

MODELACIÓN FORESTAL

como innovación tecnológica para el manejo silvicultural y
aprovechamiento económico de la Balsa, Región Costa-Ecuador

Estación Experimental Portoviejo

**Álvaro Cañadas, Ph.D., Diana Rade, M.C.A.
Juan Manuel Domínguez, Ph.D.
Isabel Murillo, M.Sc. y Carlos Molina, M.Sc.**

ESTACION EXPERIMENTAL PORTOVIEJO

**Modelación forestal
como innovación tecnológica
para el manejo silvicultural
y aprovechamiento económico
de la Balsa, Región
Costa-Ecuador**

*Álvaro Cañadas, Ph.D.
Diana Rade, M.C.A
Juan Manuel Domínguez, Ph.D.
Isabel Murillo, M.Sc.
Carlos Molina, M.Sc.*

2016

**Modelación forestal como innovación tecnológica para el manejo silvicultural
y aprovechamiento económico de la Balsa, Región Costa-Ecuador**

*Álvaro Cañadas, Ph.D., Diana Rade, M.C.A., Juan Manuel Domínguez, Ph.D., Isabel
Murillo, M.Sc., Carlos Molina, M.Sc.*

PRIMERA EDICIÓN
2016

©Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP)
Estación Experimental Portoviejo
Km 12 Vía Santa Ana, Cantón Portoviejo, Manabí
Casilla: 100
Teléfono: 00593-5-2420-317
Email: alvarocaniadas@yahoo.es
www.iniap.gob.ec
Ediciones Abya-Yala
Av. 12 de Octubre N24-22 y Wilson, bloque A
Apartado postal: 17-12-719
Teléfonos: (593 2) 250 6267 / (593 2) 396 2800
e-mail: editorial@abyayala.org
www.abayayala.org
Quito-Ecuador

Fotografías: Técnicos de la Estación Experimental Portoviejo
Derecho de autor: 049386
Depósito legal: 005650
ISBN: 978-9942-09-360-8
Diseño, diagramación
e impresión: Ediciones Abya-Yala
Tiraje: 700 ejemplares

Impreso en Quito - Ecuador, junio 2016

Revisión por Pares Externos

- Prof. František Vilko, Ph.D.
Profesor Adjunto
Instituto Buckhardt, Inventario Forestal y Percepción Remota
Universidad de Georg August Göttingen, Alemania
- Prof. Christian Wehenkel, Ph.D.
Profesor Investigador
Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera
Universidad de Juárez del Estado de Durango, México

Revisión Interna

- Comité de Publicaciones Estación Experimental Portoviejo (EEP)
- Comité de Publicaciones Administración Central (Dirección de Investigación y Dirección de Tránsito de Tecnología)

El contenido de este documento técnico es de responsabilidad exclusiva de los autores y no representa necesariamente el punto de vista del INIAP, ITTO, IICA o ABYA-YALA.

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE FIGURAS	9
AUTORES	15
PRÓLOGO	17
RESUMEN	21
AGRADECIMIENTOS	23
<i>CAPÍTULO 1</i>	
Introducción	25
<i>CAPÍTULO 2</i>	
Modelos forestales	33
2.1 DESARROLLO DE MODELOS FORESTALES	35
2.2 TIPOS DE MODELOS FORESTALES	37
2.3 VALORACIÓN DE MODELOS FORESTALES	41
2.3.1 <i>Evaluación cualitativa</i>	41
2.3.2 <i>Evaluación cuantitativa</i>	45
2.3.3 <i>Caracterización del error del modelo</i>	45
2.4 ECUACIONES DE CRECIMIENTO FORESTAL	48
2.4.1 <i>Función de crecimiento</i>	48
2.4.2 <i>Utilidad de las funciones de crecimiento en el campo forestal</i>	50
2.4.3 <i>Características deseables de una función de crecimiento</i>	51
2.4.4 <i>Clasificación de las funciones de crecimiento forestal según su expresión matemática</i>	52
<i>CAPÍTULO 3</i>	
Información base de esta investigación	55
3.1 DESCRIPCIÓN BOTÁNICA DE LA Balsa	57
3.2 SILVICULTURA	58
3.3 SIEMBRA Y FERTILIZACIÓN	60

3.4	UTILIZACIÓN.....	61
3.5	DESCRIPCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS LLUVIAS EN EL ECUADOR Y EN EL ÁREA DE INVESTIGACIÓN.....	61
3.5.1	<i>Condiciones generales de circulación atmosférica para la formación de las lluvias en el Ecuador.....</i>	61
3.5.2	<i>Las lluvias estacionales en el Ecuador</i>	65
3.5.3	<i>Lluvia en la Costa.....</i>	67
3.5.4	<i>Evaporación</i>	67
3.5.5	<i>Balance hídrico</i>	68
3.6	REQUERIMIENTO DE DATOS	71
3.7	TIPOS DE PARCELAS FORESTALES.....	73
3.7.1	<i>Parcelas permanentes.....</i>	73
3.7.2	<i>Parcelas temporales.....</i>	75
3.7.3	<i>Parcelas de intervalo</i>	77
3.8	DATOS	80
 CAPÍTULO 4		
	Parámetros de rodales de Balsa	83
4.1	DISTRIBUCIÓN DIAMÉTRICA	85
4.1.1	<i>Relación diámetro-altura</i>	<i>88</i>
4.1.2	<i>Ecuaciones generales diámetro-altura para O. pyramidale.....</i>	<i>91</i>
4.1.3	<i>Validación.....</i>	<i>94</i>
4.2	DENSIDAD DE UN RODAL	96
4.2.1	<i>Área basal de un rodal.....</i>	<i>97</i>
4.2.2	<i>Índice de densidad del rodal (SDI).....</i>	<i>100</i>
4.2.3	<i>Guías o diagramas de densidad para plantaciones de Balsa</i>	<i>104</i>
4.2.4	<i>Espaciamiento relativo (RS)</i>	<i>106</i>
4.2.5	<i>Límite máximo y mínimo del área basal para plantaciones de Balsa</i>	<i>110</i>
4.3	VOLUMEN DE PRODUCCIÓN PARA BALSA.....	111
4.3.1	<i>Caracterización de la forma de fuste</i>	<i>111</i>
4.3.2	<i>Factor de forma de un árbol</i>	<i>112</i>
4.4	MODELOS DE PRODUCCIÓN DE VOLÚMENES	113
4.4.1	<i>Relación entre volumen y área basal de un árbol individual de Balsa.....</i>	<i>114</i>
4.4.2	<i>Predicción explícita de volumen actual.....</i>	<i>115</i>

4.4.3	<i>Predicción de volumen futuro</i>	117
4.5	ESTIMACIÓN DEL CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE LA Balsa	119
4.5.1	<i>Calidad de sitio</i>	120
4.5.2	<i>Valoración de la calidad de sitio usando el índice de sitio</i>	122
4.6	DIÁMETRO Y ÁREA BASAL PARA RODALES NO RALEADOS	126
4.7	INCREMENTO MEDIO ANUAL (IMA)	129
 CAPÍTULO 5		
	Aprovechamiento forestal económico para la Balsa	133
5.1	VALOR DE EXPECTATIVA DE LA TIERRA (LAND EXPECTATION VALUE)	135
5.2	DEFINICIÓN Y SUPUESTO DEL LEV	138
5.3	CÁLCULO DEL LEV	139
	<i>Notación</i>	141
5.4	MÉTODO DE CÁLCULO 1: CALCULANDO EN VALOR PRESENTE DE LA PRIMERA ROTACIÓN	142
5.5	MÉTODO DE CÁLCULO 2: DEDUCIENDO EL VALOR FUTURO DE LA PRIMERA ROTACIÓN DIRECTAMENTE	144
5.6	CÁLCULO MEDIANTE MÉTODO 3: SEPARANDO LOS COSTOS E INGRESOS ANUALES	145
5.7	ROTACIÓN ÓPTIMA FINANCIERA	149
5.8	DECISIÓN DE LA ROTACIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS MARGINAL	151
5.9	EL EFECTO DE CAMBIOS DE LAS CONDICIONES ECONÓMICAS SOBRE LA ROTACIÓN ÓPTIMA FINANCIERA	155
 CAPÍTULO 6		
	Número de rotaciones de la plantación que deje el mayor rédito económico de la Balsa, bajo rendimientos decrecientes	161
6.1	ANÁLISIS BENEFICIO/COSTO DEL NÚMERO DE ROTACIONES DE LA PLANTACIÓN DE Balsa ...	167
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	171

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cuatro criterios para la evaluación del ajuste de un modelo. MRES mide las BIAS, los cuatro criterios restantes indican la precisión de un modelo (y = valores observados; \hat{y} = valores predichos; $(y - \hat{y})$ = residuos; p = número de parámetros del modelo).....	47
Tabla 2. Resumen de las características de los rodales para el primer grupo de datos ($n= 926$) y el segundo grupo ($n= 2 293$)	81
Tabla 3. Criterios de evaluación de los modelos (\hat{X}_i = Valores Predichos; X_i = Valores Observados; n = Número de observaciones)	81
Tabla 4. Clases de edades y valores de la función Weibull para seis rodales de Balsa en la zona de investigación	87
Tabla 5. Modelos empleados con sus respectivos parámetros y coeficiente de determinación para establecer la relación altura/diámetro zona de investigación	90
Tabla 6. Criterios para la evaluación de las ecuaciones generales de diámetro y altura para Balsa, zona de investigación.....	95
Tabla 7. Parámetros del modelo para la predicción del área basal para el sitio de mejores condiciones de crecimiento en la región de investigación.....	99
Tabla 8. Parámetros del modelo propuesto por Reineke para las plantaciones de Balsa, región de investigación	101
Tabla 9. Ajuste de modelos para la relación altura máxima y edad para los rodales de <i>O. pyramidale</i> en la zona de estudio	123
Tabla 10. Valores de los parámetros ajustados a la curva de máximo IMA en la zona de investigación	130
Tabla 11. Tabla de costos y retornos para una plantación de Balsa	147
Tabla 12. Valores presente y futuro de los costos e ingresos asociados con la plantación de Balsa	148

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos comunes de modelos de crecimiento: alta agregación de volumen sobre la edad para una predicción regional, modelo de rodal para la predicción del crecimiento de área basal como una función de la edad en confrontación con el área basal inicial, modelo de tamaño de clases para la predicción del movimiento de la distribución diamétrica y modelos de árboles individuales, los cuales requieren información espacial	39
Figura 2. Sistemas de integración de modelos, son empleados con la finalidad de hacer frente a la variación de los niveles de resolución de los datos disponibles, un concepto con el cual podría ser comparado con un telescopio que puede extenderse para revelar los detalles de los diferentes niveles	40
Figura 3. Dos componentes de un modelo. Arriba: el efecto del área basal de un rodal sobre el incremento del área basal de un árbol. Abajo: el efecto de competencia sobre el valor del BAL (Basal Area Large) multiplicador	42
Figura 4. Efecto del diámetro de un árbol con diámetro D (cm) y edad sobre el parámetro β_p	43
Figura 5. Un objetivo imaginario y distribución de residuos, ilustrando el concepto de precisión y BIAS. Una predicción precisa y no distorsionada es precisa.....	46
Figura 6. Visualización de los residuos. Arriba: datos observados ploteados sobre los valores predichos Abajo: residuos $(y - \hat{y})$ ploteados.....	48
Figura 7. Características fundamentales de una curva sigmoidea y su primera derivada.....	50
Figura 8. Representación gráfica de <i>O. pyramidale</i> (Cav. ex Lam.) Urb	57
Figura 9. Circulación sobre Suramérica mientras ocurren las lluvias ecuatoriales (850 hPa y 300 hPa) y ONO-ESE perfil (N-LLJ= N-NO Low Level Jet,	

Inversión) A= Alta Presión, B= Baja Presión.....	63
Figura 10. Patrones de circulación sobre Suramérica durante el periodo de sequía (850 y 300 hPa) mes de julio	64
Figura 11. Potencial de evapotranspiración para el período 2003-2010 registrados en el Tanque Tipo A y los datos predichos por el modelo desarrollado por Cañadas et al. (2013c), línea punteada roja.....	70
Figura 12. Validación del modelo desarrollado por Cañadas et al. (2013c). Contraposición de los datos observados con los datos predichos.....	70
Figura 13. Balance hídrico en diferentes estaciones de la zona de estudio. Potencial de evapotranspiración para el período 2003-2010 registrados en el Tanque Tipo A y los datos predichos por el modelo desarrollado por Cañadas et al. (2013c), línea negra representa la precipitación promedio mensual y línea roja punteada la evapotranspiración mensual.....	71
Figura 14. A la izquierda: una parcela permanente con tres fechas (tiempos) sucesivas de observación (los árboles blancos han sido removidos por aclareos). La coordenada de tiempo ha sido designada con T. A la derecha: se presenta el proceso de crecimiento de una determinada especie	74
Figura 15. A la izquierda: tres parcelas temporales con variación en edad. La coordenada x significa la posición de los árboles. El símbolo T indica la coordenada en tiempo. A la derecha: se presentan los datos altura/edad obtenidos de parcelas temporales.....	76
Figura 16. A la izquierda: tres parcelas de intervalo. Los árboles en blanco fueron raleados. A la derecha: se presenta los intervalos de los datos para el modelaje del proceso de crecimiento de la especie	78
Figura 17. Dos mediciones sucesivas para obtener el cambio de la variable de estado resultante del raleo a y el crecimiento natural b.....	79
Figura 18. Distribución espacial de las plantaciones de Balsa para la obtención del primer set de datos, zona de investigación	80

Figura 19. Distribución diamétrica de diferentes clases de edades de <i>O. pyramidale</i> de acuerdo a la función de tres parámetros de Weibull en la zona de investigación.....	87
Figura 20. Valores observados y predichos para los modelos para la Balsa en base a Korsum, Prodam, Parabólica y Freese.....	92
Figura 21. Residuos de las ecuaciones [1-4] ploteados sobre los valores predichos, zona de investigación.....	93
Figura 22. Validación de ecuaciones [1-4] utilizando datos independientes (segundo grupo de datos), <i>r= Coeficiente de correlación</i>	96
Figura 23. Representación de las densidades de plantaciones para rodales de Balsa, en la zona de investigación.....	97
Figura 24. Confrontación de datos observados y predichos del diámetro medio cuadrático para rodales de Balsa	100
Figura 25. Relación entre el número de árboles y el diámetro medio cuadrático, basado en el modelo de Reineke para los rodales de Balsa	102
Figura 26. Diagrama de densidad con base al índice de Reineke, zona de investigación	105
Figura 27. Diagrama de densidad con base a la ley de autoclareao para plantaciones de Balsa.....	106
Figura 28. Curvas derivadas de la relación edad/espaciamento relativo para las plantaciones de Balsa en el área de investigación	108
Figura 29. Relación árboles espaciamento según el modelo desarrollado para la Balsa.....	110
Figura 30. Evaluación de los valores máximo y mínimo del área basal en relación al diámetro cuadrático medio para plantaciones de Balsa	111
Figura 31. Evaluación del factor de forma en relación a la edad de las plantaciones de Balsa	112
Figura 32. Valores observados y predichos para el volumen individual.	115

Figura 33. Modelo relacionando altura máxima, volumen del rodal y densidad de plantación	119
Figura 34. Relación entre producción de volumen total y altura máxima para rodales de <i>O. pyramidale</i> . Nótese que, la densidad de los rodales se mantiene constante 300 árboles/ha.....	121
Figura 35. Clases de sitios e índices de sitio para <i>O. pyramidale</i> en la zona de investigación (altura a la edad de referencia 4 años).....	125
Figura 36. Clases de sitios y curvas de índice de sitio para el diámetro <i>O. pyramidale</i> en la zona de estudio (edad referente 4 años)	127
Figura 37. Desarrollo del diámetro medio cuadrático para diferentes densidades de plantación para el índice de sitio 34.04 m a la edad de 4 años.....	128
Figura 38. Desarrollo del diámetro medio cuadrático para diferentes índices de sitio en altura a los 4 años, con una densidad constante de 300 árboles/ha.....	129
Figura 39. Curvas de incremento medio anual en volumen ($m^3/ha/año$) por índice de sitio para <i>O. pyramidale</i> en la zona de estudio	131
Figura 40. Una serie de idénticas rotaciones de un rodal coetáneo, mostrando la fundamental asumiendo subyacente del valor de la expectativa de la tierra (LEV).....	138
Figura 41. Diagrama de flujo de caja para un ejemplo de cálculo del LEV.....	140
Figura 42. Producción y valor de expectativa de la tierra para el ejemplo propuesto en un rango de edades de rotación.....	150
Figura 43. Análisis marginal de una rotación óptima. Beneficios y costos marginales de posponer un año más la cosecha.....	159
Tabla 12. Efecto de los cambios en las variables financieras sobre la rotación óptima financiera y el LEV.....	163
Figura 44. Número de ciclos de reiteración de las plantaciones de Balsa en el mismo sitio, expresado en valores relativos.....	164
Figura 45. Almacenamiento de nutrientes en la biomasa de los bosques tropicales (verde) y bosque de	

coníferas (rojo)	164
Figura 46. Almacenamiento de nutrientes en los suelos de los bosques tropicales (verde) y bosque de coníferas (rojo)	165
Figura 47. Decrecimiento de la producción del volumen maderable de Balsa, para el mejor índice de sitio, durante 5 rotaciones consecutivas en el mismo sitio.	167
Figura 48. Radio beneficio/costo por índice de sitio para 5 rotaciones, en la zona de investigación.....	169

AUTORES

Álvaro Gustavo Cañadas López

Ph.D. en Manejo de Recursos Naturales mención Manejo Forestal, Maestría en Economía Forestal e Ing. Agrónomo. Director Estación Experimental Portoviejo (EEP), Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). Catedrático de la Universidad Andina Simón Bolívar (UASB).
alvarocaniadas@yahoo.es

Diana Yasbhet Rade Loor

Magister en Contabilidad y Auditoría Ambiental, Ingeniera Comercial. Docente Investigadora de la Carrera de Administración Pública. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, ESPAM-MFL.
yasbeth_rade15@hotmail.com

Juan Manuel Domínguez Andrade

Ph.D. en Economía Aplicada. Master en Economía. B.Sc. Economista. Profesor Titular. Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL-ESPAE, Graduate School of Management, Campus Las Peñas Malecón No 100 y Loja.
jdomingu@espol.edu.ec

Dora Isabel Murillo Hernández

Magister en Agronegocios. Economista. Subdirectora General, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP).
isabel.murillo@iniap.gob.ec

Carlos Alberto Molina Hidrovo

Magister en Producción Animal, Manejo de Sistemas Silvopastoriles. Ingeniero Zootecnista. Director Estación Experimental Tropical Pichilingue (EETP), Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP).
carlos.molina@iniap.gob.ec

PRÓLOGO

Es importante recordar que “Investigar es invertir recursos para obtener conocimiento, en tanto que innovar es invertir conocimiento para obtener valor”. Bajo esta perspectiva hoy en día, el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP apunta al incremento sustentable de la productividad del sector agropecuario, agroindustrial y forestal comercial del país, para alcanzar la seguridad y soberanía alimentaria, reducir la pobreza rural, fomentar el crecimiento económico agropecuario, potenciar el desarrollo territorial y conservar los recursos naturales, bajo los lineamientos del Plan Nacional del Buen Vivir del Gobierno Nacional.

Para el efecto, el INIAP se encuentra potenciando su trabajo de investigación y mayor cobertura en zonas de interés nacional. En la Provincia de Imbabura, Parroquia Urcuquí, se he implementado una Estación INIAP-YACHAY, la cual se constituye en una entidad élite para fortalecer la “Ciudad del Conocimiento-Yachay”. Este lugar ha sido planificado para promover la innovación tecnológica y la generación del conocimiento. De igual manera en las Islas Galápagos se está estructurando el Centro de Experimentación y Bioconocimiento Agropecuario para generar conocimiento y tecnologías de manejo integrado y sostenible de cultivos y estudios de conservación de suelos y agua.

Lo expuesto más los nuevos escenarios económicos, culturales, políticos y sociales que enfrenta la agricultura mundial obligan a repensar el rol de la investigación agrícola para solucionar problemas complejos asociados a esos nuevos desafíos y afrontar esa nueva ruralidad. Varias iniciativas de dominio mundial tales como la Cumbre de la Tierra en 1992 y el Protocolo de Kioto en 1995, han despertado el interés de las naciones para examinar el potencial de los ecosistemas de bosques y plantaciones forestales comerciales, cuya intención es proporcionar servicios ambientales a través del desarrollo de iniciativas de investigación/ desarrollo forestal y agroforestal en el marco del Mecanismo de Desarrollo Limpio y disponer de alternativas sostenibles de uso de la tierra como estrategia para reducir la pobreza y conservar los recursos naturales.

A nivel de país, aún se evidencian algunas situaciones de pobreza pese a los grandes esfuerzos que realiza el Gobierno Nacional. Este

muestra la necesidad de acrecentar una profunda reforma estructural, en especial con la situación de destrucción de los recursos naturales y la importancia que pueden tener los mismos para contribuir a la solución de esta problemática, conforme a los lineamientos de los objetivos de Desarrollo del Milenio inherentes a reducción de la pobreza y sostenibilidad del medioambiente. Por otro lado, de acuerdo al Ministerio del Ambiente del Ecuador, la superficie de bosques nativos en nuestro territorio, abarca aproximadamente 8.8 millones de hectáreas, de éstas los manglares ocupan 227 300 ha y las plantaciones forestales tan sólo representan un total de 160 000 ha. Por su difícil accesibilidad, en la actualidad únicamente 600 mil ha de bosques nativos presentan condiciones económicas para ser manejados silviculturalmente, mientras que las tierras con potencial para ser forestadas alcanzan una extensión de más de 2 millones de hectáreas, cifras que apoyadas en las bajas tasas de deforestación observadas en el Ecuador, corroboran la conclusión del MAGAP sobre la evidente potencialidad productiva forestal del Ecuador en términos de ventajas comparativas que no está siendo debidamente utilizadas. A partir del 2013, con la puesta en marcha del Programa de Incentivos para la reforestación con fines comerciales se han alcanzado resultados significativos en el campo de la repoblación forestal, registrándose un total de 48 523.9 ha en la que la Balsa se destaca como una de las especies más reforestadas a nivel nacional con un total de 8 518.0 ha. No obstante, el MAGAP (2016), resalta entre las debilidades de la producción agroforestal y silvicultural actuales, el escaso conocimiento sobre la recuperación de la inversión forestal a largo plazo y falta de formación con orientación a las ciencias forestales en el Ecuador.

El INIAP, en su Programa de Forestería, ha incorporado un enfoque de desarrollo asociado a la gestión de recursos naturales, agrupando variables y problemas íntimamente relacionados entre actividad agropecuaria, degradación de la tierra y conservación de recursos naturales. Por esta razón, el Programa establece atención a sistemas forestales y agroforestales amplios, ligados con cadenas agroindustriales y mercados, enfatizando en la búsqueda de nuevas fuentes de competitividad, rescatando las cualidades de los productos/servicios que pueden proporcionar los sistemas forestales y agroforestales.

En el Plan Estratégico de Investigación, Desarrollo e Innovación (PE I+D+i) 2014-2017 se ha previsto disponer de tecnología apropiada

para el manejo silvicultural de varias especies de prioridad en el país. En este libro se plasma la inversión de recursos del Estado Ecuatoriano (INIAP) y de la Organización Internacional de las Maderas Tropicales (ITTO) en colaboración con el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) para obtener conocimientos y desarrollo de modelos para el pronóstico del crecimiento, producción, aprovechamiento y análisis de los turnos de corta basados en evaluaciones económicas apropiados para el campo forestal. Contribuyendo todo esto a la innovación en el sector forestal, como herramientas modernas básicas que aportan para el desarrollo social, económico y ambiental del sector forestal. Por tal razón, esta obra de investigación, desarrollada, e innovada por profesionales ecuatorianos que laboran en el INIAP, ESPOL y ESPAM, contribuye al cumplimiento de las directrices de esta Cartera de Estado y del Gobierno, a fin de consolidar El Plan Nacional del Buen Vivir y el Cambio de la Matriz Productiva. Resaltando, sobre todo que esta obra migra del esquema de “proyecto” y “programa” de apoyo al productor por rubro a un enfoque territorial de gestión de procesos de desarrollo territorial rural que trasfieran poderes a los campesinos de nuestro país.

Javier Ponce Cevallos

Ministro de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca

RESUMEN

En el Ecuador se ha desarrollado muy poca investigación para afrontar técnicamente estos nuevos desafíos que propone la Constitución en el país. Aún no se evidencian estudios sobre la producción y aprovechamiento económico de plantaciones forestales de cualquier especie. No obstante, la investigación en el desarrollo de modelos regionales de rodales, como principio de innovación forestal, es un instrumento orientador para dar respuesta a los diferentes problemas del sector forestal ecuatoriano y del quehacer institucional. Adicionalmente, en el Plan Estratégico de Investigación del INIAP 2014-2017 el Programa de Forestería como objetivo de investigación, disponer de tecnología apropiada para el manejo silvicultural de varias especies forestales a través de la innovación y cuya intención es proporcionar soluciones permanentes para el sector. Dentro de este contexto, el objetivo general de la presente obra es llenar este vacío, proporcionando información vital sobre el crecimiento de *O. pyramidale* (Cav.) comúnmente conocida como Balsa, mediante la generación de modelos forestales como instrumento de innovación para el manejo silvicultural en seis provincias de la región e innovar la evaluación del aprovechamiento económico de las plantaciones forestales de esta especie, sustentado en procedimientos de economía forestal. Dos conjuntos de datos fueron empleados en esta investigación, uno para el ajuste de los modelos y el otro para la validación de los mismos. El primer conjunto fue medido en el 2009-2011 dentro del proyecto de investigación de la ITTO-INIAP-IICA en las provincias de Esmeraldas, Santo Domingo de los Tsáchilas, Los Ríos, Manabí, Santa Elena y Guayas instalando en 920 parcelas situadas en plantaciones puras, con diversas densidades, la cuales cubrieron un amplio rango de rodales forestales y diversas condiciones de sitios a lo largo de la zona de estudio. Obteniéndose información básica sobre la silvicultura de la Balsa. Distribución diamétrica enmarcadas en la función Weibull. Ecuaciones de diámetro/altura. Índice de densidad de rodales. Diagramas de densidades de plantaciones de la Balsa. Espaciamiento relativo. Líneas máximas y mínimas del área basal para plantaciones de Balsa. Caracterización del factor de forma y coeficientes mórficos. Modelos de predicción de volúmenes, establecimiento de la relación volumen/área basal, predicción explícita de volumen, predicción de volumen futuro. Calidad de sitios. Relación

diámetro/área basal para rodales no raleados. Aprovechamiento económico forestal mediante el Valor de Expectativa de la Tierra. Cálculo del valor presente de la primera rotación forestal de la Balsa. Deducción del valor futuro de la primera rotación directamente. Separación de costos e ingresos anuales. Rotación óptima financiera. Efecto de cambios de las condiciones económicas sobre la rotación financiera. Establecimiento de la rotación de la plantación que deje mayor rédito económico de la Balsa, bajo rendimientos decrecientes.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca del Ecuador, en nombre del Ing. Pablo Noboa Baquerizo, Subsecretario de Producción Forestal del MAGAP y a la Bio. Tania Villegas por facilitar el apoyo logístico y las bases de datos de las plantaciones realizadas bajo el auspicio del Programa de Incentivos Forestales como base para la validación de los modelos.

Nosotros estamos agradecidos con la Organización Internacional de Maderas Tropicales (ITTO) por el apoyo financiero, a través del Programa de Becas Freezailah, especialmente a Freezailah Che Yeom, Ph.D., quien gestionó los fondos ITTO para el levantamiento de información de campo. Igualmente a Víctor Arrúa, Ph.D., representante en Ecuador del IICA por la ayuda proporcionada para la culminación de esta obra.

Deseamos enunciar nuestro sincero agradecimiento a los dos revisores externos de esta obra, František Vilčko, Ph.D., y Christian Wehenkel, Ph.D., por su valiosa revisión del contenido, análisis crítico técnico de la obra y validación de modelos. Así como también, a Mónica Navarro-González, Ph.D., Ing. Javier Jiménez del INIAP, Ing. Emilio Barriga e Ing. Galo Fernández por su colaboración en la corrección de estilo y edición de este libro.

A Julio César Delgado Arce, Ph.D., por su continuo apoyo y convicción de la importancia del sector forestal como un factor básico para el cambio de la matriz energética en el Ecuador.

A los productores de Balsa de las seis provincias que de una u otra manera con su apoyo y disposición de sus plantaciones hicieron posible la culminación de esta obra.

CAPÍTULO 1

Introducción

El desarrollo de modelos para el pronóstico del crecimiento, producción y aprovechamiento es desde hace algunos años el tema central de investigación e innovación del sector forestal (Gadow v., 2004). Alrededor de este tema, en Europa juegan un rol importantísimo las tablas de producción basadas en modelos estándares regionales, los cuales son empleados como herramientas básicas para la innovación en la planificación y control, con la finalidad de sustentar las reglas en la producción y aprovechamiento forestal. Desde inicio del siglo XVIII perteneció el desarrollo de tablas de producción como una de las tareas más relevantes para la investigación forestal (Kramer, 1988).

Basado en la inspiración de Oetteid (1765, citado en Hui, 1998) fue publicada la primera tabla de producción en el año de 1795 para las principales especies forestales en Europa. A mediados del siglo XIX se desarrollaron una gran cantidad de tablas elaboradas, por ejemplo, por Burckhardt, Cotta, Daudt, Hayer y Hundeshagen, los cuales condujeron a la introducción del concepto de “tabla de producción forestal”.

Esta contribución significó un enorme aporte al avance de las ciencias forestales y en ese tiempo se formó el Equipo de Investigación Forestal Alemán para 1872. Esta unidad fue la encargada de la planificación de los trabajos de investigación con la finalidad de elaborar tablas de producción forestal en 1874 en Eisenach (Kramer, 1988). Al final del siglo XIX, se esquematizó la metodología para la elaboración de tablas para la producción y aprovechamiento forestal. Desde ese tiempo hasta la actualidad, ellas representan la guía principal y proporcionan valores cuantitativos de los rodales forestales en relación a la fijación de una “norma” para el manejo de un rodal. De tal manera que, las tablas de producción en combinación con la salvedad de datos sobre las formas de aclareos se constituyeron por tanto, como la unidad básica del desarrollo social, económico y ambiental de la producción forestal (Gadow v. et al., 1996).

Como concepción inicial, la modelación matemática en el campo de las ciencias forestales es un principio simple de innovación y umbral, que pasa inadvertido por la gran cantidad de datos que se generan y a la confusión de manejo de los mismos. Un buen modelo es aquel que proporciona una metáfora aprovechable, la cual se basa en parte por la dinámica de datos. Con lo cual se puede ganar enormemente una comprensión de un proceso complejo. Es importante que el modelo sea trans-

parente y represente el real desarrollo de un proceso biológico. Con las posibilidades técnicas actuales del manejo de base de datos, van creciendo la diversidad de productos (innovación) para una aplicación en la práctica del campo forestal. Modelos flexibles permiten una prospección científica en el complejo proceso del desarrollo de los ecosistemas forestales, los cuales instituyen una profunda base cognoscitiva de la dinámica de los bosques y posibilita un análisis de diferentes fenómenos que influyen e intervienen en el desarrollo real de los ecosistemas de bosques (Wenk et al., 1990; Nagel, 1991; Gadow v., 1992b; Pretzsch, 1992; Gadow v., 2004; De Miguel et al., 2014).

Para la práctica forestal, los modelos de simulación son parte de la innovación y se constituyen en un instrumento irrenunciable para la investigación en el campo de la planificación y el encuentro con la toma de decisiones sobre el manejo práctico de los bosques con bases económicas. Así, de acuerdo a la resolución espacial de los modelos de producción y aprovechamiento forestal se dejan dividir en cuatro categorías:

1. *Modelos regionales*: describe el crecimiento promedio, así como también el desarrollo de los bosques dentro de una región amplia. La resolución es extremadamente pequeña. Como ejemplo de este tipo de modelos pueden ser nombrados los enfoques de Murray y Gadow v. (1993) y Shvidenko et al. (1995).
2. *Modelo de rodal*: representa la evolución de rodales puros en reacción a diferentes condiciones de sitio y variación de tratamientos. Ejemplos de este tipo de modelos se puede ver en Clutter (1963) desarrollo de compatibilidad de crecimiento y modelos de producción; Franz (1968) simulador de crecimiento Staoet; Hradetzky (1972) modelo de un sistema integrado de tablas de producción; Heep (1987) modelo de crecimiento de rodales; Gadow v., y Hui (1993) modelos para el desarrollo de rodales y potencial de densidades de rodales; Hui y Gadow v. (1993) modelos de desarrollo de área basal de rodales y modelos de crecimiento de altura máxima Lee (1993) crecimiento y modelos de producción; Hui (1995) modelos de desarrollo de rodales después del raleo.
3. *Modelo de árbol representativo*: relata el desarrollo de un único árbol como representante de una población de individuos con iguales características. Ejemplos, se puede citar a Preu ner (1974) modelo de desarrollo de la distribución diamétrica; Römisch (1983) modelo matemático para la simulación del crecimiento y

raleo; Geroid (1990) distribución y simulador de clasificación de fuste; Veso y Nagel (1991) modelo de curvas de altura; Lemm (1991) modelo de la dinámica de las empresas forestales; Hui y Gadow v. (1993) unidad de curvas de altura.

4. *Modelo de árbol individual*: se refiere al incremento de un árbol individual en dependencia de sus vecinos más cercanos. Ejemplos de estos se encuentra en Ek y Monserud (1974) desarrollo de la orientación de árbol individual, modelo de crecimiento dependiente de la distancia, Sloboda y Pfreundt (1989); Sterba (1990) modelo de procesos ecológicos; Pretzch (1992) modelo de crecimiento para rodales puros y mezclados.

Por otro lado, en Ecuador el Ministerio del Ambiente, MAE (2008) enfatiza que la superficie de bosques nativos en el país abarca aproximadamente 8,8 millones de hectáreas; de éstas, los manglares ocupan 227 300 ha y actualmente por su difícil accesibilidad solo 600 mil ha de bosques nativos presentan condiciones económicas para ser manejados silviculturalmente; mientras que las tierras con potencial para ser forestadas alcanzan una extensión de más de 2 millones de hectáreas y las plantaciones forestales tan sólo representan un total de 160 000 ha. Además en las bajas tasas de deforestación observadas en el Ecuador, por ejemplo en la reserva Faunística Cuyabeno; cantón Loreto; Reserva de Biósfera Sumaco; Territorio Shuar Arutam y Bosque Protector Chongón Colonche (Cañadas y Rade, 2013; Cañadas et al., 2013a) son factores preponderantes para impulsar la potencialidad productiva forestal del Ecuador en términos de ventajas comparativas que no está siendo debidamente utilizado (MAGAP, 2008).

En el 2013, el MAGAP diseñó el Programa de Incentivos Forestales, abriendo para ese año un nuevo sendero para la reforestación en el país, con una meta de 20 000 ha, de plantaciones en el primer año y a partir de ahí se plantea lograr un crecimiento sostenido de 25 000 ha anuales durante los cuatro años siguientes hasta concretar 120 000 ha. Mediante la resolución N°. 002, suscrita el 14 de enero del 2013, el Subsecretario de Producción Forestal para el año fiscal 2013 aprueba la plantación de especies forestales nativas y exóticas, contemplando a *Ochroma pyramidale* (Cav.) como una especie recomendada para la Costa y Amazonía (MAGAP, 2013). Este incentivo se fundamenta en las exportaciones de madera de Balsa del Ecuador, las cuales se han incre-

mentado en 2.5 veces para el período comprendido entre 1997/2014, de acuerdo a las estadísticas del BCE (2014). En concordancia en el MAGAP (2016) se ha registrado 48 532.9 ha de plantaciones forestales, en las que destacan como las especies más reforestadas a nivel nacional las siguientes: Teca 19 601.7 ha, Melina 10 467.1 ha, Balsa 8 518.0 ha, Pino 4 733.1 ha, el resto corresponde a otras especies como Laurel, Chunchu, Aguacate, Pachaco, Jacaranda, Caucho, Aliso, Algarrobo, Fernán Sánchez, Neem y Ciprés con 3 845.8 ha.

Sin embargo, la selección de especies arbóreas nativas para el establecimiento de plantaciones comerciales es un continuo desafío y oportunidad para la silvicultura tropical (Cañadas, 1983; Cañadas y Roca, 2011). No obstante de esto, no existe información sobre sus requerimientos silviculturales, aptitud ecológica y viabilidad económica, lo cual conduce a una gran limitación del uso de ellas (Lamprecht, 1986; Butterfield, 1995; Whisnie et al., 2007).

La Balsa (*O. pyramidale*) es una especie importante desde el punto de vista ecológico y económico, contribuye al mejoramiento de la calidad de los suelos (Martin et al., 2010), es empleada en la rehabilitación de áreas degradadas así como en proyectos de reforestación (Douterlungne y Thomas, 2013). Las plantaciones de Balsa se constituyen en una prometedora opción alrededor del mundo, debido a su crecimiento rápido y ligereza de su madera, condiciones apropiadas para la producción de diversos productos (Midgley et al., 2010). Esta especie puede también jugar un importante rol en la diversificación de la producción forestal para sistemas de producción adaptadas a los pequeños productores (Haggar et al., 1998).

En el Ecuador se ha desarrollado muy poca investigación para afrontar técnicamente estos nuevos desafíos que propone la Constitución en el país. Aún no se evidencian estudios sobre la producción y aprovechamiento económico de plantaciones forestales de cualquier especie. No obstante, la investigación en el desarrollo de modelos regionales de rodales, como principio de innovación forestal, es un instrumento orientador para dar respuesta a los diferentes problemas del sector forestal ecuatoriano y del quehacer institucional. Adicionalmente, en el Plan Estratégico de Investigación del INIAP 2014-2017 el Programa de Forestería como objetivo de investigación, se ha planteado disponer

de tecnología apropiada para el manejo silvicultural de varias especies forestales a través de la innovación y cuya intención es proporcionar soluciones permanentes para el sector (INIAP, 2014). Dentro de este contexto, el objetivo general de la presente obra es llenar este vacío, proporcionando información vital sobre el crecimiento de *O. pyramidale* (Cav.) comúnmente conocida como Balsa, mediante la generación de modelos forestales como instrumento de innovación para el manejo silvicultural en seis provincias de la región e innovar la evaluación del aprovechamiento económico de las plantaciones forestales de esta especie, sustentado en procedimientos de economía forestal.

CAPÍTULO 2

Modelos forestales

Como corolario se puede anotar que en nuestros países tropicales se cree que el recurso bosque es abundante y solamente está esperando ser explotado. La atención del sector forestal en el Ecuador se ha centralizado mayormente sobre la tala y utilización del recurso bosque más que sobre la plantación, crecimiento y aprovechamiento de los mismos (Cañadas y Vera, 2011). Desde este punto de vista, la tendencia en nuestro país es considerar a la plantación de árboles como un arte, sin prestar atención a sus costos involucrados y sin preocuparse aún de cuál va a ser el futuro preciso de su utilización (Cañadas, 2005). En consecuencia, los productos forestales a diferencia de otras materias primas, nunca se planifican para satisfacer las necesidades de una industria cada vez más creciente. Sino simplemente se establecen plantaciones, amparadas en el supuesto de que de algún modo estas van a ser explotadas, aprovechadas y utilizadas (Cañadas, 2007).

La elección de especies debe basarse en las propiedades más adecuados para satisfacer los futuros requerimientos de la industria, así como mantener un costo de producción bajo (Cañadas, 2007). Las plantaciones forestales con especies de rápido crecimiento provenientes de regeneración natural, se constituyen en una saludable proposición económica (Cañadas, 1983).

2.1 DESARROLLO DE MODELOS FORESTALES

En una tierra forestal sin manejo, el bosque sigue su desarrollo de acuerdo a las fases de sucesión y crecimiento natural sin disturbios, este proceso que puede ser interrumpido por pérdidas intermedias o daños de árboles causados por los vientos, fuego u otros eventos naturales (Gadow v., y Hui, 1998). Por otro lado, en un bosque manejado, el evento periódico más importante de disturbio son las operaciones de aclareos, los cuales a menudo son llevados a cabo con intervalos regulares y usualmente tienen un efecto en la futura evolución del recurso forestal (Gadow v., 1993). Así, un modelo de desarrollo forestal realista incluye ambos eventos, el de crecimiento natural y los aclareos en su análisis (Gadow v., y Hui, 1998; Gadow v., 2004).

La clave de un manejo forestal sostenible es un apropiado entendimiento de los procesos de crecimiento. Uno de los objetivos del modelaje del desarrollo forestal es proveer de herramientas que permitan a los

técnicos en manejo de recursos naturales comparar las alternativas de tratamientos silviculturales, acompañado de un análisis económico forestal (Gadow v., 1987). Por tanto, los profesionales forestales e ingenieros en manejo de recursos naturales necesitan anticipar las consecuencias de las diversas operaciones de un evento en particular (aclareos o desastres naturales sobre las masas boscosas, plagas, etc.).

En la mayoría de casos, el total de volumen de madera y, por ende, la captación de carbono es un procedimiento que tiene sus limitaciones en la cuantificación del crecimiento y la producción o los cambios causados por las operaciones de aclareos (Gadow v., 1993). La producción en términos simples es definida por las dimensiones, la calidad de los atributos de fuste cosechados y la estimación de la obtención de un volumen maderable. Estas condiciones son el punto central de las ciencias que abordan el crecimiento, producción y aprovechamiento forestal (Gadow v., 1992a).

La modelación del crecimiento es también un prerrequisito esencial para evaluar las consecuencias de una acción particular en el manejo y futuro desarrollo de un importante recurso natural, en este caso de los ecosistemas forestales. Los modelos de crecimiento pueden proveer información clave en relación a los cambios dinámicos, los cuales son una de las características menos tangibles de un bosque (Gadow v., 2004). Esto se enmarca intrínsecamente en los conceptos de estabilidad, resiliencia y resistencia de un ambiente en particular afectado por procesos de contaminación ambiental o los valores estéticos que se le dan a la estructura forestal.

En un tiempo, donde predominan sistemas de selección de árboles individuales y manejos forestales disetáneo, es necesario resaltar que, una gran proporción del mundo forestal es caracterizado por masas forestales coetáneas (Gadow v., 2003). Esto no quiere decir que, un bosque coetáneo necesariamente siempre tiene características de plantación simétricas en el espaciamiento entre columnas e hileras. Este tipo de bosque, puede tener variaciones genéticas que le permiten a los individuos a tolerar mejor a la sombra, lo cual hace que domine y suprima a otros individuos de la misma edad. Por otro lado, un bosque con una mezcla de especies arbóreas, representa a diferentes ritmos de crecimiento específico y tolerancia a la sombra (Velasco et al., 2016).

Un bosque coetáneo incluye una población regular de árboles con similares atributos, donde un simple modelo pretende describir adecuadamente un proceso. Un bosque disetáneo puede incluir diferentes dimensiones de árboles y patrones de crecimiento. Por lo que el resultado estructural presenta variaciones. De ahí que es un desafío, el poder representar la evaluación de la complejidad de los bosques disetáneos mediante métodos sofisticados del modelaje forestal (Gadow v., 1997).

La técnica más apropiada para la modelación forestal es la determinación de los niveles de detalles a escala de los datos disponibles y el nivel de resolución de la predicción forestal requerida (Gadow v., 1993). De tal manera, un modelo de rodal será utilizado, si los valores promedio de la población y el sitio en referencia de la información tales como el área basal están disponible. Un modelo de árbol individual es apropiado, cuando atributos como el tamaño del mismo y su distribución espacial mediante coordenadas de sus vecinos inmediatos han sido determinados (Gadow v., 1987).

La mayoría de modelos forestales de crecimiento son desarrollados en la base del levantamiento de datos empíricos provenientes de ensayos en parcelas. Este tipo de parcelas suelen ser distribuidas de acuerdo a una base geoestadística (Gadow v., 2004) y se constituyen en los cimientos para la elaboración de modelos forestales.

2.2 TIPOS DE MODELOS FORESTALES

Los modelos forestales representan la experimentación promedio de cómo los árboles crecen y cómo la estructura forestal se va modificando. El nivel de detalle de estos modelos difiere grandemente. Así, los modelos forestales se alimentan de los detalles morfológicos como la ramificación, forma de fuste y crecimiento de raíces (Gadow v., 1987). Los modelos regionales de producción y de crecimiento de rodales producen una información agregada sobre el desarrollo de una población de árboles, las cuales deben ser interpretadas bajo diversas condiciones agroecológicas y modificaciones intermedias de los atributos de un rodal, a través de la intervención humana o de otros factores de disturbios (Cañadas, 1983).

Un modelo forestal permite hacer una razonable predicción sobre el crecimiento de los árboles y el desarrollo de un rodal. Esto podría ser

alcanzado de diferentes maneras, dependiendo de las prioridades del usuario (Gadow v., y Hui, 1998). Los modelos de producción de madera están únicamente interesados con la parte comercial relevante de un árbol. La habilidad de simular el desarrollo de una rama de un árbol individual podría ser esclarecedor o edificante para un usuario del modelo, pero vital para otro (Gadow v., 1997). El propósito de muchos modelos forestales es elaborar un sistema comprensivo y lo suficientemente profundo que explique los procesos elementales del crecimiento de los árboles; esto se convierte en información relevante sobre la producción comercial, la cual es muy bien recibida por los productores e industria forestal (Gadow v., 2004).

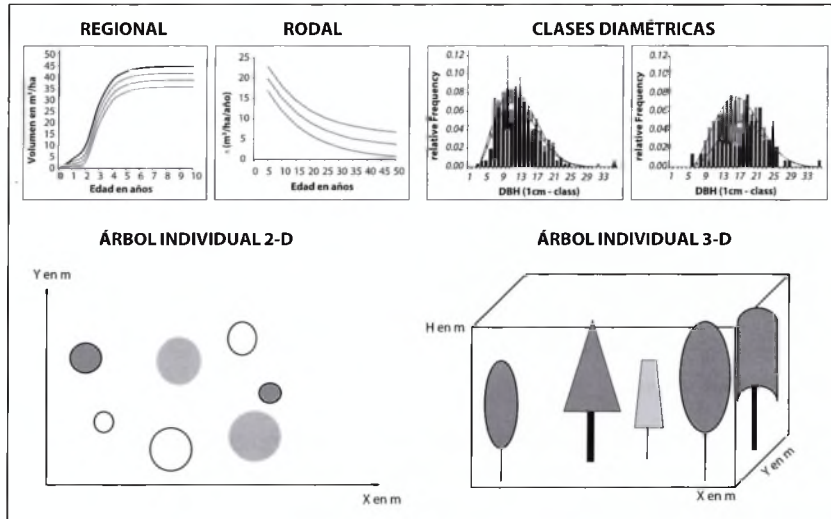
La mayoría de modelos forestales han sido desarrollados para propósitos específicos. Ellos difieren entre sí, en consideración de la generalidad, la aplicabilidad del concepto para un rango de circunstancias y la precisión, que es el grado de exactitud en las predicciones (Gadow v., 2004). Una alta precisión es a menudo alcanzada a costa de una baja generalidad. Una jerarquía común de la mayoría de tipos de modelos se muestra en la Figura 1. A lo largo de los tipos comunes de modelos de crecimiento se está agregando altamente el volumen de madera en relación a la edad en los modelos de predicción regional.

Modelos de rodales para la predicción del crecimiento del área basal como una función de la edad y el área basal inicial son posibles si se cuentan con dos mediciones consecutivas. Los modelos de clases de tamaño independientes de la distancia entre árboles para predecir el desplazamiento de la distribución de diámetros y modelos de árboles individuales dependientes de la distancia entre árboles. Pudiendo ser desarrollados, si se dispone de información espacial en dos o tres dimensiones (Gadow v., 2003).

Modelos regionales de producción están representados por una ecuación de alta añadidura entre producción sobre la edad, ellos son empleados como un recurso de predicción, especialmente para pronosticar el desarrollo de una distribución dada de clases con la edad, en respuesta a una serie de niveles de aprovechamiento forestal. Por consiguiente los modelos de crecimiento de rodales, requieren de una mayor información y por ende entregan un elevado nivel de detalles, incluyendo

estimaciones de la altura dominante, área basal y fustes por hectárea (Gadow v., 1997).

Figura 1. Tipos comunes de modelos de crecimiento: alta agregación de volumen sobre la edad para una predicción regional, modelo de rodal para la predicción del crecimiento de área basal como una función de la edad en confrontación con el área basal inicial, modelo de tamaño de clases para la predicción del movimiento de la distribución diamétrica y modelos de árboles individuales, los cuales requieren información espacial.



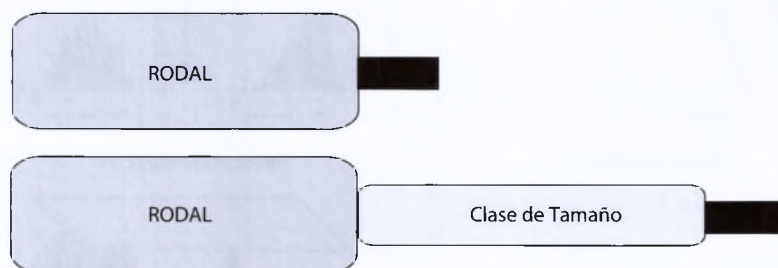
Fuente: Gadow v., 2003.

La unidad básica para el modelamiento de un patrón de clase de tamaño, es una suplantación representativa de un número de árboles dentro de una clase de tamaño o conglomerado de árboles. Los modelos de clase de tamaño, requieren incluso de mayor detalle de información que los modelos de rodales proporcionan. Ellos son probablemente el tipo más común de modelo empleado en la simulación de alternativas de programas de producción y aprovechamiento forestal (Gadow v., y Hui, 1998).

Los modelos de árbol individual emplea información sobre la posición, tamaño específico de los árboles y de ellos con su inmediata vecindad. Así la información espacial podría estar disponible en dos o tres dimensiones. Los modelos espaciales en tres dimensiones son utilizados para cuantificar la cantidad de efectos y constricciones del espacio de crecimiento, causado por la competencia de la vecindad de los árboles

en relación con el árbol referente (Gadow v., 2003; 2004). La habilidad de aprovechar la disponibilidad de datos a diferentes niveles de resolución, empleando diversas técnicas dentro de una integración con modelos ambientales es comparable al empleo de un telescopio, con el cual se puede expandir para mostrar los detalles a diferentes niveles.

Figura 2. Sistemas de integración de modelos, son empleados con la finalidad de hacer frente a la variación de los niveles de resolución de los datos disponibles, un concepto con el cual podría ser comparado con un telescopio que puede extenderse para revelar los detalles de los diferentes niveles.



Fuente: Gadow v., 2004.

Por tanto, la implicación práctica de este concepto es cuando se realiza en sistemas de ecuaciones, las mismas que enlazan modelos a nivel de rodal y clases de tamaño, como se esquematiza en la Figura 2.

Un requerimiento esencial del acercamiento de la idea del telescopio es la compatibilidad, es decir que los diferentes modelos a diversas resoluciones deberían producir resultados similares (Burkhart, 1987). Obviamente, el grado de detalle de la información que proporciona, generalmente depende del detalle de los datos. No obstante, esto no siempre es así de fácil de integrar a los modelos con diferentes resoluciones, en los cuales el sistema es compatible. Un acercamiento en escala es asumiendo que, a menor detalle de información de los altos niveles de jerarquía es más segura la información que proporciona. Igualmente, un modelo de rodal es considerablemente más fidedigno que un modelo de clase de tamaño y la compatibilidad podría ser alcanzada mediante restricciones específicas, las cuales son impuestas por el alto nivel jerárquico de estos modelos (Gadow v., 2003).

Los modelos de alta resolución a un bajo nivel de resolución están restringidos para producir resultados en conformidad con los niveles

de alta o baja resolución. Varias técnicas son usadas para obtener esta compatibilidad (Gadow v., 2004).

2.3 VALORACIÓN DE MODELOS FORESTALES

Los modelos forestales son aplicados para una diversidad de propósitos. Ellos son requeridos para la predicción del desarrollo de una comprensión de varios rodales forestales, atributos de sitios y regímenes silviculturales. De esta manera pueden ser aprovechados para una actualización de la información almacenada en una base de datos y generar información que sean capaces de evaluar regímenes de alternativas silviculturales.

Las predicciones irreales o distorsionadas deben ser especialmente observadas, debido a que los ajustes de los modelos desarrollos podrían estar proporcionando información no fidedigna. De ahí que, la evaluación es una importante parte de la modelación y los diferentes enfoques de los modelos incluyen una examinación cualitativa como cuantitativa de los mismos (Gadow v., 2004).

2.3.1 Evaluación cualitativa

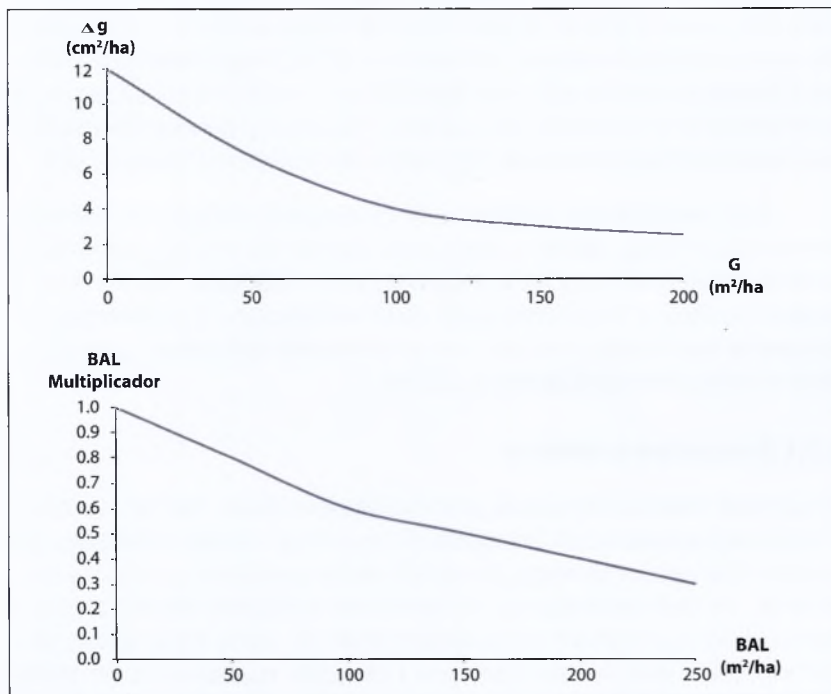
El principal objetivo de la evaluación cualitativa de un modelo de crecimiento es la examinación del ajuste de los componentes individuales del modelo. Consecuentemente, el modelo en conjunto es lógicamente consistente, en concordancia con los procesos biológicos elementales que representa y que responde a las expectativas de varios tratamientos silviculturales. Un ejemplo que ilustra una evaluación cualitativa de un modelo de área basal de un árbol individual para *Pinus palustris* fue presentado por Quicke et al. (1994). El crecimiento del área basal de un árbol (Δ_g) es exhibido aplicando la siguiente ecuación general:

$$\Delta_g = (BA \text{ submodelo}) * (BAL \text{ multiplicador}) * (\text{diámetro} - \text{edad del multiplicador})$$

Los subcomponentes individuales fueron ajustados simultáneamente a los datos, con esto minimizan el error general del modelo. El término Δ_g del modelo describe el incremento del área basal como una función de la misma en un rodal: $\Delta_g = 11.52 * \exp^{-0.0897 * G^{0.5}}$, asumiendo una edad constante, el diámetro y la competencia de la posición de los árboles. Un incremento en el crecimiento del área basal individual es predecible

con un decrecimiento del área basal de un rodal como se describe en la parte de arriba de la Figura 3.

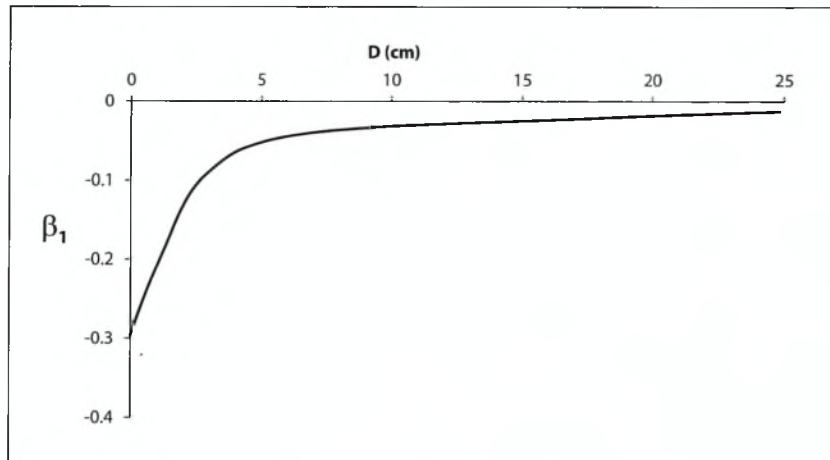
Figura 3. Dos componentes de un modelo. Arriba: el efecto del área basal de un rodal sobre el incremento del área basal de un árbol. Abajo: el efecto de competencia sobre el valor del *BAL* (Basal Area Large) multiplicador.



Fuente: Quicke et al. 1994.

Mientras el primer componente del modelo describe el efecto de la densidad general, el segundo está concerniente con la posición competitiva de los árboles dentro de la población de un rodal. Esto es expresado como la suma del área basal de todos los árboles de mayor envergadura que el árbol objetivo *BAL* (Mayor Área Basal). El *BAL* multiplicador es una función, la cual se expresa de la siguiente manera: $\exp^{0.00495 \cdot \text{BAL}}$ y se puede asumir valores entre cero y uno, como se muestra en la siguiente Figura 4.

Figura 4. Efecto del diámetro de un árbol con diámetro D (cm) y edad sobre el parámetro β_1 .



Fuente: Quicke et al. 1994.

En términos experimentales, el crecimiento del área basal puede ser desdoblado en dos elementos. El multiplicador de edad = $\exp\beta_1 \cdot \text{edad}$ y en términos de diámetro $\beta_1 = 0.3455 * [1 - \exp^{-0.5566 \cdot D}] - 0.303$. El parámetro β_1 determina el grado, al cual el multiplicador de edad se acerque a cero (Figura 4).

El tercer coeficiente (-0.303) determina la intercepción con la coordenada X. La asíntota superior es definida por la diferencia entre el primero y tercer coeficiente (0.3455, -0.303), mientras que el segundo coeficiente describe el grado al cual esta asíntota es alcanzada. Como se puede esperar, el multiplicador d -edad decrece con el incremento de la edad del rodal y disminuye el diámetro del árbol, con G y BAL , cuando estos parámetros permanecen a un nivel constante. Por consiguiente, no hay un potencial predefinido de la función de crecimiento sobre el modelo. Esto se traduce en la robustez del modelo que añade consistencia y ofrece una reducción del error global. Es de fundamental importancia, la evaluación de la performance del modelo involucrando árboles provenientes de otros sitios (Gadow v., 2004).

La habilidad del modelo para simular razonablemente el incremento de biomasa para árboles bajo un crecimiento libre fue probada dentro

de una condición de crecimiento abierto con igual área basal de un rodal y *BAL* igual a cero. Una prueba que implique una comparación entre la simulación del desarrollo del diámetro predicho con el observado provenientes de 81 árboles de crecimiento abierto mostró que, el modelo fue idóneo para proveer una buena aproximación del potencial de crecimiento. De tal manera que, la lógica específica del modelo se basó en el rango máximo de crecimiento resultante de la interacción entre el área basal, edad, diámetro del rodal con el *BAL* multiplicador igual a 1 para los árboles de grandes dimensiones (Gadow v., y Hui, 1998, Gadow v., 2003; 2004).

La evaluación cualitativa examina, si la conducta del modelo fuera del rango de la disponibilidad de datos es razonable, si los signos, los valores de los coeficientes son plausibles y el modelo corresponde a un proceso biológico específico. Si representa a los flujos de energía y nutrientes acordes con los principios básicos fisiológicos y con esto se logra asegurar un confiable flujo de masa y energía (Gadow v., y Hui, 1998).

Por lo expuesto, el crecimiento no puede ser mayor que la producción fotosintética y eficiencia de conversión, lo que permite la disponibilidad de nutrientes de un sitio forestal determinado. En tanto que, en referencia a la evaluación Bossel (1994) señaló que, la dependencia de los diferentes procesos sobre los parámetros ambientales (temperatura, radiación, niveles de nutrientes) es expresada en proporción directa de las limitaciones ambientales y la detección de este tipo de variaciones es un punto fuerte de un modelo.

La evaluación minuciosa de la calidad de un modelo es la apropiada medición para asegurar que la formulación y simulación de varios procesos no sea demasiado simple o inadecuado. Al contrario, haciendo un modelo muy complejo, requiere de mayor cantidad de parámetros, causando el incremento del número de interacciones adicionales entre los procesos individuales (Gadow v., 1987). Por ello grandes detalles implican una mejora, el entendimiento y la descripción realística de los procesos, pero esto es alcanzado a costo del aumento de la complejidad del modelo. Por lo que es difícil aceptar que un modelo no puede ser evaluado de tal manera que el nivel apropiado de complejidad sea definido por la habilidad de presentar una estimación comprensible del mismo (Gadow v., 1992a; Gadow v. 1993; 1997).

2.3.2 Evaluación cuantitativa

Una evaluación cuantitativa de un modelo de crecimiento podría incluir inclusive una caracterización de los errores en términos de su magnitud y distribución de residuos. Probar las BIAS (término relacionado a la caracterización de la calidad de datos y se refiere a la localización de estos en correspondencia al valor de referencia), precisión y análisis de sensibilidad para identificar aquellos componentes que tienen una gran influencia sobre los predictores del modelo (Vanclay, 1994). Una asunción de una regresión lineal estándar es que, el error azarizado ε de un modelo $Y = \alpha + \beta X + \varepsilon$ es *aditivo*, independientemente y normalmente distribuido con un promedio cero y con una varianza desconocida pero constante. Esta asunción representa un ideal para la evaluación cuantitativa de modelos forestales, pero no siempre esta regla es seguida.

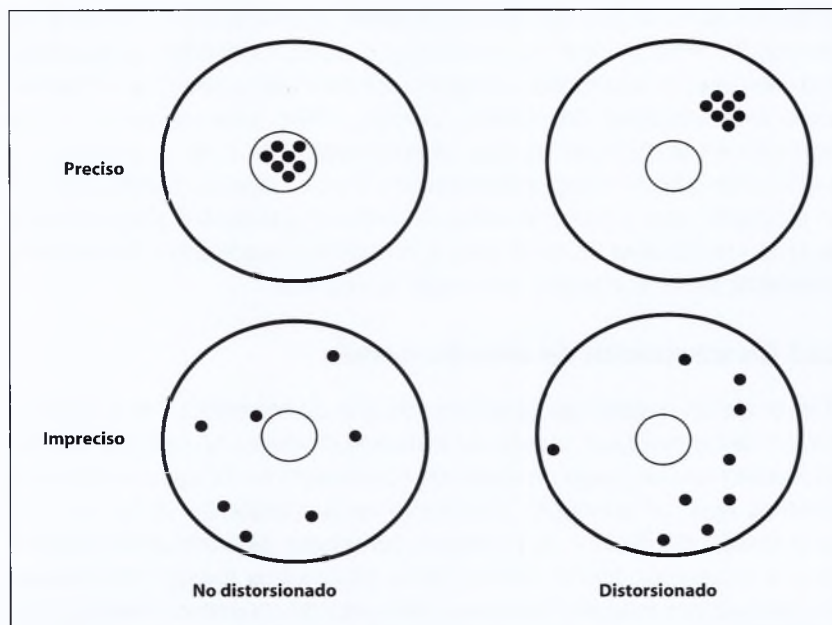
2.3.3 Caracterización del error del modelo

El error de un modelo es caracterizado por su magnitud y por la distribución de los residuos, puede ser evaluado mediante la comparación de un modelo con un juego de datos de observaciones independientes. Así tenemos que, un concepto importante en la evaluación de un modelo es la noción de BIAS y de precisión, las cuales determinan la fidelidad de una predicción (Bortz, 2005). Estos parámetros fueron introducidos por ejemplo por Freese (1960) en el contexto del muestreo forestal y son ilustrados en la Figura 5. El promedio de los residuos de la raíz cuadrada del error medio es una medida del promedio de las BIAS de un modelo. Describe la magnitud de direccionamiento, por ejemplo el tamaño de una sobre y sub estimación del modelo.

Los índices de criterios de precisión son el promedio absoluto de los residuos (o promedio absoluto de la discrepancia), la raíz cuadrada de error promedio, la eficiencia de un modelo y el radio de la varianza. El residuo absoluto promedio mide el promedio del error asociado con la simple predicción, por lo que la raíz cuadrada del error medio cuadrático se basa sobre la suma de cuadrados, el cual proporciona más peso a la mayor discrepancia entre datos observados y predichos por el modelo. Este índice de eficiencia del modelo es análogo al r^2 y proporciona una medida relativa de la performance del modelo. El radio de varianza medi-

da sobre la varianza estimada como una proporción de los datos observados (Pretzsch y urský, 2001; Cañadas et al., 2012).

Figura 5. Un objetivo imaginario y distribución de residuos, ilustrando el concepto de precisión y BIAS. Una predicción precisa y no distorsionada es precisa.



Fuente: Cañadas et al. 2012.

Los criterios residuo, promedio, raíz cuadrada del error promedio medio cuadrático, eficiencia del modelo y radio de varianza podrían ser expresados como valores relativos, los cuales son más reveladores, cuando se comparan mediciones con diferentes unidades de medida. Obviamente, el número de índices que pueden ser aconsejados para evaluar la performance de un modelo es ilimitada. Hay una cantidad de posibilidades para medir la precisión de un modelo y es muy difícil en la práctica clasificar a los diferentes índices. Debido principalmente a que, ellos miden diferentes criterios. Un buen índice es aquel que entrega valores interpretables y son referenciales, proporcionando valores máximos, mínimos u óptimos de acuerdo a las BIAS, como se muestra en la Tabla 1.

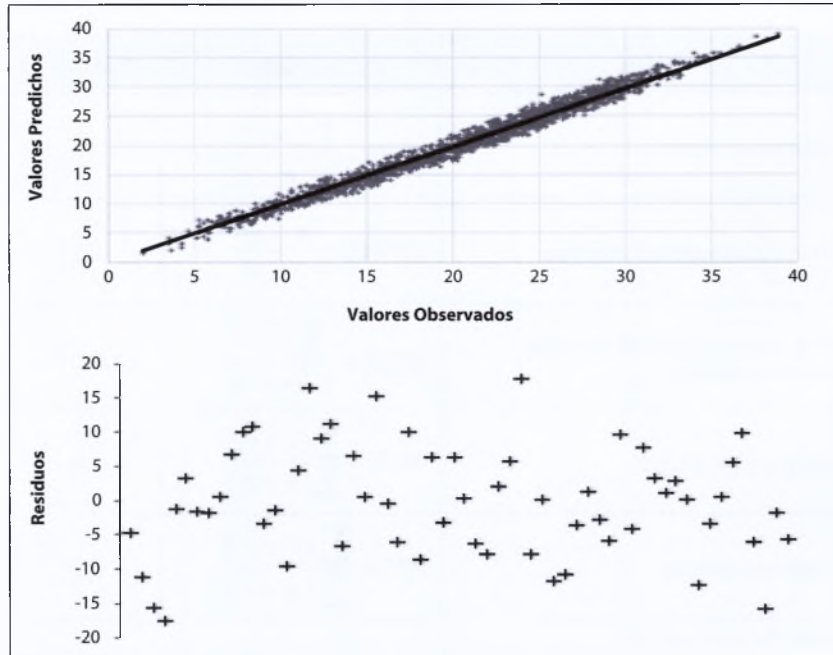
Tabla 1. Cuatro criterios para la evaluación del ajuste de un modelo. MRES mide las BIAS, los cuatro criterios restantes indican la precisión de un modelo (y = valores observados; γ = valores predichos; $(y-\gamma)$ = residuos; p = número de parámetros del modelo).

Criterio	Fórmula	Valor ideal
Residuo promedio	$MRES = \frac{\sum (y_i - \gamma_i)}{n}$	0
Promedio absoluto de residuos	$AMRES = \frac{\sum y_i - \gamma_i }{n}$	0
Raíz cuadrada del error promedio medio cuadrático	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \gamma_i)^2}{n-1-p}}$	0
Eficiencia del modelo	$MEF = \frac{\sum (y_i - \gamma_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$	0
Radio de varianza	$RV = \frac{\sum (\gamma_i - \bar{\gamma})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$	1

Fuente: Cañadas et al. 2014.

Uno de los procedimientos más comúnmente empleados para la evaluación de un modelo es el análisis de los residuos (lo observado menos lo predicho) para todas las posibles combinaciones. La meta es detectar alguna dependencia o patrones que indiquen una sistemática subordinación. Los valores observados podrían ser graficados sobre los datos predichos, o los residuos sobre los datos observados, criterios que son expuestos en la Figura 6. Un objetivo importante de la evaluación de un modelo es la detección de la dependencia del error. Los errores podrían influenciar la proyección del período, edad de un rodal o la altura de los árboles. El criterio promedio de residuos (para evaluar las BIAS) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (para evaluar la precisión) fueron empleados por Trincado y Gadov v. (1996) para evaluar la precisión de modelos desarrollados para determinar un modelo de ahusamiento en Chile.

Figura 6. Visualización de los residuos. Arriba: datos observados ploteados sobre los valores predichos Abajo: residuos ($y - \hat{y}$) ploteados.



Elaborado por: Autores.

2.4 ECUACIONES DE CRECIMIENTO FORESTAL

2.4.1 Función de crecimiento

En el campo forestal las funciones o ecuaciones de crecimiento describen los cambios estructurales que se notan en un organismo o población con el transcurso de la edad. El desarrollo biológico, aglutina una serie de combinaciones de factores complejos, los cuales pueden resumirse de una forma particularmente simple, cuando un organismo o población analizada se trata de un árbol o un rodal forestal.

De acuerdo a Zeide (1993) en el caso del reino vegetal su crecimiento es el resultado de la interacción entre dos factores opuestos. Por un lado, está la tendencia intrínseca hacia un crecimiento ilimitado, que

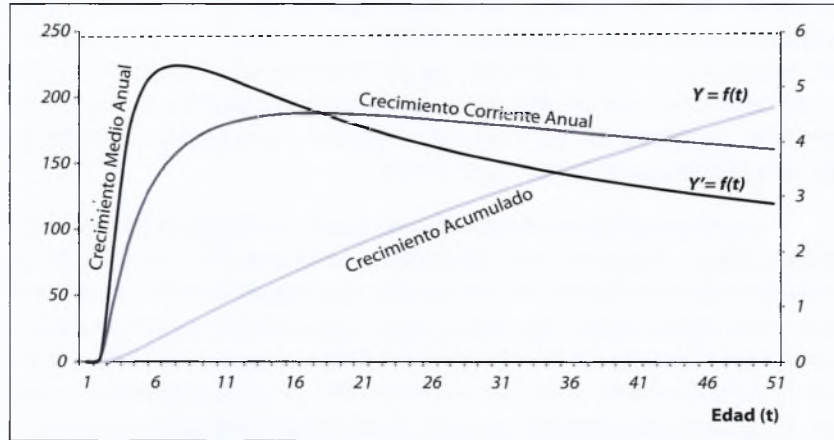
depende del potencial biótico del individuo, de su capacidad fotosintética, de las características de suelo, habilidad de tomar nutrientes, de los procesos catabólicos y anabólicos entre otros. Por el otro, se encuentran las limitaciones en el crecimiento de un individuo en confrontación con su entorno en el que se desarrolla el mismo (competencia, limitación de recursos, procesos de fotosintéticos y estrés) y su propia condición de ser vivo (estado juvenil y envejecimiento).

Los procesos de evolución del crecimiento forestal en relación a su tamaño (altura, diámetro, área basimétrica, volumen) de un árbol o de un rodal forestal en el transcurso de su vida se pueden describir en base a una curva, denominada sigmoidea. Cuyo esquema se mantiene estable, independientemente de la especie que se trate o de los cambios y fluctuaciones del entorno en el que se desarrolle. La curva sigmoidea posee dos características básicas, que provienen de la interacción de dos elementos opuestos que limitan el crecimiento, el cual se representa en un punto de inflexión y una asíntota horizontal.

Cañadas y Roca (2011) representaron en la Figura 7, una curva sigmoidea para el crecimiento *Schizolobium parahybum* en condiciones de Bosque seco Tropical. La curva sigmoidea simboliza la evolución con el pasar del tiempo del volumen de un árbol o un rodal, junto a su primera derivada, que corresponde al crecimiento corriente anual. En la Figura 7, se puede observar como en la fase inicial del crecimiento, el peso del factor positivo es mucho mayor que las restricciones o factores limitantes, debido a que el desarrollo se incrementa ostensiblemente, dando lugar a una curva de progreso cóncava hacia arriba.

En la medida en la que pasa el tiempo, las restricciones de recursos van incrementándose, de tal manera que resulta en un cambio en la trayectoria de la curva de desarrollo de un rodal, produciéndose un punto de inflexión, que corresponden al crecimiento corriente máximo. Desde ahí en adelante y como consecuencia de las restricciones, los incrementos comienzan a detenerse, dando como respuesta que la curva de evolución vaya disminuyendo paulatinamente y la de desarrollo total se vuelva cada vez más lenta. Esta tendencia se mantiene en el tiempo, hasta que finalmente los factores favorables y de oposición se equiparan, con lo que el crecimiento se estabiliza en el tamaño final del individuo, hecho que corresponde matemáticamente con la asíntota horizontal.

Figura 7. Características fundamentales de una curva sigmoidea y su primera derivada.



Fuente: Cañadas y Roca, 2011.

Es necesario resaltar que, la curva sigmoidea representa el desarrollo de cualquier variable como el diámetro, la altura, el área basimétrica y el volumen, entendiendo como el incremento del tamaño de un individuo en un periodo de tiempo establecido. Expresándose este mediante la representación de la curva de crecimiento corriente anual, que se deriva de la sigmoidea (o forma diferencial de la función de crecimiento). No obstante, la mayoría de estudios de progresión buscan modelizar la curva sigmoidea, ya que esta corresponde al crecimiento acumulado del volumen o tamaño de un individuo o rodal (o forma integral de la función de crecimiento).

2.4.2 Utilidad de las funciones de crecimiento en el campo forestal

El empleo de las ecuaciones de crecimiento en el campo de las ciencias forestales tienen varias aplicaciones que se sintetizan en:

- La atención más simple es describir el desarrollo o crecimiento de cualquier variable de un árbol o rodal estudiado, tales como altura, diámetro, área basimétrica, volumen, etc.
- Las curvas de calidad de estación o índices de sitio se basan en el estudio del desarrollo en el tiempo de las alturas dominantes de una masa forestal, que permite estimar y clasificar de forma sencilla la productividad de una determinada especie en un área definida.

- Las curvas de índice de sitio o de calidad son un paso previo para la elaboración de cualquier tabla de producción, que describa el desarrollo en relación con la edad de las variables forestales. Para la construcción de modelos más complejos, las tablas de producción dinámicas necesitan el ajuste de ecuaciones de incremento de ciertas variables, como el área basimétrica o el volumen.
- Posibilita el cálculo de variables máximas de crecimiento medio o corriente de diferentes variables. En el caso del volumen de un rodal, dichos valores permiten determinar el turno desde el punto biológico de máximo crecimiento.
- Las ecuaciones de incremento posibilitan establecer las edades a las que alcanzan los turnos financieros, tecnológicos y físicos de rodales forestales.
- La planificación y manejo forestal se simplifica, cuando las funciones que rigen el crecimiento en volumen de sus rodales están disponibles.
- Los modelos de crecimiento y sus primeras derivadas se pueden emplear para una descripción de las funciones de distribución y de densidad de probabilidad de variables dendrométricas como el diámetro, altura, sección o volúmenes, tanto en rodales regulares, como en irregulares.
- En las masas regulares cuando se conocen la distribución de las clases de edad, es posible utilizar las ecuaciones de crecimiento (de volumen o área basimétrica) para realizar simulaciones con el objetivo de optimizar los aprovechamientos.

2.4.3 Características deseables de una función de crecimiento

El crecimiento de un árbol o un rodal forestal con el tiempo alcanza un patrón definido y estable conocido como sigmoidea, cuyas características fundamentales son el punto de inflexión, que representa el máximo de crecimiento y una asíntota, que describe el tamaño máximo que puede alcanzar la variable forestal en consideración. De acuerdo a Goelz y Burk (1992) describieron las propiedades que deben cumplir los modelos empleados para construcción curvas de índice de sitio, algunas de las cuales pueden generalizar a todos los modelos de crecimiento. Las principales son:

- Existencia de un punto de inflexión.
- Presencia de una asíntota horizontal.

- Comportamiento lógico: los modelos no deben permitir valores anormales desde el punto de vista biológico. Por ejemplo, las curvas de alturas *deben pasar por el origen* o el diámetro debe ser igual a cero a la edad en que el árbol alcance la altura de 1.30 metros.
- Base biológica: la forma de la ecuación debe derivarse del conocimiento teórico que se tenga del crecimiento de la variable dependiente analizada. Al sistematizar esta base teórica del desarrollo de la ecuación se alcanza adicionalmente que, se ajuste a cualquier conjunto de datos resultando un modelo más exacto (Pianaar y Turnbull, 1973).

Una de las características deseables de los modelos de crecimiento es la flexibilidad, entendiéndose como la capacidad de ajustarse con precisión a diferente conjunto de datos. La maleabilidad de un modelo se le asocia al número de parámetros empleados en el mismo. De acuerdo a Zeide (1993) mencionó que, cualquier modelo cuyo número de parámetros coincida con el número de puntos de la muestra a ajustar pasará a través de todos estos, mostrando por tanto, la máxima exactitud. Aunque esto signifique la pérdida de la tendencia universal asumida de la curva sigmoidea, por lo que se considera que el conocimiento real de las leyes que rigen los procesos de crecimiento es más importante a la hora de desarrollar un modelo que su propia flexibilidad.

2.4.4 Clasificación de las funciones de crecimiento forestal según su expresión matemática

En el transcurso del tiempo han sido desarrolladas una serie de modelos de crecimiento, desde la más sencilla (la recta que a pesar de no cumplir ninguna de las dos condiciones fundamentales de las curvas sigmoidea, puede adaptarse a cortos intervalos de edad en los que se considera que dicha curva tiene forma lineal) hasta los más complejos modelos de árbol individual. Adicionalmente de la edad, se pueden añadir muchas otras variables independientes. De acuerdo a Kiviste (1988) los modelos de incremento se clasifican en ocho grupos, los cuales se resumen de acuerdo al mencionado autor:

Grupo 1: la principal característica de este grupo es que, los parámetros son lineales o fácilmente linealizables, lo que significa que se ajusten pudiéndose emplear el método de mínimos cuadrados ordinarios. Su forma general es:

$$y = a_0 + a_1 f_1 + a_2 f_2(t) + \dots + a_n f_n(t)$$

Donde: "t" es la edad y a_i son parámetros a estimar.

Grupo 2: entre los más destacables se puede nombrar a los modelos desarrollados por Hossfeld. Son funciones resultantes de cocientes de polinomios y que han sido frecuentemente utilizados en la construcción de curvas de índice de sitio o calidad de estación o en la modelización de volumen de rodales forestales. Su expresión es:

$$y = \frac{a_1 f_1 + a_2 f_2(t) + \dots + a_n f_n(t)}{b_0 + b_1 f_1 + b_2 f_2(t) + \dots + b_n f_n(t)}$$

Donde: "t" es la edad, " a_i " y " b_i " son parámetros a estimar.

Grupo 3: una de las propiedades fundamentales de este grupo de modelos es que la variable independiente (edad) está elevada a una potencia. Un modelo que se destaca en este grupo son los alométricos y su forma general es:

$$y = f(t^a) \text{ o } y = [f(t)]^a$$

Donde: "t" es la edad, "a" es un parámetro a estimar.

Grupo 4: se fundamentan en la presencia de un término exponencial de la edad o bien directamente o en el denominador de un cociente. Se destacan los modelos de Bailey-Clutter o de Schumacher, los cuales son muy empleados para establecer el índice de sitio. Su expresión matemática es la siguiente:

$$y = \exp^{(f)} \text{ o } y = \frac{a}{1 + \exp^{b_0 + b_1 f_1(t) + \dots + b_n f_n(t)}}$$

Donde: "t" es la edad, "a" y " b_i " son parámetros a estimar.

Grupo 5: para este grupo de modelos aparece como un regulador del crecimiento, el término $1 - \exp^{(t)}$. Los modelos más destacables

son los de Mitscherlich, Richard-Chapman, Weibull y von Bertalanffy, su fórmula general es:

$$y = a_1 (1 - \exp^{-a_2(t)})$$

Donde: "t" es la edad, "a₁" son parámetros a estimar.

Grupo 6: este grupo de modelos son más complejos, debido a que son expresiones potenciales en relación a la edad. Su expresión matemática se resume:

$$y = [a_1(t)]^{a_2t}$$

Donde: "t" es la edad, "a₁" son parámetros a estimar.

Grupo 7: se incluyen los modelos, cuya características común es la presencia de una función trigonométrica de una parte de la expresión en la que, figura el valor absoluto de una función de la edad. Su forma general es:

$$y = a_0 + a_1 h(t) h_1(t) \text{ es una función trigonométrica } \text{ ó } y = a_0 + a_1 |f(t)|$$

Donde: "t" es la edad, "a₁" son parámetros a estimar.

Grupo 8: se destaca en este grupo la presencia de una función de distribución (Φ) en sus expresiones. Entre las funciones que, sobresalen están las de Charlier y función S_B de Jhonson, que han sido fundamentalmente empleadas para caracterizar las distribuciones dimétricas o alturas de rodales forestales. Su expresión es:

$$y = f[\varphi(t)]$$

Donde: "t" es la edad, " Φ " es la función de distribución normal.

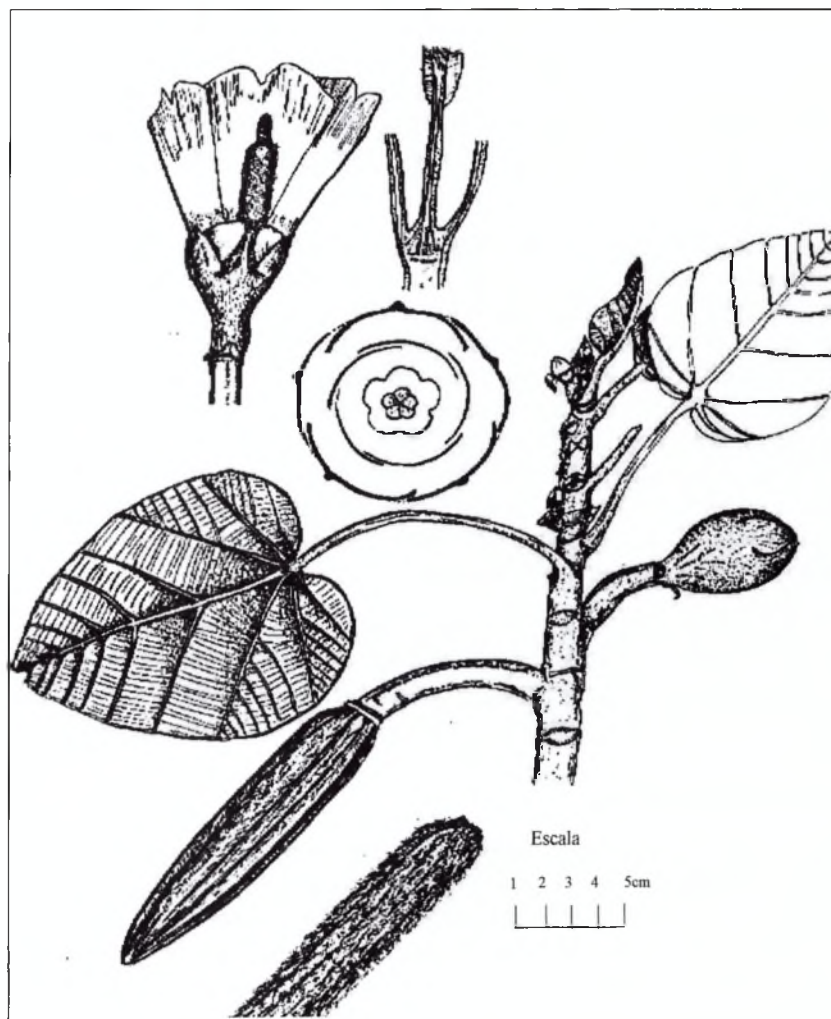
CAPÍTULO 3

Información base de esta investigación

3.1 DESCRIPCIÓN BOTÁNICA DE LA BALSA

La Balsa pertenece a uno de los 25 géneros (aproximadamente) de la familia Malvaceae, subfamilia Bombacoideae y se ha clasificado dentro del género *Ochroma*.

Figura 8. Representación gráfica de *O. pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb.



Fuente: Little y Dixon, 1969.

Sin embargo, para los propósitos prácticos existe una sólo especie *O. pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb., sinonimia *O. lagopus* Sw. El área de distribución natural abarca desde los 19° N hasta los 20° S en regiones de Centro y Suramérica tropical, desde el sur de México hasta Bolivia (Lamprecht, 1986). La Balsa es comúnmente conocida como Palo de Balsa, Balsa Boya, Corkwood, Down Tree, Bois o Korkholz (Fletcher, 1951). Este árbol de rápido crecimiento se reconoce fácilmente por una copa abierta de unas pocas ramas gruesas y extendidas, corteza lisa color gris rosado, hojas grandes casi redondas, acorazonadas de 20-40 cm de largo y de ancho (Figura 8), con 7-9 nervios principales saliendo de la base (venación palmada) y con peciolo largos, flores grandes en forma de campanas, blancuzcas y verdosas, solitarias de 14-15 cm o más de largo (Little y Dixon, 1969).

Con 5 pétalos y 5 cápsulas color café oscuro de forma particular, cilíndricas de 18-25 cm de largo y 2.5-4 cm de diámetro, cubiertas con una materia lanosa color café claro después de abrirse (Little y Dixon, 1969). La Balsa es la madera comercial más liviana del mundo, (0.07 a 0.15 g/cm³) pesa menos que el corcho (Toson et al., 2014) y el Ecuador ha sido el principal productor (Lamprech, 1986). La madera es blancuzca grisácea, pálida con lustre sedoso, la albura y el corazón no bien definidos, sin olor ni sabor distintivo, la médula gruesa de 1.5-2.0 cm de diámetro (Whitmore y Wooi-Khomm, 1983). La madera es muy blanda, débil y tiene el grano muy grueso, recto, uniforme, se deforma por compresión pero es fuerte considerando su peso.

A menos que no sea tratada es absorbente, se seca al aire con rapidez moderada y los defectos debido al secado son atenuados; de fácil cepillado; resistente a rajaduras; moldeado deficiente; lijado regular; el torneado; taladrado y escopleado son muy defectuosos (Little y Dixon, 1969).

3.2 SILVICULTURA

De acuerdo a Lamprecht (1986), la Balsa es una especie heliófila. Es decir de crecimiento rápido y fructifica por primera vez entre los 3 a 5 años de edad, el peso de mil semillas es de aproximadamente 10 g (100 000 unidades por kilogramo). Después de la cosecha, la tasa de germinación de la semilla sin tratar únicamente es del 10%. Para mejorar el porcentaje, se recomiendan los siguientes procedimientos, ya aplicados exitosamente en la práctica.

- Las fibras algodonosas se eliminan mecánicamente, por ejemplo en una mezcladora de cemento o bien mediante el aporreo de los sacos con semilla; se sumerge en agua hirviendo, se apaga la fuente de calor y se deja enfriar en el agua durante aproximadamente 15 minutos y la siembra se debe realizar inmediatamente después de este tratamiento.
- Las semillas adheridas al algodón son esparcidas en un tamiz metálico, hasta que formen una capa delgada. El calibre de la malla del tamiz corresponde aproximadamente al tamaño de la semilla para eliminar las fibras que son de fácil combustión; se le prende fuego y de esta manera, el material es liberado y cae a través del tamiz en un recipiente de agua. También en este caso la siembra debe ser realizada inmediatamente después del tratamiento.

Las plantas jóvenes de *O. pyramidale* son extremadamente susceptibles a daños en las raíces, por lo que a menudo se aplica la siembra directa como método de regeneración. Para ello, la superficie debe estar bien preparada y libre de malezas; el distanciamiento entre los pequeños hoyos de siembra será de 3 x 3 m y en cada uno de ellos se siembran aproximadamente 15 semillas, posteriormente las plantas son raleadas, hasta dejar sólo una de ellas en cada hoyo. Si después de la siembra al voleo la vegetación rastrera es quemada, no es necesario un tratamiento previo de la semilla. Así en su fase inicial del desarrollo es imprescindible el cuidado intensivo de la plantación, especialmente el combate regular de las malezas (Lamprecht, 1986).

En el vivero, las plantas se cultivan en contenedores llenos con tierra arcillo-arenosa, a la semilla sólo se cubre levemente. La germinación ocurre después de 10 días, aproximadamente a los 3 meses de edad, las plantas tienen una altura de 20-25 cm y están listas para la plantación, el espaciamiento entre plantas puede ser de 4 x 4 m. Para el establecimiento de un rodal hay que considerar que, si bien la Balsa requiere plena luz desde arriba, también tolera o hasta demanda el sombreado lateral, tal como se produce en los claros y en las aberturas naturales del bosque (Lamprecht, 1986).

A la edad de 4 años, el número de más de 625 árboles/hectárea debe ser reducido a 400 árboles/hectárea. En el raleo hay que tener sumo cuidado para no causar lastimaduras a los individuos remanentes, ya que hasta las heridas causadas por podas, casi no sanan. Por tanto,

el enorme crecimiento juvenil de esta especie se reduce considerablemente entre los 7 y 12 años de edad, a partir de entonces la madera también comienza a desarrollar el duramen y a adquirir mayor densidad, perdiendo parte de las características que la hacen adecuada para usos especiales. El turno de arboricultivos de Balsa generalmente es de 7 a 8 años (Lamprecht, 1986).

O. pyramidale tiene la capacidad de producir madera liviana sólo en los suelos de mejor calidad. La plantación en sitios desfavorables y también las lesiones causadas a árboles conducen a la producción de madera relativamente pesada y de baja calidad. Hasta ahora no se han observado daños o enfermedades de importancia económica en plantaciones de *O. pyramidale*. Sin embargo, generalmente se considera que la Balsa es muy susceptible al ataque de hongos e insectos (Lamprecht, 1986).

3.3 SIEMBRA Y FERTILIZACIÓN

En las fundas de vivero se colocan dos semillas en el centro de la funda a un centímetro de profundidad, las cuales deben ser cubiertas con tierra, se recomienda:

- Realizar la siembra en la época de inicio de la lluvia.
- Extraer la funda plástica de las plantas que provienen del vivero y colocar en el hoyo conservando el pan de tierra. El tallo deberá estar totalmente vertical.
- Cubrir el hoyo con materia orgánica, fertilizante y tierra de monte, posteriormente se apisonará alrededor de la planta con la finalidad de no dejar aire en el suelo.

Después del aprovechamiento del primer turno y la quema de los desperdicios, normalmente se establece una repoblación natural. No obstante, para asegurar la calidad de las plantaciones se realizará una nueva plantación en cada sitio:

- Limpiar la maleza alrededor de los hoyos y aplicar 50 g de urea cada 3 meses durante el primer año.
- Para el segundo y el tercer año se debe repetir esta aplicación de urea pero cada 6 meses.
- Aplicar cada seis meses 50 g de abono completo 10-30-10 por mata.

- Realizar limpiezas en un mínimo de dos veces por año; después del tercer año se debe cortar los tallos delgados y ramas para controlar la densidad y permitir el ingreso de las personas al gradual. Las ramas pueden ser utilizadas para la confección de canastos o tutores de otros cultivos.

3.4 UTILIZACIÓN

La albura es ancha y de color casi blanco, el duramen es de color blanco a marrón y muy suave. La madera se compone básicamente de celulosa pura, la densidad relativa es de aproximadamente de 0.07 a 0.15 g/cm³, pero en árboles viejos puede llegar hasta el triple, la madera se puede cepillar y no sostiene clavos o tornillos. En cambio en encolado y la impregnación no presenta dificultades, posee adicionalmente una resistencia mecánica relativamente elevada, la cual aumenta al disminuir la temperatura. Por esta razón es altamente adecuada como material aislante y de embalaje, como es el caso de los alimentos perecederos; se utiliza además, para el modelaje, embalajes especiales y como sustituto del corcho en los chalecos y como Balsas salvavidas.

El algodón del fruto tiene una utilidad parecida a la del algodón, aunque es de menor calidad. La Balsa también es apropiada para la producción de papel y de pulpa, su fibra es muy larga y produce una pulpa muy valiosa, con un rendimiento del 45-50%; además, la celulosa cruda es fácil de blanquear (Lamprecht, 1986).

3.5 DESCRIPCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS LLUVIAS EN EL ECUADOR Y EN EL ÁREA DE INVESTIGACIÓN

3.5.1 Condiciones generales de circulación atmosférica para la formación de las lluvias en el Ecuador

En febrero, es época de lluvia en todo el Ecuador, los niveles de la esfera tropical (700-850 hPa) presentan las siguientes corrientes (Virji, 1981) así:

De diciembre a marzo en la mayoría del hemisferio sur, los vientos alisos en dirección NE provenientes del hemisferio norte determinan la dirección del viento sobre la región amazónica. Estos vientos como consecuencia del rozamiento con el pie de la cordillera de los Andes y el cambio de los parámetros coreólicos (es el componente horizontal de

la fuerza de desviación por el movimiento de la tierra, el cual es llamado fuerza coreólica) entre las latitudes del norte del hemisferio y la Línea Ecuatorial, inclusive cambian su dirección a NO (Figura 9) (Bendix y Lauer, 1992; Cañadas, 1997).

Por lo indicado, a través de la compresión de las líneas de corriente, se aceleran los vientos a velocidades comprendidas entre 10 m/seg hasta 25 m/seg, debido a que esta velocidad de corrientes no pueden alcanzar nunca los niveles altos de la tropósfera. De esta manera podemos definir el concepto de turbulencia de bajo nivel (Low-Level-Jet) (Virji, 1981).

Sobre la parte central de la Amazonía se forma una zona estable de baja presión, la cual causa precipitaciones mayores a 2 000 mm (Kreuels et al., 1975), su efecto alcanza hasta la parte nororiental de la Línea Ecuatorial. Al mismo tiempo, en la costa oeste de Suramérica, en la temporada de lluvias al final de diciembre, se traslada la corriente caliente ecuatorial llamada Corriente del Niño hasta el norte del Perú y conjuntamente con el aumento de la temperatura de la superficie del mar y traslado de humedad del monzón (viene del árabe Mausim= estación, son sistemas de vientos que retornan en cada estación en la misma dirección) proveniente del NO transformado a partir de los vientos alisos del NE, pueden traer a la costa ecuatoriana fuertes lluvias. Este monzón del NO se vuelve muy inestable (Bendix y Lauer, 1992; Cañadas, 1997).

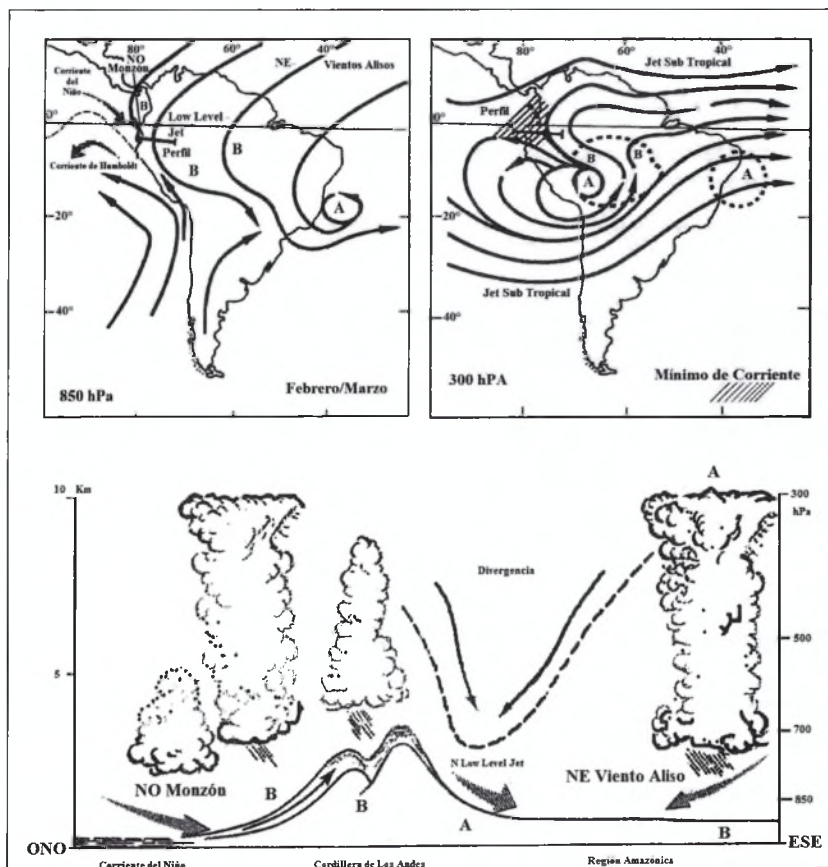
En ámbito de los 300-100 hPa existe una típica formación de corrientes en el punto máximo de lluvia en el hemisferio sur (febrero). Sobre la región sur amazónica con centro en Bolivia a nivel del suelo (17° S, 80° N, Figura 2) se extiende un anticiclón caliente, fomentando a través de un fuerte fenómeno de convección (Es un importante camino de transporte de calor en la atmósfera, cuando se trata de subida o baja de las masas de aire) y un alto transporte de calor en los altos estratos atmosféricos (Virji, 1981; Kreuels et al., 1975).

Sobre los límites del Trópico de Cáncer (latitud sur entre 20°-30°) se forma un frente de baja presión como consecuencia del inmenso transporte de calor latente y con la de energía potencial proveniente del centro de la región amazónica (hemisferio sur, turbulencia subtropical), la cual, debido a su moderado descenso detrás de la cordillera de los An-

des en las partes planas del este amazónico, causa la conocida sequía del nor-este del Brasil (Molion, 1987).

Adicionalmente una fuerte corriente meridional (sur-norte) sobre la cordillera de los Andes en el perímetro comprendido entre las latitudes 5° S hasta los 5° N y longitudes entre 60° y 80° O, resultante del doblamiento de la corriente caliente anticiclónica hacia el norte, alimenta con esto, la turbulencia Subtropical sobre el Caribe (Figura 9).

Figura 9. Circulación sobre Suramérica mientras ocurren las lluvias ecuatoriales (850 hPa y 300 hPa) y ONO-ESE perfil (N-LLJ= N-NO Low Level Jet, Inversión) A= Alta Presión, B= Baja Presión.

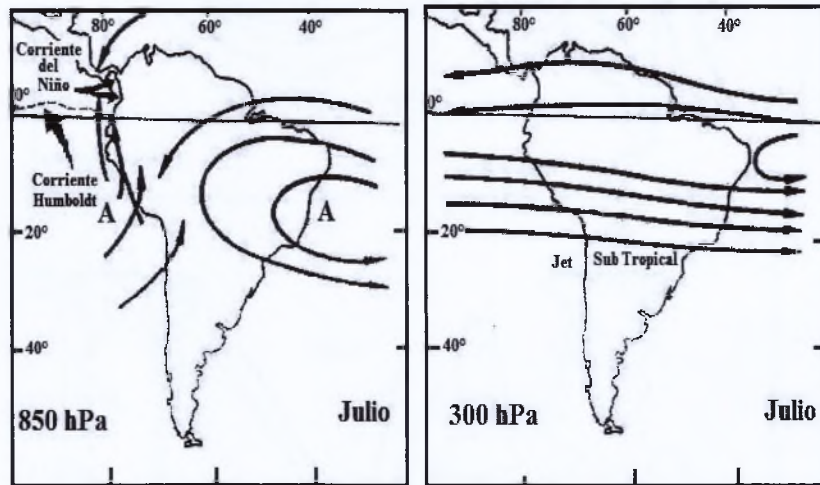


Fuente: Bendix y Lauer, 1992.

Tanto en el Ecuador y en parte de Colombia (Figura 9) se ubican entre una esfera de un mínimo de corriente y la región tropical del viento del este y la meridional corriente del norte (Zona de Convergencia Intertropical). Especialmente sobre las costas sur ecuatorianas se disminuye en algo la divergencia existente en los estratos altos (inversión de los vientos alisos) y esto hace que sean elevados y finalmente disueltos en las costas ecuatorianas y colombianas debido a la actividad e influencia del monzón proveniente del NO. En el período de sequía (julio), la corriente fría y seca de Humboldt y con esto el anticiclón del sur Pacífico ha sido desplazada hacia el norte y ejerce su influencia sobre las costas sur de Colombia.

En los niveles de presión de 300 hPa se presenta un desplazamiento en dirección hacia la línea ecuatorial (Figura 10), de tal manera que, el sur de la región amazónica, está bajo el efecto dominante de Divergencia, denominado efecto de Föhn (Cañadas, 1983).

Figura 10. Patrones de circulación sobre Suramérica durante el periodo de sequía (850 y 300 hPa) mes de julio.



Fuente: Bendix y Lauer, 1992.

De tal manera, que el anticiclón caliente sobre el sur de Bolivia, así como también, el Low-Level-Jet en el flanco este al pie de la cordillera de los Andes son menguados. Por otro lado, desde la Línea Ecuatorial hasta los 10° de latitud Norte existe una corriente de vientos cargados provenien-

tes del Este, pasando sobre los Andes (Kreuels et al., 1975), con esto se establece un puente de alta presión entre el Sur Pacífico y Sur Atlántico en el trópico de Sudamérica y subyuga con esto también en la costa y la sierra del Ecuador.

3.5.2 Las lluvias estacionales en el Ecuador

La asimétrica expresión de la época de lluvia y sequía en las provincias climáticas del Ecuador se debe ciertamente al desarrollo de los vientos alisios provenientes del norte del hemisferio, los cuales aportan o quitan vapor de agua en las estaciones, así como también espacialmente al Ecuador.

Mientras el traslado del sol hacia el hemisferio Sur es inexorable en el equinoccio (octubre), en la Sierra. La lluvia es provocada por los vientos alisios dirección NO y el viento alisios desviados en dirección NE proveniente de la cuenca amazónica en dirección a la línea equinoccial y contra el flanco este de la cordillera de los Andes. Esta corriente de tipo monzónica que choca contra la parte este de la cordillera trae consigo tanto a la Amazonía como también a la Sierra una gran cantidad de lluvias. Mientras que, los vientos alisios desviados en dirección NE provenientes del Caribe no se han podido subyugar a la Corriente de Humboldt (Bendix y Lauer, 1992; Cañadas, 1997).

Consecuentemente en la Costa y el flanco occidental de la cordillera del Ecuador las lluvias equinociales son limitadas. Por otro lado, debido a que se ha formado en el flanco este de la cordillera Low Level Jet, que limita de algún modo el transporte de vapor de agua, en el mes de octubre solamente se presenta el segundo máximo de lluvia. No obstante por, lo indicado, la Sierra es abastecida de vapor de agua predominantemente de la Amazonía. Así, para el mes de diciembre, se reorganiza el sistema de corrientes en la Costa como en las tierras bajas amazónicas. En el flanco este de la cordillera se establece un sistema predominante de vientos alisios NO de tipo monzónico que alcanzan la zona sur del país. Los mismos que, intensifican la velocidad de Low Level Jet en el flanco este de los Andes. Estos vientos se manifiestan de manera fuerte provocando la disminución de vapor de agua y por ende la baja de la pluviosidad en la región (Bendix y Lauer, 1992; Cañadas, 1997).

Este cambio de corrientes causa tanto en la región Amazonía como en la Sierra un “período de sequía”, veranillo del niño (Cañadas, 1983). Mientras que a lo largo de la Costa, la corriente del Niño como una contracorriente cálida ecuatorial se ha trasladado al norte de las costas del Perú. Con lo cual se ocasiona un “invierno” equinoccial tardío con el máximo de aporte de lluvias provenientes del norte. Lo indicado significa para la costa ecuatoriana un retraso de las tormentas con lluvia al inicio del verano del hemisferio sur. En los meses de marzo y abril se encuentra en su apogeo la corriente del Niño y si esto se suma la presencia de la corriente monzónica (NO) del Pacífico, ambas pueden ser muy efectivas trayendo lluvias, que favorecen la región Costa, los flancos de la cordillera oeste y la región Sierra. Forzosamente transportan el vapor de agua sobre el flanco occidental de la cordillera de los Andes, provocando el máximo de lluvia en el Ecuador (Bendix y Lauer, 1992; Cañadas, 1997).

Al mismo tiempo, se intensifica el Low Level Jet en el flanco este de la cordillera; esto provoca que en las alturas comprendidas entre 1 000 y 3 000 msnm, como consecuencia de la posición de sotavento y el efecto de divergencia, reciben poca lluvia. En consecuencia, limita altamente el transporte de vapor de agua a las tierras altas sobre la cordillera este. De ahí que, las lluvias en la Sierra son originalmente monzónicas provenientes del cálido Océano Pacífico que alimentan con vapor de agua a las masas de aire. En junio y julio, todo el Ecuador se encuentra influenciado por un puente de alta presión entre el Sur Pacífico y Sur Atlántico y el anticiclón en el trópico de Sudamérica, que causa una gran divergencia y sequía en la región. Solamente en la zona de pie de monte del flanco este de la Cordillera se presenta una época de precipitación de tipo cenital en estos dos meses (Bendix y Lauer, 1992; Cañadas, 1997).

La causa de este fenómeno es la presencia de los vientos alisios en dirección SE, los cuales están relacionados con una corriente fría proveniente del hemisferio sur fuera del trópico. Lo especial del flanco este de la cordillera está evidenciada, ya que entre 1 000 y 3 000 msnm, las estaciones muestran una lluvia de tipo unimodal con su máximo en junio/julio. La razón de esto es que, mientras en la principal época de lluvia en octubre y marzo de la Sierra, el efecto del Low Level Jet se encuentra bajo presión. Cuando este efecto LLJ en junio/julio es atenuado, este hecho contribuye en particular al incremento de la influencia de los vientos alisios SE. Ofreciendo buenos niveles de condición en la cordillera este, lo

que obligatoriamente ocasiona el pico máximo de lluvia en la Amazonía (Bendix y Lauer, 1992; Cañadas, 1997).

3.5.3 Lluvia en la Costa

Las lluvias de tipo unimodal, con un máximo de precipitación en el mes de marzo, es la consecuencia de la inestabilidad del anticiclón a través de la corriente monzónica N-Oeste y el intercambio del calor de la Corriente del Niño que llega hasta las costas del norte del Perú. En los otros meses son disminuidos los eventos de precipitación debido a la presencia de una alta presión en el Sur del Pacífico (Greenhunt, 1982), con lo cual, en este ámbito se esperaría una distribución bimodal de la precipitación, con una disminución del máximo de lluvia en octubre como consecuencia del tránsito de la Zona de Convergencia Intertropical, solamente en la parte norte pasando la frontera del Ecuador (Limonos, Borbón) es posible observar esta lluvia bimodal o precipitaciones cenitales (Cañadas, 1966). En tanto que en la parte costera sur del Ecuador, el efecto del anticiclón del Pacífico es así de fuerte durante todo el año y el período de lluvia es limitado a tres meses y con una considerable disminución de la precipitación total.

3.5.4 Evaporación

La transición de agua a vapor de agua se llama evaporación y alrededor de una masa de aire no saturada con vapor de agua evapora la misma de cualquier superficie inmediatamente tanto de la tierra o de cualquier superficie de agua de otra parte a través de la transpiración de plantas. Junto a una cobertura cerrada se produce la evaporación del suelo menor a la transpiración.

La técnica de medición de estos dos parámetros es difícil separar. La evaporación necesita energía calórica, bajo condiciones externas normales y requiere algo así como 2 500 kj para evaporar un gramo de agua o 10 mm de una capa de agua. De esta manera, la energía para la evaporación de una superficie de agua o de un suelo húmedo proviene de la radiación neta y el viento que unido al incremento de la intensidad de la radiación, con la elevación de la temperatura del aire y del suelo, produce la disminución de la humedad del mismo (Cañadas, 1997).

En una vegetación cerrada puede ser la evaporación tan alta, siempre y cuando exista una cantidad de agua suficiente en el suelo para la transpiración por las hojas. Ante la deficiencia de agua en el suelo no se puede transportar suficiente agua hacia las hojas. Entonces las hojas cierran sus estomas, con lo cual el transporte puede limitarse fuertemente (Cañadas, 1997). El único remanente de agua es evaporado por transpiración cuticular, de igual manera, con el cierre de los estomas se suspende el intercambio de carbono y es entonces cuando se da una obstrucción del agua hacia la atmósfera. Así, como la fuerza de la evaporación (evapotranspiración) solamente actúa como transporte de la energía calórica, quiere decir que es dependiente de las condiciones de clima. La máxima posible evaporación de una cobertura vegetal cerrada se denomina potencial de evapotranspiración (Cañadas, 1997).

De lo expuesto se desprende que las superficies de agua siempre tienen un potencial de evaporación, pero también la evaporación y evapotranspiración dependen ciertamente de la forma y la estructura de la cobertura vegetal, así como también, del estado biológico de crecimiento de la vegetación, lo cual determina la necesidad de agua (Cañadas, 1997).

3.5.5 Balance hídrico

El balance hídrico es la cantidad real de agua transferida a la atmósfera de una determinada superficie de tierra cubierta por vegetación en área y tiempo. Esta encierra no solamente la pérdida de agua del suelo a través de la evaporación, sino también la succión de agua de la vegetación mediante la transpiración, igualmente de la evaporación, rocío, agua de gutación y el agua superficial interceptada por la superficie de la hoja, ramas y tallos. La evaporación actual necesita no solamente de la energía disponible de la radiación solar, sino también la producida por advección (Penman, 1956).

De ahí que, los modelos de la evaporación actual se deberían basar sobre parámetros aerodinámicos y resistencia de las copas, sustentadas con datos de campo sobre la humedad del suelo, directamente medidos en lisímetros (López-Urrea et al., 2006) o datos directos tomados en torres climatológicas del tipo Eddy Covariance (Alcalá et al., 2011). Ya que en ocasiones, solo existen datos disponibles de temperatura y precipitación, la fórmula de Turc (1961) continúa siendo empleada.

Gerrits et al. (2009) analizaron las desventajas y limitaciones de estos métodos bajo diferentes condiciones climáticas.

Penman (1956) define a la evapotranspiración potencial como la cantidad de agua transpirada por un cultivo de césped que cubre el suelo en su totalidad y sin ningún déficit de agua. Es decir, cuando la superficie está húmeda y no existe una restricción sobre el flujo de vapor de agua, el potencial de evapotranspiración es alcanzado, tomando las restricciones arriba expuestas. Para determinar el Balance Hídrico de la provincia de Los Ríos, se tomó como estación representativa al espacio ubicado en la Estación Experimental Tropical Pichilingue, de acuerdo a Cañadas et al. (2013c) desarrollaron un modelo que permitió predecir los valores de evapotranspiración para el año 2012, el cual se describe a continuación y fue aplicado para determinar el balance hídrico en el área de investigación:

$$PET = 20.57 * Es * (1 - HR / 100)$$

Dónde:

PET= Evapotranspiración (mm/mes)

Es= Presión de saturación de vapor (m bar)

HR= Humedad relativa

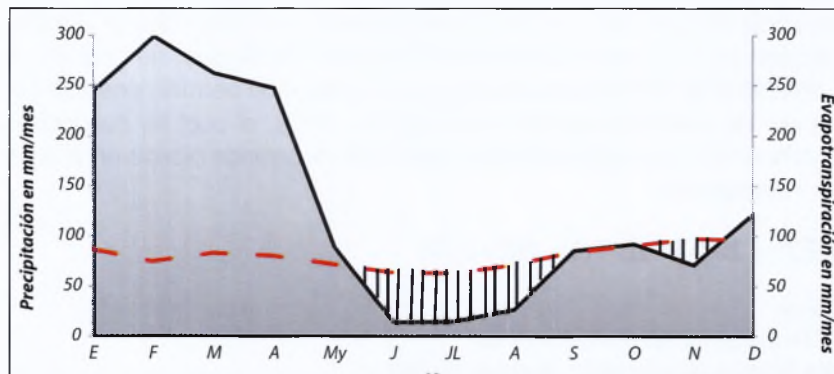
Los valores de evapotranspiración mensual (Línea punteada) son representados en confrontación con la precipitación promedio anual en la Figura 11. Estos dos parámetros determinaron el balance hídrico en la provincia. De tal manera que, los meses que presentaron un déficit de disponibilidad de agua fueron junio, julio, agosto, octubre y noviembre (Figura 11, zona achurada).

En la Figura 12, se presenta los datos observados en el Tanque Tipo A en confrontación con los datos predichos por el modelo desarrollado por Cañadas et al. (2013c).

En la Figura 13, se presenta los diagramas ombrotérmicos de las principales estaciones de la zona de estudio. Se comprenderá, que el patrón unilateral de las lluvias en la zona de estudio como ingreso de agua al ecosistema (Figura 13), mientras que, como salida de agua se empleó el modelo de evapotranspiración desarrollado por Cañadas et al. (2013c). Es decir que, el índice de aridez de Goussen no fue deter-

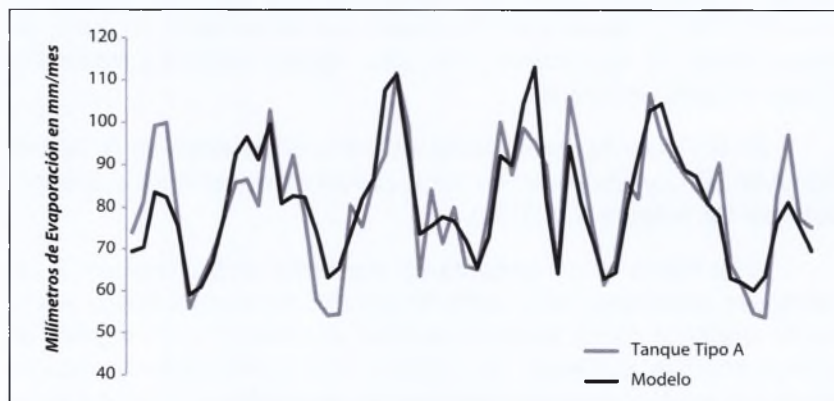
minando mediante el cálculo de dos veces los valores de la temperatura promedio mensual. De la Figura 13, se puede establecer la amplia diversidad de disponibilidad de agua para la producción de la Balsa. Los sitios marginales para las plantaciones fueron Sube y Baja, El Corozo y El Carrizal en el área de Chongón Colonche.

Figura 11. Potencial de evapotranspiración para el período 2003-2010 registrados en el Tanque Tipo A y los datos predichos por el modelo desarrollado por Cañadas et al. (2013c), línea punteada roja.



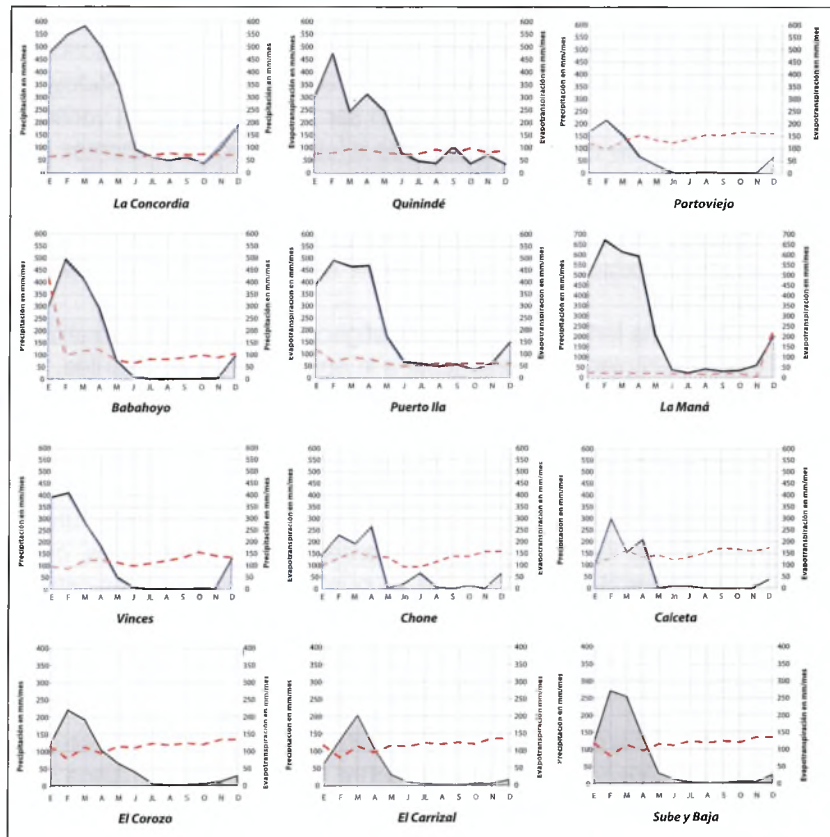
Fuente: Cañadas et al. 2013c.

Figura 12. Validación del modelo desarrollado por Cañadas et al. (2013c). Contraposición de los datos observados con los datos predichos.



Elaborado por: Autores.

Figura 13. Balance hídrico en diferentes estaciones de la zona de estudio. Potencial de evapotranspiración para el período 2003-2010 registrados en el Tanque Tipo A y los datos predichos por el modelo desarrollado por Cañadas et al. (2013c), línea negra representa la precipitación promedio mensual y línea roja punteada la evapotranspiración mensual.



Elaborado por: Autores.

3.6 REQUERIMIENTO DE DATOS

Una población de árboles crecientes sobre un determinado sitio de desarrollo durante una sucesión de períodos, sin mayores disturbios del crecimiento e intermitentes modificaciones en la densidad a través de los aclareos, determina que el desarrollo forestal es una respuesta directa a la variación de los tipos e intensidades de aclareos y estos son influen-

ciados por factores ambientales existentes sobre un sitio de crecimiento. En consecuencia, dos tipos diferentes de datos empíricos son requeridos para el desarrollo de modelos.

La información primero describe el cambio del estado de las variables debido a las operaciones de aclareos y segundo, describe el cambio del estado de las variables por el crecimiento natural (Gadow v., 2003). Los datos de crecimiento podrían ser obtenidos de una variedad de experimentos de campo; de acuerdo a los objetivos dominantes son comúnmente los siguientes:

- Ensayos de procedencia para evaluar la adecuada adaptación de especies exóticas y/o proveniencia específica sobre un sitio en particular.
- Ensayos de fertilización para investigaciones sobre el mejoramiento de crecimiento en respuesta a la aplicación de fertilizantes.
- Ensayos de espaciamiento, producción y raleo para evaluar los diferentes espaciamientos de plantación en relación a la producción y tratamientos de aclareo sobre el crecimiento.

Este campo de investigación es establecido y mantenido por institutos u organizaciones de investigación gubernamentales, universidades, compañías y entidades de desarrollo. Así, se puede observar que, en esta última década la investigación forestal y los fondos para la investigación se han incrementado en dirección a la producción de madera comerciable y captación de carbono en la biomasa.

El conocimiento actual sobre los diferentes tipos de ecosistemas forestales está basado mayormente sobre la obtención de datos provenientes de parcelas permanentes de investigación, medidas durante varios períodos de tiempo. La limitada disponibilidad de fondos para la investigación y el incremento de la complejidad de las preguntas que actualmente se están haciendo en la investigación forestal, necesitan de una continua evaluación para establecer un diseño óptimo de ensayos de crecimiento (Kleinn, 2007).

No hay una única vía correcta que implique la obtención de tablas de producción, debido a que no existe unanimidad sobre los tratamientos óptimos de un determinado bosque. El modo en el cual los bosques han sido manejados está cambiando continuamente, por ello se requiere

una permanente reorientación de los objetivos de ensayos. De tal manera que, este cambio de visión continua de objetivos (condiciones ambientales) podrían incluso no ser necesarios o deseables para mantener ensayos de crecimiento por un largo período de tiempo, siempre que uno sea capaz de predecir el desarrollo forestal bajo cualquier conjunto de condiciones agroecológicas (Kleinn, 2007).

Tres tipos de ensayos de crecimiento podrían ser distinguidos en consideración con un horizonte de tiempo. Indistintamente, las parcelas permanentes son establecidas para la elaboración de tablas de producción, para un determinado programa silvicultural y son medidas usualmente en intervalos regulares de tiempo hasta que sean cosechadas. Las parcelas temporales se miden una única vez, proveen de información basada sobre la edad y variables relevantes, las cuales son utilizadas para construir tablas de producción, asumiendo nuevamente una representación silvicultural normal. Las parcelas de intervalo son remedidas una vez, así abastecen una base de datos sobre el rango promedio de cambios en respuesta a un determinado conjunto de condiciones iniciales. Estas parcelas son abandonadas después de que se ha hecho el intervalo de la medición (Gadow v., 2004).

A continuación se describe los tres tipos de parcelas para la planificación forestal, fundamentada en base a datos científicos:

3.7 TIPOS DE PARCELAS FORESTALES

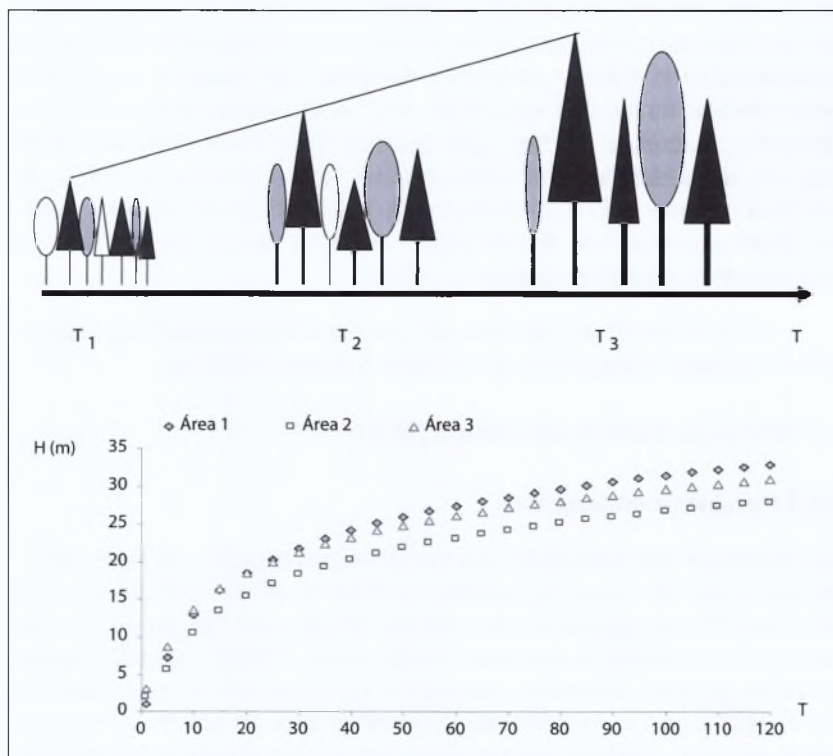
3.7.1 Parcelas permanentes

Las observaciones de parcelas permanentes representan una base de datos muy importante para desarrollar modelos de crecimiento. Durante un largo período se registran en las mismas los cambios cuantitativos y cualitativos de los atributos arbóreos (Jansen et al., 1996). De esta manera, las observaciones obtenidas permiten la construcción de un modelo de crecimiento para un conjunto de condiciones específicas dadas. Muchas tablas de producción se construyeron en base a los datos de parcelas permanentes (Hasenauer et al., 1995; Gadow v., 2004). Una de las ventajas de la base de datos derivadas de las parcelas permanentes es el potencial para describir el patrón de crecimiento polimórfico por evaluación de datos separadamente de cada parcela y por la expresión de los parámetros

de un modelo de alturas como una función del índice de sitio o como una función de variables específicas de sitio (Rojo y Montero, 1996).

De esta forma, es posible desarrollar un modelo de altura poli-mórfica no desarticulado (Clutter et al., 1983; Kahn, 1994) y su ecuación representa el desarrollo específico de sitio de la altura dominante de un rodal sobre el tiempo (Figura 14).

Figura 14. A la izquierda: una parcela permanente con tres fechas (tiempos) sucesivas de observación (los árboles blancos han sido removidos por aclareos). La coordenada de tiempo ha sido designada con T. A la derecha: se presenta el proceso de crecimiento de una determinada especie.



Elaborado por: Autores.

En la Figura 14 (izquierda), se muestra una parcela permanente con tres mediciones consecutivas de la altura del rodal en diferentes edades (T). En

la Figura 14 (derecha), se representa una serie hipotética de datos provenientes de tres parcelas permanentes en tres lugares o regiones dadas.

Una amplia gama de modelos son empleados para describir el desarrollo de las variables de producción en relación con la edad. Pero una de las más empleadas es la ecuación de Chapman-Richards, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$H = a_1 \left[1 - \exp^{-a_2 t} \right]^{a_3}$$

Dónde:

H = Altura dominante del rodal (m)

t = Edad del rodal (años)

a_1, a_2, a_3 = Parámetros empíricos del modelo

En el uso de parcelas permanentes es posible calcular un conjunto separado de parámetros para cada parcela. El modelo adoptado es polimórfico, si el parámetro determina la forma de crecimiento a_1, a_2 y son expresados como función de una variable específica de sitio, tales como profundidad del suelo, formación geológica o precipitación promedio anual.

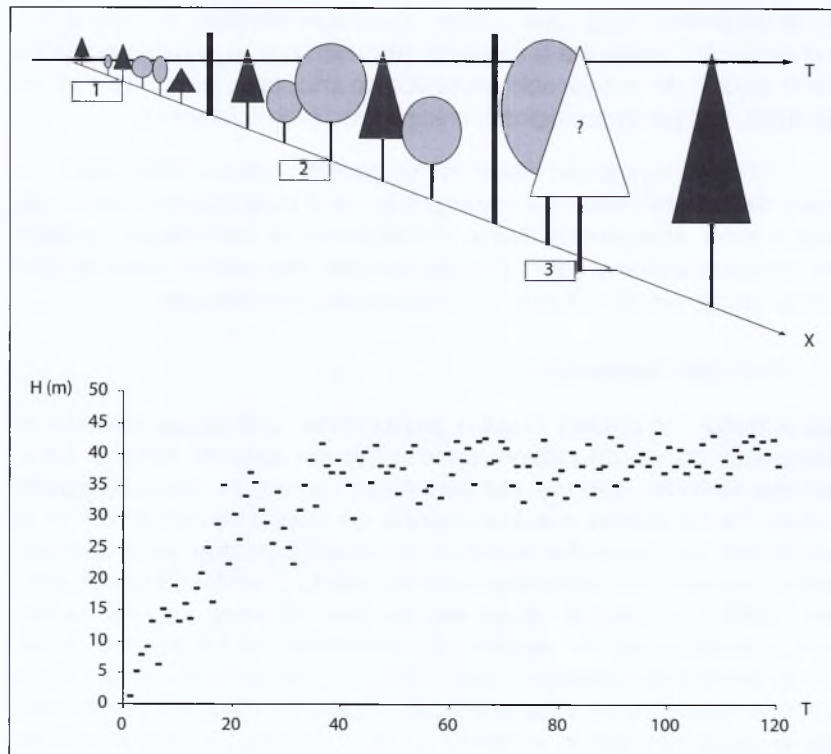
Una desventaja del diseño de las parcelas permanentes es el alto costo de mantenimiento e infraestructura de la investigación y la prolongada espera para generar datos. Los objetivos de los ensayos no siempre son alcanzados y como parcelas pueden ser prematuramente destruidas por el viento, el fuego o la destrucción intencionada.

3.7.2 Parcelas temporales

Las parcelas temporales pueden proporcionar una rápida solución en situaciones donde no existen datos sobre el desarrollo forestal. Estas parcelas se miden sólo una vez pero cubren un amplio rango de edades y sitios. De tal manera que la secuencia de mediciones en el tiempo es substituido por la simultaneidad de la medición puntual en el espacio, método que ha sido extensivamente empleado durante el siglo 19 (Kramer, 1988). Las parcelas temporales son aún utilizadas en nuestros días para la construcción de modelos de crecimiento en situaciones de carencia de información forestal (Lee, 1993). El principio está esquematizado en la Figura 15, las superficies con rodales de diferentes edades son separadas por las líneas verticales. El eje X describe la posición de los árboles. El símbolo T determina el eje del tiempo (Biber, 1996).

A la izquierda de la Figura 15 se representan tres parcelas temporales de diferentes edades, el eje X describe la posición de los árboles y T define el eje del tiempo. A la derecha se representan los datos de alturas independientes provenientes de parcelas temporales, siendo la principal limitación de estas parcelas temporales que no proporcionan información sobre tasas de crecimiento. Simplemente, se esquematiza una serie de datos independiente de valores de edad y altura. Por tanto, es posible reconstruir el desarrollo de un estado de variables que no son afectadas por la competencia inter específica entre árboles empleando observaciones puntuales y el sistema de análisis de fuste. Por tal razón, la reconstrucción de algunas variables podría representar un problema.

Figura 15. A la izquierda: tres parcelas temporales con variación en edad. La coordenada x significa la posición de los árboles. El símbolo T indica la coordenada en tiempo. A la derecha: se presentan los datos altura/edad obtenidos de parcelas temporales.



Elaborado por: Autores.

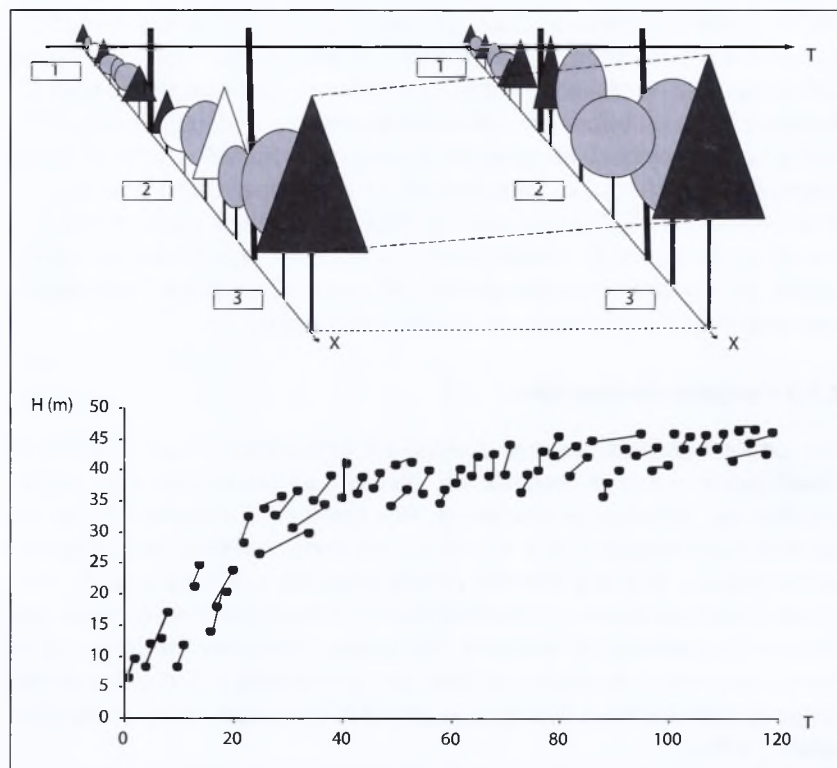
Por ejemplo, para explicar la variación del crecimiento del diámetro es necesario reconstruir la constelación de poblaciones y por tanto la inmediata vecindad de los árboles. Las tablas de producción fueron desarrolladas en ciertos países europeos después de la segunda guerra mundial, recurriendo a datos provenientes de parcelas temporales (Pardé, 1961). Las tablas generadas son, no obstante, estáticas en tiempo. Ellas pueden representar el desarrollo de un tratamiento silvicultural estándar y no pueden ser aprovechadas para predecir el desarrollo forestal y las diferentes alternativas de aclareos (Alder, 1980). Las parcelas temporales poseen una gran limitación al no proveer de información sobre el rango de cambios de un estado inicial conocido a otro. En consecuencia, se concluye que no son recomendables, pero pueden ser útiles para la calibración de modelos y adecuados para examinar el crecimiento de árboles individuales.

3.7.3 Parcelas de intervalo

Uno de los beneficios es que pueden ser empleadas en un sistema de investigación sobre el crecimiento, con lo cual se mantiene en ventaja sobre las parcelas permanentes. Por ejemplo, al obtener la tasa de cambio de un estado inicial conocido. Así como también, la amplia cobertura de los estados iniciales proporcionados por las parcelas temporales, se transforma en una flexibilidad en la obtención de datos que ofrecen las parcelas de intervalo, las cuales deben ser medidas por lo menos dos veces al inicio y al final de un intervalo y la cual no existe ninguna intervención o evento que afecte la estructura de un rodal (Gadow v., 2004).

Los intervalos entre mediciones deben ser lo más espaciados en tiempo, con la finalidad de reflejar mayor claridad en los crecimientos de un rodal. Las intervenciones silviculturales no pueden ser permitidas entre estas dos mediciones y la toma de datos puede coincidir con las operaciones de aclareo, para obtener datos no solamente sobre el crecimiento de los árboles sino al mismo tiempo sobre el cambio de las variables iniciales resultantes de los raleos. Por consiguiente los efectos del raleo pueden ser evaluados al tiempo inicial (t_1) o al final (t_2) de la medición o en ambas ocasiones. El concepto puede ser ilustrado de la siguiente manera (Figura 16).

Figura 16. A la izquierda: tres parcelas de intervalo. Los árboles en blanco fueron raleados. A la derecha: se presenta los intervalos de los datos para el modelaje del proceso de crecimiento de la especie.



Elaborado por: Autores.

García (1988) propuso un sistema multidimensional de ecuaciones diferenciales, en las cuales el futuro desarrollo de un bosque depende únicamente del presente estado. Para estar en la posibilidad de desarrollar tales modelos, es necesario tener datos que describen el estado inicial como también los cambios asociados de las variables de estado.

Otro tipo de modelo adecuado de dos medidas sucesivas es una función diferencial algebraica de una función de crecimiento, las cuales han sido aprovechadas por diferentes autores, la misma que se puede escribir de la siguiente manera:

$$H_2 = H_1 \left[\frac{1 - \exp^{-a_1 * t_2}}{1 - \exp^{-a_1 * t_1}} \right]^{a_2}$$

Dónde:

H_2, H_1 = Altura dominante del rodal (m) a la edad t_1 y t_2

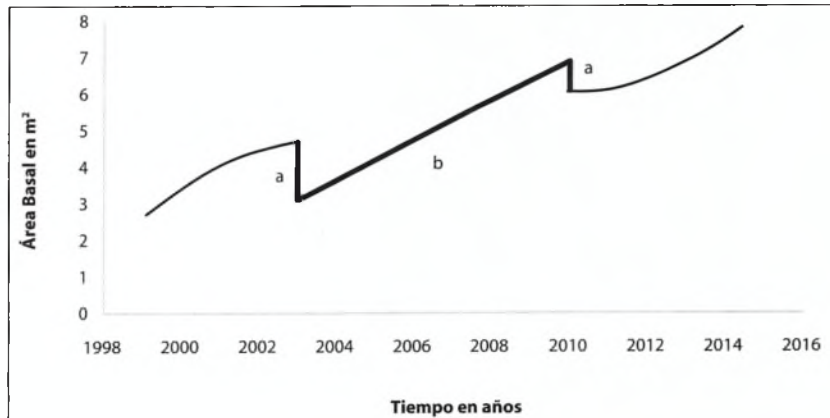
t_1, t_2 = Tiempo en años

a_1, a_2 = Parámetros empíricos del modelo

En estas parcelas, se pueden obtener tasas de crecimiento para diferentes estados iniciales y tras una espera mínima se dispone de datos adecuados para modelar procesos de crecimiento (Gadow v., y Hui, 1998). Estas se pueden establecer sobre un amplio rango de sitios, estados de desarrollo y tratamientos silvícolas. La caracterización del concepto de parcelas de intervalo son esquematizados en la Figura 17.

El concepto de intervalo ofrece flexibilidad a un bajo costo y ganancia de información. Las parcelas pueden ser abandonadas a cualquier tiempo después de ser evaluados los objetivos de la medición de las parcelas de intervalo y sobre todo “se rompe con ese mito de que los resultados de crecimiento, producción y aprovechamiento forestal requieren de largos, aburridos y extensos períodos de espera en la generación de información viable en un sitio determinado”.

Figura 17. Dos mediciones sucesivas para obtener el cambio de la variable de estado resultante del raleo a y el crecimiento natural b.

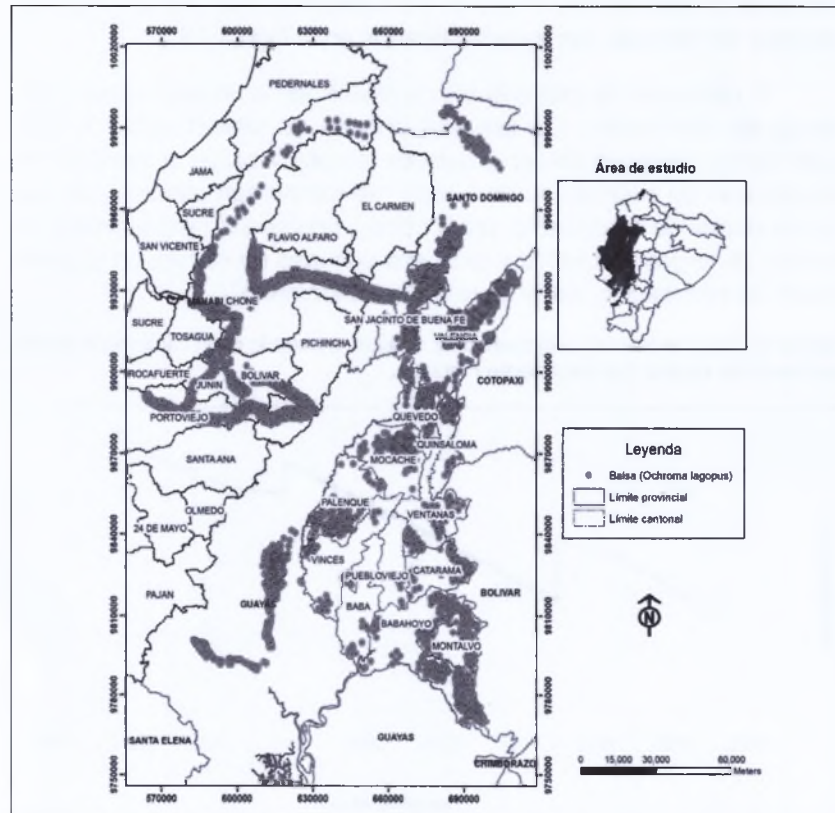


Elaborado por: Autores.

3.8 DATOS

Dos conjuntos de datos fueron empleados en esta investigación, uno para el ajuste de los modelos y el otro para la validación de los mismos. El primer conjunto fue medido en el 2009-2011 dentro del proyecto de investigación de la ITTO-INIAP en las provincias de Esmeraldas, Santo Domingo de los Tsáchilas, Los Ríos, Manabí, Santa Elena y Guayas instalando en 920 parcelas situadas en plantaciones puras, con diversas densidades, las cuales cubrieron un amplio rango de rodales forestales y diversas condiciones de sitios a lo largo de la zona de estudio (Figura 18).

Figura 18. Distribución espacial de las plantaciones de Balsa para la obtención del primer set de datos, zona de investigación.



Elaborado por: Autores.

Tabla 2. Resumen de las características de los rodales para el primer grupo de datos (n= 926) y el segundo grupo (n= 2 293).

Variables	1er Grupo de datos			2do Grupo de datos		
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
Altura dominante de un rodal (m)	1.40	12.19	28.07	4.87	40.62	22.51
Diámetro medio cuadrático (cm)	3.06	22.68	49.41	5.00	24.08	92.59
Número de árboles (ha)	100	361	1 506	200	332	1 500
Área basal (m ² /ha)	1.90	12.19	28.07	1.17	13.52	26.89

Elaborado por: Autores.

El segundo conjunto de datos, para la validación de los modelos, provino de 200 inventarios sobre 2 293 en parcelas circulares temporales y permanentes de 100 m² instaladas en rodales coetáneos localizados en las provincias señaladas. El primer rango de datos es menor, debido a que abarcaron una amplia gama de condiciones ambientales de la mencionada provincia. La Tabla 2, resume las características de los árboles para el primer y segundo grupo de datos.

En la presente obra fue empleado el algoritmo DUD, el cual puede ser encontrado en el procedimiento NLIN del programa SAS (SAS Institute, 2014; Álvarez González, 1997; Ralston y Jengrich, 1978). El supuesto de normalidad de residuos de los datos observados con los datos predichos fue evaluada gráficamente utilizando gráficos Q-Q plots. En la Tabla 3, se resumen las fórmulas empleadas, con la finalidad de la validación de los modelos. Esta metodología fue propuesta por Pretzsch y urský (2001) y Sterba et al. (2001).

Tabla 3. Criterios de evaluación de los modelos (x_i = Valores Predichos; X_i = Valores Observados; n = Número de Observaciones).

Criterio	Fórmula		Valor ideal	
	Absoluto	Relativo	Absoluto	Relativo
<i>Distorsión</i> (\bar{e} , \bar{e} %)	$\frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_i)}{n}$	$(\bar{e} - 100) / \bar{X}$	0	0%
<i>Precisión</i> (s_e , s_e %)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}}$	$(s_e - 100) / \bar{X}$	0	0%
<i>Exactitud</i> (m_x , m_x %)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_i)^2}{n-1}} = \sqrt{s_e^2 + \bar{e}^2}$	$(s_e - 100) / \bar{X}$	0	0%

Fuente: Cañadas et al. 2014.

CAPÍTULO 4

Parámetros de rodales de Balsa

4.1 DISTRIBUCIÓN DIAMÉTRICA

La definición de estructura forestal de un rodal varía ligeramente de un autor a otro. Así tenemos que en estudios silviculturales, la estructura de un rodal en general podría ser definido como la distribución horizontal y vertical de componentes de un rodal forestal, los cuales incluyen la altura; diámetro; niveles de coronas; fustes de árboles; arbustos; especies del sotobosque; lianas y restos de madera muerta (Helms, 1998). En este estudio, para la estructura de un rodal se considera únicamente a los árboles del rodal, sin tomar en cuenta arbustos o hierbas.

En un rodal forestal, una medición fácil que describe la estructura de un rodal es el diámetro de los árboles. La distribución diamétrica refleja los aspectos básicos de la estructura de un rodal y es comúnmente aplicada tanto en bosques plantados como naturales. Este contingente es una herramienta básica para construir las tablas de rodales, con la finalidad de estimar el volumen de un rodal y el volumen de un amplio rango de productos, los cuales son recuperados desde un rodal de determinado diámetro y altura media (Van Laar y Akça, 1997). Existen por lo tanto, diferentes funciones disponibles para caracterizar la distribución diamétrica, pero la distribución de Weibull ha sido usada extensivamente para ajustar la distribución diamétrica de rodales forestales (Gadow v., 2004).

Entonces la función Weibull ha mostrado los mejores desempeños sobre otras funciones como la de Johnson's y función Beta (Cañadas et al., 2003; Gadow v., 2004). La función de probabilidad de densidad de dos o tres parámetros se describe a continuación:

$$f(x) = \frac{b}{c} \left(\frac{x}{c} \right)^{b-1} * \exp \left[- \left(\frac{x}{c} \right)^b \right] \text{ Dos parámetros}$$

$$f(x) = \frac{b}{c} \left(\frac{x-a}{c} \right)^{b-1} * \exp \left[- \left(\frac{x-a}{c} \right)^b \right] \text{ Tres parámetros}$$

Dónde:

x= Diámetro a la altura del pecho (DAP)

a= Parámetro de ubicación

b= Parámetro de forma

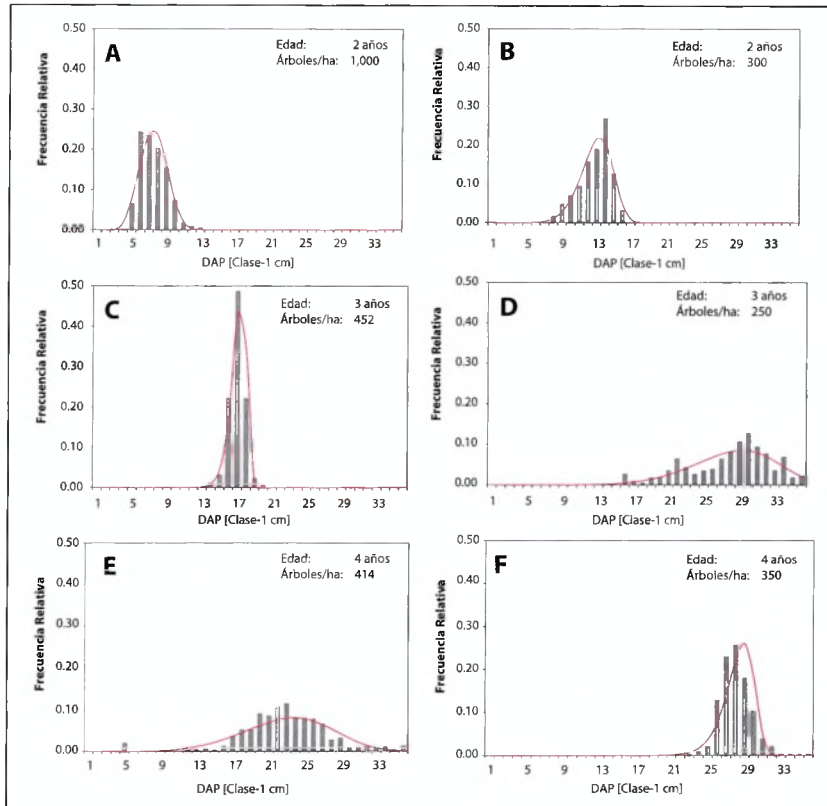
c= Parámetro de escala

Para algunos rodales, la función Weibull de dos parámetros podría ser aplicada para obtener el mejor ajuste. Existen dos vías para predecir los parámetros de la función, una es el enfoque de predicción de parámetros y la otra de recuperación de parámetros. En este estudio, con la finalidad de obtener el ajuste más apropiado para tres parámetros de la función Weibull fue llevado a cabo mediante el programa SAS. El enfoque de la predicción de parámetros, se basó en el método de *maximum likelihood*. Por ejemplo, Shirley y Lentz (1985) introdujeron un procedimiento llamado “método de momentos” como una alternativa al método de *maximum likelihood*, pero el mismo es aplicable únicamente, cuando el promedio y la varianza del tamaño de los árboles de la muestra son conocidas.

Seleccionando la clase diamétrica se pueden discriminar los diferentes rangos de crecimientos tanto para los árboles de crecimiento rápido comparados con uno de lento crecimiento. En este estudio, la clase de 5 cm de diámetro fue seleccionada para ajustar la función Weibull. Los diámetros de varias plantaciones de la zona de investigación fueron clasificados en clases diamétricas de 1 cm de diferencia a partir de 5 cm, los valores medios de cada clase diamétrica son demarcados en la Figura 18 (rojo), para obtener una línea continua de distribución y la escala de frecuencia relativa. Es decir la probabilidad de la función de densidad, lo cual permite la comparación dentro del mismo marco de escala (Figura 19) a las diferentes plantaciones de Balsa.

La distribución diamétrica y el ajuste de la función Weibull para diferentes edades de los rodales en la zona de estudio son presentadas en la Figura 19. Esto muestra la dinámica de la distribución de los rodales de *O. pyramidale* con diferentes edades y el desarrollo de las clases diamétricas sobre la edad. Por ejemplo, las categorías de diámetros incrementan con el transcurso de la edad y existe la probabilidad de que las otras categorías diamétricas decrezcan. La prueba de normalidad fue realizada con la finalidad de ajuste con la distribución a través de la prueba de Shapiro-Wilks y los rodales con edades comprendidas entre 1 a 10 años obedecen a poblaciones normalmente distribuidas con una probabilidad de $p= 0.01$. Las clases de edad y los valores de los parámetros de la función de distribución diamétrica de Weibull para diferentes rodales de la zona de investigación se presentan en la Tabla 4 (Figura 19).

Figura 19. Distribución diamétrica de diferentes clases de edades de *O. pyramidale* de acuerdo a la función de tres parámetros de Weibull en la zona de investigación.



Elaborado por: Autores.

Tabla 4. Clases de edades y valores de la función Weibull para seis rodales de Balsa en la zona de investigación.

Edades en años	Densidad árboles/ha	Valores de los parámetros		
		a	b	c
A	1 000	5	4.5	2.3
B	300	5	10.6	6.3
C	452	5	14.5	19.2
D	250	5	27.0	6.2
E	414	5	21.8	4.7
F	350	5	26.0	18.4

Elaborado por: Autores.

Debido a las diferentes prácticas de manejo, el número de árboles por hectárea varía de sitio a sitio. Los índices de localización tienen mayores porcentajes de árboles con mayores dimensiones que otros y su distribución de clase diamétrica es menos dispersa. Al disminuir la densidad de los rodales el parámetro b de la función Weibull aumenta en su valor, mientras que el parámetro c valores menores significan concentración de árboles en clases diamétricas menores.

4.1.1 Relación diámetro-altura

Los modelos de crecimiento y producción son necesarios en la práctica dentro del marco del sistema de planificación forestal. Entre la altura de un árbol y el diámetro a la altura del pecho (DAP), existe una relación estocástica, no lineal y esta relación es empleada para la estimación del volumen de los árboles y evaluación de la altura dominante (Gadow v., 2004; Cañadas et al., 2013; Cañadas et al., 2016). En las actividades de operaciones forestales que más tiempo ocupan y mayor recursos demandan está la medición de altura total de los árboles en pie (Zhang et al., 2002; Cruz-Leyva et al., 2010). La estimación precisa de esta analogía diámetro-altura es fundamental, debido a que la altura es normalmente predicha mediante la determinación de esta relación (diámetro-altura) antes de ser medida (Gadow v., 2004). Como consecuencia de esto, los volúmenes individuales de los árboles son estimados a menudo de la medición del diámetro de todos los árboles, mientras que para la altura se instalan sub-parcelas para la determinación de este parámetro (Cañadas et al., 2016).

Los datos obtenidos de altura de los árboles muestreados son utilizados para establecer una regresión diámetro-altura, la cual a su vez, se emplean para estimar la altura de los árboles, a los que sólo se les han medido los diámetros (Arabatzi y Burkhart, 1992). Tal regresión para estimar la altura, podría ser obtenida separadamente para cada rodal. No obstante, esta aproximación ocupa considerable cantidad de tiempo y dinero. Una alternativa práctica sería el desarrollo de una ecuación generalizada que describa la dependencia entre diámetro-altura basándose en una función que implique la altura dominante de un rodal o el diámetro medio cuadrático (Sloboda et al., 1993; Hradetzky, 1999; Jayaraman y Lappi, 2001; Cañadas et al., 2013b).

Las ecuaciones generalizadas de diámetro-altura no sólo son herramientas útiles para el propósito de inventario forestal, también se usan

con el tiempo como un elemento importante de muchos modelos de clase de tamaño para la simulación del desarrollo de alternativas de manejo silvicultural (Trincado y Leal, 2006). A veces estas se aplican con la finalidad de generar datos sobre el crecimiento de la altura de árboles individuales (Kahn y Ďurský, 1999). En el modelaje de la relación altura-diámetro se están incorporando variables obtenidas de los rodales, con la finalidad de mejorar su capacidad de estimación (López et al., 2003). Esta incorporación de variables de los rodales hacen que la aplicación de las ecuaciones generales sean mayormente generados en relación a los modelos de tipo local (Soares y Tomé, 2002).

Trincado y Leal (2006) en su estudio sobre ecuaciones locales y generalizadas de altura-diámetro para pino (*Pinus radiata*) concluyen que las ecuaciones locales con 2-parámetros son más precisas y estables en términos de convergencia en comparación a ecuaciones con 3-parámetros. En muchas evaluaciones realizadas, las ecuaciones generalizadas presentan mejores valores de precisión y sesgo que las ecuaciones locales. Con la finalidad de optimizar el número de mediciones de alturas se pueden construir las curvas locales altura o las curvas generalizadas de altura (Kramer y Akça, 1995).

Las curvas locales de un rodal describen la correspondencia diámetro altura de un rodal específico. Las curvas generales de altura relacionan la altura de los árboles con el diámetro y con otras variables dasonométricas de los rodales que pueden ser la edad o densidad. La selección de un modelo adecuado para diferentes clases de edades es un verdadero desafío en las ciencias forestales. Bredenkamp (1991) ha empleado un modelo básico y comúnmente utilizado, el cual se basa en el logaritmo de la altura/inverso del DAP que desarrolla la relación entre la altura y el diámetro para diferentes edades de clases para *Eucalyptus grandis*. Este modelo fue inicialmente introducido por Schumacher (1939).

$$\ln(h) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{d} \right)$$

Dónde:

h = Altura de un árbol

d = Diámetro a la altura del pecho

β_0, β_1 = Parámetros del modelo

Existe una cantidad considerable de modelos disponibles para describir la analogía entre el diámetro y la altura. Los parámetros empleados en la zona de estudio para estimar la altura fueron $\beta_0 = 0.981$ y $\beta_1 = 1.00591$, según el modelo de Schumacher. Gadow v. y Hui (1998) manifiestan que existe un mínimo de 30 funciones que han sido desarrolladas para describir la mencionada relación. En este estudio para los datos disponibles de DAP y altura de la Balsa se aplicaron modelos para encontrar los mejores ajustes. De igual forma se seleccionaron aquellas funciones que den el menor error; los modelos probados para explicar la relación DAP/Altura para las plantaciones de Balsa fueron:

Modelo 1	$h = \exp^{(\beta_0 + \beta_1 * \ln d + \beta_2 * d)}$	Freese
Modelo 2	$h = \exp^{(\beta_0 + \beta_1 * \ln d + \beta_2 * (\ln d)^2)}$	Korsun
Modelo 3	$h = \beta_0 + \beta_1 * d + \beta_2 * d^2$	Parabólica
Modelo 4	$h = 1.3 + \frac{d^2}{(\beta_0 + \beta_1 * d + \beta_2)}$	Prodan

En la Tabla 5 se resume los modelos empleados con sus respectivos parámetros y coeficiente de determinación para establecer la relación altura/diámetro en la zona de investigación. La Figura 20 muestra los cuatro modelos desarrollados con la Balsa para describir la relación altura-diámetro. Se muestra los valores observados en relación a los predichos por los modelos de Korsun, Prodan, Parabólica y Freese.

Tabla 5. Modelos empleados con sus respectivos parámetros y coeficiente de determinación para establecer la relación altura/diámetro zona de investigación.

Modelo	β_0	β_1	β_2	r^2
Freese	0.099	0.929	0.0048	0.8274
Korsun	0.182	0.932	0.00214	0.8323
Parabólica	1.109	0.988	0.00039	0.8314
Prodan	-12 993	0.923	0.06913	0.8319

Elaborado por: Autores.

4.1.2 Ecuaciones generales diámetro-altura para *O. pyramidale*

Análisis de los modelos propuestos

Como primer paso, se probó el desempeño de dos ecuaciones generalizadas conocidas diámetro-altura, inicialmente la ecuación [1]

$$h_j = \alpha_1 H_o \left(1 - \alpha_2 e^{\frac{-\beta d_j}{D_g}} \right)^{\alpha_3} \quad [1]$$

Esta ecuación fue derivada por Pienaar et al. (1991) de la función de Richards para rodales de pino (*Pinus eliottii*) en el sureste de Estados Unidos (Richards, 1959) y fueron adaptadas a los rodales de Balsa.

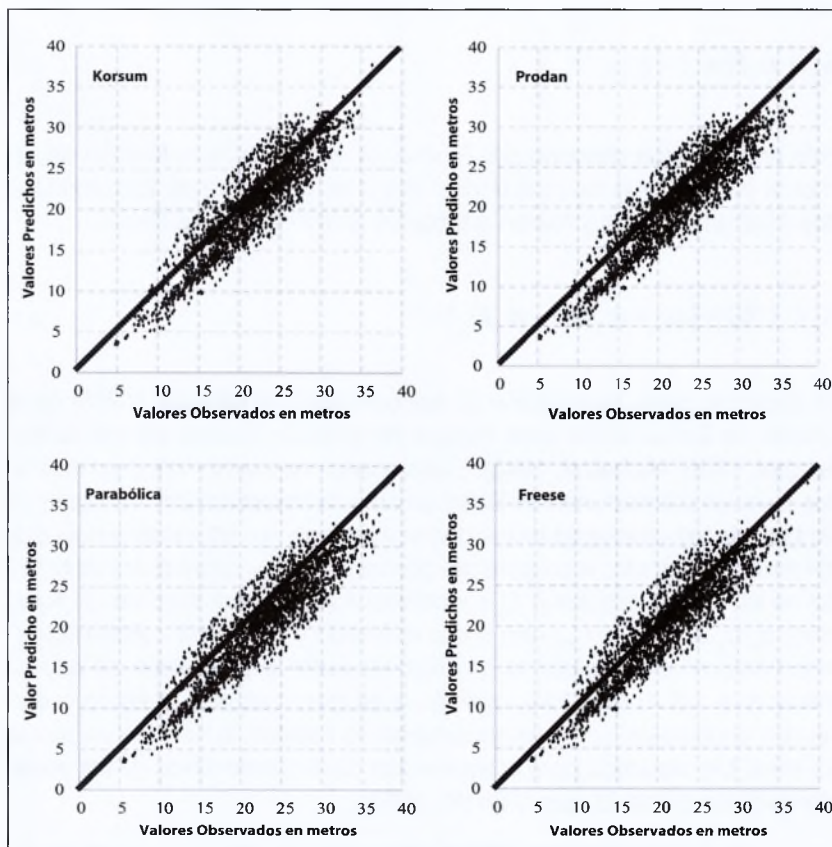
$$h_j = 1.30 + \left(\alpha_1 + \alpha_2 H_o - \alpha_3 D_g \right) e^{\frac{-\beta}{d_j}} \quad [2]$$

En segundo paso, la ecuación [2] fue derivada por Mirkovic (1958) de la función de Schumacher para rodales de roble en Europa central (Schumacher, 1939; Michailoff, 1943). Estas ecuaciones también fueron aplicadas para las plantaciones de Balsa en área de investigación. La siguiente simbología fue empleada en las dos ecuaciones: h_j = altura del árbol j (m), d_j = árbol j 's diámetro a la altura del pecho (cm), H_o = altura dominante (m) del rodal, de los árboles j , D_g = diámetro medio cuadrático de un rodal (cm), α_1 , α_2 , α_3 , β ,= parámetro a ser estimado y 1.3= una constante comúnmente empleada, con la finalidad de evitar la predicción de alturas menores a 1.3 m de altura, cuando d_j es muy pequeño. Debido a que las dos ecuaciones son intrínsecamente no lineales, la bondad de ajuste no-lineal fue requerida para la estimación de los parámetros de las ecuaciones propuestas (Draper y Smith, 1981).

Los valores iniciales fiables para el inicio del procedimiento de estimación fueron tomados de Hui y Gadov v. (1993), los cuales en un estudio previo probaron la bondad de ajuste de las ecuaciones [1] y [2] para *Cunninghamia lanceolata* en China. Un paso importante en la evaluación del ajuste de las ecuaciones, es el análisis gráfico de los residuos con la finalidad de buscar dependencias o modelos que evidencien dife-

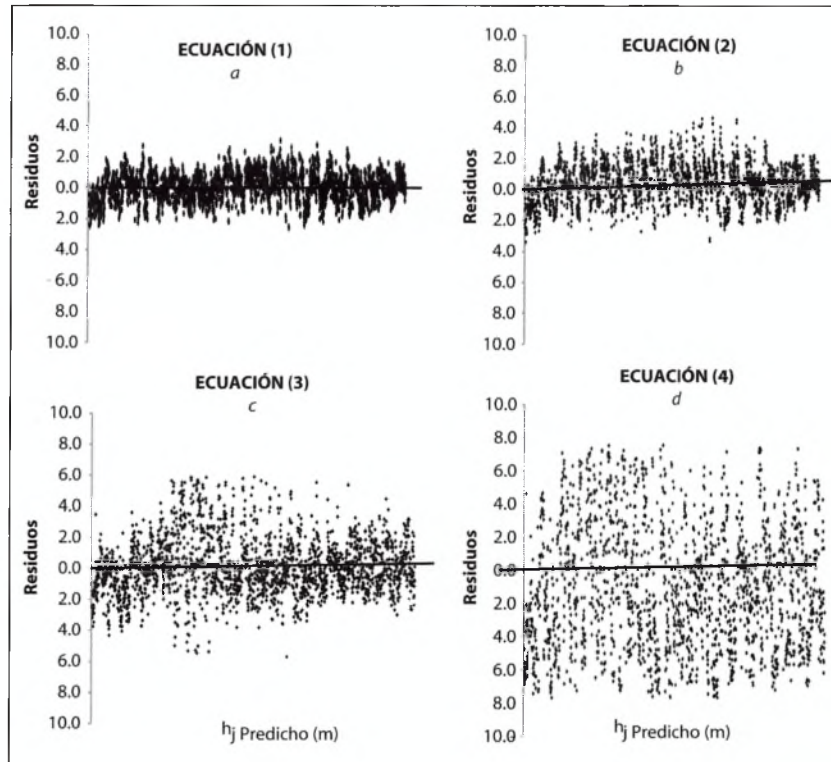
rencias sistemáticas (Hui y Gadow v., 1993). Una técnica simple y eficaz es la determinación de la tendencia de los residuos (BIAS), basado en la identificación de una regresión lineal de los residuos entre los valores observados y valores predichos (Soares et al., 1995).

Figura 20. Valores observados y predichos para los modelos para la Balsa en base a Korsum, Prodam, Parabólica y Freese.



Elaborado por: Autores.

Figura 21. Residuos de las ecuaciones [1-4] ploteados sobre los valores predichos, zona de investigación.



Elaborado por: Autores.

En la Figura 21 (a) y (b) queda ilustrado que, las dos ecuaciones mostraron únicamente una pequeña tendencia sistemática. Como siguiente paso, se trató de mejorar la ecuación [2] efectuando una transformación de la raíz cuadrada de d_j con la finalidad de obtener un nuevo modelo:

$$h_j = 1.30 + (\alpha_1 + \alpha_2 H_o - \alpha_3 D_g) e^{\frac{-\beta}{\sqrt{d_j}}} \quad [3]$$

La dispersión de los residuos mostró la normalidad de estos según la Figura 21 (c). Tomando en cuenta que, un rodal con igual D_g puede tener diferente densidad es interesante preguntarse si el modelo propuesto por

Schumacher puede ser mejorado con la incorporación de una variable adicional que considere (a) la densidad de un rodal. Como el número de árboles por hectárea mostró una alta correlación con el diámetro medio cuadrático (D_g), el área basal de un rodal G (m^2/ha) fue incorporada con la finalidad de ver la bondad de ajuste, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$h_j = 1.30 + (\alpha_1 + \alpha_2 Ho - \alpha_3 D_g + \alpha_4 G) e^{\frac{-\beta}{\sqrt{d_j}}} \quad [4]$$

La dispersión de los residuos no mostró ninguna tendencia, Figura 21 (d).

4.1.3 Validación

Las estimaciones de los diferentes parámetros calculados y los criterios de evaluación de las ecuaciones analizadas son presentados en la Tabla 6. De acuerdo a los valores estimados de Distorsión, Precisión Exactitud y Eficiencia mostrados para las ecuaciones [1] fueron cercanas a los valores ideales, de tal manera que la Eficiencia fue del 96% y fue la que menor valor de Exactitud mostró de 1.02 cercano al valor ideal.

Seguida por la ecuación [2] Eficiencia de 94% y Exactitud de 1.38 y en tercer lugar la ecuación [3] Eficiencia de 91% y Exactitud de 1.79. La validación de las cuatro ecuaciones fue evaluada prediciendo la altura individual de los árboles de la segunda secuencia de datos (no utilizados para el ajuste de las ecuaciones). En la Figura 22, las ecuaciones 1-4 se pueden observar, los valores predichos en confrontación con los valores observados. El coeficiente de correlación asociado entre los valores observados y predichos, puede ser tomado como otro criterio de evaluación de las ecuaciones ajustadas. Una fuerte correlación ($r= 0.9895$) fue observada para la ecuación [1], mientras que, para la ecuación [4] fue menor ($r= 0.8116$), la diferencia entre los coeficientes de regresión de las ecuaciones fueron pequeñas [1, 2, 3], mientras que para la ecuación [4] fue grande la diferencia.

Tabla 6. Criterios para la evaluación de las ecuaciones generales de diámetro y altura para Balsa, zona de investigación.

Ecuación	Parámetro	Estimación	Distorsión valor ideal 0	Precisión valor ideal 0	Exactitud valor ideal 0	Eficiencia valor ideal 1
[1]	α_1 α_2 α_3 β	1.0382 0.3450 0.2821 1.9812	-0.31	0.97	1.02	0.96
[2]	α_1 α_2 α_3 β	1.0501 1.0011 0.1834 10.0139	-0.04	1.38	1.38	0.94
[3]	α_1 α_2 α_3 β	1.0521 1.4999 0.6791 5.0129	-0.05	1.82	1.79	0.91
[4]	α_1 α_2 α_3 α_4 β	10.9000 1.5981 1.3333 0.3782 12.9988	-0.74	4.23	4.29	0.64

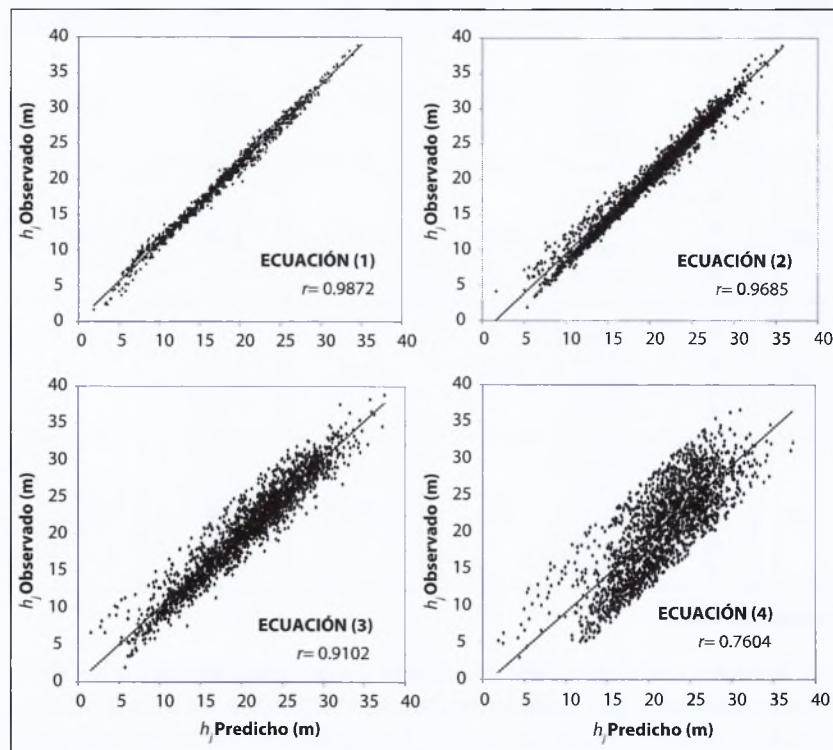
Elaborado por: Autores.

Los residuos obtenidos para las cuatro ecuaciones generalizadas de la relación diámetro-altura desarrolladas son probados en esta investigación, las cuales no muestran severas transgresiones de los fundamentos estadísticos. De acuerdo a la validación metodológica, la ecuación [1] es la de mejor ajuste para predecir fiablemente la altura individual de la Balsa en la región de investigación (eficiencia de 96%), seguida por la ecuación [2] con una eficiencia del 94% y por la ecuación [3] que presenta el 91%.

Estas tres ecuaciones muestran una aceptable bondad de ajuste, debido a que los parámetros de Distorsión, Precisión y Exactitud son cercanos a los valores ideales (Cero). Mientras que la ecuación [4] no debe ser aplicada ya que requiere de la determinación de tres variables independientes y muestra una eficiencia del 64% y un coeficiente de co-

relación de $r= 0.81$. Modelos que pueden ser empleados en la práctica en la zona de estudio.

Figura 22. Validación de ecuaciones [1-4] utilizando datos independientes (segundo grupo de datos), $r=$ Coeficiente de correlación.



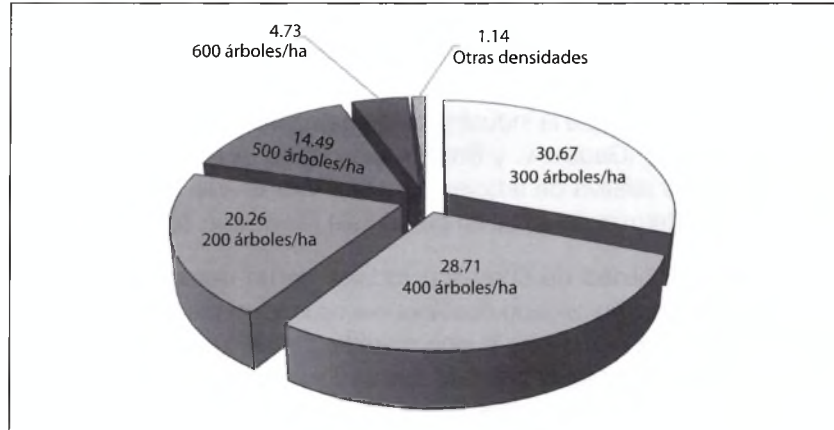
Elaborado por: Autores.

4.2 DENSIDAD DE UN RODAL

De acuerdo al estudio conducido por Gonzáles et al. (2010) en la caracterización del cultivo de la Balsa en la provincia de Los Ríos se reporta la diversidad de las densidades de siembra de las plantaciones de Balsa, donde el 39.51% representa otras densidades de plantación. Estos datos están en contra posición con las densidades observadas en el zona de estudio, donde en 3 219 plantaciones se obtuvo densidades de entre

200 a 400 árboles/ha y representa el 79.65% de las densidades observadas (Figura 23), destacándose la densidad de 300 árboles/ha (30.67%).

Figura 23. Representación de las densidades de plantaciones para rodales de Balsa, en la zona de investigación.



Elaborado por: Autores.

4.2.1 Área basal de un rodal

La densidad de un rodal puede ser definido usando diferentes métodos, en la siguiente sección, los parámetros: área basal, índice de densidad de un rodal y espaciamento relativo pueden ser empleados para la descripción de este parámetro forestal vinculado a la producción forestal (Milčko, 2005). La densidad de un rodal es una media cuantitativa expresada, ya sea en términos absolutos como el número de árboles, área basal o volumen por unidad de área o en forma relativa para la comparación entre diferentes rodales. Este concepto puede ser definido como una medida del grado de aglomeración de árboles dentro de un área promedio comúnmente expresada por varios radios de crecimiento en dependencia del espacio (Helms, 1998). Por lo expuesto, la densidad de un rodal es una importante medida para tomar en cuenta en temas de relación con los regímenes de raleo especialmente para masas forestales coetáneas.

El área basimétrica de un rodal puede ser definida como el área de la sección transversal de todos los árboles de un rodal, medidos a la

altura del pecho, expresada por unidad de área cuyos valores del área basimétrica dependen del número de árboles. Esta es una medida ampliamente utilizada para determinar la densidad, debido a la facilidad de su toma de datos, así como también, de la dimensión de los árboles desde el punto de vista de manejo forestal (Vilčko, 2005). La relación entre la densidad de un rodal y el promedio de tamaño es un importante tema para la comparación de los diferentes regímenes de aclareo para plantaciones industriales. Por ejemplo, la madera aserrada requiere de grandes diámetros, mientras que la industria pulpera necesita de mayores valores de áreas basales (Gadow v. y Bredekamp, 1992). A menudo es usado como densidad relativa de árboles para expresar el área basal por hectárea en un determinado rodal en porcentaje (Gadow v. 2004).

Con la finalidad de comparar rodales de un determinado sitio y edad con un rodal no raleado coetáneo se asumirá el parámetro de área basal de un rodal como una buena medida. De ahí que, áreas basales promedio para un bosque húmedo siempre verde está alrededor de 30 m² por hectárea (Weidelt, 1998). Para plantaciones de eucalipto, puede variar entre 80-85 m² por hectárea en un sitio productivo. En este estudio de un total de 3 219 rodales, el promedio de área basimétrica fue de 21.87 m²/ha con un máximo de 37.23 m²/ha y un mínimo de 4.48 m²/ha, estos datos pueden ser comparados con los experimentos realizados por Wishnie et al. (2007) en Panamá quienes reportan áreas basales para rodales de Balsa con dos años de edad en Soberanía 14.91 m²/ha, Los Santos 13.46 m²/ha, y Río Hato 7.76 m²/ha.

Un parámetro para establecer la densidad de un rodal según Gadow v. (2004), se lo obtiene del número de árboles por hectáreas N y el diámetro cuadrático medio D_g . El diámetro medio cuadrático se calcula de la siguiente manera:

$$D_g = \sqrt{\frac{40000}{\pi} * \frac{G}{N}}$$

Dónde:

D_g = Diámetro cuadrático medio

G = Área basimétrica de un rodal (m²)

N = Número de árboles por ha

π = 3.1416

Por otro lado, el área basimétrica de un rodal juega un rol importantísimo en el desarrollo de modelos de predicción de volúmenes. De tal manera, es necesario saber cómo se puede predecir el futuro del área basal para la proyección del volumen ulterior. Hui y Gadov v. (1993) desarrollaron un modelo basándose en el crecimiento del diámetro medio cuadrático en dependencia de la altura máxima y la cantidad actual de árboles por hectárea. Este modelo fue ajustado para describir el valor del diámetro cuadrático medio para la Balsa de acuerdo al siguiente modelo:

$$D_g = a * H^b * N^{c * H^d}$$

Dónde:

D_g = Diámetro medio cuadrático

H = Altura máxima en m

N = Número de árboles por ha

a, b, c, d = Parámetro del modelo

La altura máxima fue incluida en este modelo, la cual se encuentra más relacionada con las condiciones de crecimiento de sitio. Debido a la consideración de este hecho, el modelo de predicción el área basal fue aplicado para todas las plantaciones en la zona de investigación. Los parámetros del modelo propuesto son resumidos en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros del modelo para la predicción del área basal para el sitio de mejores condiciones de crecimiento en la región de investigación.

	Parámetros del modelo				r^2
	a	b	c	d	
Valores	0.0000929	0.91003	2.0884	0.0091254	0.79

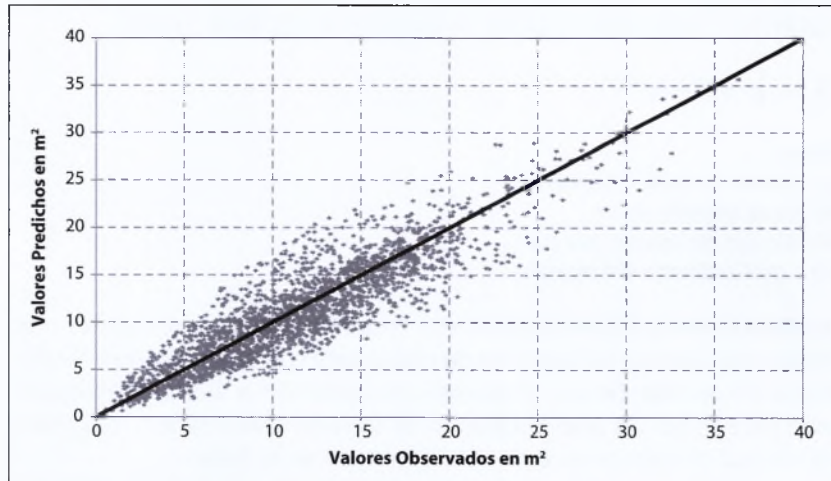
Elaborado por: Autores.

El coeficiente de determinación del ajuste del modelo fue de 0.79. La variación de los datos observados versus los datos predichos mediante el modelo de predicción del área basal propuesto son presentados en la Figura 24.

La bondad de ajuste del modelo propuesto muestra la posibilidad de emplear dicha ecuación para predecir la futura área basimétrica por hectárea para los rodales de Balsa basados en áreas o sitios específicos (Vilčko, 2005). Con la ayuda del modelo desarrollado de diámetro se

puede pronosticar el desarrollo del área basal, bajo cualquier condición de sitio en la zona de estudio, la altura máxima (Índice de Sitio) y variabilidad del número de árboles por hectárea, en este caso 100, 200, 400 y 1 000 árboles/ha (Figura 23).

Figura 24. Confrontación de datos observados y predichos del diámetro medio cuadrático para rodales de Balsa.



Elaborado por: Autores.

4.2.2 Índice de densidad del rodal (SDI)

Reineke (1933) introdujo este índice (en inglés Stand Density Index SDI), con la finalidad de explicar la densidad relativa de un rodal en términos de una relación entre el número de árboles y el promedio del área basal de los árboles o en muchos casos referidos al diámetro medio cuadrático. El número de árboles por unidad de área es inversamente proporcional con el promedio del diámetro de los árboles. En los rodales de alta densidad con el tiempo se producirán procesos de competencia que conducen a la mortalidad y un auto aclareo en sí, lo que resulta en una disminución de la densidad. Es claro también que a un determinado tamaño de árboles hay un limitado número de los mismos por unidad de área, que coexisten en un rodal coetáneo. Esta relación puede ser delimitada mediante una línea o límites (Gadow v. y Hui, 1998). El modelo propuesto por Reineke es el siguiente:

$$N = a * D_g^b$$

Dónde:

N = Número de árboles por unidad de área

D_g = Diámetro medio cuadrático

a, b = Parámetros del modelo

Para desarrollar la relación entre el número de árboles (número de árboles decrecientes con el tiempo) y el diámetro medio cuadrático (incremento en el tiempo) se requiere tener información sobre rodales no raleados para diferentes edades. Los datos obtenidos en este estudio provienen de rodales de Balsa no raleados y los parámetros obtenidos para el modelo de Reineke son resumidos en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros del modelo propuesto por Reineke para las plantaciones de Balsa, región de investigación.

Parámetros del modelo		Número de Observaciones	r^2
a	b		
34 995	-1.4009	3 000	0.87

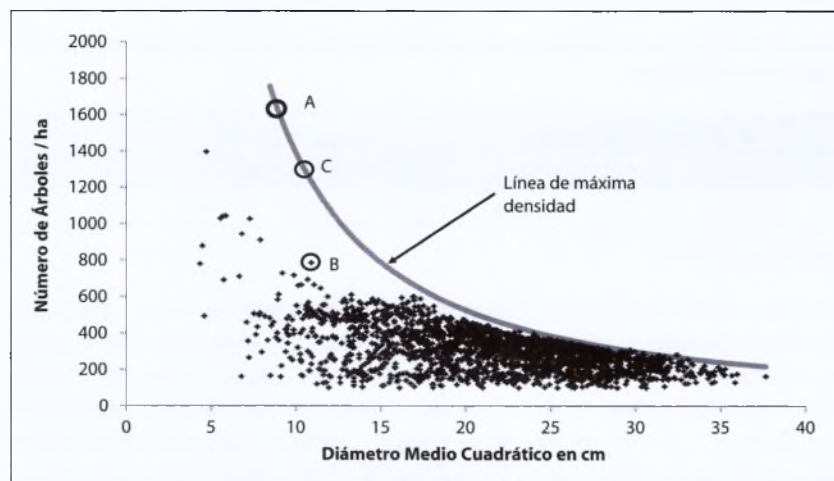
Elaborado por: Autores.

En esta investigación, el parámetro b (pendiente) tuvo un valor de -1.4009. Reineke (1933) desarrolló esta relación en numerosos rodales de diferentes especies incluyendo pinos y eucaliptos y encontró que la pendiente de la línea de límite fue de -1.605. En otro estudio conducido por Gadov v. (1986) en Suráfrica para *E. grandis* y algunas otras especies de pinos se registraron pendientes de -1.98. De acuerdo a Sivananthawerl (2001) reportó pendientes entre -1.76 a -0.97 para plantaciones de eucalipto en Sri Lanka. La Figura 25 muestra la curva de ajuste para los rodales de Balsa en la zona de estudio. Aquí, los datos de campo no exceden la curva calculada al máximo del diámetro medio cuadrático. La mayor densidad de árboles observados fue de 1 600 árboles/ha, considerando una espaciamento inicial de 2.5 x 2.5 metros.

En la Figura 25 existen marcadas diferencias entre la relación del número de árboles y el diámetro medio cuadrático en las diferentes plantaciones de Balsa en el área de investigación. La variación inicial en el diámetro medio cuadrático es alta en comparación con las etapas tar-

días de las plantaciones, esto puede deberse a varias razones. La primera es la diferencia de condiciones de sitio donde se desarrollaron las plantaciones de Balsa. De tal manera que, la línea de raleo podría ser empleado para discriminar o cuantificar la diferencia entre sitios (Gadow v. y Bredenkamp, 1992, Vilčko, 2005). Otra razón podría ser la amplitud de espaciamiento que se emplean para el establecimiento de las plantaciones en la zona de investigación. La medida de sobrevivencia es de gran aplicación para la producción y aprovechamiento de la Balsa, puesto que considera la mortalidad natural resultante de una alta densidad de plantación.

Figura 25. Relación entre el número de árboles y el diámetro medio cuadrático, basado en el modelo de Reineke para los rodales de Balsa.



Elaborado por: Autores.

La evaluación periódica de la sobrevivencia permite estimar el desarrollo de la mortalidad de un rodal coetáneo, que se deben a factores de competencia por luz, agua y nutrientes. En la Figura 25 punto A, se observó una sobrevivencia del 100%, de ahí que, la densidad de la plantación corresponde a un diámetro medio cuadrático de 8 cm y una segunda evaluación de la densidad en relación al diámetro medio cuadrático se ubicó en un punto B (Figura 25). En este cambio de posiciones entre las dos evaluaciones la plantación mostró una mortalidad normal, debido a la competencia por la obtención de espacio y recursos.

De no haber sido así, el desarrollo del número de individuos por área en relación al diámetro medio cuadrático debería haber estado en el punto C (Figura 25). De tal manera que, esta técnica de evaluación relativa permite discriminar el componente de mortalidad natural. Así, la curva de límite de raleo para la región de estudio proporciona una impresión de “línea de límite”, lo cual es aceptable para árboles de rápido crecimiento. Por ejemplo, si se tiene 37 cm de diámetro medio cuadrático, el número de árboles por hectárea correspondiente fue de 170 y se tiene un área basal de 19 cm para un rodal dentro de estas condiciones limitantes. El grado común de aglomeración puede ser expresada en forma numérica, como la expectativa del número de árboles por hectárea a un determinado promedio. Si el diámetro cuadrático medio es 25 cm, la ecuación de Reineke puede ser redefinida como:

$$SDI = \alpha * (25)^\beta$$

Esto demuestra el número de árboles máximos y posibles por hectárea para un diámetro cuadrático medio. Partiendo de este principio se puede calcular el valor empírico de (índice de densidad de un rodal) SDI. Si se conoce el número de árboles y el diámetro cuadrático medio se utilizó la siguiente fórmula:

$$SDI = N * \left(\frac{25}{D_g}\right)^\beta$$

Aplicando la ecuación de Reineke ajustada a las plantaciones de Balsa, donde se conoce los parámetros $\alpha = 34.9956$ y $\beta = -1.4009$, el SDI máximo será 385 árboles/ha, cuando D_g es de 25 cm. Si se quiere comparar este valor con otros rodales, los valores del número de árboles y D_g deben ser substituidos:

$$SDI = 300 * \left(\frac{25}{22}\right)^{-1.4009} = 358.33$$

Debido a que 358.33 es menor que 385, la densidad actual del rodal es pequeña en comparación con la máxima densidad posible, pudiéndose emplear para realizar afirmaciones sobre la densidad del rodal en las plantaciones de Balsa y sobre la optimización del uso del suelo. El índice

de densidad de un rodal (SDI) es un concepto introducido por Reineke (1933) el cual muestra, la relación entre el número de árboles y el diámetro medio (área basal de los árboles promedio) en el manejo de rodales coetáneos. Este parámetro mostró la aplicabilidad de este índice en los procesos de producción de la Balsa, por tanto la variación inicial en el diámetro medio es provocada por tres razones:

- La primera diferencia es correspondida obviamente a las condiciones de sitio, en relación a la precipitación y condiciones de suelo. De tal manera que, esta línea puede ser empleada para la cuantificación de la diferenciación de sitio en la zona de estudio límite (Gadow v. y Breidenkamp, 1992).
- La segunda razón se debe a que, la discrepancia de espaciamiento entre plantaciones es sumamente amplia y diversa en la zona de estudio; y
- El tercer argumento es, la presencia de vientos huracanados que afectan a los rodales de Balsa especialmente en la primera fase de crecimiento.

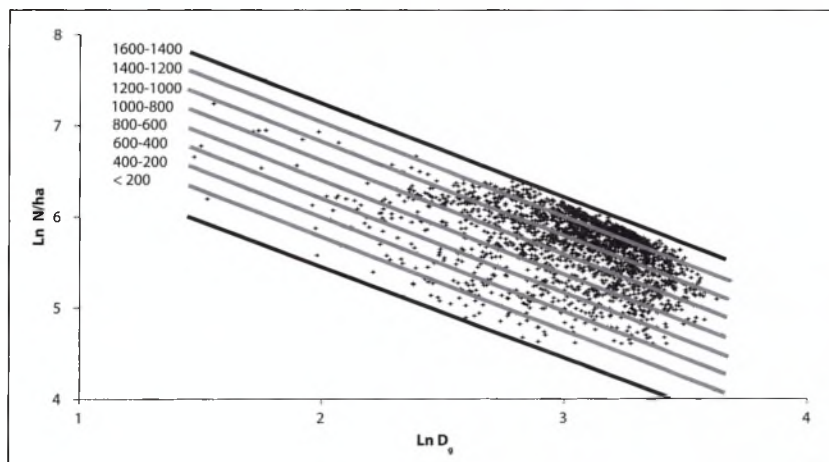
4.2.3 Guías o diagramas de densidad para plantaciones de Balsa

En la zona de estudio las densidades de plantación van desde 1 600 hasta 100 árboles por hectárea, siendo un rango muy amplio de densidades que es necesario optimizar. Las guías de densidad son herramientas utilizadas en dasonomía para el manejo de densidad de los rodales, siendo esta herramienta de gran utilidad sobre todo en lugares donde no existe información sobre esta relación, para la optimización de la densidad en plantaciones forestales. Por otro lado, estas guías hacen un seguimiento al desarrollo de la densidad de los rodales considerando la relación densidad y tamaño; instrumento que permite tomar decisiones a corto plazo sobre las necesidades de raleo, niveles de densidad y la producción de las plantaciones de Balsa.

De acuerdo a Torres y Magaña (2001) las guías y diagramas de densidad se elaboran en dos dimensiones, la densidad expresada en área basal o número de individuos por unidad de superficie y la variable dependiente que puede ser el volumen total, volumen comercial o alguna variable que aproxime la altura, diámetro o incluso la misma área basal. Los diagramas de la densidad pueden ser obtenidos mediante los siguientes métodos:

- Diagrama con base en el índice de densidad de Reineke (Long et al., 1988).
- Diagrama con base en la ley de autoclareo (Drew y Flewelling, 1979).
- Diagrama de área basal (Gingrich, 1967).
- Índices de espaciamiento (Hummel, 1954).

Figura 26. Diagrama de densidad con base al índice de Reineke, zona de investigación.

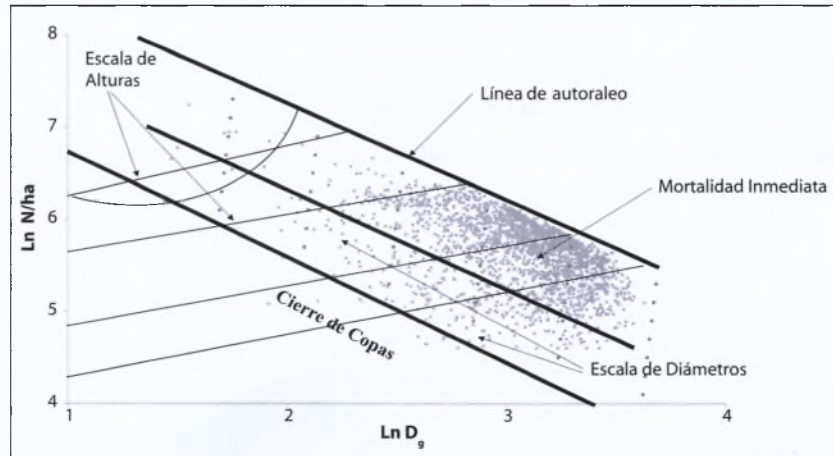


Elaborado por: Autores.

En el diagrama representado en la Figura 26 se puede observar la relación entre el logaritmo del número de árboles por unidad de superficie en proporción a la superficie y el diámetro medio cuadrático para la zona de estudio; además se puede obtener funciones de acuerdo a la densidad. La línea superior determina el máximo soporte ecológico del número de árboles y diámetro medio cuadrático. La línea inferior proporciona la densidad mínima definida regularmente por los factores de competencia de copas y las líneas de mortalidad inmediata.

Por otro lado, en la Figura 27 se resalta la línea superior en negrita como la línea del Índice de Densidad de un Rodal de Reineke (máxima densidad posible de un rodal) y la línea inferior se asocia a la competencia de copas o cierre de copas para la zona de investigación (Brendenkamp, 1984).

Figura 27. Diagrama de densidad con base a la ley de autoclareao para plantaciones de Balsa.



Elaborado por: Autores.

Por otro lado, la ley de autoraleo, basado en la densidad, es de utilidad para las plantaciones forestales, debido a que proporcionan una serie de información sobre la producción y manejo, dando una inquisición adicional (Figura 27) que esquematiza varios procesos intrínsecos del manejo y producción forestal (Seo et al., 2004). De acuerdo a Torres y Magaña (2001) esta última línea de referencia usualmente se obtiene monitoreando las condiciones e identificando la densidad en la cual se inicia la mortalidad producto de la competencia inter-arbórea. A este diagrama usualmente se le adiciona otras variables de referencia como es el diámetro y la altura promedio del rodal. Sin duda para adicionar estas variables es de vital importancia asumir normalidad de la distribución diamétrica del rodal, por lo que estos diagramas son más comunes en plantaciones forestales. La Figura 27 muestra un ejemplo para las plantaciones de Balsa en la zona de investigación.

4.2.4 Espaciamiento relativo (RS)

El espaciamiento relativo es otra herramienta para medir la densidad de un rodal. Este parámetro forestal puede ser definido como la “relación entre la distancia media entre árboles y la altura dominante de un rodal” (Vilčko, 2005). Hart (1928) propuso una medida basada en la distancia

promedio entre árboles y la altura promedio de los árboles dominantes, el mismo que se conoce como el índice de espaciamiento. Wilson propuso posteriormente en el año de 1946 este índice como una herramienta de manejo forestal, cuyo principio es de mantener un crecimiento constante dentro de un rodal (Bredenkamp y Burkhart, 1990). En algunas ocasiones, el espaciamiento relativo puede también referirse como un índice de espaciamiento (Clutter et al., 1983), de tal manera que, puede ser escrito así:

$$RS = \frac{\text{Distancia promedio entre árboles}}{\text{Altura dominante del rodal}}$$

La medición del espaciamiento relativo en los bosques naturales siempre va a ser un tema de gran debate en las ciencias forestales, debido a la existencia de una amplia variación de distribuciones espaciales de árboles dentro de un mismo rodal, así como también, la dificultad de determinar la distancia entre árboles de una misma especie. Por otro lado, el espaciamiento relativo entre especies de árboles varía, pero este no es afectado por el índice de sitio (Bredenkamp y Burkhart, 1990). El espaciamiento relativo es más aplicable a rodales, donde la distancia entre árboles es relativamente similar. Para los árboles de plantaciones, en las cuales se asume una distribución cuadrática, el espaciamiento relativo puede ser determinado como:

$$RS = \frac{\sqrt{10,000 / N}}{H_d}$$

Dónde:

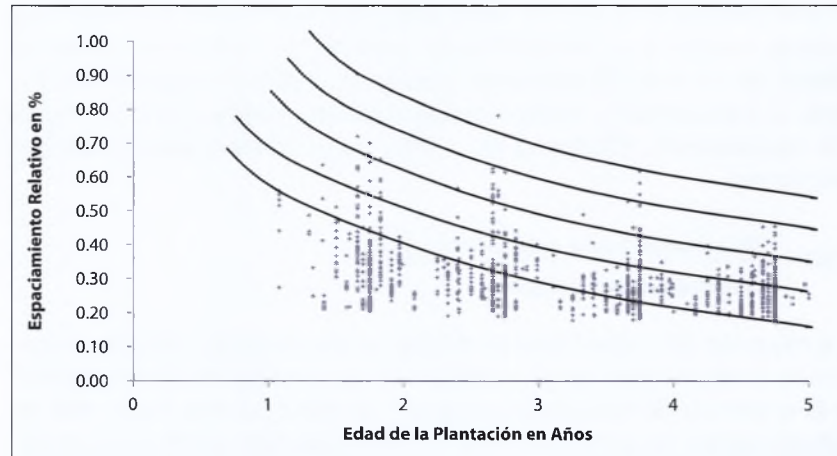
RS= Espaciamiento relativo

N= Número de árboles por unidad de área

H_d = Altura dominante del rodal / Altura Máxima (m)

El espaciamiento relativo que fue calculado para la zona de investigación, en promedio presentó una media de 0.29, con un máximo de 0.90 y un mínimo de 0.18.

Figura 28. Curvas derivadas de la relación edad/espaciamento relativo para las plantaciones de Balsa en el área de investigación.



Elaborado por: Autores.

La Figura 28 muestra la inmensa variabilidad de este parámetro de manejo, lo que resulta un problema de optimización de recursos para la producción de la Balsa en la zona de estudio. Esto ratifica la falta de investigaciones sobre la producción y raleo de la Balsa. Adicionalmente, a través del espaciamento relativo se podría realizar comparaciones entre rodales de una especie forestal en particular (Vičko, 2005). La información obtenida en esta investigación no puede ser comparada con otras para este parámetro. De tal manera que, estos datos son desarrollados únicamente para la Balsa y no puede ser extrapolado a otras especies. En el pasado los forestales han empleado las tablas de espaciamento relativo para comparar curvas guías y los regímenes de raleo. De ahí que, las curvas guías son específicas para una política de aprovechamiento forestal (Gadow v., y Bredenkamp, 1992).

El espaciamento relativo tiene una relación estrecha con la edad. Así, se puede observar una función inversamente proporcional y de forma como un J invertida. La pendiente de la curva decrecerá con el incremento del número de árboles por unidad de área. Por ejemplo, la variación del RS se aumenta con el decrecimiento del número de árboles/ha, sin consideración de la calidad de sitio y la edad inicial. Todo rodal

de una determinada especie tiene un comportamiento común, con un valor de espaciamiento relativo mínimo con el incremento de la edad del rodal. La curva inversa puede ser obtenida cuando la altura dominante se incrementa con el tiempo y el número de árboles permanece relativamente constante por unidad de área. La relación puede ser expresada de la siguiente manera:

$$RS = \beta_0 + \beta_1 * t^{\beta_2}$$

Dónde:

RS= Espaciamiento relativo

t= Edad del rodal en años

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = Parámetros

La ecuación de RS es una estimación de la distancia promedio entre árboles contiguos, cuya precisión es suficiente cuando los árboles sobre una superficie están regularmente distribuidos y la distancia entre árboles contiguos varía escasamente. Para las plantaciones de Balsa se puede establecer la relación de espaciamiento y la cantidad de árboles presentes en un rodal. La analogía es presentada a continuación:

$$N = 1000 * E^{-2}$$

Dónde:

N= Número de árboles por hectárea

E= Espaciamiento entre árboles (m)

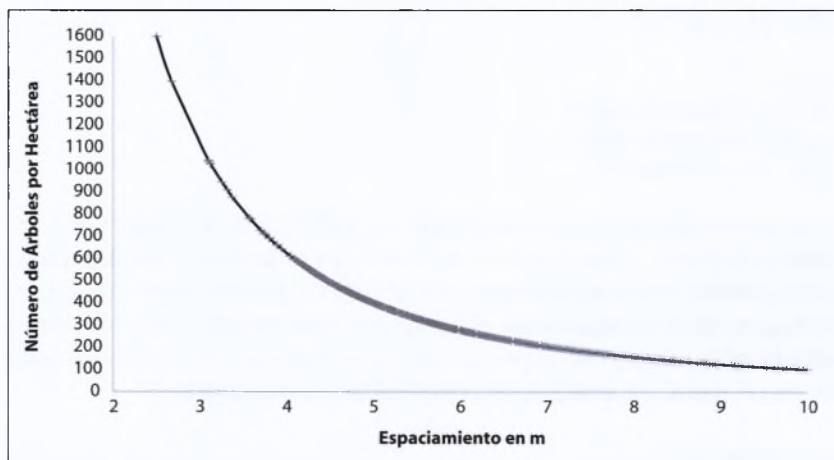
Esta función se representa en la Figura 29 y permite calcular el número de árboles esperados por hectárea para las plantaciones de Balsa. El número de árboles por unidad de área es inversamente proporcional al diámetro medio de los árboles.

Los rodales con alta densidad serán sometidos a una gran competencia, que conducirá a un grado de mortalidad o raleo natural. Es evidente entonces que, para un determinado promedio de tamaño de árboles límite y número de árboles por unidad de área pueden coexistir en un rodal coetánea.

Otra medida de la densidad de un rodal es el espaciamiento relativo (RS); es decir, el radio de la distancia promedio entre los árboles

y la altura dominante de un rodal. Este parámetro es más apropiado para rodales, donde la distancia de plantación entre árboles es más o menos similar. Por consiguiente, para las plantaciones es mucho más adecuado para indicar la densidad del rodal midiendo el espaciamiento relativo.

Figura 29. Relación árboles espaciamiento según el modelo desarrollado para la Balsa.



Elaborado por: Autores.

4.2.5 Límite máximo y mínimo del área basal para plantaciones de Balsa

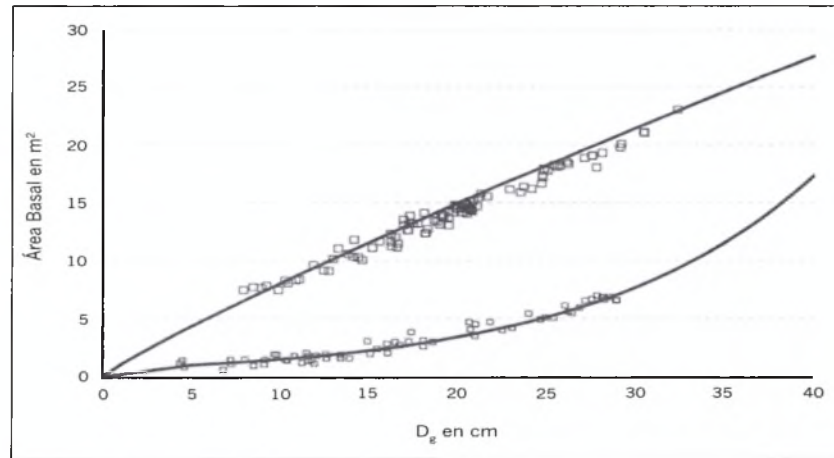
Mediante el uso de una regresión, se pudo establecer los límites máximo y mínimo del área basal para plantaciones de Balsa, en relación al diámetro cuadrático medio.

$$\begin{aligned} \text{Área Basal}_{\max} &= 1.04191 \cdot D_g^{0.8894} & r^2 &= 0.92 \\ \text{Área Basal}_{\min} &= 0.6731 \cdot D_g^{0.81247} & r^2 &= 0.89 \end{aligned}$$

Elaborado por: Autores.

En la Figura 30 se presenta los datos empleados con la finalidad de ajustar los modelos desarrollados para establecer la relación área basal/diámetro cuadrático medio. Se puede ver similares modelos desarrollados para Picea (*Picea abies*) en los bosques de Alemania por Sánchez y Vilčko (2002).

Figura 30. Evaluación de los valores máximo y mínimo del área basal en relación al diámetro cuadrático medio para plantaciones de Balsa.



Elaborado por: Autores.

4.3 VOLUMEN DE PRODUCCIÓN PARA BALSA

4.3.1 Caracterización de la forma de fuste

Forma de un árbol

La forma de fuste se caracteriza por el grado de decrecimiento del diámetro con la altura. Los árboles pueden tener diferentes formas de fuste, cuando las pequeñas diferencias de conicidad no pueden ser visualmente reconocidas. Dependiendo de la forma de fuste, el volumen del árbol podría ser muy diferente uno de otro con igual DAP. La forma de fuste puede ser graficado resaltando la curva de ahusamiento, el cual proporcióna el radio de fuste a una determinada altura. Para esto se requiere de mediciones del radio a diferentes alturas de fuste. De tal manera que, algunos procedimientos simples pueden ser desarrollados como el factor de forma (Kleinn, 2007; Cañadas et al., 2010).

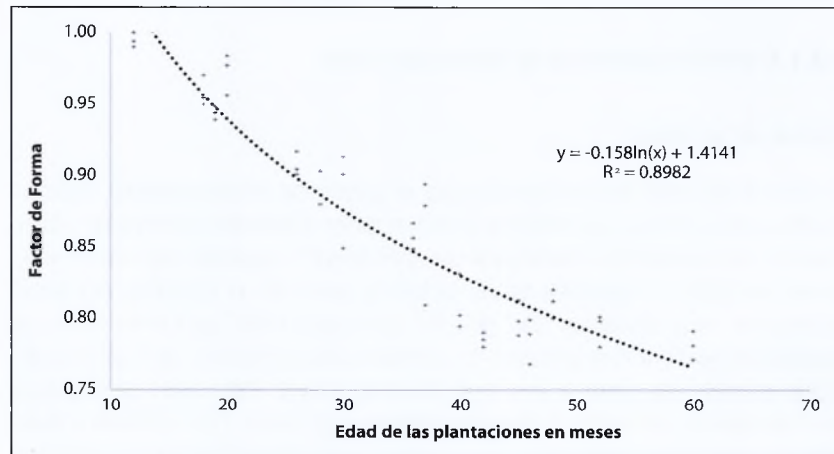
4.3.2 Factor de forma de un árbol

Con la finalidad de determinar el volumen, se necesita un factor de reducción, el cual disminuye el volumen del cilindro (como definición de DAP y Altura) al verdadero valor del volumen de fuste. Este factor de reducción se le denomina Factor de Forma y se le representa con la siguiente fórmula:

$$f = \frac{\text{Volumen de fuste actual}}{\text{Volumen de un cilindro sobre un diámetro determinado}}$$

Dependiendo del diámetro referente, el cual está siendo empleado, se distingue entre el Factor de Forma Absoluto ($f_{1,3}$) y el Factor de Forma Relativo ($f_{0,9}$ o $f_{0,1}$). Factor de forma absoluto: El DAP es tomado como un diámetro referente medido a una altura absoluta de 1.3 m. El Factor de Forma Absoluto es usualmente descrito como $f_{1,3}$.

Figura 31. Evaluación del factor de forma en relación a la edad de las plantaciones de Balsa.



Elaborado por: Autores.

Factor de Forma Relativo: El diámetro al 10% de la altura del árbol es tomado como referente para el cálculo de cilindro. El Factor de Forma Relativo es conocido como $f_{0,1}$ o en otros libros $f_{0,9}$. Una vez que el Factor de

Forma es conocido (por estudios previos por ejemplo) el volumen del fuste puede fácilmente ser calculado por una fórmula. Actualmente el Factor de Forma puede ser visto como un simple modelo de volumen, prediciendo el volumen de un árbol como una función de DAP, la altura y el Factor de Forma. Este varía de una especie a otra según la edad, el sitio, competencia, densidad, tamaño de corona, etc. (Kleinn, 2007; Cañadas et al., 2010). En la Figura 31, se muestra el desarrollo del Factor de Forma en relación a la edad de las plantaciones de Balsa.

La dispersión de los datos observados es un reflejo de los factores antes mencionados, comúnmente este parámetro varía en orden de magnitud de 0.45 a 0.55. El Factor de Forma absoluto está siendo empleado para relacionarlo con la altura comercial. El Factor de Forma de fuste comercial está usualmente en el orden de la magnitud $f_{com} = 0.7$ y debe ser empleado con reserva para el cálculo del volumen de esta sección del árbol (Kleinn, 2007; Cañadas et al., 2010; Cañadas et al., 2014).

4.4 MODELOS DE PRODUCCIÓN DE VOLÚMENES

La producción en volumen maderable comercial es una importante cuantificación en las ciencias forestales y corresponde al crecimiento de los rodales. La estimación de este parámetro en un rodal directamente en el campo es imposible. Es así que, el volumen es predicho o calculado por el empleo de otras variables involucradas indirectamente en el cálculo del volumen, como es el área basal, altura del árbol, factor de forma y en algunos casos la edad del rodal. Así, básicamente existen dos grandes vías para predecir el volumen, el primer método es el análisis del fuste, en los cuales los cálculos se basan en segmentos del tronco y el segundo método es mediante la predicción a través de ecuaciones de volumen disponibles o tablas de volúmenes (Cañadas, 2007).

El cálculo fundamental del volumen de un árbol (basado en el factor de forma) es la función del diámetro a la altura del pecho, altura y factor de forma y dependiendo del producto final, la masa del fuste podría ser expresado ya sea en volumen o en peso. Igualmente, la altura del árbol podría considerarse la altura al ápice (altura total) o a la altura de las primeras ramas (altura comercial). La medida comúnmente empleada puede ser escrita de la siguiente manera:

$$V = f(D, H, F)$$

Dónde:

V= Volumen

D= Diámetro a la altura del pecho (cm)

H= Altura (m)

F= Factor de forma

f= Función

Existe un número de ecuaciones de volumen disponible para una serie de especies, pero no desarrollados para la Balsa. Así, un elemento interesante en estas ecuaciones es el factor de forma, ya que su incremento dentro de los rangos de diámetro es bastante diferente de un autor a otro. En este estudio, una función de volumen fue empleada para predecir el volumen de la *O. pyramidale* en la región oeste de la costa ecuatoriana. Lo expuesto puede ser representado como se expresa a continuación:

$$V = \left[7.0598 - \left(\frac{0.151178}{d * \pi} \right) \right] * \left[\frac{\pi * d^2 * h}{40000} \right]$$

Dónde:

V= Volumen de fuste, a partir de los 5 cm de DAP

d= Diámetro a la altura del pecho (cm)

h= Altura total (m)

$\pi = 3.1416$

Elaborado por: Autores.

4.4.1 Relación entre volumen y área basal de un árbol individual de Balsa

La relación entre volumen y área basal es una herramienta importante para la predicción del volumen individual de un árbol mediando únicamente en el diámetro a la altura del pecho (DAP). El área basal en la mayoría de inventarios forestales es muy difícil medir las variables del área basal para todos los árboles de cada parcela, debido a la implicación de los diferentes costos del levantamiento de estas variables. La medición del DAP puede ser obtenida a bajo costo en cualquier tipo de especie forestal, en tanto que la medición de la altura es considerada más costosa bajo las mejores condiciones y la exactitud de la toma de la altura en árboles grandes y densos se traduce en una tarea más ardua. Este es uno de

los procedimientos de rutina en el manejo forestal especialmente en las plantaciones forestales. En este estudio, una simple regresión no lineal fue aplicada para estimar el volumen y se expresa de la siguiente manera:

$$V = 79.171 * g^{1.5199}$$

Dónde:

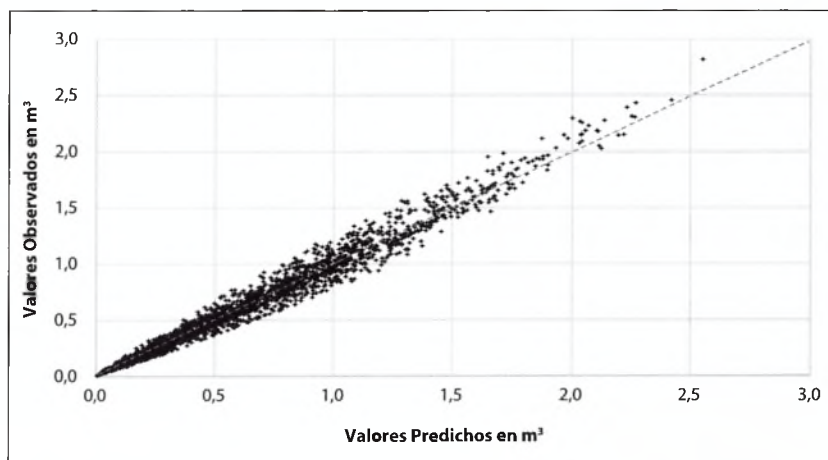
V = Volumen individual de un árbol, a partir de 5 cm (m^3)

g = Área basal de un árbol individual (m^2)

Elaborado por: Autores.

En la Figura 32 se observan los valores predichos mediante la ecuación arriba descrita y los volúmenes calculados para el volumen de la Balsa. La raíz cuadrada del error medio describe la sub o sobre estimación del modelo propuesto ($\pm 0.075 m^3$).

Figura 32. Valores observados y predichos para el volumen individual.



Elaborado por: Autores.

4.4.2 Predicción explícita de volumen actual

La predicción de volumen puede ser hecha para dos diferentes situaciones “actual” o “futuro”. La diferencia fundamental es que, el vaticinio de la producción actual no implica un pronóstico de la densidad de un rodal, mientras que la expectativa de la futura producción implica, ya sea explí-

citamente o implícitamente este parámetro. La predicción de volúmenes actuales puede ser dividida en dos grupos.

En el primer grupo, la solución de una ecuación que comprende un sistema de ecuaciones estima el volumen por unidad de área. Este conglomerado es conocido como sistema de producción explícito. Mientras que el segundo, es llamado como un sistema implícito de predicción. Con estos sistemas la solución de ecuaciones involucradas en el pronóstico de producción de volúmenes proporciona información básica sobre la estructura y su potencial de aprovechamiento de un rodal.

Entonces, las estimaciones de volumen que implican la predicción de la estructura de un rodal se determinan a partir de cálculos con información adicional de la estructura de un bosque (Clutter et al., 1983). Bajo un sistema explícito de predicción del volumen actual, cuatro modelos proporcionan buenos resultados (como parámetro de evaluación se empleó el r^2), basados sobre el cálculo de volumen, los siguientes modelos fueron empleados:

$$V = a * g * H_d \quad 1$$

$$V = a * g \left[1 - \exp^{-b*t} \right]^c \quad 2$$

$$V = a * g * H_d \left[1 - \exp^{-b*t} \right]^c \quad 3$$

$$V = a * S * g \left[1 - \exp^{-b*t} \right]^c \quad 4$$

Dónde:

V= Volumen de un rodal (m³)

g= Área basal de rodal (m²)

H_d= Altura máxima (m)

S= Índice de sitio (base a los 4 años)

t= Edad (años)

a,b, c= Parámetros del modelo

Los modelos arriba descritos pueden ser empleados en trabajos de inventarios forestales o en otras predicciones de volumen, basados en las variables disponibles. Por ejemplo, la medición de la altura máxima es difícil realizar porque demandan tiempo para el levantamiento de esta informa-

ción. Bajo estas circunstancias, mediante el empleo de la ecuación 2, uno puede predecir el volumen de un rodal, conociendo la edad del mismo y midiendo únicamente el DAP. En el caso que se conozca el índice de sitio, la ecuación 4 es más aplicable. Si la edad del rodal no es conocida o difícil de proyectar, entonces la ecuación 1 podría ser de suma importancia en la práctica. El volumen de un rodal, el área basal del rodal, altura máxima, índice de sitio y edad son variables a las que se pueden recurrir para el ajuste de los modelos arriba mencionados. Los modelos para la estimación del volumen son resumidos a continuación para la Balsa:

$$V = 0.65919156 * g * H_d \quad 1$$

$$V = 21.2952 * g \left[1 - \exp^{-0.098 * t} \right]^{3.1989} \quad 2$$

$$V = 0.669853 * g * H_d \left[1 - \exp^{-0.9105 * t} \right]^{0.3935} \quad 3$$

$$V = a * S * g \left[1 - \exp^{-b * t} \right]^c \quad 4$$

Elaborado por: Autores.

Estas ecuaciones de predicción de la producción de volumen pueden ser empleados para rodales de Balsa en las tierras bajas de la costa oeste del Ecuador. La ecuación 1, 2, y 3 reportan casi el 94% de las variaciones de volumen con sus parámetros (área basal, altura máxima, índice de sitio y edad). La variación explicada en los modelos, donde el área basal y la edad son incluidas, explica el 90% de la variación. El índice de sitio empleado en la ecuación 4 ($V = a * S * g \left[1 - \exp^{-b * t} \right]^c$) fue determinado mediante el promedio de la altura máxima a la edad de 4 años para una clase particular de sitio.

4.4.3 Predicción de volumen futuro

Existe un número de modelos disponibles para predecir el volumen futuro para varias especies. Todas estas ecuaciones son explícitas para predecir la producción futura del volumen, basados en el área basal, edad y/o índice de sitio. En la mayoría de casos, la predicción se basa sobre el presente (actual) del volumen de un rodal. Por tal motivo, para resolución de la siguiente ecuación $V = a * S * g \left[1 - \exp^{-b * t} \right]^c$ en un mismo rodal

(o sitio) a una edad proyectada, se puede reescribir la ecuación de la siguiente manera:

$$V_2 = V_1 \frac{G_2}{G_1} \left[\frac{(1 - \exp^{-a*t_2})}{(1 - \exp^{-a*t_1})} \right]^b$$

Dónde:

V_1 = Volumen actual del rodal (m^3)

V_2 = Proyección del volumen de un rodal a una edad proyectada (m^3)

G_1 = Área basal actual (m^2)

G_2 = Área basal a ser predicho a una edad proyectada (m^2)

t_1 = Edad actual (años)

t_2 = Edad proyectada (años)

a, b = Parámetros del modelo

Una vez parametrizados los valores correspondientes a la ecuación arriba expuesta mediante el método maximum likelihood del programa SAS (SAS Institute, 2014) se puede predecir la producción futura de volumen de un rodal de Balsa. La ecuación final que pronostica la futura producción en volumen es de la siguiente manera:

$$V_2 = V_1 \frac{G_2}{G_1} \left[\frac{(1 - \exp^{-0.0305*t_2})}{(1 - \exp^{-0.0305*t_1})} \right]^{1.63}$$

Elaborado por: Autores.

Este modelo puede ser empleado para la predicción del futuro volumen basado en el volumen corriente. Esta expresión es válida bajo las mismas circunstancias de índice de sitio. Por ejemplo, puede ser sustituido por el volumen de crecimiento del rodal a diferentes edades y ésta podría ser explicada por la función arriba expuesta.

Por otro lado, en la Figura 33 se muestran los datos de volumen de rodales de *O. pyramidale* a partir de 5 cm de DAP plateados en consideración a la altura máxima. La variación en dirección vertical esta mayormente asociada a las diferentes densidades de plantación observadas en las plantaciones de la zona de estudio. La Figura 33 también muestra la simple regresión $V = a * H^b * N^c$. El coeficiente de determinación (r^2) fue de 0.789 y el modelo ajustado es el siguiente:

$$V = 0.0000521 * H_d^{3.099} * N^{0.8541}$$

Dónde:

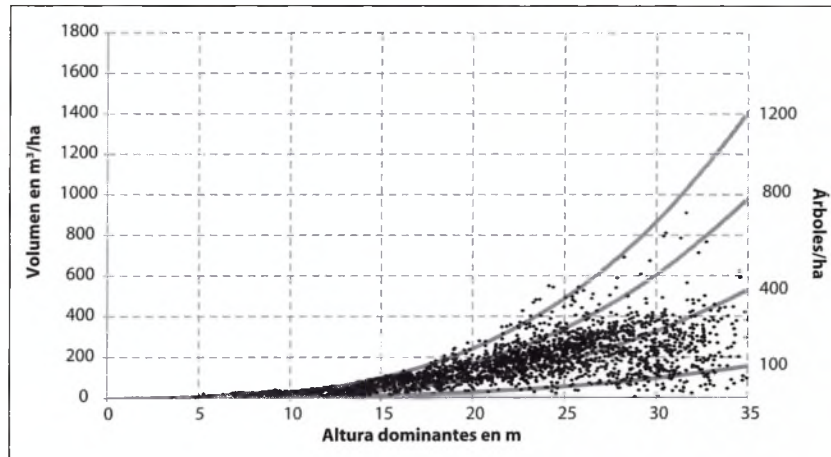
V = Volumen individual de un árbol, a partir de 5 cm (m^3)

H_d = Altura máxima en m.

N = Número de árboles/ha

Elaborado por: Autores.

Figura 33. Modelo relacionando altura máxima, volumen del rodal y densidad de plantación.



Elaborado por: Autores.

4.5 ESTIMACIÓN DEL CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE LA BALSA

La clave para un manejo forestal exitoso es poseer un apropiado entendimiento de las fuerzas que influyen en el crecimiento y desarrollo de un rodal. El modelamiento del crecimiento y la producción es la esencia del negocio de la madera. Los profesionales forestales necesitan modelos para la predicción de la producción frente a la variedad de condiciones ambientales y determinadas situaciones de manejo, posibilitando a los mismos tomar decisiones a nivel de rodal e implicaciones de largo plazo alrededor de la organización total de los bosques privados y estatales.

Para una determinada especie, el crecimiento y producción de una plantación coetánea es mayormente determinado por dos factores:

- La capacidad de producción y crecimiento de un sitio.
- Densidad de un rodal, el cual está determinado por los regímenes silviculturales.

La calidad de sitio y la densidad de un rodal son dos de las más prominentes complicaciones en la silvicultura y el manejo de una plantación de producción maderable coetánea. Estos dos factores afectan la productividad de los bosques y su influencia por tanto necesita ser entendida. No solamente por los que guían el manejo de los bosques, los cuales están involucrados en el manejo de rodales, sino también por los científicos, los cuales desarrollan innovación mediante modelos de crecimiento y producción en tiempo de cambio climático y pago de servicios ambientales.

4.5.1 Calidad de sitio

De acuerdo a Finkeldey et al. (2005) el objetivo de cualquier programa de mejoramiento forestal es optimizar uno o más de los siguientes puntos:

1. Tasa de crecimiento forestal.
2. Resistencia a plagas y enfermedades.
3. Calidad del producto final (madera, leña, forraje, etc.).
4. Resistencia a plagas y enfermedades.

De ahí que, una mala selección para el crecimiento forestal resultará desfavorable en relación al incremento de diámetro y altura. En el contexto del manejo forestal, la calidad de sitio es definida como el potencial de producción para una especie específica sobre un sitio de crecimiento dado. La calidad de sitio podría ser evaluado directamente recurriendo a la disponibilidad de datos sobre la medición de árboles o indirectamente ya sea por las características de la vegetación o por características topográficas, edáficas o factores climáticos (Gadow v., 2004).

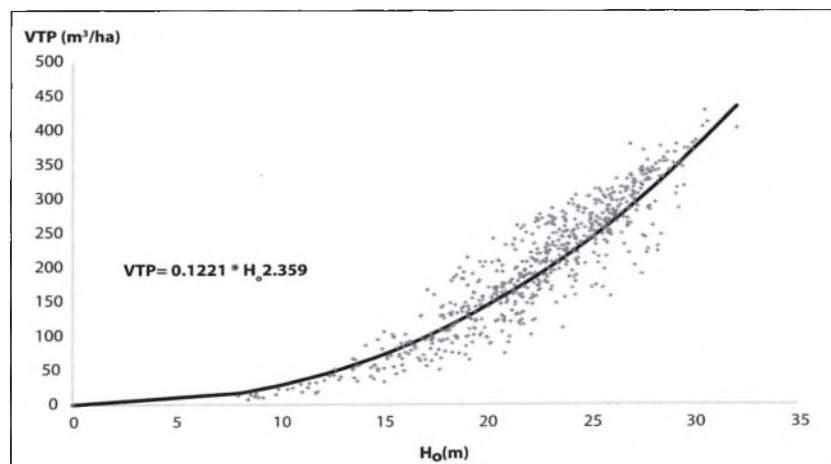
Métodos directos para la evaluación de la calidad de sitio

La metodología clásica para evaluar la calidad de sitio se basa en el índice de sitio y la ley de Eschhorn's. En 1904, mientras se recolectaba información sobre un plan de manejo en la selva negra (Swarzswald, región

boscosa al suroeste de Alemania), J. Eschhorn encontró una relación entre la altura media de un rodal y el volumen total de producción (VTP) para rodales de *Abies alba*, sin consideración de la edad de un rodal. Esta analogía fue posteriormente confirmada para otras especies forestales y gradualmente se constituyó en la conocida ley Eschhorn's (Mitscherlich, 1978). Este hecho estocástico puede ser adaptado para describir la relación entre la producción de volumen total y la altura máxima para la Balsa, la respectiva función está mostrada en la Figura 34. La ley de Eschhorn's ayuda a los forestales a estimar el volumen total de producción a una determinada edad por muchas predicciones mediante la estimación de la altura máxima para una determinada edad. En nuestros días, los forestales que manejan plantaciones necesitan estar en la capacidad de predecir más allá de la producción del volumen total. La función adaptada a los rodales de la Balsa es expuesta dentro de la Figura 34.

Un análisis financiero significativo de las plantaciones de Balsa es únicamente posible mediante una estimación detallada de productos maderables y esto requiere de conocimientos de edad de los diámetros de los árboles y la forma de los fustes. La ley de Eschhorn's no puede ver directamente el futuro en la predicción de la producción de una plantación, pero indirectamente esta implicación permanece aún relevante.

Figura 34. Relación entre producción de volumen total y altura máxima para rodales de *O. pyramidale*. Nótese que, la densidad de los rodales se mantiene constante 300 árboles/ha.



Elaborado por: Autores.

La altura de un rodal es una variable clave en la mayoría de modelos en plantaciones comerciales en la actualidad, esto se debe no solamente por la relación entre la producción total y la altura de un rodal.

La altura dominante y los árboles co-dominantes son poco afectados por la variación de la densidad de un rodal, la misma permanece estable sobre un amplio rango de regímenes de aclareos y es por tal motivo un muy útil parámetro para evaluar la calidad de sitio. La mayoría de métodos basados en la altura evalúan la calidad de sitio e involucran el uso de familias de curvas altura/crecimiento, conocidas como curvas de índice de sitios (Gadow v., 2004).

4.5.2 Valoración de la calidad de sitio usando el índice de sitio

El índice de sitio es un importante fenómeno para los bosques naturales y plantaciones, los cuales reflejan el crecimiento y desarrollo de un rodal forestal. Los dos mayores componentes que influyen sobre el comportamiento de una plantación son los factores climáticos y edáficos. En estudios forestales sobre la calidad de sitio, han sido estimados con diferentes índices. No existe un simple índice basado directamente en parámetros ambientales, los cuales muestran suficiente precisión en el modelaje del manejo forestal. La producción de madera podría ser el mejor indicador de la productividad del sitio, pero la medición del volumen de la producción es una tarea difícil y es mucho más confortable el uso de métodos más simples (Vanclay, 1994).

En rodales coetáneos, lo más popular en la valoración de la calidad de sitio es a través del índice de sitio, el cual implica la edad y la altura de una especie. El índice de Sitio proporciona datos concretos de cómo una especie arbórea en particular muestra su desempeño sobre diferentes condiciones de sitio. La altura de un rodal puede ser usado como un estimador de la productividad de un rodal en un sitio, el cual es lo suficientemente bueno para reflejar el máximo potencial de crecimiento de la altura sobre un sitio (Vanclay, 1994).

El incremento en altura es relativamente independiente de la densidad de un rodal, de tal manera que los aclareos no le afectan mayormente (Gadow v., 2004). La altura promedio puede también ser ajustada para describir la calidad del crecimiento en un sitio, siendo este criterio

poco empleado en las ciencias forestales (Gadow v., 1986). Desde luego, con la finalidad de rehabilitar esta medición, se puede establecer una correlación entre la altura media y la altura máxima, que es altamente significativa y depende de la densidad de un rodal (Villiers y Van Laar, 1986).

Tabla 9. Ajuste de modelos para la relación altura máxima y edad para los rodales de *O. pyramidale* en la zona de estudio.

Modelos	Valores de los parámetros de los modelos			r ²
	α	β	γ	
Chapman-Richards: $H = \alpha [1 - \exp^{-\beta t}]^\gamma$	40.99	0.3198	0.0699	0.81
Cilliers-Van: $H = \alpha [1 - \exp^{-\beta(t-\gamma)}]$	41.01	0.2999	0.0019	0.78
Lundqvist: $H = \alpha [\exp^{-\beta t - \gamma}]$	27.45	0.8979	2.0678	0.69
Gompertz: $H = \alpha * \beta^y$	11.45	20.0061	0.0710	0.31
$H = \alpha [1 - \exp^{-\beta - \gamma t}]$	29.54	0.1966	0.7597	0.79
$H = \alpha + \beta * t^\gamma$	0.14	10.0333	0.69999	0.71
$H = \frac{\alpha}{1 + \exp^{\beta - \gamma t}}$	44.55	0.8903	0.3559	0.77

Dónde:

H= Altura máxima (m)

t= Edad (años)

α, β, γ= Parámetros de los modelos (α es una asíntota o parámetro de escala de una variable dependiente, β escala de tiempo coordenada x, γ control de la forma de la curva)

Elaborado por: Autores.

En el presente estudio, diferentes modelos asintóticos fueron aplicados para todos los datos de campo en relación a la altura máxima/edad de los rodales de Balsa. Para obtener el mejor ajuste en este trabajo, la altura máxima, fue definida como el promedio de altura de los 100 árboles más altos por hectárea y por rodal. En la Tabla 9 se explica el resumen de los diferentes modelos asintóticos, el ajuste para la edad y altura máxima.

Así, el modelo más apropiado fue empleado para predecir el índice de sitio a una determinada edad y altura dominante.

La ecuación de Chapman-Richards es la versión generalizada del modelo de crecimiento desarrollado por Bertalanffy's usada para monocultivos de coníferas en rodales coetáneos (Pienaar y Turnbull, 1973). Este modelo es muy popular y aplicado para las plantaciones coetáneas. Entonces, este modelo se aplicó para la Balsa y fue el que mejor ajuste mostró en relación a los otros modelos probados en esta investigación. Exhibiendo un r^2 de 0.81, en concordancia con los parámetros de ajuste determinados de acuerdo al método estimación maximum likelihood (SAS Institute, 2014). El modelo para predecir la altura máxima para la Balsa (índice de sitio) fue la siguiente:

$$H = 50.54 * \left[1 - \exp^{-0.0859*t} \right]^{0.481}$$

Elaborado por: Autores.

Esta ecuación de Chapman-Richards puede ser reescrita y servir como un predictor del crecimiento futuro en altura de una plantación de Balsa, pudiendo esta ecuación ser expresada de la siguiente manera:

$$H_2 = H_1 \left[\frac{1 - \exp^{-0.1101*t_2}}{1 - \exp^{-0.1089*t_1}} \right]^{0.5239}$$

Elaborado por: Autores.

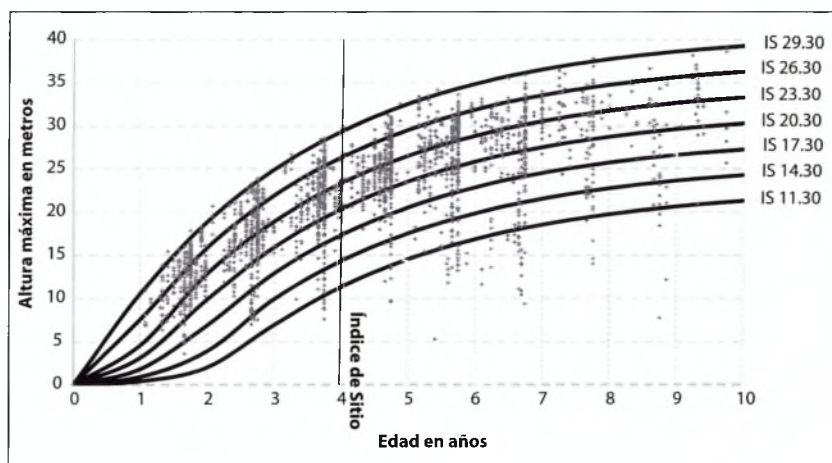
La altura máxima (H_2) que alcanzará un rodal a una edad proyectada (t_2) puede ser predicha para una determinada altura máxima (H_1) a una edad (t_1). Así por ejemplo, si en una plantación se mide la altura máxima de 18.60 m (H_1) a la edad de 1 año (t_1) la altura de Balsa (H_2) a la edad de 4 años (t_2), sería:

$$H_2 = 18.6 \left[\frac{1 - \exp^{-0.1101*4}}{1 - \exp^{-0.1089*1}} \right]^{0.5239} = 35.59m$$

El índice de sitio es un parámetro importante en estudios silviculturales. De tal manera que, desarrollando las clases de sitio se constituyen en una herramienta preliminar para las prácticas de producción y aprovechamiento

forestal, los cuales están cercanamente relacionados con los factores de los sitios. Por ejemplo, el desarrollo de tablas volumétricas es establecido para diferentes clases de sitios. El concepto es difícil de discutir o explicar debido a que, diferentes países emplean sus propios sistemas. En Alemania, las tablas de producción empleadas inicialmente para *Picea abies* fueron desarrolladas por Weidemann (1936) los cuales se basaron en la altura media para la clasificación de un sitio. Pero actualmente, las tablas de producción y su desarrollo por Assman-Franz están basadas en la altura máxima. En el Reino Unido las tablas de producción, la clase de sitio se basan sobre el incremento medio anual (IMA) (Van Laar y Akça, 1997).

Figura 35. Clases de sitios e índices de sitio para *O. pyramidale* en la zona de investigación (altura a la edad de referencia 4 años).



Elaborado por: Autores.

En este análisis, la clase de sitio se basó en la altura máxima. La Figura 35 muestra la clasificación de sitio mediante curvas que representan el desarrollo de la altura máxima en relación a la edad, etiquetadas desde 11.30 a 29.30 m de la altura máxima alcanzada a la edad de 4 años. De tal manera que, se estima así el índice de sitio, bajo diferentes condiciones agroecológicas. Estas curvas anamórficas fueron derivadas a través del “método de la curva guía” (Tewari et al., 2007). En este estudio para la Balsa, las clases de sitio fueron divididas en 7 clases. La primera (clase I) se refiere a la mejor calidad de producción en altura (IS 29.30 m) y clase VII (IS 11.30 m) para sitios de pobre crecimiento en altura.

Los patrones del crecimiento en altura observados en la zona de estudio son presentados en la Figura 35. Las plantaciones mostraron una serie de características distintivas con respecto al crecimiento en altura. Se puede resaltar primeramente el alto crecimiento a edades tempranas. Estos datos pueden ser comparados con los obtenidos por Centre Technique Forestier Tropical (CTFT) (1961) donde se presentan alturas de 9 metros a los 4 años de edad para *O. lagopus*. Es necesario resaltar que se trata de alturas promedio del rendimiento promedio de arboricultura de la Balsa bien manejada y ubicada en condiciones medio ambientales de calidad media (CTFT, 1961).

4.6 DIÁMETRO Y ÁREA BASAL PARA RODALES NO RALEADOS

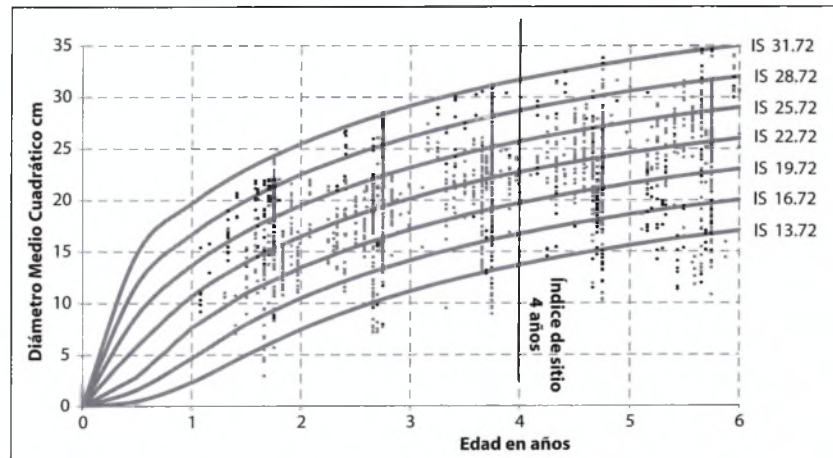
El diámetro y el área basal son parámetros importantes de un rodal, ellos constituyen el centro del pronóstico de un rodal o del crecimiento de un único árbol. De tal manera que juegan un importante rol en el desarrollo de modelos para el pronóstico del diámetro y área basal en las ciencias dasonómicas. Cuando se revisan diversos estudios, uno se encuentra con una diversidad de modelos de crecimiento, los cuales se ocupan en una parte con el total de un rodal o la otra con árboles individuales de un rodal (Munro, 1974). Los modelos de árboles individuales son una selección importante de índices de competencia, la estimación del crecimiento de un árbol individual y desarrollo de funciones modificadas. Una especial importancia o peso de estos modelos recibe la variable de competencia que sufre un árbol individual en relación a su vecindad (Mitchell, 1975; Sloboda y Pfreundt, 1989; Sterba, 1990; Pretezschn, 1992).

La ocupación y la orientación de la investigación científica sobre los modelos de árbol individual es elevar el nivel de la exactitud de los pronósticos de los parámetros forestales en la práctica. Para los modelos de rodales es de gran importancia la selección de variables independientes, las cuales tienen una estrecha relación con el diámetro medio cuadrático, en especial para los bosques plantados. Los modelos de rodales poseen una alta exactitud a los actuales modelos de árbol individual. Sería deseable que, las dos ventajas de estos métodos sean compartidos por estas dos filosofías de elaborar modelos, con la finalidad de poder ser compartida la información relevante ya sea por los modelos de rodal y de árbol individual.

Los trabajos realizados por Hyink y Moser (1983), Pianaar y Harrison (1988) y Hui y Gadov v. (1996) reportaron que, una gran compatibilidad puede ser alcanzada por los diversos niveles de modelos, junto a este acercamiento es indispensable, evaluar con una alta exactitud, el diámetro del medio cuadrático y el área basal de un rodal. Un gran problema en la elaboración de modelos de rodales es el ciclo de predicción de las variables, lo cual conduce en la regla a un error sistemático (Tang, 1991). Una salida para este tipo de inconvenientes es la correcta selección de variables y el desarrollo de modelos, los cuales se concierne con el crecimiento del diámetro medio cuadrático y del área basimétrica de un rodal en dependencia de la densidad del mismo.

En la Figura 36 se muestra la clase de sitio por diámetro medio cuadrático en relación a la edad para los diferentes sitios en la zona de estudio. El diámetro en el mejor sitio en la zona de estudio fue 31.72 cm. Estos datos pueden ser comparados con los obtenidos por CTFT (1961) quienes observaron un diámetro de 25 cm a la edad de 4 años para *O. lagopus*.

Figura 36. Clases de sitios y curvas de índice de sitio para el diámetro *O. pyramidale*. Estos rendimientos están por debajo de los observados en la zona de estudio (edad referente 4 años).



Elaborado por: Autores.

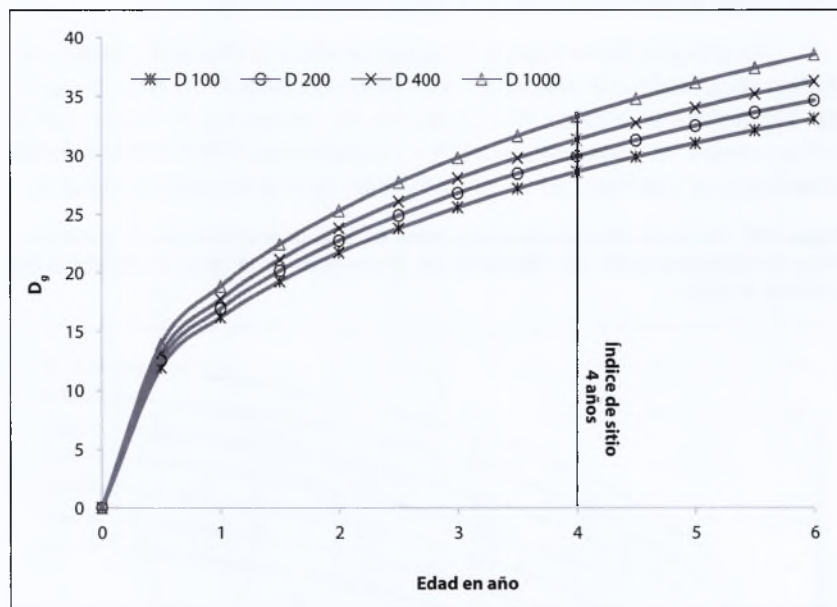
Por otro lado, el diámetro (D_2) que tendrá a una edad proyectada (t_2) puede ser predicha para una determinado diámetro (D_1) a una edad (t_1). El

r^2 fue de 0.94. Así por ejemplo, si en una plantación se mide el diámetro promedio de 23.0 cm (D_1) a la edad de 1.5 años (t_1), el diámetro (D_2) a la edad de 5 años (t_2), sería:

$$D_2 = 23.0 \left[\frac{1 - \exp^{-0.000991 \cdot 5}}{1 - \exp^{-0.000991 \cdot 1.5}} \right]^{0.30899} = 33.35m$$

Elaborado por: Autores.

Figura 37. Desarrollo del diámetro medio cuadrático para diferentes densidades de plantación para el índice de sitio 34.04 m a la edad de 4 años.

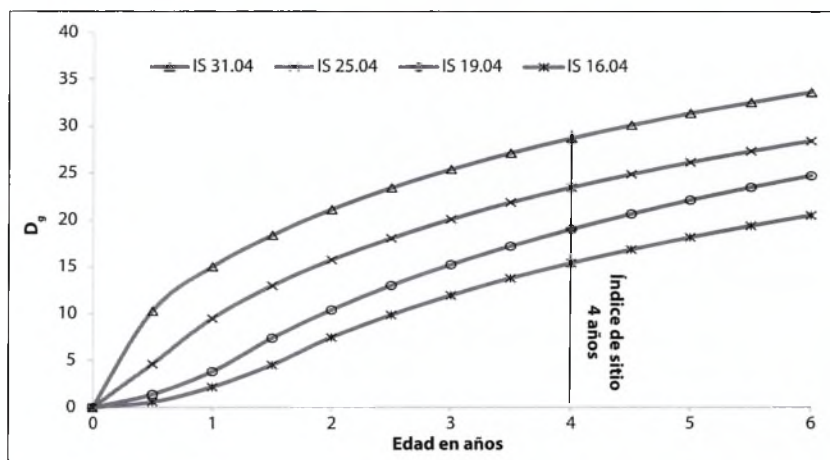


Elaborado por: Autores.

Igualmente, el modelo desarrollado para el diámetro medio cuadrático permite representar el desarrollo del diámetro del promedio del área basal del árbol en cm para diferentes densidades de plantación para el índice de sitio 34.04 m (Figura 37).

Así como también, el crecimiento del diámetro medio cuadrático manteniendo constante la densidad de 300 árboles/ha y variando las condiciones de sitio de 31.04 a 16.04 m a la edad de 4 años (Figura 38).

Figura 38. Desarrollo del diámetro medio cuadrático para diferentes índices de sitio en altura a los 4 años, con una densidad constante de 300 árboles/ha.



Elaborado por: Autores.

4.7 INCREMENTO MEDIO ANUAL (IMA)

El incremento medio anual (IMA) es el crecimiento total de un árbol o un rodal a una determinada edad y herramienta básica para la producción y aprovechamiento forestal (Helms, 1998). No existe ninguna definición estándar de edad de rotación de un rodal, debido a que este parámetro varía largamente entre especies forestales y condiciones de sitio. Así como también, de acuerdo a los objetivos del posterior uso de la madera. En este estudio, la curva del IMA fue construida tomando en cuenta el incremento anual de todas las plantaciones. Los valores de la función ajustada se basaron en el máximo de incremento medio anual observado a las diferentes edades y los parámetros fueron calculados para el siguiente modelo:

$$IMA = \exp[a + b * t + c * \ln(t)]$$

Dónde:

IMA= Incremento medio anual (m^3/ha)

t= Edad (años)

Ln= Logaritmo natural

a, b, c= Parámetros del modelo

Los parámetros calculados para el modelo propuesto para determinar el máximo IMA observado en la zona de estudio son resumidos en la Tabla 10. El modelo de ajuste mostró un coeficiente de determinación de 0.85.

Tabla 10. Valores de los parámetros ajustados a la curva de máximo IMA en la zona de investigación.

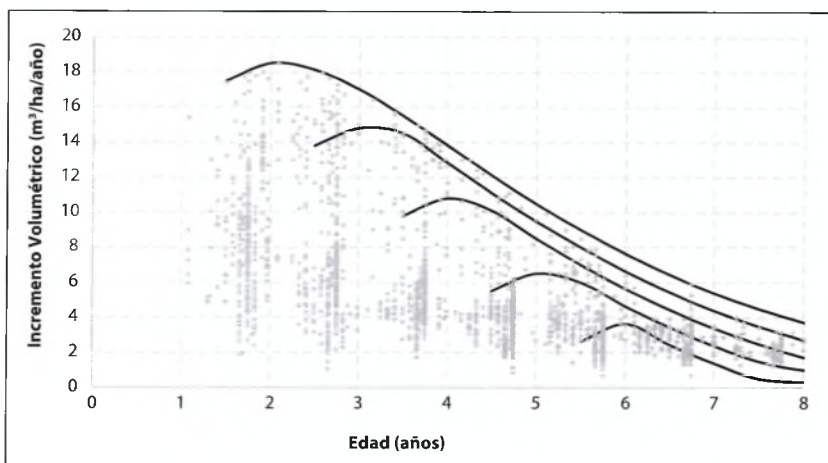
Parámetros del modelo			Observaciones	r^2
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		
3.20998	-0.50990	1.40999	40	0.85

Elaborado por: Autores.

En la Figura 39, se puede observar la curva ajustada que describe el IMA, la línea representa el máximo de IMA para el sitio I. Este fenómeno puede atribuirse a las mejores condiciones de sitio. Dentro de aspectos teóricos, el mejor índice de sitio trae consigo al rodal con mayor IMA en estados tempranos de la plantación en comparación con sitios pobres. Basados en este punto de vista se puede decir que los IMAs por debajo de la línea representada en la Figura 39, son plantaciones que presentaron menores IMAs. En algunas parcelas experimentales con un crecimiento excepcional rápido fueron reportados en Kerela (India) para el Eucalipto con un IMA de 43 m³/ha a los 17 años (Luna, 1996). Por otro lado, las curvas de IMAs sobre el tiempo pueden ser producidas para un determinado valor de índice de sitios y una constante densidad de plantación.

En la Figura 39 se muestra las curvas para los IMAs comerciales para diferentes índices de sitio y una densidad constante de 300 árboles/ha. Las líneas representadas en la Figura 39 muestran el máximo punto de IMA, el cual puede ser tomado como un óptimo de la rotación de una plantación de Balsa, si no existen otras restricciones. La edad de plantación de la Balsa que alcanza el máximo de IMA varía con el índice de sitio, recibiendo altos valores en períodos de tiempo cortos. De acuerdo a Alder y Montenegro (1999) reportan para el Laurel *Cordia alliodora*, en un típico índice de sitio de 24 metros de altura a la edad de 10 años con una densidad de plantación de 300 árboles/ha, un IMA máximo en volumen total de 16.5 m³/ha/año.

Figura 39. Curvas de incremento medio anual en volumen ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$) por índice de sitio para *O. pyramidale* en la zona de estudio.



Elaborado por: Autores.

Sobre los mejores índices de sitios para el Laurel, la edad máxima donde se registra el máximo IMA para volúmenes comerciales ocurren a los 5 años, mientras que en los peores sitios se esperan a más de 30 años, para un típico índice de sitio de 22 a 24, el máximo ocurre de 11 a 16 años. En tanto que De Miguel et al. (2014) expresaron, para la Balsa en Bolivia asumiendo una rotación de 5 años, una predicción del IMA para el volumen comercial de 5.9, 10.4 y 12.9 $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ para sitios con pobres, medianos y buenos índices de sitio correspondientemente. Por otro lado, Webb et al. (1980) reportaron que, en las zonas tropicales se pueden encontrar con incrementos promedio en volumen entre 17 a 30 $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$.

Estos datos obtenidos por Webb et al. (1980) pueden ser contrastados con los de la presente investigación en la zona de estudio, donde se obtuvieron incrementos medios anuales de 18.5 en los mejores sitios, 11.8 en los medianos y 3.6 $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ en los peores sitios. *O. lagopus* produce adecuadamente en las mejores condiciones de suelo y clima. Las plantaciones en sitios desfavorables conducen a la producción de madera relativamente pesada y de baja calidad.

CAPÍTULO 5

Aprovechamiento forestal económico para la Balsa

5.1 VALOR DE EXPECTATIVA DE LA TIERRA (LAND EXPECTATION VALUE)

En este apartado, se considera el análisis de la toma de decisiones desde el punto de vista financiero para el manejo, producción y aprovechamiento forestal de la Balsa. El manejo de la Balsa se trata de un rodal coetáneo, el cual es definido por árboles de una única clase de edad (coetáneo) y con un rango de edades al inicio del rodal de no más de 20% de una rotación. Los bosques coetáneos son regenerados o plantados y aprovechados removiendo toda o la mayoría de árboles del rodal al final del ciclo. De tal manera que, no existe una sobre posición de una generación a otra en un sitio determinado (Gadow v., 2004). El manejo de masas forestales coetáneas está asociado al favorecimiento de especies intolerantes a la sombra, incluyendo por ejemplo al Pigüe, Laurel, Aliso, Pino, Gemelilla, etc. Por otro lado, los costos de establecimiento y aprovechamiento son relativamente bajos en relación al manejo y explotación de especies disetáneas. Por esta razón y otras de tipo silvicultural, el establecimiento de plantaciones coetáneas tienden a ser favorecidas, cuando el objetivo primario de manejo forestal es la producción de fibras para la industria.

La valoración de la expectativa de la tierra (LEV) conocido también como, valoración de la expectativa del suelo (SEV) o valor de la tierra, es uno de los más importantes conceptos financieros en el manejo y aprovechamiento de tierras destinada a la producción forestal (Buongiorno et al., 1995; Sánchez et al., 2004; Zhang y Majumdar, 2013), por lo que se puede señalar dos razones principales:

- Cuando los supuestos asumidos en el cálculo del LEV son reales, proporciona una estimación del valor de la tierra forestal (excluyendo el valor de la madera en pie) para una superficie de terreno, que es empleado primordialmente para el crecimiento, producción y aprovechamiento de la madera.
- Cuando el objetivo principal del propietario de la tierra es maximizar los retornos financieros, el LEV o la generalización de éste es la herramienta principal más empleada para identificar el punto óptimo de los regímenes de manejo de masas forestales coetáneas, incluyendo los esfuerzos de establecimiento de rodales, tratamientos silviculturales intermedios, raleo y decisión del tiempo de rotación.

En el manejo y aprovechamiento forestal es fundamental y de mucha importancia tener la capacidad de establecer el valor de la tierra. Una guía

para explorar su costo es el análisis de las evidencias de transacción comerciales, que son los registros de ventas recientes de propiedades con características similares. Este es un método empleado a menudo por gente que realiza catastros y/o para la valoración de propiedades. Este punto de vista es complicado de aplicar en la valoración de tierras forestales, debido a que es muy difícil a menudo encontrar un número suficiente de transacciones de propiedades forestales idénticas, con la finalidad de comparar precios (Faustmann, 1849; Zhang y Majumdar, 2013), por tanto existen muchas razones para argumentar lo siguiente:

Primero: la tierra forestal no cambia de manos continuamente como en sitios urbanos residenciales u otras propiedades periurbanas o como en cualquier otro estado real de transacciones. La ubicación de una propiedad forestal tiene un gran efecto sobre su valor y este puede cambiar rápidamente de acuerdo a diferentes circunstancias. Así, únicamente las ventas de tierras forestales que se han efectuado recientemente, que estén cercanas una en relación a otra y que se encuentren bajo las mismas condiciones agroecológicas podrían ser comparables en precio de la tierra (Zhang y Majumdar, 2013).

Segundo: las tierras forestales normalmente vienen ensambladas con muchos otros activos, cuyos valores deben ser separados del precio de transacción, con el fin de evaluar por si sola el valor de la tierra forestal. Obviamente, esta superficie viene generalmente provista de árboles, con la finalidad de calcular el valor de la tierra como tal, el coste de la madera tiene que ser substraído del precio de transacción. No obstante, los precios de la madera pueden ser también difícil de determinar, ya que depende de una serie de factores.

Uno de ellos, por ejemplo, sería la venta súbita de un área forestal. Aquí, usualmente se emplea el coste de liquidación de la madera en pie, que sería el precio de la masa forestal vendida en ese momento (Sánchez et al., 2004). Sin embargo, a menos que realmente se planee vender la madera tan pronto como sea posible, el valor de liquidación puede estar sustancialmente por debajo del verdadero precio de la madera.

Adicionalmente, la tierra forestal también está ligada a menudo con otras actividades agrícolas, infraestructura, caminos y servicios ambientales (Sánchez, 2003; Zhang y Majumdar, 2013). Así por ejemplo, muchas propiedades privadas de tierras forestales no relacionadas con

la industria, adquieren áreas boscosas para fines recreacionales o propósitos de conservación y desarrollo (Dominguez y Espinel, 2009). En estos casos, el LEV sería un discreto predictor del valor de la tierra forestal.

Debido a los argumentos expuestos arriba, el LEV es frecuentemente el mejor método disponible para estimar el valor de las tierras forestales. La optimización económica del manejo y aprovechamiento forestal permite identificar, evaluar y seleccionar las opciones de manejo de las tierras forestadas. De ahí que, el LEV se constituye en la principal herramienta para la evaluación y elección de las opciones de manejo para rodales coetáneos. Siempre y cuando, el primer objetivo de un propietario de la tierra es maximizar los retornos financieros del crecimiento forestal (Sánchez et al., 2004; Domínguez y Espinel, 2009). Esencialmente, las opciones de manejo que maximizan el LEV son aquellas que proporcionan un óptimo retorno financiero. De ahí que, la rotación inmejorable financieramente hablando puede ser identificada mediante la maximización del LEV. Similarmente, un programa de raleo debe sustentarse en un punto recomendable financieramente para cada alternativa de manejo que deje el mayor valor del LEV (Buongiorno et al., 1995; Zhang y Majumdar, 2013).

Mientras el LEV es aplicado para optimizar el manejo y aprovechamiento silvicultural de los rodales coetáneos, el concepto y los métodos usados pueden ser adaptados mediante el cálculo del LEV para determinar las alternativas de manejo de las plantaciones disetáneas (Sánchez et al., 2004). De tal manera que, el concepto básico del LEV tiene una amplia aplicación en el manejo forestal. Por otro lado, el concepto de Beneficios y Costos podrían ser incorporados en el cálculo del LEV. Pero por la dificultad de ser medidos en términos financieros por los largos períodos de espera para la cosecha forestal estos no son considerados.

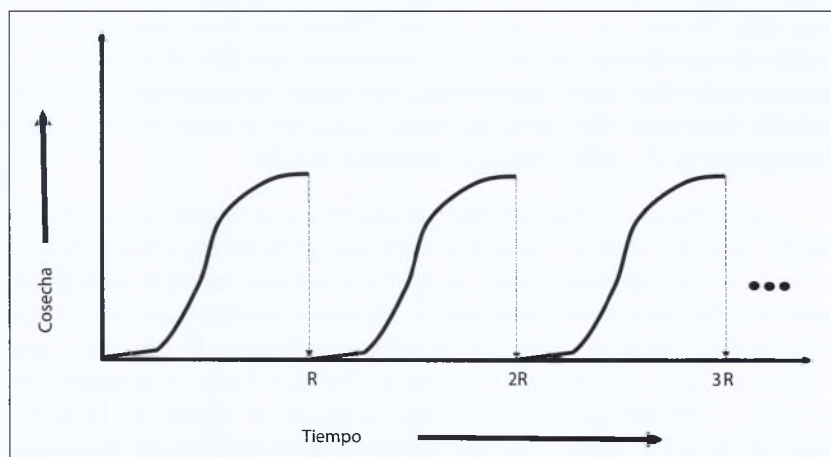
Otra opción para la maximización del LEV es el establecimiento de los costos de oportunidad. Pero mediante el siguiente ejemplo se proporciona el argumento del porqué no son incorporados en el cálculo del LEV. Así, una alternativa de manejo financieramente insuperable para un rodal forestal produciría un LEV de US\$ 350/ha y comparada con un LEV de una alternativa seleccionada es US\$ 250/ha. Entonces el costo de oportunidad de la alternativa seleccionada es de US\$ 100/ha. Esto implicaría un error de selección de esta alternativa. En otros términos,

los beneficios no cuantificados asociados con la alternativa seleccionada tiene que ser de un valor de por lo menos US\$ 100/ha.

5.2 DEFINICIÓN Y SUPUESTO DEL LEV

En la Figura 40 se ilustra los patrones de crecimiento y aprovechamiento de un rodal forestal coetáneo. En ella se muestra una secuencia de rotaciones; cada período de producción tiene un número de años R en el cual un rodal crece a una edad R y entonces es cosechado. Además, se detalla en la Figura 40 también tres rotaciones consecutivas, esta secuencia de turnos forestales se espera continuar a perpetuidad.

Figura 40. Una serie de idénticas rotaciones de un rodal coetáneo, mostrando la fundamental asumiendo subyacente del valor de la expectativa de la tierra (LEV).



Elaborado por: Autores.

El LEV es el valor presente por unidad de área de los costos e ingresos proyectados de series infinitas de rotaciones idénticas de plantaciones forestales coetáneas iniciadas de una tierra baldía (Faustmann, 1849; Zhang y Majumdar, 2013). El cálculo de un LEV asume que:

1. Cada rotación es de igual duración.
2. La secuencia de eventos dentro de cada turno de corta es el mismo.
3. Que los ingresos netos asociados con cada evento dentro de una rotación es la misma en todos los aprovechamientos forestales.

En esencia, este supuesto dice que, cada rotación será exactamente la misma. Esta asunción claramente no es probable que se mantenga en la mayoría de situaciones. Debido a que es poco posible que cualquier rodal forestal se maneje de forma idéntica para cada rotación. Es aún más improbable que los ingresos netos asociados con un determinado evento serán los mismos de una rotación a otra, los cuales requerirían unos costos (reales), precios y producción constantes (Faustmann, 1849; Zhang y Majumdar, 2013).

Estos supuestos están hechos para simplificar el análisis. En cualquier investigación, es necesario establecer algunos apócrifos para simplificar la complejidad de eventos. La pregunta clave es, ¿Cuál sería la mejor asunción? y si es así, ella aportaría con la suficiente mejora en base al incremento de la complejidad y si se justifica el costo de adquisición de información adicional. En general, no sabemos cómo van a cambiar las cosas en un futuro (Zhang y Majumdar, 2013). Al no contar con información específica sobre cómo los insumos pueden variar y asumir que los entes no cambiarán es a menudo una forma razonable de hacer las cosas. Por tanto, si hay información que, puede ser utilizada para predecir como cambiará los costos o beneficios en el futuro, entonces el concepto del LEV puede ser generalmente acomodado a tales expectativas.

En la mayoría de casos es importante considerar que, los supuestos hechos sobre la rotación posteriores al turno inicial no afectará mayormente el valor de LEV (Zhang y Majumdar, 2013). Debido a que la rotación futura está alejada en el tiempo, su típico valor de descuento compensa en menor proporción el valor total de LEV. Usualmente, la parte crítica del LEV radica en la definición de los supuestos relacionados con la rotación inicial.

5.3 CÁLCULO DEL LEV

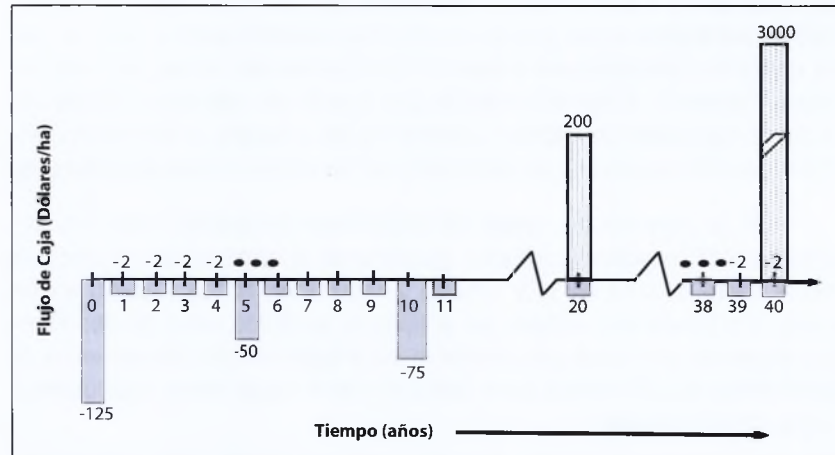
El cálculo de un LEV se efectúa con la aplicación de técnicas de un análisis financiero. La principal dificultad es la presencia de los diferentes flujos de dinero asociados dentro de cada una de las rotaciones de un rodal forestal (Chang, 1981, 1990). Si cada una de las rotaciones en un horizonte infinito de tiempo y de manejo de las unidades asume que las operaciones son las mismas, el cálculo del LEV implica una repetición de una típica primera rotación.

Los cuatro tipos básicos de costos e ingresos asociados con la rotación de bosques coetáneos son:

1. Costos de establecimiento.
2. Un ingreso final neto.
3. Costos anuales.
4. Resumen de los costos interludios o beneficios que ocurren en el intermedio de una rotación.

En la Figura 41 se recrea cada uno de los puntos arriba descritos. El costo de establecimiento del rodal es de US\$ 125 mientras, el ingreso neto final es de US\$ 3 000; existe por tanto un costo anual de US\$ 2, los cuales se dan cada año comenzando desde el año 1 y terminando en el año 40.

Figura 41. Diagrama de flujo de caja para un ejemplo de cálculo del LEV.



Elaborado por: Autores.

Finalmente, hay tres flujos de costos: uno de US\$ 50 en el año 5, otro de US\$ 75 en el año 10 y un ingreso de US\$ 200 en el año 20, cada uno de estos tres tipos de flujo de caja debe ser ya sea actualizados o capitalizados con la finalidad de comparar a ellos dentro de un valor presente o futuro de los valores para una rotación (Cañadas y Rade, 2013).

Notación

En general es necesario comenzar con la definición de los símbolos que se va a emplear en estos análisis:

R = Largo de la rotación (años).

E = Costos de establecimiento de un rodal por unidad de área.

A = Costo neto o beneficio por unidad de área de cada costo y beneficio anual.

I_t = Costos o ingresos intermedios por unidad de área ocurridos en un tiempo t , mayor a 0 pero menor a R .

$Y_{p,t}$ = Producción esperada por unidad de área del producto p a la edad R .

P_p = Precio del producto p .

n = El número de productos cosechados al final.

C_n = Costos de la venta de madera.

r = Interés real.

A menudo, los costos de establecimiento (E) incluyen precios que ocurre en el tiempo cero de la rotación. Típicamente en estos incluirá el coste de preparación del sitio/plantación, platines, etc., (E)= US\$ 125/ha (Figura 41). Los ingresos anuales no son comunes en el campo forestal, pero podría incluirse actividades como cacería o bienes ambientales. Los costos anuales incluyen asuntos tales como impuestos a la propiedad o costos de manejo anual, A = -US\$ 2/ha (Figura 41). El resumen de los costos intermedios incluye tratamientos con herbicidas, costos de prevención de incendios y raleos pre comerciales. Por tanto el resumen de los costos intermedios de la Figura 41 incluye US\$ 50/ha en el año 5 (I_5 = US\$ 50/ha) y US\$ 75/ha de costo en el año 10 (I_{10} = US\$ 75/ha). La sinopsis de los costos intermedios incluye rubros como comercialización, control de fuego, venta de resinas, etc. En la Figura 41, los ingresos de raleo a la edad de 20 años es considerado un ingreso intermedio (I_{20} = US\$ 200/ha).

Una tasa de interés real debería siempre ser empleada para el cálculo del LEV. Uno de los supuestos básicos en este análisis es el precio y los costos son asumidos constantes. Así, la inflación debería ser removida de la tasa de interés, de los precios y los costos usados en el análisis. De ahí que, este valor se define como invariable.

5.4 MÉTODO DE CÁLCULO 1: CALCULANDO EN VALOR PRESENTE DE LA PRIMERA ROTACIÓN

La fórmula de cálculo de LEV para un período infinito es:

$$V_o = \frac{R}{(1+i)^t - 1}$$

Aquí R , representa el período de pago. En el cálculo del LEV el lapso entre pagos será considerado como el tiempo de una rotación a otra. Es decir, el tiempo entre cada tala raza. Así, t en la fórmula de arriba será reemplazado por R (por rotación). El numerador de esta fórmula (R por período de pagos) asume ser los ingresos conseguidos al final de cada período. De tal manera que, R en el numerador debe ser reemplazado por el valor futuro de cada ciclo de corta, por ejemplo, el precio acumulado al final de la rotación. En el caso del manejo forestal de un rodal, todas las rotaciones implican las mismas actividades en tiempo y producción. El valor futuro de los flujos de costos e ingresos para todas las rotaciones se consideran ser iguales, debido a que todo se repite en el coste futuro de los costos e ingresos de la primera rotación. Entonces, el primer paso será el cálculo del valor futuro de la primera rotación. Este precio será reemplazado por la R del numerador de una serie infinita de períodos de la fórmula arriba expuesta.

Incluso, se piensa que la ecuación para un lapso infinito de series de rotaciones forestales requiere de un valor futuro del primer ciclo de corta, este puede ser encontrado y servir de mucha ayuda en el cálculo del valor presente de la misma y convertirse en un valor futuro. Este es un procedimiento básico en el primer método de cómputo de LEV. Una ventaja de este procedimiento es establecer el valor presente de la primera rotación y este provee por tanto una buena oportunidad para chequear la consistencia de los flujos de caja. Partiendo de que, el LEV es la suma de los valores presentes de todas las futuras rotaciones, incluyendo a la primera. El valor presente de la primera rotación debe ser menor que el LEV. Usualmente representa una proporción medible del LEV, entre el 77 al 99% (Sánchez, 2004).

Si al calcularse el valor de LEV se obtiene una cifra mucho menor o mayor al valor presente de la primera rotación se sospechará la posibilidad de algún error en el procedimiento. Con esta consideración, los

siguientes pasos describen el desarrollo de la sistematización del LEV mediante el método 1:

Calcular el valor presente de la primera rotación (PV_{R1}). Esto puede ser obtenido mediante la siguiente ecuación:

$$PV_{R1} = -E + \sum_{t=1}^{R-1} \frac{I_t}{(1+r)^t} + \frac{A[(1+r)^R - 1]}{r(1+r)^R} + \frac{\sum_{p=1}^n P_p Y_{p,R} - C_h}{(1+r)^R}$$

La fórmula contiene cuatro términos correspondientes a los tipos de costos e ingresos generalmente encontrados en una rotación forestal que se describió anteriormente. El primer término $-E$, representa el valor presente de los costos de establecimiento. La segunda expresión, está dado por I_t en el numerador, incluye el valor presente de cada costo intermedio y retornos. El signo de sumatoria (Σ) significa la adición posible de todos los ingresos intermedios que pueden ocurrir en cualquier año desde el 1 hasta $R-1$. Por supuesto, I_t será cero para la mayoría de estos años. El tercer componente, está dado por una A , emplea una fórmula de serie anual finita para proporcionar el valor presente de los costos e ingreso que ocurren anualmente. El término final suministra el valor presente del aprovechamiento final, la sumatoria designada en el numerador de la última expresión permite la posibilidad de hasta n . En otras palabras, los productos a ser cosechados.

El valor de cada producto es calculado mediante la multiplicación del precio por el producto de la cosecha. El término C_h reconoce que, a menudo hay costos asociados con la cosecha, en adición con los ingresos. De ahí que, se debe:

1. Convertir el valor presente de la primera rotación dentro del valor futuro:

$$FV_{R1} = (1+r)^R PV_{R1}$$

2. Aplicar un período infinito de pago en la fórmula:

$$LEV = \frac{FV_{R1}}{(1+r)^R - 1}$$

Combinando estas ecuaciones dadas, se tiene:

$$LEV = \frac{\left[-E + \sum_{t=1}^{R-1} \frac{I_t}{(1+r)^t} + \frac{A[(1+r)^R - 1]}{r(1+r)^R} + \sum_{p=1}^n \frac{P_p Y_{p,R}}{(1+r)^R} - \frac{C_h}{(1+r)^R} \right] (1+r)^R}{(1+r)^R - 1}$$

Esta ecuación, representa la combinación de resultados de los dos pasos arriba descritos y la deducción de la última fórmula. En la práctica es mejor realizar cada uno de los pasos por separado.

5.5 MÉTODO DE CÁLCULO 2: DEDUCIENDO EL VALOR FUTURO DE LA PRIMERA ROTACIÓN DIRECTAMENTE

Partiendo de que, el numerador de la anterior ecuación representa una serie infinita de periodos que suponen ser un valor futuro, se deberá calcular el LEV sin efectuar el primer cómputo del valor presente de la primera rotación. Los siguientes pasos describen el procesamiento de datos del LEV mediante la aplicación directa del valor futuro de la primera rotación.

1. La siguiente fórmula es empleada para calcular el valor futuro de la primera rotación:

$$FV_{R1} = -E(1+r)^R + \sum_{t=1}^{R-1} I_t(1+r)^{(R-t)} + \frac{A[(1+r)^R - 1]}{r} + \sum_{p=1}^n P_p Y_{p,R} - C_h$$

La ecuación expuesta arriba representa justamente la suma de cuatro simples términos. El primero es, $-E(1+r)^R$ proporciona el valor futuro de los costos de establecimiento de la plantación forestal. El siguiente componente está representado por I_t y suministra el valor futuro de cada uno de los costos e ingresos intermedios. La tercera expresión A , personifica el valor futuro de los costos y beneficios que ocurren anualmente. El último elemento es el valor futuro de la cosecha final.

2. Se aplica la igualdad de pago periódico infinito:

$$LEV = \frac{FV_{R1}}{(1+r)^R - 1}$$

Combinando estas dos ecuaciones dadas se obtiene la fórmula para establecer el LEV:

$$LEV = \frac{-E(1+r)^R + \sum_{t=1}^{R-1} I_t(1+r)^{(R-t)} + \frac{A[(1+r)^R - 1]}{r}}{(1+r)^R - 1} + \sum_{p=1}^n P_p Y_{p,R} - C_h$$

Esta expresión matemática es equivalente a la fórmula final expuesta en el método 1, mediante la multiplicación de los términos individuales en el soporte del numerador de la combinación de la fórmula LEV del método 1, por el término $(1+r)^R$.

5.6 CÁLCULO MEDIANTE MÉTODO 3: SEPARANDO LOS COSTOS E INGRESOS ANUALES

La parte más complicada del cálculo del LEV es el componente de los ingresos anuales netos. Este término puede ahora ser simplificado considerablemente al reconocer que, los métodos anteriores tratan como una serie anual finita. El ingreso neto anual es realmente una serie imprecedera cíclica dentro de un lapso de series perpetuas. Reconociendo esta simplificación se vuelve mucho más escueta que la fórmula finita de series anuales. El tercer método de cálculo del LEV usa este allanamiento de cálculo del método 2, un procedimiento similar podría ser empleado para compendiar el método 1.

1. Cálculo del valor futuro para la primera rotación directamente, ignorando los ingresos anuales (esta modificación del valor futuro es denominado aquí por FV^*R1):

$$LEV'_{R1} = -E(1+r)^R + \sum_{t=1}^{R-1} I_t(1+r)^{(R-t)} + \sum_{p=1}^n P_{p,R} - C_h$$

2. La fórmula de pago para un período infinito del valor futuro de la primera rotación calculado en el primer paso y emplea la ecuación de serie infinito anual para los ingresos netos anuales se tiene que:

$$LEV = \frac{FV'_{R1}}{(1+r)^R - 1} + \frac{A}{r}$$

Combinando estas ecuaciones se obtiene

$$LEV = \frac{-E(1+r)^R + \sum_{t=1}^{R-1} I_t(1+r)^{(r-t)} + \sum_{p=1}^n P_{p,R} - C_h}{(1+r)^R - 1} + \frac{A}{r}$$

Todas estas expresiones expuestas son matemáticamente equivalentes y todas ellas proporcionan el valor correcto del LEV. De ahí que, se puede utilizar cualquiera de estas fórmulas. Sin embargo, se debe escoger la que se ajuste a sus necesidades.

Ejemplo: Establecimiento de un rodal a través de la regeneración natural de la Balsa

En la Estación Experimental Tropical Pichilingue (EETP) la Balsa se regenera naturalmente sin costos de establecimiento. Cada 4 años se puede aprovechar 100 m³/ha y con un valor de US\$ 40/m³. Los costos de inversión anuales para el manejo del rodal es de US\$ 5.00/ha. Asumiendo una tasa de interés del 5%. ¿Cuál es el valor de la tierra (por hectárea)?.

Respuesta: No hay costos de establecimiento, precios intermedios o ingresos. Lo único que se tiene son los costos de cosecha y los ingresos por aprovechamiento de la madera de Balsa. Aplicando el método 3, el LEV puede ser calculado de la siguiente manera:

$$FV_R^{-1} = 100 \text{ m}^3/\text{ha} \times \text{US\$ } 40/\text{m}^3 = \text{US\$ } 4,000.00/\text{ha}$$

Ahora, aplicando la fórmula de pago para un período infinito:

$$LEV = \frac{\$4\,000}{(1.05)^4 - 1} + \frac{\$5/\text{ha}}{0.05} = \text{US\$}18\,661.48/\text{ha}$$

Ejemplo: Cálculo del LEV para un plantación tradicional de Balsa

Si se supone que la tasa de interés, producción y precios son correctos y si únicamente el valor de la tierra es la producción de madera. El valor de tierra en si para Pichilingue sería de US\$ 18 661.48 por hectárea. La Tabla 11, presenta una consideración de los siguientes ingresos y costos asociados con el manejo de un rodal determinado de la Balsa.

El cálculo del LEV para este rodal asume que, la tasa de interés es de 5%.

Tabla 11. Tabla de costos y retornos para una plantación de Balsa.

Actividad	Cantidad	Año
<i>Producción de plantas</i>		
Compra de plantas (4x4)	175.00	
Transporte de plantas	50.00	0
<i>Preparación del suelo</i>		0
Tumba de árboles	180.00	
Roza y vallada	80.00	0
Corona, trazado y planteo	80.00	0
<i>Establecimiento de la plantación</i>		0
Hoyado	80.00	
Fertilización	11.56	0
Siembra	96.00	0
Replante	96.00	0
Subtotal	848.56	0
<i>Mantenimiento de la plantación 1^{er} año</i>		
Chapias (2 por año)	180.00	1
Fertilización urea (50 g)	13.75	1
Fertilización completa 10-30-10	11.56	1
Aplicación de fertilizante	48.00	1
Subtotal	253.31	
<i>Mantenimiento de la plantación 2^{do} año</i>		
Chapias (1 por año)	90.00	
Podas	16.00	2
Fertilización urea (50 g)	13.75	2
Fertilización completa 10-30-10	11.56	2
Aplicación de fertilizante	48.00	2
Subtotal	179.31	2
<i>Costos indirectos</i>		
Herramientas	60.00	
Combustible	5.92	Anual
Arriendo de terreno (costo de oportunidad)	80.00	Anual
Gastos administrativos	295.00	Anual
Subtotal	440.92	Anual
<i>Costos cosecha</i>		
Motosierrista	450.00	
Ayudante de operados	40.50	4
Obreros cargadores	96.00	4
Subtotal	586.50	4
Venta		
150 m ³ /ha x US\$ 40/m ³	6 000.00	4

Elaborado por: Autores.

Respuesta: Primero, se calcula ya sea el valor presente o futuro de la primera rotación. Esto es fácil realizar si la información es organizada de acuerdo a la Tabla 12.

Tabla 12. Valores presente y futuro de los costos e ingresos asociados con la plantación de Balsa.

Actividad	Cantidad	Año	Valor presente	Valor futuro
Producción y establecimiento	848.56	0	-US\$ 848.56	- US\$ 1 031.43
Mantenimiento de la plantación 1 ^{er} año	253.31	1	-US\$ 241.25	- US\$ 304.57
Mantenimiento de la plantación 2 ^{do} año	179.31	2	-US\$ 162.63	- US\$ 197.63
Costos indirectos	440.92	Anual	-US\$ 1 560.86	- US\$ 1 893.24
Costos cosecha	586.50	4	-US\$ 482.52	- US\$ 586.48
Venta	6 000.00	4	US\$ 4 936.21	US\$ 5 999.99
TOTAL			US\$ 1 640.39	US\$ 1 993.90

Elaborado por: Autores.

Si el valor presente de la primera rotación es computado para los 4 años, el resultado es igual al valor futuro del primer ciclo de corta y puede ser calculado directamente:

$$FV_R^1 = (1+r)^R PV_R^1 = (1.05)^4 \times US\$ 1\ 640.39 = US\$ 1\ 993.90.$$

Ahora, el LEV puede ser obtenido utilizando la fórmula para una serie de período infinito:

$$LEV = \frac{FV_R^1}{(1+r)^R - 1} = \frac{1\ 993.90}{(1.05)^4 - 1} = US\$9\ 052.17$$

Igualmente que en el caso anterior, si los supuestos sobre la tasa de interés, producción y precios son correctos y si el uso de la superficie tiene como fin la producción de madera, el valor de tierra desnuda para una Plantación en EETP sería de US\$ 9 052.17 por hectárea.

5.7 ROTACIÓN ÓPTIMA FINANCIERA

Uno de los usos claves del LEV es la selección de la mejor alternativa para el manejo, producción y aprovechamiento de rodales coetáneos, considerando que los propietarios de los predios forestales desean maximizar sus ingresos financieros. Uno de las más importantes decisiones a tomar en cuenta en el manejo de los rodales coetáneos es la determinación de la edad de rotación. Es decir, la edad en la cual el rodal está listo para ser cosechado desde el punto de vista económico y dar paso a un nuevo establecimiento de un rodal, de tal manera que la rotación óptima financiera se da cuando se logra el máximo LEV. Una vía para obtener este parámetro es la identificación de la mejor rotación para un rodal y esto se logra mediante el cálculo del LEV. En el caso de una especie forestal con diferentes alternativas de manejo que influyen sobre el tiempo de rotación, la tarea es identificar la edad de rotación que atañe al más alto nivel del LEV.

1. Asumiendo que la producción de un rodal de Balsa (Y) es 564.86 m³/ha a la edad de 4 años de rotación y es dada como una función de la edad (A) determinada por la siguiente ecuación:

$$Y(A) = 119.4 * (A)^{1.1621}$$

Elaborado por: Autores.

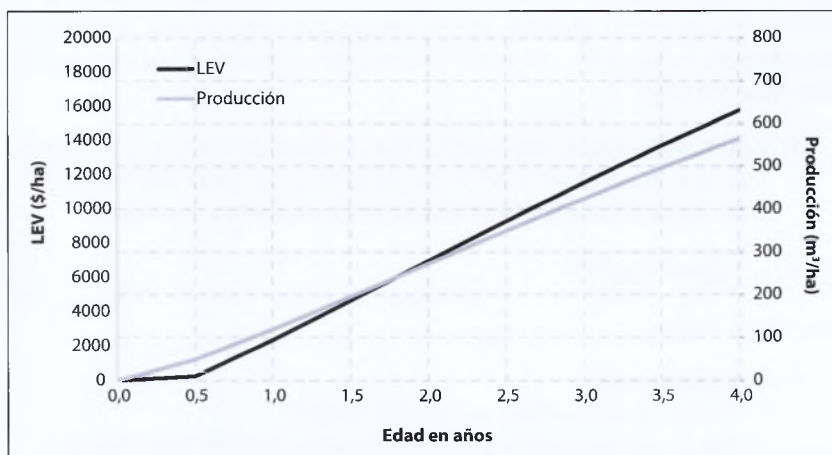
2. Arrogarse que:
 - El precio de la madera es de US\$ 40/m³.
 - El precio de establecimiento del rodal es de US\$ 846.56/ha.
 - Los impuestos anuales de propiedad es de US\$ 1.91/ha.
 - Los costos anuales de manejo es US\$ 18.50/ha.
 - La tasa marginal del impuesto al ingreso es de 12%.
 - El rango real de alternativa de retorno es del 4%.
3. Finalmente, se asume que todos estos valores no cambiarán y que el propósito del propietario de la tierra es maximizar el retorno financiero de su tierra forestal.

Aplicando el método 3 para el cálculo del LEV (con un término adicional, la cantidad asignada para la tasa de los impuestos), la fórmula para el LEV en este ejemplo se presenta como una función de la edad de rotación y se expresa de la siguiente forma:

$$LEV(R) = \left[\frac{-846.56(1.04)^4 + 40xY(4)}{(1.04)^4 - 1} - \frac{2041}{0.04} \right] * (1 - 0.12)$$

Esta ecuación se combina con la función de producción de esta especie y puede ser empleada para calcular el valor de LEV para el ejemplo del rodal citado para cualquier edad de rotación. En la Figura 42 se muestra la curva de producción de madera (curva en gris) del ejemplo propuesto en confrontación con la curva del LEV sobre el crecimiento del rodal con el transcurso del tiempo (curva en negro).

Figura 42. Producción y valor de expectativa de la tierra para el ejemplo propuesto en un rango de edades de rotación.



Elaborado por: Autores.

Nótese que la curva de producción de madera aserrada comparada con el LEV, muestra el desarrollo del valor del LEV sobre los años de rotación. Así, muy poco volumen se produce antes de los 1.7 años de edad. Por supuesto, el principal interés de mostrar la Figura 42 es resaltar la trayectoria del LEV y demostrar que es una herramienta fundamental para la toma de decisiones en la producción y aprovechamiento de la Balsa desde el punto de vista económico.

El LEV crece rápidamente de US\$ 0/ha a la edad de 0.5 a su intersección con la curva de producción US\$ 5 803/ha con una rotación de

1.7 años en las mejores condiciones de crecimiento de la Balsa. Después de la edad de 1.7, el incremento marginal del LEV cae rápidamente desde este punto al final de la rotación (un 52% reducción del valor del LEV). Como se recalcó en el capítulo sobre el incremento medio anual (IMA), este parámetro se maximiza cuando culmina el IMA y es considerado como una óptima rotación biológica de producción. En consecuencia, el promedio de la producción de volumen sobre el período de vida de un rodal se alcanza cuando se consigue el máximo de IMA. Este cálculo se basa en el sitio de mejores rendimiento (sitio I) a la edad de 2 años de edad para la Balsa.

Empleando un máximo biológico de rotación, el LEV será de US\$ 6 971.77, mientras que el óptimo de una rotación financiera ocurre a la edad de 1.7 años para la Balsa iniciando con un LEV de US\$ 5 803.46 (Figura 41). Estos dos criterios económicos y biológicos arrojan una diferencia de US\$ 1 116.31. Mucha gente debe estar sorprendida por este hecho de que, el óptimo de rotación financiera es menor que el IMA. Surge aquí la siguiente pregunta, ¿Es posible que la edad de rotación inmejorable financiera de un rodal se dé anteriormente a la edad, donde se expresa el máximo de la producción de volumen en un rodal de Balsa? Esto parece no tener ningún sentido.

Primero, la edad de rotación óptima financiera no siempre es más corta que el IMA. Esto es posible percatarse en ejemplos, donde la edad de rotación óptima financiera es más larga que el IMA. Incluso en el caso dado de la Balsa, si la tasa de interés es lo suficientemente baja (cerca a cero) en la edad de rotación óptima financiera el LEV se prolongará en tiempo y se alcanzará posterior al IMA. No obstante, existen excepciones, usualmente la edad de rotación que maximiza el LEV es más corto que el IMA. Para entender por qué la edad de rotación financiera puede ser diferente al IMA, es necesario conocer las técnicas del análisis marginal que nos permite entender mejor estos criterios de establecimiento del período de rotación de un rodal.

5.8 DECISIÓN DE LA ROTACIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS MARGINAL

El análisis marginal considera el beneficio y costo de aplicar una unidad más de un recurso variable usado en la producción de un producto. El rendimiento de dicho producto aumentará inicialmente en proporciones

crecientes, después evidenciará proporciones decrecientes y finalmente llegará un momento en que mayores aplicaciones del recurso variable nos proporcionarán una disminución del rendimiento total (Cansier, 2005). Así, el beneficio primario crecerá añadiendo valor al volumen al rodal que eventualmente va a ser cosechado. La cuantía de este crecimiento, más el precio del volumen de la madera, menos los impuestos por ingresos, se constituye en el beneficio marginal a de permitir al rodal crecer un año más, esta expresión puede ser representada de la siguiente manera:

$$MB_a = P * \Delta Y_{a+1} (1 - t_{inc})$$

Dónde:

MB_a = Beneficio marginal

P = Precio de la madera

ΔY = El crecimiento de la madera en un rodal entre la edad a y edad $a + 1$

t_{inc} = El rango de ingresos marginales

Ahora, ¿Cuál es el costo marginal de dejar crecer un rodal un año más? Obviamente, si existen impuestos anuales a la propiedad o costos anuales de manejo, ellos deben ser incluidos, los otros valores de la espera de la cosecha de un rodal son menos intuitivos. Primero, considerar el precio de usar la tierra por un año más, si la tierra fuera rentada, entonces este costo sería el ingreso por un año más, pero, ¿Qué pasa con la persona que posee la tierra? ¿Cuál es el costo de emplear la tierra para esto? Incluso, si la tierra no es alquilada, un propietario tendría una opción de arrendar la tierra a cualquier otra persona. Incluso para el propietario la renta potencial que podría ser ganado es un costo de oportunidad de usar la tierra. De tal manera que, el concepto de renta se aplica si la tierra es en realidad alquilada o no.

Entonces, la renta es parte de los costos de oportunidad (un costo de oportunidad es el valor de los beneficios que son percibidos por no hacer algo) del propietario de la tierra. ¿Cuánto se debe pagar por el alquiler de un área de tierra con un bosque coetáneo? Para responder esta pregunta, se debe pensar en la tierra como un activo financiero. Si alguna persona arrienda un activo, ¿Cuánto se debe pagar por el uso de este activo? La gente paga intereses por el uso de un activo financiero, el cual es calculado por la multiplicación del valor del activo por la tasa de interés. El precio de la propiedad de un bosque coetáneo está dado

por el valor más alto de LEV que se puede ganar por la tierra. Por lo que, el alquiler debería ser la tasa de interés multiplicado por el LEV óptimo.

$$Rent = r * LEV$$

Hasta el presente, se ha considerado tres agregados para incluirlos en el costo marginal de esperar un año más para la cosecha de un rodal maderable coetáneo: 1) impuestos anuales a la propiedad, 2) costos de manejo anuales del rodal, 3) la renta de la tierra que es igual a la tasa de interés del LEV. Existe todavía un componente más considerado como costo de oportunidad, y es el no disfrutar del uso del dinero que podría ser aprovechado si el rodal habría sido cosechado.

El costo es denominado como precio de inventario, es el interés que se podría haber ganado sobre el valor del inventario del volumen en pie; si el volumen es cosechado, vendido y se procede a invertir este ingreso en la mejor alternativa de inversión. Por tanto el importe del inventario es establecido por el volumen maderable, más los precios de tala menos impuestos. El costo de inventario a cualquier edad a , representa la tasa de interés multiplicando el valor del inventario del volumen a una determinada edad. Por ejemplo, el precio multiplicado por el inventario de volumen, menos cualquier impuesto que, tendría que ser pagado. Así, los costos de inventarios se expresan:

$$Costo\ de\ Inventario = r * P * Y_a (1 - t_{inc})$$

Todos los componentes del costo marginal por la espera de la cosecha de un bosque coetáneo pueden ahora ser resumido de la siguiente manera:

$$MC_a = A(1 - t_{inc}) + t_{prop}(1 - t_{inc}) + r * LEV + r * P * Y_a(1 - t_{inc})$$

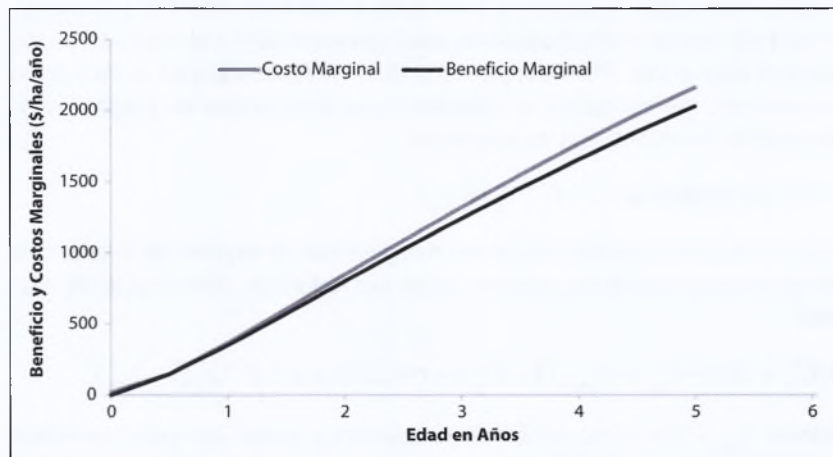
Dónde: t_{prop} = Impuesto anual de propiedad y todas las otras variables que son previamente definidas.

Nótese que tanto los costos anuales de manejo y de la tasa de interés anual han sido reducidos por la tasa de impuestos de los ingresos. Esto es debido a que se ha asumido que, estos valores pueden ser expandidos como gastos. Por ejemplo, deducidos del ingreso neto para reducir los impuestos por ingresos en el año en los cuales ellos ocurren. La Figura 43 muestra el beneficio y los costos marginales de posponer

la cosecha de un rodal coetáneo de Balsa. Tanto el beneficio y el costo marginal de esperar la cosecha del rodal varían con la edad del rodal, como consecuencia de la tasa de crecimiento (Beneficios Marginales) y la producción (Costo Marginales) respondiendo como una función de la edad del rodal, antes del punto de inflexión de la curva de producción de un rodal y la tasa de crecimiento. Por tanto, el beneficio marginal de la espera de la cosecha se incrementa con la edad del rodal.

Sin embargo, cuando la edad del rodal y su nivel de crecimiento alcanzan un máximo y entonces comienza su decrecimiento. Este hecho ocasiona que el beneficio marginal de esperar el aprovechamiento disminuya con el tiempo a medida que envejece el rodal. Por otro lado, el costo marginal de postergar un año más la cosecha, el rodal crece con el transcurso de la edad, ya que los costos de inventario aumentan de igual manera, desde la fase inicial de crecimiento de un rodal.

Figura 43. Análisis marginal de una rotación óptima. Beneficios y costos marginales de posponer un año más la cosecha.



Elaborado por: Autores.

El beneficio marginal de prolongar la cosecha del rodal será mayor que el costo marginal de esperar la cosecha de un rodal. Entonces, el beneficio neto de prolongar será positivo y el rodal no debería ser cosechado. Como un rodal madura, no obstante, el beneficio marginal de prolongar decrecerá y el costo marginal incrementará hasta un determinado punto del

costo marginal de prolongación de la cosecha y se volverá mayor que el beneficio marginal. Cuando esto sucede, el beneficio neto de prolongar la cosecha del rodal se volverá negativo y entonces el rodal debe ser cosechado. El punto óptimo de rotación está dado por la edad, donde la curva de beneficio marginal excede la curva de costo marginal.

Esto ocurre a la edad de 1.7 años para el índice de sitio de mejores condiciones de crecimiento de la Balsa en la zona de estudio (Figura 43). Esto se da a la misma edad, donde la curva del LEV alcanza su máximo Figura 42. Reconsiderando ahora la pregunta, ¿por qué la edad óptima de rotación financiera es a menudo mucho más corto que la edad a la que se alcanza el máximo de incremento medio anual? El máximo IMA claramente optimiza la producción de volumen anual de un rodal. No obstante, seleccionando este como una edad óptima de rotación se ignoran los costos de maximización de la producción de madera, especialmente de los costos de inventario.

De hecho, seleccionando la rotación que maximiza el IMA, se ignoran todos los factores económicos, basándose únicamente sobre una curva de producción biológica. La rotación financiera óptima, por otro lado, acumula los beneficios/costos y estas son una variable objetiva la cual cambiará con las divergencias, altos y bajos de las condiciones económicas.

5.9 EL EFECTO DE CAMBIOS DE LAS CONDICIONES ECONÓMICAS SOBRE LA ROTACIÓN ÓPTIMA FINANCIERA

Se demostró anteriormente, cómo la rotación óptima financiera de las plantaciones coetáneas es determinada por la intersección de dos curvas representativas, el beneficio y costo marginal de prolongar la cosecha de un rodal coetáneo. El costo marginal de la prórroga incluye cuatro componentes: 1) impuestos anuales de propiedad; 2) costos anuales de manejo; 3) los ingresos de la tierra y 4) los costos de inventario. Los beneficios marginales de prolongar la cosecha es igual al valor del crecimiento adicional que ocurrirá en el siguiente año. Adicionalmente, estos parámetros van variando con la edad de los rodales, de los costos y beneficios marginales de la postergación de la cosecha de un rodal, los cuales dependen también de los valores de establecimiento, costos de manejo anual, precio del aprovechamiento del rodal, impuestos fiscales y la tasa de interés.

La primera consideración, discurre sobre la rotación óptima por el cambio del precio de tala; incrementando el precio de la misma levantará a la curva de beneficio marginal en proporción al aumento del precio. Una subida del 25 por ciento en el precio de la tala cambiará el beneficio marginal de la toma de decisión de prolongar la cosecha arriba del 25%. El efecto sobre la curva de costo marginal del cambio del precio de corta es un poco más complicado de analizar. Ninguno de los términos que reflejan el costo anual (por ejemplo, costos de manejo anual e impuestos anuales a la propiedad) se verán afectados.

Con la curva marginal, el incremento de los costos de inventario será proporcional con el aumento del costo de corte. La prueba de este hecho es un poco complejo describir. Pero esto puede ser visto como la elevación en el LEV resultante de un acrecentamiento del precio de tala y serán sus resultados:

1. Si no hay un costo de establecimiento, la curva de beneficio marginal se desplazará proporcionalmente al incremento del precio de corta.
2. Si existe un costo positivo de establecimiento, el cambio en la curva de beneficio marginal será más que proporcional al incremento del precio de corta.

En el primer caso, cuando no hay costos de establecimiento las dos curvas marginales de beneficios y costos se desplazarán hacia arriba proporcionalmente; y la edad a la cual las dos curvas se intersectarán no cambiará. Por consiguiente, cuando no hay costos de establecimiento de un rodal, el precio de corta no tendrá ningún efecto sobre la óptima rotación financiera. Por otro lado, si hay un costo de establecimiento de un rodal, el cambio en la curva de costo marginal será más que proporcional a la variación del precio de corta, mientras el cambio en la curva de beneficio marginal será proporcional a la permutación en el precio de corta.

Así, para un incremento de precio, la curva de costo marginal se trasladará más allá que la curva marginal de beneficios, resultando en dos curvas cruzándose en una edad temprana que el incremento de precio de corta. Así también, la rotación óptima financiera será reducida, si el precio incrementa. En otras palabras, cuando hay un costo positivo de establecimiento de un rodal. La óptima rotación financiera estará inversamente afectada por los cambios en el precio de cosecha. Por

ejemplo, incrementando el precio reducirá la rotación óptima financiera o viceversa.

¿Qué pasa con los costos de establecimiento? ¿Cómo los cambios de los costos de establecimiento de una plantación afectan a la rotación óptima financiera, considerando el efecto de un cambio en los costos de establecimiento de un rodal sobre las dos curvas marginales de beneficios y costos? El único término en cualquiera de las dos curvas que sería afectado por un cambio en el costo de establecimiento es el LEV. De tal manera que, un incremento en el costo de establecimiento del rodal decrecerá inmediatamente el LEV, lo cual cambiará a la curva de costo marginal hacia abajo y se moverá al punto, donde la curva de costo marginal intercepta a la curva de beneficio marginal hacia la derecha. Por ejemplo, hacia una edad mayor de rotación óptima. Así, la edad óptima de rotación financiera se moverá en la misma dirección de los cambios en los costos de establecimiento.

Por ejemplo, el incremento de los costos de establecimiento de un rodal, elevarán el óptimo de rotación financiera y viceversa. La explicación intuitiva de esto es sencilla cuando los costos de establecimiento de un rodal se aumentan, la primera vía para reducir el impacto del incremento de esos costos es reducir la frecuencia de restablecimiento de un rodal; esto se logra mediante la prolongación en tiempo de la rotación de un rodal. Ahora considerando los costos anuales de manejo e impuestos a la propiedad e incrementado a estos serían vistos como la causa del aumento de la curva de costos marginales. Partiendo de que, los costos anuales e impuestos a la propiedad aparecen directamente en la ecuación.

No obstante, se debe recordar que, el incremento a los costos anuales o impuestos a la propiedad reducirá entonces el LEV. De hecho, la disminución en el LEV acabará con el desplazamiento del incremento en los costos anuales o impuesto a la propiedad y como resultado neto consiguiente. La curva de costo marginal no cambiará, de tal manera que, las permutas en los costos de manejo anuales o impuestos a la propiedad no tendrán ningún efecto en la determinación de la óptima rotación financiera. Bajo el supuesto que, todo los costos se encarecen (deducido del ingreso anual), los impuestos a los ingresos entonces no tendrían efecto sobre la rotación óptima.

Todos los términos en ambas funciones de beneficios y costos marginales cambiarán en proporción inversa al cambio de los impuestos. Así, las dos curvas se desplazarán hacia arriba o abajo en la misma proporción y ellas se interceptarán a la misma edad. No obstante, un impuesto es pagado sobre el valor del producto cosechado, afectará la edad de la rotación óptima financiera; entonces, el impuesto de explotación es por tal motivo una alteración en el costo de cosecha. De igual manera con la variación en el precio, el efecto de un cambio en el impuesto dependerá de si hay un costo de establecimiento de un rodal. Cuando hay un costo de establecimiento, elevando el impuesto de explotación, incrementará la rotación óptima y viceversa.

Hasta aquí, se ha considerado la dirección del cambio en la rotación óptima en respuesta a la mudanza de la tasa de interés, precio, costos de establecimiento del rodal, costo anual de manejo y los impuestos. Lo que no se ha considerado, es la magnitud de este efecto, por supuesto, la exacta dimensión de estos cambios dependerá de los detalles específicos del problema.

La rotación óptima financiera, cambia levemente, como resultado de una permuta en el precio de cosecha, el costo de establecimiento, los costos de manejo anual y los impuestos. De tal manera que, la rotación óptima financiera es largamente más sensitiva a la tasa de interés. Los cambios en la tasa de interés no tiene efecto sobre la curva de beneficio marginal, esto afecta a la curva marginal de tres formas: los dos últimos términos de la ecuación de costo marginal directamente involucra la tasa de interés, cuando la tasa de interés sube, este término tenderá a escalar y viceversa. No obstante, el LEV es también afectado por la tasa de interés, entonces el LEV se relaciona inversamente a la tasa de interés (por ejemplo, cuando la tasa de interés crece, el LEV decrece y viceversa). Así, el cambio en la ganancia en respuesta a la permuta de la tasa de interés es un tanto ambiguo.

Sin embargo, el efecto del cambio de la tasa de interés sobre los costos de inventario será generalmente bastante grande y siempre mayor que el efecto sobre el término de la utilidad. La curva de costo marginal se desplazará regresando a la intercepción de las dos curvas y acortando con esto el óptimo rotacional.

Similarmente, decreciendo la tasa de interés cambiará la curva de costo marginal hacia abajo, moviendo el punto de intersección hacia la derecha e incrementando la rotación financiera óptima. La Tabla 12, resume el efecto de cada una de las variables financieras que influyen la rotación óptima financiera y el LEV.

Tabla 12. Efecto de los cambios en las variables financieras sobre la rotación óptima financiera y el LEV.

Parámetros	R Largo de un período de rotación		LEV
	C=0 0	C>0 Negativo	
R	Negativo		Negativo
P	C=0 0	C>0 Negativo	Positivo
C	Positivo		Negativo
A	0		Negativo
t_{prop}	0		Negativo
t_{inc}	0		Negativo
t_{server}	C=0 0	C>0 Positivo	

Elaborado por: Autores.

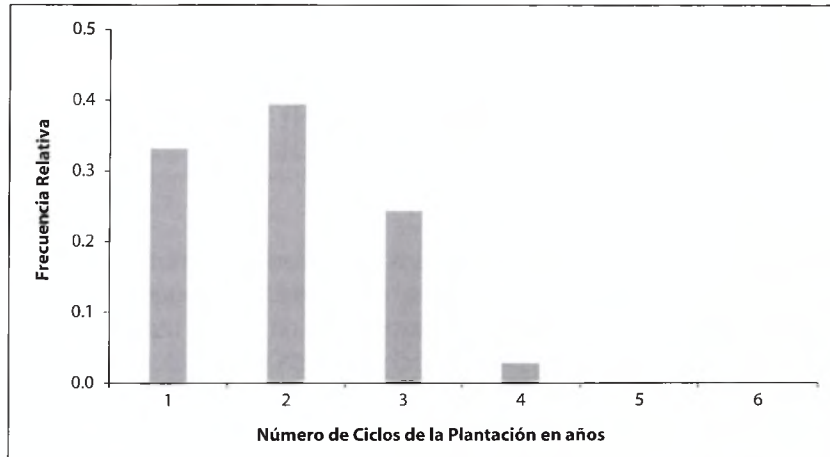
El signo “positivo” en la tabla significa que un incremento en la variable, elevará el óptimo de rotación o LEV. En tanto que el signo “negativo” simboliza que un incremento en la variable decrecerá el óptimo rotacional o LEV. El número cero representa que la variable no tiene efecto sobre la rotación óptima o LEV. En general, el LEV disminuye con el aumento de los costos y subirá con el incremento de precios.

CAPÍTULO 6

Número de rotaciones de la plantación
que deje el mayor rédito económico de
la Balsa, bajo rendimientos decrecientes

En la zona de investigación, el 70% de los propietarios repiten la plantación de Balsa en el mismo sitio entre dos a cuatro ciclos de corta (Figura 44). Es decir al menos 12 años de producción continua, de acuerdo a Cansier (2005) cuando se aumenta la cantidad de un recurso variable usado en la producción de un producto, el rendimiento de dicho producto crecerá en un principio en proporciones crecientes, después incrementará en proporciones decrecientes y finalmente llegará un momento en que mayores aplicaciones del recurso variable proporcionarán una disminución del rendimiento total. Mientras más cerrado es el círculo de nutrientes, mayor será la estabilidad de un ecosistema, pero donde hay intervención del humano son otras las consecuencias sobre los ecosistemas.

Figura 44. Número de ciclos de reiteración de las plantaciones de Balsa en el mismo sitio, expresado en valores relativos.

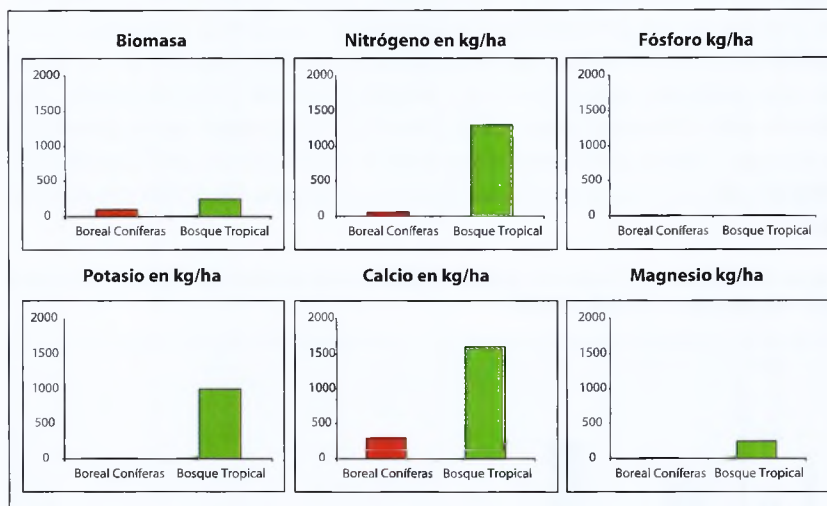


Elaborado por: Autores.

Este último aspecto es importante cuando se aprovecha una misma superficie a largo plazo y donde la fertilización química es un factor de producción que cada día se encarece. Este es un punto de reflexión y análisis en los impactos ambientales de las plantaciones forestales comerciales. De una explotación de los bosques tropicales de tierras bajas se exportan dentro de la biomasa una determinada parte de nutrientes y otra cantidad de nutrientes se van perdiendo, debido a procesos de

meteorización de la biomasa producto del aprovechamiento y parte de la misma es arrastrada a otros lugares.

Figura 45. Almacenamiento de nutrientes en la biomasa de los bosques tropicales (verde) y bosque de coníferas (rojo).



Elaborado por: Autores.

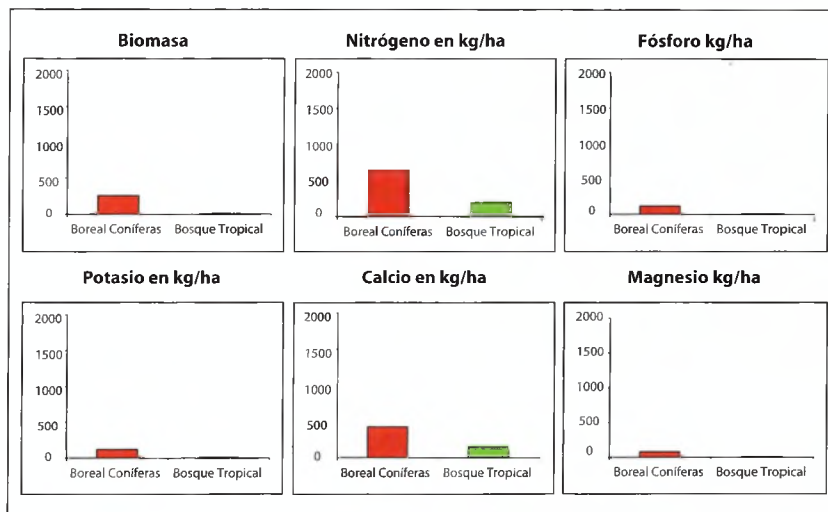
Arriba, en la Figura 45 se representa la acumulación de nutrientes en la biomasa (hojas, ramas, corteza, fuste, raíces) de los bosques tropicales (verde) y bosque de coníferas (rojo) expresada en kg/ha. Las diferencias son claras ante una mayor precipitación, elevada temperatura, procesos de lavado de sales, descomposición de materia orgánica, acidificación de los suelos, etc. Los ecosistemas se adaptan para acumular nutrientes en la biomasa. En la Figura 45 se puede ver que, el color predominante es el verde excepto para el fósforo (bosques tropicales y/o de la sierra o coníferas), los ecosistemas forestales tropicales tienden a almacenar los macro, meso y micro nutrientes dentro de la biomasa.

Los bosques tropicales extienden su sistema radicular en los primeros centímetros de suelo, donde hay procesos de descomposición para aprovechar la escasez de nutrientes. Aspecto importante en la caída de árboles dentro de los bosques tropicales, por su limitada estabilidad aportada por el sistema radicular. No así en los bosques de la sierra o coníferas, donde las condiciones son contrarias a las observadas en los bosques tro-

picales y donde el agua es un factor limitante. De ahí que, en estos ecosistemas los bosques invierten una mayor cantidad de energía en la formación de sistemas radiculares profundos en búsqueda del recurso escaso. Por tanto, es necesario resaltar que el bosque tropical, como los bosques de la sierra o coníferas almacenan muy pocas cantidades de fósforo, lo cual es el punto de partida para la discusión de los impactos ambientales de las plantaciones forestales comerciales. Lo cual tiene que ver directamente con la ley de mínimo de Liebig. La economía ambiental se mueve en relación a identificar los recursos escasos de un ecosistema.

Por otro lado, cuando se considera el almacenamiento de nutrientes dentro del suelo y no en la biomasa (Figura 46), se observa que, el color predominante es el rojo sobre el verde. Se resalta la relativa riqueza de los suelos de la sierra en relación al contenido de fósforo en comparación a los suelos de bosque tropical. Es decir, las plantaciones en la sierra tienen un círculo de nutrientes más cerrado y esto confiere una base adecuada de los mismos que le permite resistir varias rotaciones sin la disminución del rendimiento en relación a la producción de volúmenes maderables.

Figura 46. Almacenamiento de nutrientes en los suelos de los bosques tropicales (verde) y bosque de coníferas (rojo).



Elaborado por: Autores.

Mientras que, los bosques tropicales ante la baja fertilidad natural de los suelos y al someterse a un aprovechamiento de la madera, exportan nutrientes dentro de la biomasa y ante la exposición del suelo a la temperatura se eleva el grado de mineralización y se produce pérdida de nutrientes por el agua de lixiviación. Una sustitución a la pérdida de nutrientes es posible únicamente por el agua de lluvia enriquecida por trazas de macro, meso y micro nutrientes en largos períodos de restauración de los ecosistemas.

Esta reflexión es todavía más importante cuando existen plantaciones forestales comerciales en las zonas tropicales. El aprovechamiento forestal se centra en la cosecha del fuste de un árbol y a través de él se exporta una gran cantidad de nutrientes dentro de la biomasa de los troncos y la biomasa restante se mineraliza rápidamente. Lo que resalta que, el volumen de raíces y biomasa viviente de la superficie del suelo sean relativamente pequeños. Entonces, la pérdida por lavado puede ser alto de acuerdo a la cantidad de lluvia que reciba un sitio. Este fenómeno sobre el círculo de nutrientes debe ser considerado, debido a que no se reponen los nutrientes y existe escasa fertilización observada en la zona de estudio. En la Figura 47 se muestra la disminución de producción de madera para plantaciones de Balsa en deferencia con el tiempo de obtención de volúmenes maderables en el índice de sitio de mayor rendimiento de la Balsa.

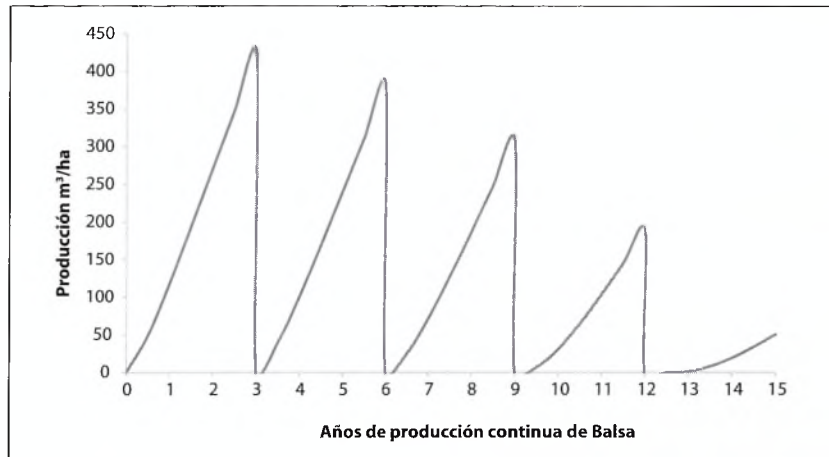
La consideración arriba expuesta sobre el círculo de nutrientes y la escasa fertilización observada en la zona de estudio, nos permiten conjuntar que cuando un país tropical corta sus bosques, esta acción tiene como efecto un incremento en su Producto Interno Bruto, aumentando con esto su bienestar, de acuerdo al concepto convencional de bienestar del Banco Mundial. Esto es asumido independientemente de si los bosques son manejados sosteniblemente o se da una tala predatoria; si se reponen los nutrientes extraídos a través del aprovechamiento forestal o no. Este ejemplo plantea un conflicto claro de intereses entre la protección de la naturaleza y el desarrollo económico de los Estados (Cañadas et al., 2007).

En la Figura 47 se expone la disminución de producción con el tiempo del rendimiento de volúmenes maderables en el índice de sitio de mayor erogación maderable. De ahí nace una pregunta, ¿Qué número de rotaciones le permite a un productor el aprovechamiento forestal de la Balsa para alcanzar la maximización de los retornos financieros?

6.1 ANÁLISIS BENEFICIO/COSTO DEL NÚMERO DE ROTACIONES DE LA PLANTACIÓN DE Balsa

Este estudio incorpora en su análisis el valor del dinero en función del tiempo. El objetivo de este método es comparar si los beneficios o ingresos del proyecto son mayores que los costos del mismo. Este ratio proporciona una relación directa entre los beneficios y costos de un proyecto (Cañadas y Rade, 2013).

Figura 47. Decrecimiento de la producción del volumen maderable de Balsa, para el mejor índice de sitio, durante 5 rotaciones consecutivas en el mismo sitio.



Elaborado por: Autores.

Se utilizan estas relaciones para decidir si un proyecto particular es una inversión buena financieramente hablando, su fórmula es la siguiente:

$$RB / C = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+i_t)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i_t)^t}}$$

Dónde:

i_t = Es la tasa de interés para el período t

Primero se tiene que fijar la tasa de interés con la que se desea medir el proyecto, lo mismo que estará en función del producto que se va a obtener.

Tasa de interés real y nominal. Es muy importante recalcar que cuando se usa cantidades nominales para el cálculo del beneficio neto de un período, entonces se debe también usar una tasa nominal de descuento o viceversa. Esto tiene que ser usado como una tasa real de descuento para cantidades reales, de tal manera que, el flujo de caja en el análisis de beneficio/costo puede ser expresado en valor nominal. Este valor es empleado en el análisis del sector privado convencional para medir los réditos, gastos, ingreso neto, recursos, obligaciones y dinero en efectivo, que fluyen refiriéndose a unidades monetarias históricas. También se refiere como dólares nominales (o los dólares actuales) el término de valor real se refiere a la cantidad de dinero que responde al efecto de inflación (Domínguez y Espinel, 2009; Cañadas y Rade, 2013). Es decir, estos tienen el efecto de la remoción de la inflación, de tal manera que, un dólar no tiene el mismo poder adquisitivo, sin tener en cuenta cuánto se gana.

La tasa de interés real refleja solamente el valor del tiempo del dinero y no los cambios de los niveles de precio en general; así, en períodos de inflación, la tasa de interés nominal deberá ser mayor que una tasa real, subsecuentemente las proporciones nominales también incluyen los efectos de un nivel más alto de precios a lo largo de la economía (Cañadas y Rade, 2013).

Algunos analistas prefieren trabajar en dólares reales, pero los beneficios, costos, o la tasa de interés son expresados en los dólares nominales. Entonces deben convertirse las cantidades en dólares nominales a dólares reales. Para hacer esto, la fórmula siguiente ayuda transformar los beneficios futuros y costos de los dólares nominales a dólares reales (Cañadas y Rade, 2013) y se calcula los valores de la siguiente manera:

$$r = \frac{i - m}{1 + m}$$

Dónde:

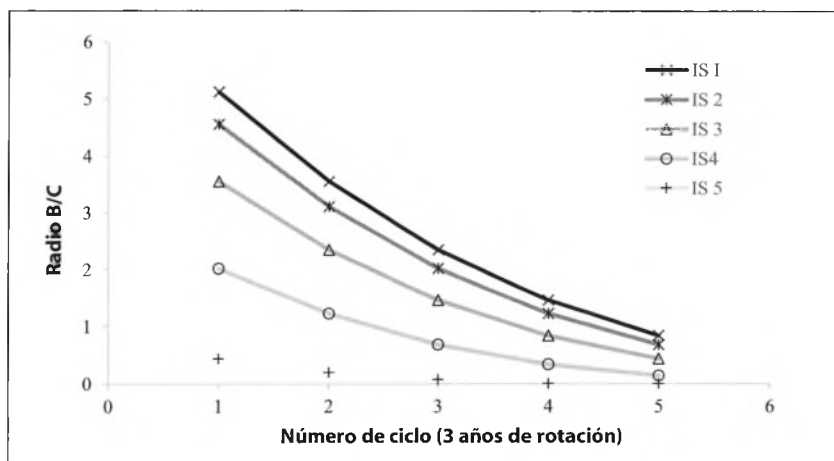
r = Tasa de interés real

i = Interés nominal

m = Taza de inflación

Utilizando la ecuación arriba expuesta, se fijó para este estudio la tasa de interés de 4%. En la Figura 48 se expone el radio beneficio/costo por índice de sitio para 5 rotaciones consecutivas (15 años), en la zona de investigación. De acuerdo a la Figura 48 existe una gradiente de rentabilidad asociada con la calidad de sitio. Es ineficiente que las plantaciones de *O. pyramidale* se realicen en sitios pobres. La rotación de máxima producción se incrementa rápidamente con el decrecimiento del índice de sitio, siendo de dos años en los mejores sitios a más de siete años en los peores sitios. En términos económicos, los ingresos descontados de un rodal del índice de sitio 1 es más que el doble para el índice de sitio 3.

Figura 48. Radio beneficio/costo por índice de sitio para 5 rotaciones, en la zona de investigación.



Elaborado por: Autores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcalá, F.J., Cantón, Y., Contreras, S., Were, A., Serrano-Ortiz, P., Puigdefábregas, J., Solé-Benet, A., Custodio, E., Domingo, F. (2011). Diffuse and concentrated recharge evaluation using physical and tracer techniques: results from a semiarid carbonate massif aquifer in southeaster Spain. *Environmental Earth Sciences*, 62 (3), 541-557.
- Alder, D. (1980). *Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento*. FAO. Montes 22/2. Roma. 80 p.
- Alder, D., Montenegro, F. (1999). Yield model for *Cordia alliodora* plantation in Ecuador. *International Forest Review*, 1, 242-250.
- Álvarez González, J.G. (1997). Análisis y caracterización de las distribuciones dimétricos de *Pinus pinastre* Ait., en Galicia. (Tesis inédita de Doctorado), Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. 270 p.
- Arabatzis, A.A., Burkhart, H.E. (1992). An evaluation of sampling methods and model forms for estimating height-diameter relationships in loblolly pine plantations. *Forest Science*, 38(1), 192-198.
- Bendix, J., Lauer, W. (1992). Die Niederschlagsjahreszeiten in Ecuador und ihre klimadynamische Interpretation. *Erdkunde*, 46: 118-134.
- Biber, P. (1996). *Konstruktion eines einzelbaumorientierten Wachstumssimulators für Fichten – Buchen – Misbestände im Solling*. Diss. Forstw d. Ludwig Maximilians. Uni. München. 239 p.
- Banco Central del Ecuador, BCE (2014). Comercio Exterior, 2014. Quito: Ecuador; http://www.portal.bce.fin.ec/vto_bueno/seguridad/ComercioExteriorEst.jsp
- Bortz, J. (2005). *Statistik für Sozialwissenschaftler*. 4^{te} Auflage. Hamburg, Deutschland: Springer-Verlag. 910 p.
- Bossel, H. (1994). *Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme*. Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden. 402 p.
- Boungiorno, J., Peyron, L., Haullier, F., Cruchiamacchie, M. (1995). Growth and management of mixed-species, uneven-aged forest in the French Jura: Implications for economic returns and tree diversity. *Forest Science*, 41, 397-429.
- Bredenkamp, B.V. (1991). Predicting Tree Heights to Supplement Stand Tables of *Eucalyptus grandis*. *South African Forestry Journal*, 158, 1-3.
- Bredenkamp, B.V., Burkhart, H.E. (1990). Diameter Distributions in Old-Field Slash Pine Plantation. *Ga. For. Res. Council Report*, 13. 540 p.
- Bredenkamp, B.V. (1984). The Langebam CCT. A Visitors Guide to a Correlated Curve Trend Spacing Experiment in *E. grandis*. Directorate of Forestry, South Africa.

- Burkhardt, H.E. (1987). Data collection and modelling approaches for forest growth and yield prediction. En: *Prediction Forest Growth and Yield. Current Issues, Future Prospect. Inst. of Forest Resources*. Uni. Washington. Contribution Nr. 58: 3-16.
- Butterfield, R. (1995). Early species selection for tropical reforestation: a consideration of stability. *Forest Ecol. Manage*, 81, 161-168.
- Cansier, D. (2005). *Umweltökonomie. 2. neubearb.* Aufl. Stuttgart. UTB, 394 p.
- Cañadas, L. (1966). Correlación entre el número medio anual de meses ecológicamente secos y precipitación media anual en la provincia de Esmeraldas, Ecuador. *Turrialba*, 16(4), 25-31.
- ____ (1983). *El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador*. Ecuador: Editores Asociados. 210 p.
- Cañadas, A. (1997). *Regionalisierung der Klimadaten und Monitoring der Landnutzung im Großraum des Guayllabamba Tales in Ecuador durch G.I.S.* Magisterarbeit. Institut für Bioklimatologie. Universität Göttingen. 120 p. http://books.google.com.ec/books/about/Regionalisierung_der_Klimadaten_und_Moni.html?id=sgxpGwAACAAJ&redir_esc=y
- ____ (2005). *Providing information about natural resources as a base to support the decentralization of the forest sector in Canton Loreto*. Research Centre of Forest Ecology, University Göttingen. Edition 192, Line A, 191 p. ISBN: 0939-1347. <http://d-nb.info/975387634/about/html>
- ____ (2007). Volumen y perfil de fuste para *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales del Bosque Protector Sumaco. *Bosque Latitud Cero*, 3, 15-20.
- ____ (2015). *Ecología y silvicultura para el manejo y aprovechamiento forestal*. UTEQ. Unidad de Posgrado. Notas de Lecturas. 350 p.
- Cañadas, A., Rade, D., Palacios, A., Mestanza, S., Molina, C., Domínguez, J.M., Murillo, I. (2016). Ecuaciones generales diámetro-altura para *Ochroma pyramidale*, Región Costa-Ecuador. *Bosque Latitud Cero* (por aparecer).
- Cañadas, A., Vilčko, F., Rade, D., Zambrano, C. (2014). Hacia una descripción de fuste para Laurel (*Cordia alliodora*) en sistemas agroforestales, bosque protector Sumaco. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, 6(1), 24-31.
- Cañadas, A., Rade, D. (2013). *Bases económicas como plataforma para la formulación de proyectos ambientales sostenibles*. Ibarra: Ed. UTN, 310 p. ISBN: 978-9942-9942-1-9.
- Cañadas, A., Arias, P., Rade, D., Zambrano, C. (2013a). Land Use/cover Change (1997–2007) in the Protected Forest Sumaco, Northern Ecuadorian Amazon. En: *Agricultural development within the rural-urban continuum*. Uni Hohenheim, Stuttgart. http://www.tropentag.de/links/Alvaro_Gustavo_lwPtCbYW.pdf ISBN: 978-3-95404-498-6.
- Cañadas, A., Vilčko, F., Rade, D., Zambrano, C. (2013b). General Diameter-Height equations for *Ochroma lagopus* S.W., Coast Region, Ecuador. En: *Applied Stochastic Models and Data Analysis*. Barcelona, España. http://www.asmda.es/images/Program_ASMDA2013_Demographics2013_final_v1a.pdf ISBN: 978-618-80698-2-4

- Cañadas, A., Rade, D., Zambrano, C., Molina, C., Arce, L. (2013c). Evaluación y manejo de fuentes semilleras de Teca (*Tectona grandis* Linn.f.) en la Estación Experimental Tropical Pichilingue, Ecuador. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, 5(1), 64-75.
- Cañadas, A., Korol, M., Zambrano, C., Camacho, B. (2012). Modelos descriptivos de corona para Laurel (*Cordia alliodora*) bajo sistemas agroforestales en el Bosque Protector Sumaco, Ecuador. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, 4(2): 39-46.
- Cañadas, A., Roca, A. (2011). *Can the reforestation projects stop the extraction of wood from the Protected Forest Chongón-Colonche?* Tropentag, Bonn University Development on the Margin, Tropentag, Bonn <http://www.tropentag.de/2011/abstracts/full/233.pdf> ISBN: 978-3-9801686-7-0
- Cañadas, A., Vera, L. (2011). Forestería tropical al ¿final del camino? Revisión del manejo sostenible de bosques nativos Tropicales. *ESPAM Ciencia*, 2(1), 27-36.
- Cañadas, A., Arce, L., Molina C. (2010). *Growth, Yield and Performance of Teak in Silvopastoral System in the Lowland Western Region, Ecuador. World Food System. A Contribution from Europe, Tropentag.* Zurich. <http://www.tropentag.de/2010/abstracts/full/798.pdf> ISBN: 978-3-9801686-7-0
- Cañadas, A., Argüello, J., Urquiza, R. (2007). Sustitucionalidad y aumento en la eficiencia del uso de la riqueza natural, dilema ambiental ecuatoriano. *Bosque Latitud Cero*, 3, 30-33.
- Cañadas, A., Vilčko, F., Gadow v., K. (2003). Management of Laurel (*Cordia alliodora*) within agroforestry system in the Canton Loreto, Ecuador. En: A. Wollny et al. (Ed.), *Technological and Institutional Innovations for Sustainable Rural Development.* Deutscher Tropentag, Göttingen, Germany. October 6 - 8, 2003. ISBN: 3-9808714-3-6.
- Chang, S. (1981). Determination of the Optimal Growing Stock and Cutting Cycle for an Uneven-Aged Stand. *Forest Science* 27(4), 739-744.
- _____ (1990). An economic comparison of even – aged and uneven aged management of southern pines in the mid-South. En: C. Hlckman (Ed.), *Proc. Of the Southern Forest Economics Workshop on Evaluation Even and All- Aged Timber Management Options for Southern Forest Land.* USDA. pp. 45-52.
- Clutter, J.L., Fortson, J.C., Pienaar, L.V., Brister, G.H., Bailey, R.L. (1983). *Timber management – a quantitative approach.* John Wiley. 333 p.
- Clutter, J.L. (1963). Compatible Growth and Yield Models for Loblolly Pine. *Forest Science*, 9(3), 354-371.
- Cruz-Leyva, I.A., Valdez-Lazalde, J.R., Ángeles-Pérez., G., de los Santos-Posadas, H.M. (2010). Modelación espacial de área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *P. teocote* en el ejido Atopixco, Hidalgo. *Madera y Bosques*, 16(3), 75-97.
- Centre Technique Forestier Tropical, CTFT (1961). *Ochroma lagopus – caractères sylvicoles et méthodes des plantation.* *BFT. No 73.*

- De-Miguel, S., Pukkala, T., Morales, M. (2014). Using optimization to solve tree misidentification and uneven measurement interval problems in individual-tree modeling of Balsa stand dynamics. *Ecological Engineering*, 69, 232-236.
- Douterlungne, D., Thomas, E. (2013). Fast-growing pioneer tree stands as a rapid and effective strategy for bracken elimination in the Neotropics. *J. Appl. Ecol.*, 50, 1257-1265.
- Draper, N.R., Smith, H. (1981). *Applied Regression Analysis*. USA: Wiley and Sons. 709 p.
- Drew, T.J., Flewelling, J.W. (1979). Stand density management: an alternative approach and its application to Douglas-fir plantation. *Forest Science*, 25, 518-532.
- Ek, A.R., Monserud, R.A. (1974). *Trials with program FOREST: Growth and reproduction simulation for mixed species even or uneven aged forest stand*. In: Fries (ed.): *Growth models for tree and stand simulation*. Royal College of Forestry. Research Note. No 30. 56-73.
- Dominguez, J.M., Espinel, R., (2009). Análisis de factibilidad para la introducción de biodiesel en Ecuador. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 25, 10-22.
- Faustmann, M. (1849). Berechnung des Wertes, welchen Waldboden, sowie noch nicht haubare Holtbestände für die Waldwirtschaft besitzen. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 20, 441-445.
- Finkeldey, R., Gailing O., Leinemann, L. (2005). *Einführung in die Forstgenetik. Institut für Forestgenetik und Forstpflanzenzüchtung*. Georg-August-University Göttingen. 334 p.
- Fletcher, M.I. (1951). Balsa: Production and Utilization. *Economic Botany* 5(2), 107-125.
- Franz, F. (1968). *Das EDV-Programm STAOET zur Herleitung mehrgliedriger Standort Leistungstafeln*. München Verlag. 230 p.
- Freese, F. (1960). Testing accuracy. *For. Sci.* 91, 139-145.
- Gadow v., K. (1986). Observation on Self-thinning in *Pinus patula* Stands. *South African Journal of Science*, 82, 364-368.
- _____ (1987). *Untersuchungen zur Konstruktion von Wachstumsmodellen für schnellwüchsige Platagenbaumarte*. *Forstl. Forschungsberichte*. Uni. München No 77. 260 p.
- _____ (1992a). Ein Wachstums und Ertragsmodell für die Beschreibung von Bestandesparametern. En: Preuhsler, Röhie, Utschig, Cachman (Eds.), *Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Franz, Lehrstuhl f. Waldwachstumskunde*. Uni. München. pp 75-83 .
- _____ (1992b). Wachstums und Ertragsmodelle für die Forsteinrichtung. Bericht zur Jahrestagung des Deutschen Verbandes Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Jahrestagung in Grillenburg. 180 p.
- _____ (1993). Zur Bestandesbeschreibung in der Forsteinrichtung- *Forst und Holz*, 48(21), 602-606.

- _____. (1997). Strukturentwicklung eines Buchen – Fichten – Mischbestandes. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 168, 103-105.
- _____. (2003). *Waldstruktur und Wachstum. Beilage zur Vorlesung. Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie*. Uni. Göttingen. 246 p.
- _____. (2004). *Forsteinrichtung. Steuerung und Analyse der Waldentwicklung. Beilage zur Vorlesung. Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie*. Universität Göttingen. 246 p.
- Gadow V., K., Hui, G.Y. (1993). Stammzahlentwicklung und potentielle Bestandesdichte bei *Cunninghamia lanceolata*. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 110(2), 41-48.
- _____. (1998). *Modelling forest development*. Dodrecht: Kluwer Academic Publisher, 213 p.
- Gadow v., K., Heydecke, H., Riemer, Th. (1996). Zur Vechereibung der Schaftprofile stehender Waldbäume. *Feschrift. A. Akça*, 31-44.
- Gadow v., K., Breckenkamp, B. (1992). *Forest Management*. Pretoria: Academica, 151 p.
- García, O. (1988). Experience with an advanced growth modelling. En: Ek. Ar., Shefley, S.R. y Burke (Eds.), *Forest growth modelling and prediction. USDA For. Serv. Gen. Techn. Rep. Nc-120*, 668-675.
- Gerold, D. (1990). *Modellierung des Wachstums von Waldbeständen auf der Basis der Durchmesserverteilung*. Dissertation, Dresden. 180 p.
- Gerrits, A.M.J., Savenije, H.H.G., Veling, E.J.M, Pfister, L. (2009). Analytical derivation of the Budyko curve based on rainfall characteristics and a simple evapotranspiration model. *Water Resources Research* 45: W04403. Doi: 10.1029/2008WR007308.
- Gingrich, S.F. (1967). Measuring and evaluating stocking and stand density in upland hardwood forest in central states. *Forest Science*, 13: 38-53.
- Goelz, J.C.G, Burk, T.E. (1992). Development of a well-behaved site index equations jack pine in north central Ontario. *Can. J. For. Res.* 22, 776-784.
- González, B., Cervantes, X., Torres, E., Sánchez, C., Simba, L. (2010). Caracterización del cultivo de la Balsa (*Ochroma pyramidale*) en la provincia de Los Ríos. *Ciencia Tecnología*, 3(2), 7-11.
- Greenhunt, G.K. (1982). Dependence of fluxes and bulk transfer coefficients on atmospheric stability over the upwelling region off the coast of Ecuador. En: *Proc. 1st Int. Conf. on Met., and Air/Sea Interactions of the coastal zone* (pp. 321-324). The Hague.
- Haggar, J.P., Buford Briscoe, C., Butterfield, R.P. (1998). Native species: a resource for the diversification of forestry production in the lowland humid tropics. *Forest Ecology and Management*, 106, 195-203.
- Hart, H.M. (1928). *Stantal en Dunning – eem Orienteerend Onderzoek naar de Beste Plantwijdte en Dummingswijze voor de Djati*. H. Venman & Zonnen, Wageningen.
- Hasenauer, H., Moser, M., Eckmüllner, O. (1995). MOSES – a computer simulation program for modelling stand response. En: Pinto da Costa and

- Preuhsler (Eds.), *Mixed stand, research plots, and results, models*. Portugal: Inst. Sup. de Agronomía. Uni. Tec. de Lisboa, 330 p.
- Heep, T.E. (1987). Using microcomputers to narrow the gap between research and practitioner. A case history of the TVA yield program. *USDA. For. Ser. Gen. Tech. Rep. NC. 120*, 976-983.
- Helms, J.A. (1998). *Fertilizers and Eucalypt Plantation in South Africa: Nutrition of Eucalypts*. Australia: CSIRO publisher, 120 p.
- Hradetzky, J. (1981). Spiine – Funktion und ihre Anwendung in der forstlichen Forschung. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 100, 45-49.
- _____. (1999). Höherermittlung bei Betriebsinventuren in Baden-Württemberg. *Cbl. f.ges. Forstw*, 116(1/2), 119-128.
- Hummel, F.C. (1954). *Definition of thinning treatments*. Proceedings of the IUFRO Congress, Rome.
- Hui, G.Y., Gadow V., K. (1993). Zur Modellierung der Bestandesgrundflächentwicklung dargestellt am Beispiel der Baumart *Cunninghamia lanceolata*. *Allg. Forst- u J.-Ztg*, 164(8), 144-145.
- _____. (1996). Ein neuer Ansatz zur Modellierung von Durchmesserverteilungen. *Cbl. f.d. ges. Forstwes*, 11(4), 101-113.
- Hui, G. (1995). Zur Beschreibung der Bestandesentwicklung nach einer Durchforstung. *Forstarchiv*, 66, 61-63.
- _____. (1998). *Wuchsmodelle für die Baumart Cunninghamia lanceolata*. Göttingen: Cuvillier Verlag, 121 p.
- Hyink, D.M., Moser, J.W. (1983). A generalized framework for projecting forest yield and stand structure using diameter distribution. *For. Sci.* 29(1), 85-95.
- Instituto Nacional De Investigaciones Agropecuarias, INIAP (2014). Plan Estratégico de Investigación Desarrollo e Innovación (PE I+D+i) 2014-2017 <http://www.tecnologia.iniap.gob.ec/index.php/msniaf/mplaniaf>
- Jansen, J.J., Sevenster, J., Faber, P.J. (1996). *Opbrengsttabellen voor belangrijke boomsoorten in Nederland*. Hinkeloord Report No. 17, Wageningen. 202 p.
- Jayaraman, K., Lappi, J. (2001). Estimation of height-diameter curves through multilevel models with special reference to even-aged teak stands. *Forest Ecology and Management*, 142, 155-162.
- Kahn, M. (1994). Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. *Forstliche Forschungsberichte München*, 141. 204 p.
- Kahn, M., urský, J. (1999). Höhenzuwachsfunktionen für Einzelbaummodelle auf der Grandiage quasirealer Baumhöhenzuwächse. *Cbl. f.ges. Forstw*, 162(1/2), 105-118.
- Kiviste, A.K. (1988). *Mathematical Function of Forestal Growth*. Estonia Agricultural Academy, 179 p.
- Kleinn, Ch. (2007). *Lecture Notes for the Teaching Module Forest Inventory. Institute of Forest Management, Faculty of Forest Sciences and Forest Ecology*. Göttingen, Germany: Georg August Universität Verlag. 164 p.

- Kramer, H., Akça, A. (1995). *Leitfaden zur Waldmesslehre*. Frankfurt am Main: J.D. Sauerländer's Verlag. 205 p.
- Kramer, H. (1988). *Waldwachstumslehre*. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey, 880 p.
- Kreuels, R., Fraerich, K., Ruprecht, E. (1975). An aerological climatology of South America. *Met. Rdsch. H. 1*, 17-24.
- Lamprecht, H. (1986). *Silviculture in the Tropics*. Hamburg/Berlin: Editions Paul Parey. 296 p.
- Lee, W.K. (1993). *Wachstums und Ertragsmodelle für Pinus densiflora in der Kangwon-Provinz, Korea*. Dissertation. Uni. Göttingen. 150 p.
- Lemm, R. (1991). Ein Dynamisches Forstbetriebs Simulationsmodell. Professur für Forsteinrichtung und Waldwachstum der ETH Zürich. 200 p.
- Little, E., Dixon, R. (1969). *Árboles comunes de la provincia de Esmeraldas. Estudio Pre inversión para el Desarrollo Forestal del Noroccidente*. PNUD/FAO. Roma. 536 p.
- Long, J.N., Mccarter, J.B., Jack, S.B. (1988). A modified density management diagram for coastal Douglas fir. *Western Journal of Applied Forestry*, 3(2), 88-89.
- López-Urrea, R., Martín De Santo Olalla, F., Fabeiro, F.C., Moratall, A. (2006). Testing evaporation equations using lysimeters observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 85, 15-26.
- López Sánchez, C.A., Gorgoso, J., Varela, F., Castedo Dorado, F., Rojo Alboreceda, A., Rodríguez Soalleiro, R., Álvarez González, J.G., Sánchez Rodríguez, F. (2003). A height-diameter model for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Northwest Spain). *Ann. For. Sci.* 60, 237-345.
- Luna, R.K. (1996). *Plantation Trees*. Dehra Dun, India: International Book Distributors, pp. 350-353.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador, MAE (2008). Evaluación y actualización de las estrategias de desarrollo forestal sustentable del Ecuador, estrategia para el desarrollo forestal sustentable del Ecuador; <http://web.ambiente.gob.ec/sites/default/files/archivos/PUBLICACIONES/FORESTAL/edfsi.pdf>
- Ministerio de Agricultura, Acuacultura y Pesca, MAGAP (2008). Plan de reactivación agropecuario 2007-2011. Quito: Ecuador; <http://es.scribd.com/doc/72871785/Plan-Nacional-de-Reactivacion-Agropecuaria-2008-2011>.
- ____ (2013). Programa de Incentivos para la Reforestación con fines comerciales. MAGAP, 63 p.
- ____ (2016). La política agropecuaria ecuatoriana. Hacia el desarrollo territorial rural sostenible 2015-2025. I Parte. MAGAP, 480 p.
- Martin, J.F., Roy, E.D., Diemont, S.A.W., Fergurson, B.G. (2010). Traditional Ecological Knowledge (TEK): ideas, inspiration, and designs for ecological engineering. *Ecol. Eng.* 36, 839-849.

- Michailoff, J.L. (1943). Zahlenmässiges Verfahren für die Ausführung der Bestandeshöhenkurven. Sonderdr. *Fw. Cbl. u. Tharandter Forstl. Jb.*, 6, 273-279.
- Mitscherlich, G. (1978). *Wald Wachstum und Umwelt*. Sauerländer Verlag. 340 p.
- Midgley, S., Blyth, M., Howcroft, N., Midgley, D., Brown, A. (2010). *Balsa: biology, production and economics in Papua New Guinea*. ACIAR Technical Reports No. 73. Australian Centre for international Agricultural Research, Canberra, 98 pp.
- Mirkovic, D. (1958). Normale visinske krive za chrast kinak i bukvu v NR Srbiji. Zagreb. Glasnik sumarskog fakultate 13. Citado en: Wenk G, V Antanaitis, S Smelko, 1990. *Waldetragslehre*. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 448 p.
- Mitchell, K.J. (1975). *Dynamics and simulated yield of Douglas-fir based on stem analysis data and stand simulation*. Royal College of Forestry, Research Notes. No 30. pp. 7-21.
- Molion, L.C. (1987). On the dynamic climatology of Amazon Basin and associated rain-producing mechanisms. En: E. Dickinson (Ed.), *The Geophysiology of Amazonia* (pp. 391-407). New York.
- Munro, D.D. (1974). Forest growth models – a prognosis. En: J. Fries (Eds.), *Growth models for tree and stand simulation*. Royal College of Forestry. Research Notes, No 30. pp. 7-21.
- Murray, D.M., Gadow v., K. (1993). A flexible yield model for Regional Timber Forecasting. *Southern Journal of Applied Forestry*, 17(2), 112-115.
- Nagel, J. (1991). Enheldshöhenkurvenmodell für Roteiche. *Allg. Forst- und J. Ztg.* 162(1), 16-18.
- Parde, J. (1961). *Dendrométrie*. Nancy: Editions de l'École Nationale des Eaux et des Forêts, 120 p.
- Penman, H. L. (1956). Evaporation: An introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 4, 9-29.
- Pienaar, L.V., Harrizon, W.M., Rheney, J.W. (1991). *PMRC Yield Prediction System for Slash Pine Plantations in the Atlantic Coast Flatwoods*. Technical Report 1990-3. Athens: University of Georgia; <http://warnell.forestry.uga.edu/pmrcpub/TR1990-3.pdf>
- Pienaar, L.V., Harrison, W.M. (1988). Stand Table Projection Approach to Yield Prediction in Untinned Even-Aged Stands. *For. Sci.*, 34(3), 804-808.
- Plenaar, L.V., Turnbull, K.J. (1973). The Chapman Richards Generalization of Von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. *For. Sci.*, 19, 2-22.
- Pretzsch, H., urský, J. (2001). Evaluierung von Waldwachstumssimulatoren auf Baum – und Bestandesebene. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 172(8-9), 146-150.
- Pretzsch, H. (1992). Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. *Forstliche Forschungsberichte München*, 15, 150 p.

- Preuner, K. (1974). *Aufstellung und Experimentelle (Überprüfung Mathematischer Modelle für die Entwicklung der Durchmesser-Verteilung von Fichtenbeständen*. Dissertation, Dresden. 140 p.
- Quicke, H.E., Meldahl, R.S. Kush, J.S. (1994). Basal area growth of individual tree – a model derived from a regional longleaf pine growth study. *For. Sci.*, 40(3), 528-542.
- Ralston, M.L., Jengrich, R.I. (1978). DUD, a derivative-free algorithm for nonlinear least squares. *Technometrics*, 20: 7-14.
- Reineke, L.H. (1933). Perfecting a Stand Density Index for Even-Aged Forests. *Journal of Agricultural Research*, 46(7), 627-638.
- Richards, F.J. (1959). A flexible growth functions for empirical use. *J. Exp. Bot.*, 10, 290-300.
- Rojo, A., Montero, G. (1996). *El Pino Silvestre en la Sierra de Guadarrama*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 293 p.
- Römisch, K. (1983). *Ein Mathematisches Modell zur Simulation von Wachstum und Durchforstung Gleichaltriger Reinbestände*. Dissertation, Tharandt. 124 p.
- Sánchez, S., Chang, S., Gadov v., K. (2004). Optimal residual growing stock and cutting cycle in mixed uneven-aged maritime pine stands in North-western Spain. *Forest Policy and Economics*, 6(2), 145-152.
- Sánchez, S. (2003). Untersuchung zur optimalen Steuerung der Waldentwicklung. Universitätsbibliothek. Sub Göttingen. http://webgw.dg/diss/2003/sanchez_orois/
- Sánchez, S., Vilčko, F. (2002). Bewertung und Optimierung von Vornutzungen in Fichtenbeständen. *Forstw. Cbl.* 121, 250-264.
- SAS Institute Inc. (2014). SAS User's Guide: SAS STAT. Version 8. SAS Institute Inc., Cary. NC. 844 p.
- Schumacher, F.X. (1939). A new growth curve and its application to timber yield studies. *J. For.*, 37, 819-820.
- Seo, J.H., Vilčko, F., Sánchez, S., Kunth, S., Gadov v., K. (2004). A case study of forest management planning for Norway spruce (*Pice abies*) stands using modified accelerated Simulated Annealing. *Tree Physiology*, 25(7), 929-938.
- Shirley, S., Lentz, E. (1985). Quick Estimation of the Three-Parameter Weibull to Describe Tree Size Distribution. *Forest Ecology and Management*, 13, 195-203.
- Shvidenko, A., Venevsky, S., Raille, G., Nilsson, S. (1995). A System for evaluation of growth and mortality in Russian forest. *Water, Air and Soil Pollution*, 82, 333-348.
- Sivananthawerl, Th. (2001). *Growth and Site Conditions of Eucalyptus grandis in Sri Lanka*. Göttingen: Cuvillier Verlag, 128 p.
- Sloboda, B., Gaffrey, D., Matsumura, N. (1993). Regionale und lokale Systeme von Höhenkurven für gleichartige Reinbestände. *AFJZ*, 12, 225-228.
- Sloboda, B., Pfreundt, T. (1989). Baum und Bestandeswachstum. Ein system-

- manalytischer räumlicher Ansatz mit Versuchsplanungskonsequenzen für die Durchforstung und Einzelbaumentwicklung. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten – Sektion Ertragskunde. Ateendorf/Olpe. 300 p.
- Soares, P., Tomé, M. (2002). Height-diameter equation for first rotation eucalypt plantations in Portugal. *Forest Ecology and Management*, 166, 99-109.
- Soares, P., Tomé, M., Skovsgaard, J.P., Vanclay, J.K. (1995). Evaluating a growth model for forest management using continuous forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, 71, 251-265.
- Sterba, H., Korol, M., Rössler, G. (2001). Ein Ansatz zur Evaluierung eines Einzelbaumwachstumssimulators für Fichtenreinbestände. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 120, 406-421.
- Sterba, H. (1990). *Validitätsprüfung des Einzelbaumsimulators für Fichten – Kiefern – Mischbestände*. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten – Sektion Ertragskunde. Deutschland: Alier Verlag. 150 p.
- Tang, Sh. (1991). Establishment and Application of an Integrated Stand Growth Model of Masson Pine in Daqinschan. *Forest Research*, 4: 8-13.
- Tewari, V.P., Corral Rivas, J.J., Vilčko, F., Gadow v., K. (2007). Height-growth and site index equations for social forestry plantations of *Acacia nilotica* and *Eucalyptus hybrid* in Gujarat State of India. *Forests, Trees and Livelihoods*, 17(2), 125-140.
- Trincado, G., Leal, C. (2006). Ecuaciones locales y generalizadas de altura-diámetro para pino radiata (*Pinus radiata*). *Bosque*, 27(1): 23-34.
- Trincado, G., Gadow v., K. 1996. Zur Sortimentschätzung stehender Laubbäume. *Zentralblatt für das gesamte Forstw*, 113(1), 27-38.
- Toson, B., Viot, P., Pesqué, J.J. (2014). Finite element modeling of Balsa wood structures under server loading. *Engineering Structures*, 70, 36-52.
- Torres R., J.M., Magaña Torres, O.S. (2001). *Evaluación de plantaciones forestales*. México, D.F.: Limusa, 472 p.
- Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Annales Agronomiques*, 12(1), 13-49.
- Vanclay, J.K. (1994). *Modelling forest growth – applications to mixed tropical forest*. Wallingfort, UK: CAB International, 210 p.
- Van Laar, A., Akça, A. (1997). *Forest Mesuration*. Göttingen, Germany: Cuvillier Verlag, pp. 246-247.
- Velasco, J., Hernández-Días, J., Fladung, M., Cañadas, A., Prieto-Ruiz, I., Wehenkel, Ch. 2016. Spatial genetic structure in four *Pinus* species in the Sierra Madre Occidental, Durango, México. *Canadian Journal of Forest Research*. (aceptado).
- Vilčko, F. (2005). *Examining growth and management of spruce stands*. Dissertation. Georg-August-University of Göttingen, 150 p.
- Villiers, Y., Van Laar, A. (1986). Studies and Stand Structure in Plantations of *Pinus radiata*. *South African Forestry Journal*, 136, 15-21.

- Virji, H. (1981). A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. *Month. Weath. Rev.*, 109, 559-610.
- Webb, F.R., Holman, F.J., Palmer, V.C. (1980). *A guide to species selection for tropical and sub-tropical plantations*. CFI Tropical Forestry Papers. No 15, Oxford.
- Weidelt, H. (1998). *Tropical Silviculture – Part II. Lecture notes from Institute of Tropical Silviculture*. Germany: University of Göttingen, 400 p.
- Wenk, G., Antanaitis, V., Smelko, S. (1990). *Waldertragslehre*. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag, 230 p.
- Weidemann, E. (1936). Über die Vereinfachung der Höhengermittlung bei der Vorratsaufnahme. *Mitt. a. Forstw. u. Forstwiss.*, 387-365.
- Wishnie, M.H., Dent, D.H., Mariscal, E., Deago, J., Cedeño, N., Ibarra, D., Condit, R., Ashton, P.M.S. (2007). Initial performance and reforestation potential of 24 tropical tree species planted across a precipitation gradient in the Republic of Panamá. *Forest Ecology and Management*, 243, 39-49.
- Whitmore, T.C., Wooi-Khoon, W. (1983). Growth Analysis of the Seedling of Balsa, *Ochroma lagopus*. *New Phytol*, 95, 305-311.
- Zeide, B. (1993). Analysis of growth equations. *For. Sci.*, 39, 594-616.
- Zhang, L., Peng, C. Huang, S., Zhou, X. (2002). Development and evaluation of Eco region-based jack pine height-diameter models for Ontario. *Forestry Chronicle* 78(40), 530-538.
- Zhang, Y., Majumdar, S. (2013). Land Expectation Value to Profit Maximization: Re- Examination of the Faustmann Formula. *Sustainability, Economics, and Natural Resources*, 4, 277-287.



“Esta obra de investigación, desarrollada e innovada por profesionales ecuatorianos que laboran en el INIAP, ESPOL y ESPAM, contribuye al cumplimiento de las directrices de esta Cartera de Estado y del Gobierno, a fin de consolidar el Plan Nacional del Buen Vivir y el Cambio de la Matriz Productiva. Resaltando que esta obra migra del esquema de “proyecto” y “programa” de apoyo al productor por rubro a un enfoque territorial de gestión de procesos de desarrollo territorial rural que transfieren poderes a los campesinos de nuestro país”.

Javier Ponce Cevallos
Ministro de Agricultura,
Ganadería, Acuicultura y Pesca



Ministerio
de Agricultura, Ganadería,
Acuicultura y Pesca



Av. Francisco Orellana y Justino Cornejo
Teif.: (593 4) 2068528
www.iniap.gob.ec
Guayaquil - Ecuador



ESTACION EXPERIMENTAL PORTOVIEJO

ISBN 978-9942-09-360-8



9 789942 093608