto al incluir ingresos por captura de carbono en Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31 (2): 173-182 p. DOI: <https://doi.org/10.35196/rfm.2008.2.173>
- Tlaxcala, M., R. M., H. M. de los Santos P., P Hernández de la R., y J. L López A. (2016). Variación del factor de forma y el ahusamiento en procedencias de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.). *Agrociencia* 50(1): 89-105.
- Tomusiak, R., & Magnuszewski, M. (2009). Effect of resin tapping on radial increments of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Trace*, (7):151-157.

- Torres, A., D., H. M. de los Santos P., M. A. Velázquez y U. J. Tamarit C. (2020). Ahusamiento y volumen comercial de tres procedencias de pinos tropicales en plantaciones forestales de Veracruz, México. *Madera y bosques* 26(3): e2631890
- Torres, A., D. (2018). Crecimiento de Plantaciones Forestales de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W.H.G. para la Producción de Resina en Las Choapas, Veracruz. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. 95 p.
- Torres, J. y O. Magaña (2001). Evaluación de Plantaciones Forestales. México DF: Centro de Investigación y Docencia Económica A.C. 230p.
- Torres-Rojo, J. M., O. S. Magaña-Torres, y M. Acosta-Mireles. (2000). Metodología para mejorar la predicción de parámetros de las distribuciones diamétricas. *Agrociencia* 34: 627-637.
- Triola, M.F. (2009). Estadística. Décima edición. Pearson Educación. 904 p.
- Van Wyk, G. 2002. *Pinus caribaea* Morelet, in: Pines of silvicultural importance. Forestry Compendium (compiled). CABI. Publishing. UK. 38-49 pp.
- Trlica, A., Rachel L, C., Timothy J A., Rajan P., David R C., Rafael A., R. (2021), Financial Returns for Biomass on Short-Rotation Loblolly Pine Plantations in the Southeastern United States, *Forest Science*. 67 (6): 670–681. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxab033>
- Upadhyay, M. (2008). Economic analysis of resin tapping. *Wood Science and Technology*, 2(3), 1-22.
- Uranga, L. P. (2014). Crecimiento y rendimiento maderable en plantaciones de *Pinus Patula* en Zacualpan, Veracruz. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados.
- Valencia, L. P. U., De los Santos Posadas, H. M., Barraza, G. Q., Ramírez, V. H. V., y Guzmán, T. Q. (2018). Distribución Weibull para *Pinus Patula* schiede ex schldl. Et. Cham. En plantaciones forestales comerciales. *Revista Biológico-Agropecuaria Tuxpan*, 6(2), 45-53.
- Van der Maaten, E., Mehl, A., Wilmking, M., & van der Maaten-Theunissen, M. (2017). Tapping the tree-ring archive for studying effects of resin extraction on the growth and climate sensitivity of Scots pine. *Forest Ecosystems*, 4(1), 1-7.
- Vargas, L. B., Corral R, J. J., Aguirre C, O. A., López M, J. O., Santos P, H. M., Zamudio S, F. J., Aguirre C, C. G. (2017). SiBiFor: Forest Biometric System for forest management in Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(3), 437-455. doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.06.040
- Vásquez, N., F. Zamudio S., A. Alvarado S., y J. Romo L. (2016). Forest biometric models in Hidalgo, México: state of the art. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22(3): 51-67. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa>.
- Vázquez, G., C., X. López, G., R. Alía., G. Bustingorri., F. J. Lario., M. Lema and R. Zas. (2021). Genetic variation in resin yield and covariation with tree growth in maritime pine. *Forest Ecology and Management* 482: 118843.

- Vidakovic, M. (1991) Conifers, morphology, and variation. Graficki Zavod Hrvatske, Zagreb
- White, T.L., Adams, T.W., Neale D.B. 2007. Forest Genetics. CAB International, Oxford. 682 p.
- Wang, Z., Calderon M. M., Carandag, G. M. (2006). Effects of resin tapping on optimal rotation age of pine plantation. *Journal of Forest Economics* 11 (2006) 245-260 doi: 10.1016 / j.jfe.2005.10.001
- Weiskittel, A. R. (2014). Forest Growth and Yield Models for Intensively Managed Plantations. In J. Borges, L. Diaz-Balteiro, M. McDill, & L. Rodriguez (Eds.), *The Management of Industrial Forest Plantations. Managing Forest Ecosystems* (Vol. 33, pp. 61-90). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8899-1_3
- Wiant, H. V., Wood, G. B., and Furnival, G. M. (1992). Estimating log volume using the centroid position. *Forest Science* 38(1): 187-191.
- Williams, R., Nauman, C., and Zhu, J. (2017). The Effects of Resin Tapping on the Radial Growth of Pine Masson Trees in South China-A Case Study. *Agri Res y Tech: Open Access J.*; 8(2): 555732. 10.19080/ARTOAJ.2017.08.555732.
- Wu, H., Fan, Y., Niu, X., Luan Q., Li, Y., Jiang, J., y Jin, J. (2022). Effects of Resin-Tapping Year on Wood Properties of Living *Pinus elliottii*. *Forest Research*. 35(1): 31-39. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.01.004.
- Wu, H., Hu, Z. (1997). Comparative anatomy of resin ducts of the Pinaceae. *Trees* 11, 135-143 <https://doi.org/10.1007/s004680050069>
- Yuan, T., Yang, Z., Tan, R., Chunjiang, M. (2013). Benefit Assessment on Early Tapping of *Pinus elliottii*. *Asian Agricultural Research*, 5(9):100-102
- Zamora-Martínez, M.C., Velasco, B, E., Muñoz, F., H. J., Romero, S, M. E. (2013). Modelos predictivos para la producción de productos forestales no maderables: Resina de pino. Manual Técnico No. 9 CENID-COMEF, INIFAP. México. 44 p.
- Zaragoza-Peralta, L. (2018). Evaluación Financiera de una plantación forestal de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen en Tlatlauquitepec, Puebla. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. 148 p.
- Zárate Sánchez, J. G. (2017). Solución Web para simular escenarios financieros alternos de plantaciones forestales. Colegio de Postgraduados. Tesis de maestría. 96 p
- Zas, R., Quiroga, R., Touza, R., Vázquez G, C., Sampedro, L., Lema, M. (2020). Resin tapping potential of Atlantic maritime pine forests depends on tree age and timing of tapping. *Ind. Crop. Prod.* 157, 112940.
- Zeng, X., Sun, S., Wang, Y., Chang, Y., Tao, X., Hou, M., Wang, W., Liu, X., y Zhang, L. (2021). Does resin tapping affect the tree-ring growth and climate sensitivity of the Chinese pine (*Pinus tabuliformis*) in the Loess Plateau, China? *Dendrochronologia*, (65), 125800. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125800-10.1016/j.dendro.2020.125800>

- Zheng, Y. Q., Ennos R. A. (1999). Genetic variability and structure of natural and domesticated populations of Caribbean pine (*Pinus caribaea* Morelet). *Theoretical and Applied Genetics*. 98:765- 771.
- Zimmerman, D.L. y Núñez-Antón, V. (2001). Parametric modelling of growth curve data: An overview. *Test* 10, 1-73. <https://doi.org/10.1007/BF02595823>
- Zulak, K.G y Bohlmann, J. (2010). Terpenoid biosynthesis and specialized vascular cells of conifer defense. *J. Integr. Plant Biol.* 52 (1), 86-97. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.00910.x>.

ANEXOS

Anexo I. Ecuaciones específicas de ahusamiento y volumen total generadas a partir del modelo de Demaerschalk 1972, para los seis grupos bajo estudio.

L5 *Pinus caribaea* var. *hondurensis* X *Pinus elliottii* var. *elliottii* (Australia)

Para árboles no resinados

$$d_{L5NR} = \sqrt{6630.315 \cdot \left(\frac{1}{D^2H}\right) \cdot X^{40.89109} + 1.250531 \cdot X^{1.755071}}$$

$$VT_{L5NR} = \frac{(K)(6630.315)}{40.89109 + 1} + \frac{(K)(1.250531)}{1.755071 + 1} (D^2H)$$

Para árboles resinados

$$d_{L5R} = \sqrt{4131.455 \cdot \left(\frac{1}{D^2H}\right) \cdot X^{52.59223} + 1.299894 \cdot X^{1.535471}}$$

$$VT_{L5R} = \frac{(K)(4131.455)}{52.59223 + 1} + \frac{(K)(1.299894)}{1.535471 + 1} (D^2H)$$

L4 *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Australia)

Para árboles no resinados

$$d_{L4NR} = \sqrt{6630.315 \cdot \left(\frac{1}{D^2H}\right) \cdot X^{40.89109} + 1.115951 \cdot X^{1.463771}}$$

$$VT_{L4NR} = \frac{(K)(6630.315)}{40.89109 + 1} + \frac{(K)(1.115951)}{1.463771 + 1} (D^2H)$$

Para árboles resinados

$$d_{L4R} = \sqrt{4131.455 \cdot \left(\frac{1}{D^2H}\right) \cdot X^{52.59223} + 1.230953 \cdot X^{1.533856}}$$

$$VT_{L4R} = \frac{(K)(4131.455)}{52.59223 + 1} + \frac{(K)(1.230953)}{1.533856 + 1} (D^2H)$$

L1 *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Brasil)

Para árboles no resinados

$$d_{L1NR} = \sqrt{6630.315 \cdot \left(\frac{1}{D^2H}\right) \cdot X^{40.89109} + 1.178111 \cdot X^{1.488521}}$$

$$VT_{L1NR} = \frac{(K)(6630.315)}{40.89109 + 1} + \frac{(K)(1.178111)}{1.488521 + 1} (D^2H)$$

Para árboles resinados

$$d_{L1R} = \sqrt{4131.455 \cdot \left(\frac{1}{D^2H}\right) \cdot X^{52.59223} + 1.34276 \cdot X^{1.503404}}$$

$$VT_{L1R} = \frac{(K)(4131.455)}{52.59223 + 1} + \frac{(K)(1.34276)}{1.503404 + 1} (D^2H)$$

donde VT= Volumen total en m, D= diámetro normal con corteza en cm; H = altura total en m;
 d =diámetro con corteza (cm) de la i -ésima sección a la altura h (m) y $X = \frac{H-h}{H}$; $k = \frac{\pi}{40000} = 0.00007853$.

Anexo II. Distribución de productos maderables por índice de sitio para plantaciones de pinos destinadas a la producción de resina y madera en Veracruz, México.

IS 11 m EB= 7 años

Volumen comercial para productos primarios

Edad	10	15	20	25	30	35	SUMA
3	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
4	0.40	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	1
5	0.38	1.11	0.26	0.00	0.00	0.00	2
6	0.25	1.85	2.47	0.06	0.00	0.00	5
7	0.14	1.95	5.52	0.88	0.00	0.00	9
8	0.07	1.75	7.56	3.40	0.13	0.00	13
9	0.03	1.47	8.41	7.16	0.72	0.00	18
10	0.00	1.18	8.50	11.20	2.11	0.00	23
11	0.00	0.91	8.18	14.84	4.30	0.17	28
12	0.00	0.67	7.66	17.82	7.05	0.46	34
13	0.00	0.48	7.05	20.11	10.07	0.95	39
14	0.00	0.33	6.43	21.79	13.12	1.63	43

IS 11 Volumen comercial para productos secundarios

Edad	10	15	20	25	30	35	SUMA
3	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
4	0.50	1.17	0.00	0.00	0.00	0.00	2
5	0.44	6.79	0.15	0.00	0.00	0.00	7
6	0.27	8.43	2.16	0.04	0.00	0.00	11
7	0.15	7.09	6.20	0.57	0.00	0.00	14
8	0.07	5.31	10.02	2.20	0.03	0.00	18
9	0.03	3.81	12.57	4.63	0.16	0.00	21
10	0.05	2.68	13.89	7.24	0.47	0.00	24
11	0.00	1.84	14.33	9.59	0.96	0.02	27
12	0.00	1.23	14.20	11.52	1.57	0.05	29
13	0.00	0.80	13.71	13.00	2.25	0.10	30
14	0.00	0.50	12.99	14.09	2.93	0.18	31

IS 11 Volumen comercial para productos celulósicos

Edad	10	15	20	25	30	35	SUMA
3	2.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3
4	11.36	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	12
5	10.01	10.06	0.41	0.00	0.00	0.00	20
6	6.18	17.67	4.62	0.04	0.00	0.00	29
7	1.89	19.03	11.71	0.56	0.00	0.00	33
8	1.70	17.20	17.54	2.17	0.03	0.00	39
9	0.74	14.40	20.92	4.57	0.16	0.00	41
10	0.24	11.50	22.32	7.15	0.46	0.00	42
11	0.04	8.82	22.43	9.47	0.95	0.02	42
12	0.00	6.48	21.77	11.38	1.55	0.05	41
13	0.00	4.59	20.67	12.84	2.22	0.10	40
14	0.00	3.11	19.33	13.91	2.89	0.18	39

IS 11 Volumen punta no comercial

Edad	2.5	5	10	15	20	25	30	35	SUMA
1	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
2	0.29	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0
3	0.01	2.51	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.0
4	0.00	0.91	3.77	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	5.0
5	0.00	0.25	3.35	2.57	0.06	0.00	0.00	0.00	6.2
6	0.00	0.05	2.05	4.10	0.72	0.01	0.00	0.00	6.9
7	0.00	0.00	1.34	4.19	1.83	0.09	0.00	0.00	7.5
8	0.00	0.00	0.55	3.66	2.75	0.34	0.00	0.00	7.3
9	0.00	0.00	0.24	2.99	3.28	0.72	0.02	0.00	7.2
10	0.00	0.00	0.07	2.35	3.50	1.12	0.07	0.00	7.1
11	0.00	0.00	0.01	1.78	3.51	1.48	0.15	0.00	6.9
12	0.00	0.00	0.00	1.29	3.41	1.78	0.24	0.01	6.7
13	0.00	0.00	0.00	0.91	3.24	2.01	0.35	0.02	6.5
14	0.00	0.00	0.00	0.61	3.03	2.18	0.45	0.03	6.3

IS 13 m EB= 7 años

Volumen comercial para productos primarios

Edad	10	15	20	25	30	35	SUMA
3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
4	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1
5	0.4	1.7	1.2	0.0	0.0	0.0	3
6	0.2	2.1	4.5	0.5	0.0	0.0	7
7	0.1	2.0	7.1	2.9	0.1	0.0	12
8	0.1	1.7	8.4	7.0	0.7	0.0	18
9	0.0	1.3	8.6	11.6	2.2	0.0	24
10	0.0	1.0	8.3	15.8	4.8	0.2	30
11	0.0	0.8	7.8	19.2	8.1	0.6	36
12	0.0	0.0	7.2	21.7	11.6	1.2	42
13	0.0	0.0	6.5	23.5	15.1	2.1	47
14	0.0	0.0	5.9	24.7	18.3	3.2	52

IS 13 Volumen comercial para productos secundarios

Edad	10	15	20	25	30	35	SUMA
3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
4	0.6	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	4
5	0.4	7.9	1.1	0.0	0.0	0.0	9
6	0.2	7.5	5.3	0.3	0.0	0.0	13
7	0.1	5.7	10.1	1.9	0.0	0.0	18
8	0.1	4.1	13.3	4.5	0.1	0.0	22
9	0.0	2.8	15.0	7.5	0.5	0.0	26
10	0.0	1.9	15.5	10.2	1.1	0.0	29
11	0.0	1.3	15.4	12.4	1.8	0.1	31
12	0.0	0.0	14.8	14.0	2.6	0.1	32
13	0.0	0.0	13.9	15.2	3.4	0.2	33
14	0.0	0.0	13.0	16.0	4.1	0.3	33

IS 13 Volumen comercial para productos celulósicos

Edad	10	15	20	25	30	35	SUMA
3	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7
4	9.9	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	15
5	7.2	16.7	2.3	0.0	0.0	0.0	26
6	4.2	21.0	9.8	0.3	0.0	0.0	35
7	1.4	19.7	17.1	1.8	0.0	0.0	40
8	1.0	16.6	21.6	4.5	0.1	0.0	44
9	0.4	13.3	23.5	7.4	0.5	0.0	45
10	0.1	10.2	23.8	10.1	1.1	0.0	45
11	0.0	7.5	23.1	12.2	1.8	0.1	45
12	0.0	0.0	21.9	13.8	2.6	0.1	38
13	0.0	0.0	20.4	15.0	3.3	0.2	39
14	0.0	0.0	18.8	15.8	4.0	0.3	39

IS 13 Volumen punta no comercial

Edad	2.5	5	10	15	20	25	30	35	SUMA
1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
2	0.3	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
3	0.0	2.4	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1
4	0.0	0.8	4.4	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2
5	0.0	0.2	3.3	3.4	0.3	0.0	0.0	0.0	7.1
6	0.0	0.0	1.8	4.3	1.4	0.0	0.0	0.0	7.6
7	0.0	0.0	1.0	4.0	2.6	0.3	0.0	0.0	7.9
8	0.0	0.0	0.4	3.3	3.4	0.8	0.0	0.0	7.9
9	0.0	0.0	0.1	2.5	3.8	1.3	0.1	0.0	7.9
10	0.0	0.0	0.0	1.8	3.9	1.9	0.2	0.0	7.9
11	0.0	0.0	0.0	1.2	3.7	2.4	0.4	0.0	7.8
12	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	2.7	0.6	0.0	6.9
13	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	3.0	0.8	0.1	7.1
14	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	3.1	1.0	0.1	7.2

IS 15 m EB= 7 años

Volumen comercial para productos primarios

Edad	10	15	20	25	30	35	40	SUMA
3	0.38	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
4	0.49	1.13	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	2
5	0.32	2.12	2.86	0.15	0.00	0.00	0.00	5
6	0.18	2.21	6.22	1.91	0.00	0.00	0.00	11
7	0.09	1.93	8.09	6.15	0.50	0.00	0.00	17
8	0.04	1.57	8.65	11.40	2.08	0.00	0.00	24
9	0.01	1.22	8.48	16.24	4.94	0.22	0.00	31
10	0.00	0.91	7.98	20.10	8.67	0.67	0.00	38
11	0.00	0.64	7.35	22.96	12.72	1.43	0.00	45
12	0.00	0.00	6.69	24.94	16.71	2.49	0.00	51
13	0.00	0.00	6.03	26.24	20.39	3.78	0.00	56
14	0.00	0.00	5.39	27.01	23.65	5.19	0.34	62

IS 15 Volumen comercial para productos secundarios

Edad	10	15	20	25	30	35	40	SUMA
3	0.46	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1
4	0.54	5.73	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	6
5	0.33	7.69	3.48	0.10	0.00	0.00	0.00	12
6	0.18	6.25	9.24	1.23	0.00	0.00	0.00	17
7	0.08	4.49	13.66	3.98	0.11	0.00	0.00	22
8	0.03	3.11	15.97	7.37	0.47	0.00	0.00	27
9	0.01	2.11	16.76	10.50	1.10	0.02	0.00	31
10	0.00	1.40	16.62	13.00	1.93	0.07	0.00	33
11	0.00	0.89	15.96	14.84	2.84	0.16	0.00	35
12	0.00	0.00	15.02	16.13	3.73	0.27	0.00	35
13	0.00	0.00	13.91	16.97	4.55	0.41	0.00	36
14	0.00	0.00	12.74	17.47	5.28	0.56	0.02	36

IS 15 Volumen comercial para productos celulósicos

Edad	10	15	20	25	30	35	40	SUMA
3	10.42	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11
4	8.60	11.57	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	21
5	4.47	21.93	6.33	0.09	0.00	0.00	0.00	33
6	2.31	22.69	15.42	1.22	0.00	0.00	0.00	42
7	1.06	19.58	21.67	3.93	0.11	0.00	0.00	46
8	0.42	15.71	24.52	7.28	0.46	0.00	0.00	48
9	0.11	12.06	25.13	10.37	1.09	0.02	0.00	49
10	0.00	8.86	24.49	12.83	1.91	0.07	0.00	48
11	0.00	6.21	23.20	14.66	2.80	0.15	0.00	47
12	0.00	0.00	21.59	15.92	3.68	0.27	0.00	41
13	0.00	0.00	19.84	16.75	4.49	0.41	0.00	41
14	0.00	0.00	18.03	17.25	5.21	0.56	0.02	41

IS 15 Volumen punta no comercial

Edad	2.5	5	10	15	20	25	30	35	40	SUMA
1	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
2	0.06	2.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3
3	0.00	1.89	3.39	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5
4	0.00	0.51	4.62	2.35	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	8
5	0.00	0.10	2.98	4.37	0.89	0.01	0.00	0.00	0.00	8
6	0.00	0.01	1.60	4.54	2.29	0.18	0.00	0.00	0.00	9
7	0.00	0.00	0.77	3.97	3.40	0.62	0.02	0.00	0.00	9
8	0.00	0.00	0.31	3.24	4.01	1.20	0.08	0.00	0.00	9
9	0.00	0.00	0.09	2.52	4.26	1.79	0.19	0.00	0.00	9
10	0.00	0.00	0.00	1.88	4.28	2.30	0.35	0.01	0.00	9
11	0.00	0.00	0.00	1.34	4.16	2.72	0.54	0.03	0.00	9
12	0.00	0.00	0.00	0.00	3.96	3.03	0.73	0.05	0.00	8
13	0.00	0.00	0.00	0.00	3.71	3.27	0.91	0.09	0.00	8
14	0.00	0.00	0.00	0.00	3.43	3.44	1.09	0.12	0.00	8

IS 17 m EB= 7 años

Volumen comercial para productos primarios

Edad	10	15	20	25	30	35	40	SUMA
3	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
4	0.5	1.8	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3
5	0.3	2.4	4.6	0.4	0.0	0.0	0.0	8
6	0.1	2.2	7.5	4.6	0.3	0.0	0.0	15
7	0.1	1.8	8.5	10.4	1.7	0.0	0.0	23
8	0.0	1.5	8.6	16.1	4.7	0.2	0.0	31
9	0.0	1.1	8.2	20.6	8.8	0.7	0.0	39
10	0.0	0.8	7.6	24.0	13.5	1.6	0.0	47
11	0.0	0.5	6.9	26.2	18.0	2.8	0.0	54
12	0.0	0.3	6.2	27.7	22.1	4.3	0.0	61
13	0.0	0.2	5.6	28.5	25.8	6.0	0.4	66
14	0.0	0.1	4.9	28.9	28.9	7.7	0.7	71

IS 17 Volumen comercial para productos secundarios

Edad	10	15	20	25	30	35	40	SUMA
3	0.6	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2
4	0.5	6.8	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	9
5	0.3	6.8	7.2	0.8	0.0	0.0	0.0	15
6	0.1	5.0	13.3	3.0	0.1	0.0	0.0	22
7	0.1	3.5	16.7	6.7	0.4	0.0	0.0	27
8	0.0	2.4	18.0	10.4	1.0	0.0	0.0	32
9	0.0	1.6	18.0	13.3	2.0	0.1	0.0	35
10	0.0	1.0	17.3	15.5	3.0	0.2	0.0	37
11	0.0	0.6	16.2	17.0	4.0	0.3	0.0	38
12	0.0	0.4	15.0	17.9	4.9	0.5	0.0	39
13	0.0	0.2	13.7	18.4	5.8	0.7	0.0	39
14	0.0	0.1	12.4	18.7	6.4	0.8	0.0	38

IS 17 Volumen comercial para productos celulósicos

Edad	10	15	20	25	30	35	40	SUMA
3	13.9	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17
4	5.9	19.1	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	26
5	3.8	25.5	11.8	0.5	0.0	0.0	0.0	42
6	2.1	23.3	20.6	3.0	0.0	0.0	0.0	49
7	0.8	18.9	25.2	6.7	0.2	0.0	0.0	52
8	0.3	14.6	26.5	10.3	1.0	0.0	0.0	53
9	0.1	10.8	26.0	13.2	1.9	0.1	0.0	52
10	0.0	7.6	24.7	15.3	3.0	0.2	0.0	51
11	0.0	5.1	23.0	16.7	4.0	0.3	0.0	49
12	0.0	3.3	21.1	17.7	4.9	0.5	0.0	47
13	0.0	2.0	19.2	18.2	5.7	0.6	0.0	46
14	0.0	1.0	17.2	18.5	6.4	0.8	0.0	44

IS 17 Volumen punta no comercial

Edad	2.5	5	10	15	20	25	30	35	40	SUMA
1	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
2	0.1	4.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5
3	0.0	1.8	5.5	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8
4	0.0	0.4	5.1	4.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	10
5	0.0	0.1	2.7	5.2	1.9	0.1	0.0	0.0	0.0	10
6	0.0	0.0	1.3	4.7	3.2	0.5	0.0	0.0	0.0	10
7	0.0	0.0	0.6	3.7	3.9	1.0	0.1	0.0	0.0	9
8	0.0	0.0	0.2	2.9	4.1	1.6	0.2	0.0	0.0	9
9	0.0	0.0	0.0	2.1	4.1	2.1	0.3	0.0	0.0	9
10	0.0	0.0	0.0	1.5	3.9	2.4	0.5	0.0	0.0	8
11	0.0	0.0	0.0	1.0	3.6	2.6	0.6	0.0	0.0	8
12	0.0	0.0	0.0	0.6	3.3	2.8	0.8	0.1	0.0	8
13	0.0	0.0	0.0	0.4	3.0	2.9	0.9	0.1	0.0	7
14	0.0	0.0	0.0	0.2	2.7	2.9	1.0	0.1	0.0	7

IS 19 m EB= 7 años

Volumen comercial para productos primarios

Edad	10	15	20	25	30	35	40	SUMA
3	0.63	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1
4	0.45	2.26	2.39	0.00	0.00	0.00	0.00	5
5	0.25	2.51	6.18	2.68	0.00	0.00	0.00	12
6	0.12	2.18	8.18	8.60	0.00	0.00	0.00	19
7	0.05	1.74	8.66	15.21	3.98	0.00	0.00	30
8	0.01	1.33	8.39	20.70	8.51	0.00	0.00	39
9	0.00	0.96	7.81	24.69	13.73	1.60	0.00	49
10	0.00	0.66	7.13	27.36	18.91	3.03	0.00	57
11	0.00	0.43	6.44	29.03	23.62	4.79	0.00	64
12	0.00	0.27	5.76	29.98	27.70	6.71	0.00	70
13	0.00	0.15	5.11	30.40	31.11	8.67	0.78	76
14	0.00	0.07	4.49	30.44	33.91	10.58	1.13	81

IS 19 Volumen comercial para productos secundarios

Edad	10	15	20	25	30	35	40	SUMA
3	0.68	3.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4
4	0.46	6.83	3.85	0.00	0.00	0.00	0.00	11
5	0.24	5.70	11.65	1.73	0.00	0.00	0.00	19
6	0.11	4.00	16.97	5.56	0.00	0.00	0.00	27
7	0.04	2.69	19.17	9.84	0.89	0.00	0.00	33
8	0.01	1.78	19.47	13.39	1.90	0.00	0.00	37
9	0.00	1.15	18.79	15.96	3.07	0.17	0.00	39
10	0.00	0.71	17.65	17.69	4.22	0.33	0.00	41
11	0.00	0.42	16.28	18.77	5.27	0.52	0.00	41
12	0.00	0.24	14.84	19.38	6.18	0.73	0.00	41
13	0.00	0.12	13.37	19.66	6.95	0.94	0.05	41
14	0.00	0.05	11.91	19.69	7.57	1.15	0.07	40

IS 19 Volumen comercial para productos celulósicos

Edad	10	15	20	25	30	35	40	SUMA
3	10.68	8.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19
4	6.62	25.85	6.22	0.00	0.00	0.00	0.00	39
5	3.31	27.49	17.76	1.71	0.00	0.00	0.00	50
6	1.47	23.10	25.03	5.49	0.00	0.00	0.00	55
7	0.56	17.96	27.68	9.71	0.88	0.00	0.00	57
8	0.15	13.38	27.71	13.22	1.87	0.00	0.00	56
9	0.01	9.53	26.46	15.76	3.03	0.17	0.00	55
10	0.00	6.45	24.64	17.47	4.17	0.33	0.00	53
11	0.00	4.17	22.59	18.54	5.21	0.51	0.00	51
12	0.00	2.53	20.48	19.14	6.11	0.72	0.00	49
13	0.00	1.38	18.37	19.41	6.86	0.93	0.05	47
14	0.00	0.62	16.31	19.44	7.47	1.14	0.07	45

IS 19 Volumen punta no comercial

Edad	2.5	5	10	15	20	25	30	35	40	SUMA
1	1.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1
2	0.10	5.28	1.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7
3	0.00	1.49	7.23	1.87	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	11
4	0.00	0.32	4.60	5.29	0.97	0.05	0.00	0.00	0.00	11
5	0.00	0.03	2.34	5.47	2.78	0.27	0.00	0.00	0.00	11
6	0.00	0.00	1.06	4.52	3.92	0.86	0.15	0.00	0.00	11
7	0.00	0.00	0.40	3.48	4.34	1.52	0.14	0.00	0.00	10
8	0.00	0.00	0.11	2.57	4.34	2.07	0.29	0.05	0.00	9
9	0.00	0.00	0.01	1.82	4.15	2.47	0.47	0.03	0.00	9
10	0.00	0.00	0.00	1.23	3.86	2.74	0.65	0.05	0.00	9
11	0.00	0.00	0.00	0.79	3.54	2.90	0.82	0.08	0.00	8
12	0.00	0.00	0.00	0.48	3.21	3.00	0.96	0.11	0.03	8
13	0.00	0.00	0.00	0.26	2.88	3.04	1.07	0.15	0.01	7
14	0.00	0.00	0.00	0.12	2.56	3.05	1.17	0.18	0.01	7

Anexo III. Número de árboles por hectárea por categoría diamétrica por IS (Weibull) y distribución de árboles para resinación por IS.

IS 11-NAH										árboles para resinar					
Edad	2.5	5	10	15	20	25	30	35	Total	Edad	15	20	25	30	35
1	1244								1244	1					
2	490	662							1151	2					
3	6	900	202						1108	3					
4		205	792	69					1066	4					
5		44	537	431	13				1025	5					
6		7	278	577	124	1			986	6	350	112			
7			135	521	277	16			949	7	350	104	8		
8			61	416	379	56	1		913	8	250	180	32		
9			24	318	422	110	4		878	9	100	302	55		
10			7	236	427	162	12		845	10	82	206	162	12	
11			1	171	410	206	24	1	813	11		231	206	24	1
12				120	384	239	38	1	782	12		184	239	38	1
13				82	354	261	53	3	753	13		150	256	53	3
14				54	323	276	67	5	724	14					

IS 13-NAH

árboles para resinar

Edad	2.5	5	10	15	20	25	30	35	Total	Edad	15	20	25	30
1	1244								1244	1				
2	211	940							1151	2				
3	2	619	486						1107	3				
4		123	721	220	1				1066	4				
5		24	402	538	62				1025	5				
6		2	196	554	225	9			986	6	438	24		
7			90	455	358	45	1		949	7	245	217		
8			38	349	420	103	4		913	8	100	357	5	
9			13	259	432	162	13		878	9	90	309	63	
10			2	188	418	211	26	1	845	10	27	322	113	
11				131	391	247	42	2	813	11		260	202	
12					360	271	58	3	693	12		190	270	2
13					328	287	74	6	694	13		142	280	40
14					296	295	89	9	688	14				

Edad	2.5	5	10	15	20	25	30	35	40	Total	Edad	15	20	25	30	35
1	1244									1244	1					
2	101	1050	1							1151	2					
3	1	406	683	18						1108	3					
4		79	594	381	12					1066	4					
5		13	301	565	143	3				1025	5					
6		1	141	503	312	29				986	6	311	151			
7			61	392	406	87	3			949	7	101	361	1		
8			23	292	434	153	11			913	8	41	402	19		
9			6	212	425	209	26	1		878	9	16	361	86		
10				149	401	250	43	2		845	10	6	278	178		
11				101	369	277	62	4		813	11		190	266	2	4
12					336	294	80	7		716	12		150	292	13	7
13					302	304	95	10		711	13		60	304	88	10
14					270	308	109	13	1	700	14					

Edad	2.5	5	10	15	20	25	30	35	40	Total	Edad	15	20	25	30	35
1	1244									1244	1					
2	53	1055	44							1151	2					
3		269	744	94						1107	3					
4		51	473	490	51					1066	4					
5		7	228	545	233	13				1025	5					
6			102	445	374	64	2			986	6	270	192			
7			41	336	429	135	9			949	7	154	216	92		
8			13	245	432	199	23	1		913	8	82	260	120		
9			2	174	411	247	43	2		878	9	112	200	150		
10				118	380	279	63	4		845	10	29	130	236	63	4
11				78	346	299	83	7		813	11		150	222	83	7
12				49	312	310	100	11		782	12		100	251	100	11
13				28	279	315	115	15	1	753	13		80	250	115	15
14				15	247	315	127	19	1	724	14					

Edad	2.5	5	10	15	20	25	30	35	40	Total	Edad	15	20	25	30	35
1	1243	1								1244	1					
2	30	924	198							1151	2					
3		184	698	224	3					1108	3					
4		33	375	536	120	2				1066	4					
5		3	173	503	310	35				1025	5					
6			73	390	410	107	5			986	6	390	72			
7			27	287	434	181	19			949	7	250	100	112		
8			7	205	421	239	40	2		913	8	8	159	239	40	
9			1	142	392	278	62	4		878	9	10	108	278	62	4
10				94	358	302	84	8		845	10	5	63	302	84	8
11				59	323	315	103	12		813	11		32	315	103	12
12				36	289	321	120	16	1	782	12		10	316	120	16
13				19	256	322	133	21	1	753	13		10	298	133	21
14				9	226	320	144	25	2	724	14					

Anexo IV. Datos análisis de rentabilidad IS 11 para la tasa de 7.5 %**Producción de madera (M), tasa de acumulación de Carbono (C) y resina (R) para el IS 11**

Edad	Producción de la plantación (M, C, R)				
	Producto primario para aserrío (m ³ ·rollo)	Producto secundario de cortas dimensiones (m ³ ·rollo)	Producto para astilla o celulosa (m ³ ·rollo)	Resina (ton·ha ⁻¹)	Tasa de secuestro de C (Mg·año ⁻¹)
1	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0
2	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0
3	0.07	0.08	2.82	0.0	0.7
4	0.54	1.67	12.35	0.0	2.8
5	1.76	7.37	20.48	0.0	3.6
6	4.62	10.89	28.50	6.3	3.5
7	8.50	14.02	33.19	6.8	2.8
8	12.91	17.63	38.64	8.2	3.2
9	17.80	21.20	40.78	9.9	2.5
10	22.99	24.33	41.67	11.3	2.2
11	28.40	26.75	41.72	12.6	1.9
12	33.66	28.58	41.22	13.1	1.6
13	38.67	29.86	40.42	13.5	1.3
14	43.30	30.69	39.42	0.0	1.1

Valor presente de la producción 7.5 %

Edad	Valor presente de la producción (IPvp) por escenario			
	Año de operación	Escenario I Madera para aserrío (M)	Escenario II M y beneficios por bonos de C (C)	Escenario III M, C y cosecha de resina (R)
1	0	-	-	-
2	1	-	-	-
3	2	918	1,880	1,880
4	3	5,045	8,536	8,536
5	4	12,092	16,316	16,316
6	5	18,037	21,793	105,938
7	6	23,003	25,839	109,996
8	7	28,041	31,082	125,299
9	8	32,001	34,227	139,516
10	9	35,034	36,832	149,011
11	10	37,147	38,578	155,293
12	11	38,368	39,482	152,383
13	12	38,829	39,691	147,559
14	13	38,646	38,646	38,646

Costos fijos y actuales por escenario 7.5 %

Año de operación	Costos fijos por escenario			Valor presente de los costos por escenario (Cvp)		
	M	M-C	M-C-R	M	M-C	M-C-R
0	20,845.8	20,845.80	20,845.80	18,038.17	18,038.17	18,038.17
1	3,711.00	3,711.00	3,711.00	2,987.15	2,987.15	2,987.15
2	3,711.00	3,711.00	3,711.00	2,778.74	2,778.74	2,778.74
3	2,850.00	2,850.00	2,850.00	1,985.15	1,985.15	1,985.15
4	3,753.43	3,753.43	3,497.48	2,432.03	2,432.03	2,266.19
5	5,197.48	5,197.48	87,270.34	3,132.74	3,132.74	52,601.53
6	1,700.00	1,700.00	81,645.10	953.17	953.17	45,777.63
7	2,850.00	2,850.00	82,795.10	1,486.48	1,486.48	43,183.65
8	3,753.43	3,753.43	83,698.53	1,821.11	1,821.11	40,609.17
9	1,700.00	1,700.00	87,085.12	767.27	767.27	39,304.46
10	3,753.43	3,753.43	83,525.49	1,575.86	1,575.86	35,067.79
11	1,700.00	1,700.00	81,472.05	663.94	663.94	31,819.22
12	2,850.00	2,850.00	82,622.05	1,035.42	1,035.42	30,017.08
13	5,323.94	5,323.94	5,323.94	1,799.27	1,799.27	1,799.27

Valor actual neto de la producción total por escenario 7.5 %

Flujo de efectivo (valor total de la producción) por escenario (IPvp - Cvp)			
Año de operación	M	M-C	M-C-R
0	-18,038.17	-18,038.17	-18,038.17
1	-2,987.15	-2,987.15	-2,987.15
2	-1,861.13	-898.28	-898.28
3	3,060.19	6,550.57	6,550.57
4	9,659.64	13,883.82	14,049.66
5	14,904.39	18,659.98	53,336.61
6	22,049.99	24,886.10	64,218.05
7	26,554.26	29,595.10	82,115.48
8	30,179.56	32,406.21	98,906.57
9	34,266.75	36,064.38	109,706.24
10	35,571.47	37,002.49	120,224.99
11	37,703.99	38,818.54	120,563.70
12	37,793.32	38,656.00	117,542.01
13	36,847.07	36,847.07	36,847.07

Valor actual neto con actividades específicas por escenario de producción 7.5%

Año de operación	Valor presente de los ingresos			Valor presente de los costos		
	M	M-C	M-C-R	M	M-C	M-C-R
0	4,376.76	4,376.76	4,376.76	18,038.17	18,038.17	18,038.17
1	1,701.38	1,701.38	1,701.38	2,987.15	2,987.15	2,987.15
2	-	962.85	962.85	2,778.74	2,778.74	2,778.74
3	-	3,490.39	3,490.39	1,985.15	1,985.15	1,985.15
4	-	4,224.18	4,224.18	2,432.03	2,432.03	2,266.19
5	-	3,755.59	87,901.01	3,132.74	3,132.74	52,601.53
6	-	2,836.11	86,992.52	953.17	953.17	45,777.63
7	-	3,040.85	97,258.39	1,486.48	1,486.48	43,183.65
8	-	2,226.65	107,515.07	1,821.11	1,821.11	40,609.17
9	-	1,797.63	113,976.68	767.27	767.27	39,304.46
10	-	1,431.02	118,145.44	1,575.86	1,575.86	35,067.79
11	-	1,114.54	114,014.99	663.94	663.94	31,819.22
12	-	862.67	108,730.34	1,035.42	1,035.42	30,017.08
13	38,646.34	38,646.34	38,646.34	1,799.27	1,799.27	1,799.27

VAN (bajo escenarios de producción) (IPvp - Cvp)			
Año de operación	M	M-C	M-C-R
0	-13,661.41	-13,661.41	-13,661.41
1	-1,285.77	-1,285.77	-1,285.77
2	-2,778.74	-1,815.89	-1,815.89
3	-1,985.15	1,505.24	1,505.24
4	-2,432.03	1,792.15	1,957.99
5	-3,132.74	622.85	35,299.48
6	-953.17	1,882.93	41,214.89
7	-1,486.48	1,554.37	54,074.74
8	-1,821.11	405.54	66,905.90
9	-767.27	1,030.36	74,672.22
10	-1,575.86	-144.84	83,077.65
11	-663.94	450.60	82,195.77
12	-1,035.42	-172.75	78,713.26
13	36,847.07	36,847.07	36,847.07

Datos análisis de rentabilidad IS 13 para la tasa de 7.5 %**Producción de madera (M), tasa de acumulación de Carbono (C) y resina (R) para el IS 13**

Edad	Producción de la plantación (M, C, R)				
	Producto primario para aserrío (m ³ ·rollo)	Producto secundario de cortas dimensiones (m ³ ·rollo)	Producto para astilla o celulosa (m ³ ·rollo)	Resina (ton·ha ⁻¹)	Tasa de secuestro de C (Mg·año ⁻¹)
1	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0
2	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0
3	0.21	0.26	6.56	0.0	1.7
4	1.03	4.11	14.82	0.0	3.1
5	3.29	9.38	26.24	0.0	4.5
6	7.30	13.33	35.33	6.1	4.1
7	12.17	17.76	40.15	8.1	3.4
8	17.77	22.13	43.91	9.7	3.3
9	23.85	25.88	45.10	10.5	2.6
10	30.20	28.79	45.20	11.6	2.2
11	36.37	30.90	44.59	12.5	1.8
12	41.66	31.51	38.38	13.1	1.7
13	47.18	32.71	38.91	13.6	1.6
14	52.08	33.36	38.90	0.0	1.3

Valor presente de la producción 7.5 %

Edad	Año de operación	Valor presente de la producción (IPvp) por escenario		
		Escenario I Madera para aserrío (M)	Escenario II M y beneficios por bonos de C (C)	Escenario III M, C y cosecha de resina (R)
1	0	-	-	-
2	1	-	-	-
3	2	2,248.01	4,524.20	4,524.20
4	3	8,158.37	12,057.20	12,057.20
5	4	16,433.51	21,745.76	21,745.76
6	5	23,642.43	28,090.12	108,775.17
7	6	29,925.00	33,351.40	133,662.29
8	7	35,537.54	38,636.09	150,441.84
9	8	39,758.07	42,070.36	153,840.78
10	9	42,785.03	44,613.99	159,446.78
11	10	44,588.14	45,983.48	161,880.04
12	11	43,935.12	43,881.80	156,587.82
13	12	44,422.38	45,561.21	154,284.70
14	13	44,036.82	44,036.82	44,036.82

Costos fijos y actuales por escenario 7.5 %

Año de operación	Costos fijos por escenario			Valor presente de los costos por escenario (Cvp)		
	M	M-C	M-C-R	M	M-C	M-C-R
0	20,845.8	20,845.8	20,845.8	18,038.17	18,038.17	18,038.17
1	3,711.00	3,711.00	3,711.00	2,987.15	2,987.15	2,987.15
2	3,711.00	3,711.00	3,711.00	2,778.74	2,778.74	2,778.74
3	2,850.00	2,850.00	2,850.00	1,985.15	1,985.15	1,985.15
4	3,753.43	3,753.43	3,497.48	2,432.03	2,432.03	2,266.19
5	5,197.48	5,197.48	87,270.34	3,132.74	3,132.74	52,601.53
6	1,700.00	1,700.00	81,645.10	953.17	953.17	45,777.63
7	2,850.00	2,850.00	82,795.10	1,486.48	1,486.48	43,183.65
8	3,753.43	3,753.43	83,698.53	1,821.11	1,821.11	40,609.17
9	1,700.00	1,700.00	87,085.12	767.27	767.27	39,304.46
10	3,753.43	3,753.43	83,525.49	1,575.86	1,575.86	35,067.79
11	1,700.00	1,700.00	81,472.05	663.94	663.94	31,819.22
12	2,850.00	2,850.00	82,622.05	1,035.42	1,035.42	30,017.08
13	5,323.94	5,323.94	5,323.94	1,799.27	1,799.27	1,799.27

Valor actual neto de la producción total por escenario 7.5 %

Flujo de efectivo (valor total de la producción) por escenario (IPvp - Cvp)			
Año de operación	M	M-C	M-C-R
0	-18,038.17	-18,038.17	-18,038.17
1	-2,987.15	-2,987.15	-2,987.15
2	-530.73	1,745.46	1,745.46
3	6,173.22	10,072.05	10,072.05
4	14,001.48	19,313.73	19,479.58
5	20,509.69	24,957.38	56,173.64
6	28,971.82	32,398.23	87,884.66
7	34,051.06	37,149.61	107,258.19
8	37,936.97	40,249.25	113,231.61
9	42,017.76	43,846.72	120,142.33
10	43,012.28	44,407.62	126,812.24
11	43,271.17	43,217.85	124,768.59
12	43,386.96	44,525.79	124,267.62
13	42,237.55	42,237.55	42,237.55

Valor actual neto con actividades específicas por escenario de producción 7.5%

Año de operación	Valor presente de los ingresos			Valor presente de los costos		
	M	M-C	M-C-R	M	M-C	M-C-R
0	4,376.76	4,376.76	4,376.76	18,038.17	18,038.17	18,038.17
1	1,701.38	1,701.38	1,701.38	2,987.15	2,987.15	2,987.15
2	-	2,276.19	2,276.19	2,778.74	2,778.74	2,778.74
3	-	3,898.83	3,898.83	1,985.15	1,985.15	1,985.15
4	-	5,312.25	5,312.25	2,432.03	2,432.03	2,266.19
5	-	4,447.69	85,132.74	3,132.74	3,132.74	52,601.53
6	-	3,426.41	103,737.30	953.17	953.17	45,777.63
7	-	3,098.55	114,904.30	1,486.48	1,486.48	43,183.65
8	-	2,312.28	114,082.71	1,821.11	1,821.11	40,609.17
9	-	1,828.96	116,661.75	767.27	767.27	39,304.46
10	-	1,395.34	117,291.90	1,575.86	1,575.86	35,067.79
11	-	-53.32	112,652.70	663.94	663.94	31,819.22
12	-	1,138.83	109,862.32	1,035.42	1,035.42	30,017.08
13	44,036.82	44,036.82	44,036.82	1,799.27	1,799.27	1,799.27

VAN (bajo escenarios de producción) (IPvp - Cvp)			
Año de operación	M	M-C	M-C-R
0	-13,661.41	-13,661.41	-13,661.41
1	-1,285.77	-1,285.77	-1,285.77
2	-2,778.74	-502.55	-502.55
3	-1,985.15	1,913.68	1,913.68
4	-2,432.03	2,880.22	3,046.07
5	-3,132.74	1,314.95	32,531.21
6	-953.17	2,473.23	57,959.67
7	-1,486.48	1,612.07	71,720.65
8	-1,821.11	491.18	73,473.54
9	-767.27	1,061.69	77,357.30
10	-1,575.86	-180.52	82,224.11
11	-663.94	-717.26	80,833.48
12	-1,035.42	103.41	79,845.24
13	42,237.55	42,237.55	42,237.55

Datos análisis de rentabilidad IS 15 para la tasa de 7.5 %**Producción de madera (M), tasa de acumulación de Carbono (C) y resina (R) para el IS 15**

Edad	Producción de la plantación (M, C, R)				
	Producto primario para aserrío (m ³ ·rollo)	Producto secundario de cortas dimensiones (m ³ ·rollo)	Producto para astilla o celulosa (m ³ ·rollo)	Resina (ton·ha ⁻¹)	Tasa de secuestro de C (Mg·año ⁻¹)
1	0.00	0.00	0.00	-	0.0
2	0.00	0.00	0.00	-	0.0
3	0.42	0.75	10.76	-	2.9
4	1.87	6.48	20.61	-	4.1
5	5.45	11.60	32.82	-	5.0
6	10.53	16.90	41.63	7.65	4.6
7	16.77	22.32	46.35	9.84	3.9
8	23.74	26.95	48.38	10.74	3.3
9	31.12	30.51	48.78	11.59	2.7
10	38.33	33.03	48.17	12.43	2.2
11	45.11	34.70	47.03	13.07	1.8
12	50.84	35.14	41.47	13.30	0.1
13	56.44	35.84	41.49	13.99	1.5
14	61.58	36.07	41.07	-	1.2

Valor presente de la producción 7.5 %

Edad	Año de operación	Valor presente de la producción (IPvp) por escenario		
		Escenario I Madera para aserrío (M)	Escenario II M y beneficios por bonos de C (C)	Escenario III M, C y cosecha de resina (R)
1	0	-	-	-
2	1	-	-	-
3	2	4,064.92	7,931.08	7,931.08
4	3	12,414.25	17,545.05	17,545.05
5	4	21,740.50	27,604.44	27,604.44
6	5	30,417.06	35,421.27	136,892.94
7	6	37,989.85	41,964.89	163,357.44
8	7	43,933.51	47,011.21	170,201.30
9	8	48,256.40	50,634.22	174,354.87
10	9	50,945.20	52,726.87	176,118.75
11	10	52,258.12	53,585.74	174,279.60
12	11	51,343.84	51,447.82	165,756.28
13	12	51,081.97	52,076.07	163,914.28
14	13	50,137.01	50,137.01	50,137.01

Costos fijos y actuales por escenario 7.5 %

Año de operación	Costos fijos por escenario			Valor presente de los costos por escenario (Cvp)		
	M	M-C	M-C-R	M	M-C	M-C-R
0	20,845.8	20,845.80	20,845.80	18,038.17	18,038.17	18,038.17
1	3,711.00	3,711.00	3,711.00	2,987.15	2,987.15	2,987.15
2	3,711.00	3,711.00	3,711.00	2,778.74	2,778.74	2,778.74
3	2,850.00	2,850.00	2,850.00	1,985.15	1,985.15	1,985.15
4	3,753.43	3,753.43	3,497.48	2,432.03	2,432.03	2,266.19
5	5,197.48	5,197.48	87,270.34	3,132.74	3,132.74	52,601.53
6	1,700.00	1,700.00	81,645.10	953.17	953.17	45,777.63
7	2,850.00	2,850.00	82,795.10	1,486.48	1,486.48	43,183.65
8	3,753.43	3,753.43	83,698.53	1,821.11	1,821.11	40,609.17
9	1,700.00	1,700.00	87,085.12	767.27	767.27	39,304.46
10	3,753.43	3,753.43	83,525.49	1,575.86	1,575.86	35,067.79
11	1,700.00	1,700.00	81,472.05	663.94	663.94	31,819.22
12	2,850.00	2,850.00	82,622.05	1,035.42	1,035.42	30,017.08
13	5,323.94	5,323.94	5,323.94	1,799.27	1,799.27	1,799.27

Valor actual neto de la producción total por escenario 7.5 %

Flujo de efectivo (valor total de la producción) por escenario (IPvp - Cvp)			
Año de operación	M	M-C	M-C-R
0	-18,038.17	-18,038.17	-18,038.17
1	-2,987.15	-2,987.15	-2,987.15
2	1,286.18	5,152.34	5,152.34
3	10,429.10	15,559.90	15,559.90
4	19,308.47	25,172.41	25,338.25
5	27,284.32	32,288.53	84,291.41
6	37,036.67	41,011.72	117,579.80
7	42,447.03	45,524.73	127,017.64
8	46,435.29	48,813.11	133,745.69
9	50,177.93	51,959.60	136,814.30
10	50,682.26	52,009.88	139,211.81
11	50,679.90	50,783.88	133,937.06
12	50,046.55	51,040.64	133,897.20
13	48,337.74	48,337.74	48,337.74

Valor actual neto con actividades específicas por escenario de producción 7.5%

Año de operación	Valor presente de los ingresos			Valor presente de los costos		
	M	M-C	M-C-R	M	M-C	M-C-R
0	4,376.76	4,376.76	4,376.76	18,038.17	18,038.17	18,038.17
1	1,701.38	1,701.38	1,701.38	2,987.15	2,987.15	2,987.15
2	-	3,866.17	3,866.17	2,778.74	2,778.74	2,778.74
3	-	5,130.80	5,130.80	1,985.15	1,985.15	1,985.15
4	-	5,863.94	5,863.94	2,432.03	2,432.03	2,266.19
5	-	5,004.22	106,475.88	3,132.74	3,132.74	52,601.53
6	-	3,975.04	125,367.59	953.17	953.17	45,777.63
7	-	3,077.69	126,267.78	1,486.48	1,486.48	43,183.65
8	-	2,377.82	126,098.47	1,821.11	1,821.11	40,609.17
9	-	1,781.67	125,173.55	767.27	767.27	39,304.46
10	-	1,327.62	122,021.48	1,575.86	1,575.86	35,067.79
11	-	103.98	114,412.44	663.94	663.94	31,819.22
12	-	994.09	112,832.30	1,035.42	1,035.42	30,017.08
13	50,137.01	50,137.01	50,137.01	1,799.27	1,799.27	1,799.27

VAN (bajo escenarios de producción) (IPvp - Cvp)			
Año de operación	M	M-C	M-C-R
0	-13,661.41	-13,661.41	-13,661.41
1	-1,285.77	-1,285.77	-1,285.77
2	-2,778.74	1,087.43	1,087.43
3	-1,985.15	3,145.65	3,145.65
4	-2,432.03	3,431.91	3,597.76
5	-3,132.74	1,871.47	53,874.36
6	-953.17	3,021.87	79,589.95
7	-1,486.48	1,591.21	83,084.13
8	-1,821.11	556.71	85,489.30
9	-767.27	1,014.40	85,869.09
10	-1,575.86	-248.24	86,953.69
11	-663.94	-559.96	82,593.22
12	-1,035.42	-41.33	82,815.22
13	48,337.74	48,337.74	48,337.74

Datos análisis de rentabilidad IS 17 para la tasa de 7.5 %**Producción de madera (M), tasa de acumulación de Carbono (C) y resina (R) para el IS 17**

Edad	Producción de la plantación (M, C, R)				
	Producto primario para aserrío (m ³ ·rollo)	Producto secundario de cortas dimensiones (m ³ ·rollo)	Producto para astilla o celulosa (m ³ ·rollo)	Resina (ton·ha ⁻¹)	Tasa de secuestro de C (Mg·año ⁻¹)
1	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0
2	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0
3	0.78	2.09	16.52	0.0	4.7
4	3.25	8.58	26.25	0.0	4.5
5	7.71	15.14	41.62	0.0	6.3
6	14.73	21.52	48.88	8.4	5.0
7	22.55	27.38	51.70	10.3	4.0
8	31.04	31.84	52.72	11.3	3.4
9	39.44	34.95	52.10	11.4	2.6
10	47.34	36.96	50.77	13.3	2.1
11	54.47	38.15	49.14	13.7	1.6
12	60.72	38.70	47.41	14.1	1.2
13	66.47	38.79	45.66	14.1	1.0
14	71.15	38.49	43.91	0.0	0.6

Valor presente de la producción 7.5 %

Edad	Año de operación	Valor presente de la producción (IPvp) por escenario		
		Escenario I Madera para aserrío (M)	Escenario II M y beneficios por bonos de C (C)	Escenario III M, C y cosecha de resina (R)
1	0	-	-	-
2	1	-	-	-
3	2	7,204.08	13,487.72	13,487.72
4	3	16,981.86	22,613.86	22,613.86
5	4	28,656.01	36,052.64	36,052.64
6	5	39,019.98	44,414.62	156,072.47
7	6	47,198.51	51,199.97	178,845.04
8	7	53,370.85	56,521.42	186,602.27
9	8	57,345.90	59,632.02	180,870.11
10	9	59,476.20	61,152.91	193,613.71
11	10	60,101.79	61,317.40	188,034.38
12	11	59,535.22	60,391.46	181,274.17
13	12	58,288.86	58,931.83	171,998.90
14	13	56,238.47	56,238.47	56,238.47

Costos fijos y actuales por escenario 7.5 %

Año de operación	Costos fijos por escenario			Valor presente de los costos por escenario (Cvp)		
	M	M-C	M-C-R	M	M-C	M-C-R
0	20,845.8	20,845.80	20,845.80	18,038.17	18,038.17	18,038.17
1	3,711.00	3,711.00	3,711.00	2,987.15	2,987.15	2,987.15
2	3,711.00	3,711.00	3,711.00	2,778.74	2,778.74	2,778.74
3	2,850.00	2,850.00	2,850.00	1,985.15	1,985.15	1,985.15
4	3,753.43	3,753.43	3,497.48	2,432.03	2,432.03	2,266.19
5	5,197.48	5,197.48	87,270.34	3,132.74	3,132.74	52,601.53
6	1,700.00	1,700.00	81,645.10	953.17	953.17	45,777.63
7	2,850.00	2,850.00	82,795.10	1,486.48	1,486.48	43,183.65
8	3,753.43	3,753.43	83,698.53	1,821.11	1,821.11	40,609.17
9	1,700.00	1,700.00	87,085.12	767.27	767.27	39,304.46
10	3,753.43	3,753.43	83,525.49	1,575.86	1,575.86	35,067.79
11	1,700.00	1,700.00	81,472.05	663.94	663.94	31,819.22
12	2,850.00	2,850.00	82,622.05	1,035.42	1,035.42	30,017.08
13	5,323.94	5,323.94	5,323.94	1,799.27	1,799.27	1,799.27

Valor actual neto de la producción total por escenario 7.5 %

Flujo de efectivo (valor total de la producción) por escenario (IPvp - Cvp)			
Año de operación	M	M-C	M-C-R
0	-18,038.17	-18,038.17	-18,038.17
1	-2,987.15	-2,987.15	-2,987.15
2	4,425.34	10,708.98	10,708.98
3	14,996.71	20,628.71	20,628.71
4	26,223.98	33,620.61	33,786.45
5	35,887.24	41,281.88	103,470.94
6	46,245.33	50,246.80	133,067.41
7	51,884.37	55,034.94	143,418.62
8	55,524.79	57,810.91	140,260.94
9	58,708.94	60,385.65	154,309.25
10	58,525.93	59,741.54	152,966.59
11	58,871.28	59,727.52	149,454.94
12	57,253.44	57,896.41	141,981.82
13	54,439.19	54,439.19	54,439.19

Valor actual neto con actividades específicas por escenario de producción 7.5%

Año de operación	Valor presente de los ingresos			Valor presente de los costos		
	M	M-C	M-C-R	M	M-C	M-C-R
0	4,376.76	4,376.76	4,376.76	18,038.17	18,038.17	18,038.17
1	1,701.38	1,701.38	1,701.38	2,987.15	2,987.15	2,987.15
2	-	6,283.64	6,283.64	2,778.74	2,778.74	2,778.74
3	-	5,632.01	5,632.01	1,985.15	1,985.15	1,985.15
4	-	7,396.63	7,396.63	2,432.03	2,432.03	2,266.19
5	-	5,394.64	117,052.49	3,132.74	3,132.74	52,601.53
6	-	4,001.46	131,646.53	953.17	953.17	45,777.63
7	-	3,150.58	133,231.43	1,486.48	1,486.48	43,183.65
8	-	2,286.12	123,524.21	1,821.11	1,821.11	40,609.17
9	-	1,676.71	134,137.50	767.27	767.27	39,304.46
10	-	1,215.61	127,932.60	1,575.86	1,575.86	35,067.79
11	-	856.24	121,738.94	663.94	663.94	31,819.22
12	-	642.97	113,710.04	1,035.42	1,035.42	30,017.08
13	56,238.47	56,238.47	56,238.47	1,799.27	1,799.27	1,799.27

VAN (bajo escenarios de producción) (IPvp - Cvp)			
Año de operación	M	M-C	M-C-R
0	-13,661.41	-13,661.41	-13,661.41
1	-1,285.77	-1,285.77	-1,285.77
2	-2,778.74	3,504.90	3,504.90
3	-1,985.15	3,646.86	3,646.86
4	-2,432.03	4,964.60	5,130.44
5	-3,132.74	2,261.90	64,450.96
6	-953.17	3,048.29	85,868.90
7	-1,486.48	1,664.09	90,047.77
8	-1,821.11	465.01	82,915.04
9	-767.27	909.44	94,833.05
10	-1,575.86	-360.25	92,864.81
11	-663.94	192.30	89,919.72
12	-1,035.42	-392.45	83,692.96
13	54,439.19	54,439.19	54,439.19

Datos análisis de rentabilidad IS 19 para la tasa de 7.5 %**Producción de madera (M), tasa de acumulación de Carbono (C) y resina (R) para el IS 19**

Edad	Producción de la plantación (M, C, R)				
	Producto primario para aserrío (m ³ ·rollo)	Producto secundario de cortas dimensiones (m ³ ·rollo)	Producto para astilla o celulosa (m ³ ·rollo)	Resina (ton·ha ⁻¹)	Tasa de secuestro de C (Mg·año ⁻¹)
1	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0
2	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0
3	1.35	3.94	19.29	0.0	5.9
4	5.10	11.14	38.69	0.0	7.3
5	11.62	19.33	50.27	0.0	6.3
6	19.08	26.64	55.09	7.7	4.7
7	29.65	32.63	56.80	9.9	4.4
8	38.94	36.55	56.33	12.9	3.1
9	48.80	39.14	54.96	13.8	2.7
10	57.10	40.60	53.05	14.2	1.9
11	64.32	41.28	51.02	14.5	1.4
12	70.42	41.38	48.97	14.6	1.0
13	76.23	41.09	47.00	14.6	0.9
14	80.62	40.44	45.04	0.0	0.4

Valor presente de la producción 7.5 %

Edad	Año de operación	Valor presente de la producción (IPvp) por escenario		
		Escenario I Madera para aserrío (M)	Escenario II M y beneficios por bonos de C (C)	Escenario III M, C y cosecha de resina (R)
1	0	-	-	-
2	1	-	-	-
3	2	10,204.59	18,170.26	18,170.26
4	3	24,133.15	33,279.29	33,279.29
5	4	37,624.07	44,994.82	44,994.82
6	5	47,860.13	52,971.78	154,756.42
7	6	57,569.08	61,999.30	183,583.66
8	7	63,034.92	65,910.51	213,969.49
9	8	66,963.77	69,292.48	216,594.54
10	9	68,303.82	69,835.37	210,672.84
11	10	68,057.15	69,122.40	202,840.51
12	11	66,599.25	67,300.70	192,714.59
13	12	64,704.87	65,262.87	181,829.04
14	13	61,898.02	61,898.02	61,898.02

Costos fijos y actuales por escenario 7.5 %

Año de operación	Costos fijos por escenario			Valor presente de los costos por escenario (Cvp)		
	M	M-C	M-C-R	M	M-C	M-C-R
0	20,845.8	20,845.8	20,845.8	18,038.17	18,038.17	18,038.17
1	3,711.00	3,711.00	3,711.00	2,987.15	2,987.15	2,987.15
2	3,711.00	3,711.00	3,711.00	2,778.74	2,778.74	2,778.74
3	2,850.00	2,850.00	2,850.00	1,985.15	1,985.15	1,985.15
4	3,753.43	3,753.43	3,497.48	2,432.03	2,432.03	2,266.19
5	5,197.48	5,197.48	87,270.34	3,132.74	3,132.74	52,601.53
6	1,700.00	1,700.00	81,645.10	953.17	953.17	45,777.63
7	2,850.00	2,850.00	82,795.10	1,486.48	1,486.48	43,183.65
8	3,753.43	3,753.43	83,698.53	1,821.11	1,821.11	40,609.17
9	1,700.00	1,700.00	87,085.12	767.27	767.27	39,304.46
10	3,753.43	3,753.43	83,525.49	1,575.86	1,575.86	35,067.79
11	1,700.00	1,700.00	81,472.05	663.94	663.94	31,819.22
12	2,850.00	2,850.00	82,622.05	1,035.42	1,035.42	30,017.08
13	5,323.94	5,323.94	5,323.94	1,799.27	1,799.27	1,799.27

Valor actual neto de la producción total por escenario 7.5 %

Flujo de efectivo (valor total de la producción) por escenario (IPvp - Cvp)			
Año de operación	M	M-C	M-C-R
0	-18,038.17	-18,038.17	-18,038.17
1	-2,987.15	-2,987.15	-2,987.15
2	7,425.85	15,391.52	15,391.52
3	22,148.00	31,294.14	31,294.14
4	35,192.04	42,562.78	42,728.63
5	44,727.39	49,839.04	102,154.89
6	56,615.91	61,046.13	137,806.03
7	61,548.44	64,424.03	170,785.83
8	65,142.66	67,471.38	175,985.37
9	67,536.55	69,068.10	171,368.39
10	66,481.29	67,546.54	167,772.72
11	65,935.30	66,636.76	160,895.37
12	63,669.45	64,227.45	151,811.96
13	60,098.74	60,098.74	60,098.74

Valor actual neto con actividades específicas por escenario de producción 7.5%

Año de operación	Valor presente de los ingresos			Valor presente de los costos		
	M	M-C	M-C-R	M	M-C	M-C-R
0	4,376.76	4,376.76	4,376.76	18,038.17	18,038.17	18,038.17
1	1,701.38	1,701.38	1,701.38	2,987.15	2,987.15	2,987.15
2	-	7,965.67	7,965.67	2,778.74	2,778.74	2,778.74
3	-	9,146.14	9,146.14	1,985.15	1,985.15	1,985.15
4	-	7,370.74	7,370.74	2,432.03	2,432.03	2,266.19
5	-	5,111.65	106,896.28	3,132.74	3,132.74	52,601.53
6	-	4,430.22	126,014.58	953.17	953.17	45,777.63
7	-	2,875.59	150,934.57	1,486.48	1,486.48	43,183.65
8	-	2,328.72	149,630.78	1,821.11	1,821.11	40,609.17
9	-	1,531.55	142,369.02	767.27	767.27	39,304.46
10	-	1,065.24	134,783.35	1,575.86	1,575.86	35,067.79
11	-	701.46	126,115.34	663.94	663.94	31,819.22
12	-	558.00	117,124.17	1,035.42	1,035.42	30,017.08
13	61,898.02	61,898.02	61,898.02	1,799.27	1,799.27	1,799.27

VAN (bajo escenarios de producción) (IPvp - Cvp)			
Año de operación	M	M-C	M-C-R
0	-13,661.41	-13,661.41	-13,661.41
1	-1,285.77	-1,285.77	-1,285.77
2	-2,778.74	5,186.93	5,186.93
3	-1,985.15	7,160.99	7,160.99
4	-2,432.03	4,938.71	5,104.56
5	-3,132.74	1,978.90	54,294.76
6	-953.17	3,477.04	80,236.94
7	-1,486.48	1,389.11	107,750.91
8	-1,821.11	507.61	109,021.60
9	-767.27	764.28	103,064.57
10	-1,575.86	-510.62	99,715.56
11	-663.94	37.51	94,296.12
12	-1,035.42	-477.43	87,107.09
13	60,098.74	60,098.74	60,098.74