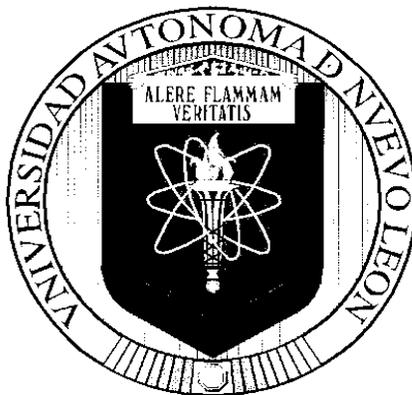


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



LA RELACIÓN COMPETENCIA-DENSIDAD Y SU EFECTO EN EL
CRECIMIENTO DE LOS BOSQUES NATURALES DEL
ESTADO DE DURANGO, MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

PRESENTA

JOSÉ LUIS REYES MUÑOZ

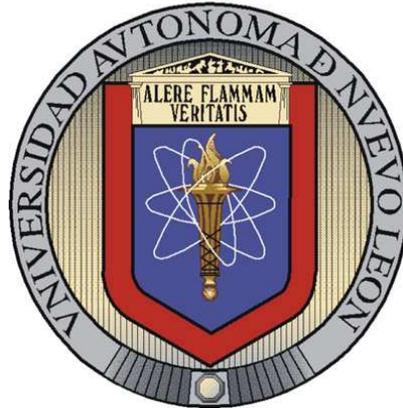
LINARES, NUEVO LEÓN

ABRIL, 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

Subdirección de Posgrado



LA RELACIÓN COMPETENCIA-DENSIDAD Y SU EFECTO EN EL
CRECIMIENTO DE LOS BOSQUES NATURALES DEL
ESTADO DE DURANGO, MÉXICO

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

PRESENTA:

JOSÉ LUIS REYES MUÑOZ

Linares, Nuevo León

Abril, 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

Subdirección de Posgrado



La relación competencia-densidad y su efecto en el crecimiento de los bosques naturales del Estado de Durango, México

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

con Especialidad en Manejo de Recursos Naturales

**PRESENTA:
JOSÉ LUIS REYES MUÑOZ**

Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón

DIRECTOR

Dr. Javier Jiménez Pérez

ASESOR

Dr. Eduardo Javier Treviño Garza

ASESOR

Dr. Enrique Jurado Ybarra

ASESOR

Dr. Rubén Francisco González Laredo

ASESOR EXTERNO

Linares, Nuevo León

Abril, 2011

Agradecimientos

A todas las instituciones y personas que física y financieramente apoyaron la realización del presente trabajo de investigación.

Agradezco a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), por brindarme la oportunidad de prepararme en esa benemérita institución.

Un agradecimiento especial a mi asesor principal y director de tesis Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón, por aceptarme como su tesista, por su apoyo científico y por creer en mi proyecto de investigación.

Al Dr. Eduardo Javier Treviño Garza, por aceptar formar parte de mi comité de tesis y por sus valiosas y acertadas sugerencias.

A mis asesores de tesis, Dr. Javier Jiménez Pérez y Dr. Enrique Jurado Ybarra, que en todo momento estuvieron dispuestos a ayudarme con sus acertadas sugerencias y críticas constructivas.

Al Dr. Rubén Francisco González Laredo, que con su motivación y conocimientos en biometría, me alentó a continuar con mis estudios de posgrado, por el tiempo dedicado le seguiré estando agradecido.

Al Dr. Arturo Gerardo Valles Gándara, por iniciarme en el interesante tema de la biometría forestal y por contribuir desinteresadamente a un mejor entendimiento sobre los modelos matemáticos de predicción.

Finalmente agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de posgrado en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León y al Ejido Pueblo Nuevo y su personal técnico por permitirme trabajar en sus sitios permanentes de investigación forestal (SPIS) y con sus bases de datos.

Dedicatorias

A mi madre Herminia Muñoz Cortés (q.e.p.d.), por su ayuda donde quiera que se encuentre, por darme la vida y estar conmigo en todo momento.

A mis hijos: L. Aarón, Diana E. y J. Rodrigo, por el tiempo que no les dedique, esperando que algún día comprendan la importancia que representa para mí la realización del posgrado.

ÍNDICE

CAPÍTULO	Página
Índice de tablas	iii
Índice de figuras	iv
Índice de apéndice A	v
Índice de apéndice B	ix
RESUMEN	x
SUMMARY	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.1.1 Objetivos particulares	3
1.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 DEFINICIONES Y CONCEPTOS	5
2.2 ANTECEDENTES	9
3. MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	19

3.1.1 Fisiografía	19
3.1.2 Geología, suelo y clima	21
3.1.3 Hidrología	21
3.1.4 Vegetación	22
3.2 METODOLOGÍA DE ESTUDIO	23
3.2.1 Descripción de sitios permanentes	23
3.2.2 Análisis de la información	24
3.2.3 Descripción de Modelos matemáticos	24
4. RESULTADOS	31
4.1 MODELIZACIÓN DEL CRECIMIENTO	35
5. DISCUSIÓN	41
6. CONCLUSIONES	44
7. LITERATURA CITADA	46
8. APÉNDICES	58
8.1 APÉNDICE A	59
8.2 APÉNDICE B	90
9. AUTOBIOGRAFÍA	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Título	Página
1	Descripción de los Índices de Competencia independientes de la distancia evaluados.	23
2	Modelos de crecimiento ($m^3r\ ha^{-1}$ en 6 años).	26
3	Estadísticos de regresión de los mejores 15 modelos de crecimiento.	30
4	Pruebas de hipótesis y grado de exactitud de los mejores 15 modelos de crecimiento.	32
5	Modelización del crecimiento modelo 15 logarítmico.	33
6	Modelización del crecimiento modelo 5 cuadrático.	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	Ubicación geográfica del área de estudio.	19
2	Gráficas de dispersión, modelos cuadráticos.	36
3	Gráficas de dispersión, modelos logarítmicos.	37

ÍNDICE DE APÉNDICE A

Tabla	Título	Página
1	Análisis de varianza del modelo 1 de crecimiento.	51
2	Análisis de varianza del modelo 2 de crecimiento.	51
3	Análisis de varianza del modelo 3 de crecimiento.	52
4	Análisis de varianza del modelo 4 de crecimiento.	52
5	Análisis de varianza del modelo 5 de crecimiento.	53
6	Análisis de varianza del modelo 6 de crecimiento.	53
7	Análisis de varianza del modelo 7 de crecimiento.	54
8	Análisis de varianza del modelo 8 de crecimiento.	54
9	Análisis de varianza del modelo 9 de crecimiento.	55
10	Análisis de varianza del modelo 10 de crecimiento.	55
11	Análisis de varianza del modelo 11 de crecimiento.	56
12	Análisis de varianza del modelo 12 de crecimiento.	56
13	Análisis de varianza del modelo 13 de crecimiento.	57
14	Análisis de varianza del modelo 14 de crecimiento.	57

15	Análisis de varianza del modelo 15 de crecimiento.	58
16	Análisis de varianza del modelo 16 de crecimiento.	58
17	Análisis de varianza del modelo 17 de crecimiento.	59
18	Análisis de varianza del modelo 18 de crecimiento.	59
19	Análisis de varianza del modelo 19 de crecimiento.	60
20	Análisis de varianza del modelo 20 de crecimiento.	60
21	Análisis de varianza del modelo 21 de crecimiento.	61
22	Análisis de varianza del modelo 22 de crecimiento.	61
23	Análisis de varianza del modelo 23 de crecimiento.	62
24	Análisis de varianza del modelo 24 de crecimiento.	62
25	Análisis de varianza del modelo 25 de crecimiento.	63
26	Análisis de varianza del modelo 26 de crecimiento.	63
27	Análisis de varianza del modelo 27 de crecimiento.	64
28	Análisis de varianza del modelo 28 de crecimiento.	64
29	Análisis de varianza del modelo 29 de crecimiento.	65
30	Análisis de varianza del modelo 30 de crecimiento.	65
31	Análisis de varianza del modelo 31 de crecimiento.	66
32	Análisis de varianza del modelo 32 de crecimiento.	66
33	Análisis de varianza del modelo 33 de crecimiento.	67

34	Análisis de varianza del modelo 34 de crecimiento.	67
35	Análisis de varianza del modelo 35 de crecimiento.	68
36	Análisis de varianza del modelo 36 de crecimiento.	68
37	Análisis de varianza del modelo 37 de crecimiento.	69
38	Análisis de varianza del modelo 38 de crecimiento.	69
39	Análisis de varianza del modelo 39 de crecimiento.	70
40	Análisis de varianza del modelo 40 de crecimiento.	70
41	Análisis de varianza del modelo 41 de crecimiento.	71
42	Análisis de varianza del modelo 42 de crecimiento.	71
43	Análisis de varianza del modelo 43 de crecimiento.	72
44	Análisis de varianza del modelo 44 de crecimiento.	72
45	Análisis de varianza del modelo 45 de crecimiento.	73
46	Análisis de varianza del modelo 46 de crecimiento.	73
47	Análisis de varianza del modelo 47 de crecimiento.	74
48	Análisis de varianza del modelo 48 de crecimiento.	74
49	Análisis de varianza del modelo 49 de crecimiento.	75
50	Análisis de varianza del modelo 50 de crecimiento.	75
51	Análisis de varianza del modelo 51 de crecimiento.	76
52	Análisis de varianza del modelo 52 de crecimiento.	76

53	Análisis de varianza del modelo 53 de crecimiento.	77
54	Análisis de varianza del modelo 54 de crecimiento.	77
55	Análisis de varianza del modelo 55 de crecimiento.	78
56	Análisis de varianza del modelo 56 de crecimiento.	78
57	Análisis de varianza del modelo 57 de crecimiento.	79
58	Análisis de varianza del modelo 58 de crecimiento.	79
59	Análisis de varianza del modelo 59 de crecimiento.	80
60	Análisis de varianza del modelo 60 de crecimiento.	80

ÍNDICE DE APÉNDICE B

Programa	Título	Página
1	Programa en SAS [®] para el análisis de los modelos cuadráticos propuestos para predecir el crecimiento maderable.	82
2	Programa en SAS [®] para el análisis de los modelos logarítmicos propuestos para predecir el crecimiento maderable.	86
3	Programa en SAS [®] para la modelización del crecimiento con el modelo número 15 logarítmico.	90
4	Programa en SAS [®] para la modelización del crecimiento con el modelo número 5 cuadrático.	91

RESUMEN

Los sistemas silvícolas actuales comparten las técnicas similares. Sin embargo, las diferencias en los ecosistemas implica que no pueden generalizarse para todas las regiones forestales. Conocer la dinámica de crecimiento de cada sitio en particular, permite conocer su efecto en el crecimiento y desarrollo de los bosques naturales. En México, durante muchos años el manejo de los bosques fue dirigido a justificar la máxima extracción de productos forestales, situación que ha cambiado por las restricciones en la normatividad vigente.

Hoy en día los Programas de Manejo Forestal en México siguen teniendo como principal objetivo el aprovechamiento de los recursos forestales maderables, pero se tiene un avance en la elaboración de éstos programas ya que ahora involucran diversas prácticas de protección a otros recursos como el suelo, agua o a la fauna silvestre. En la silvicultura actual se requiere que se incorporen modelos de predicción que permitan modelizar el crecimiento de los árboles a nivel de sitio o rodal, de tal manera que posibiliten una variedad de opciones de manejo para lograr aprovechamientos forestales sustentables.

En el presente estudio se evaluó la capacidad de 60 nuevos modelos logarítmicos y cuadráticos para predecir el crecimiento de los árboles en bosques mezclados e irregulares. Los modelos propuestos incorporan 10 índices de competencia (*IC*) independientes de la distancia, 3 índices de densidad (*ID*), además de las variables edad (*t*) y altura promedio del rodal (*H*). Para la selección de los mejores modelos, fueron considerados los estadísticos cuadrado medio del error (CME), coeficiente de determinación (R^2), prueba de F y la prueba de hipótesis de los parámetros.

Los mejores ocho modelos logarítmicos presentan una mejora significativa con respecto a los mejores modelos cuadráticos. Los modelos presentan en promedio un ajuste mayor ($R^2 = 0.99$) y un alto nivel de exactitud con $Prob > |t| = 0.0001$, explicando dichos modelos un 99% de la variación del crecimiento en volumen a nivel rodal para bosques mezclados. Con respecto al grupo de modelos cuadráticos, siete de ellos presentaron un ajuste aceptable con valores promedio de 0.92 en R^2 y un alto nivel de exactitud con $Prob > |t| = 0.0001$.

En lo referente a la modelización del crecimiento en volumen, los modelos que incluyen índices de competencia basados en área basal y diámetro fueron los que mejor ajuste presentaron; mientras que los tres índices de densidad considerados (*N*, *G1* y *VOL1*), resultaron buenos predictores dentro de los mejores modelos logarítmicos y cuadráticos.

Los resultados obtenidos en el presente estudio indican que el incremento en volumen de un rodal está determinado en gran medida por la densidad y la competencia. Además, pueden ser de gran utilidad para predecir la productividad forestal.

SUMMARY

Current forestry systems share similar techniques. Differences in ecosystems however, imply that methods can not be generalized across forest regions. Knowledge on ecosystem dynamics of each forest type is required to understand its effects on growth and development of natural forests. In Mexico, for many years forest management was directed to justify the maximum extraction of forest products, this situation has changed with new regulations.

Current programs of forest management in Mexico still have the use of timber forest resources as the main goal, but as a step forward in the development of these programs they also involve various practices of conservation for other resources such as soil, water and wildlife. New programs of forest management requires that prediction models be incorporated in order to model the growth of trees at the level of plot or stand, in such a way that they facilitate a variety of management options to make forest production a sustainable practice.

In this study the ability of 60 new logarithmic and quadratic models to predict growth of trees in mixed and irregular forests was evaluated. The proposed

models incorporate 10 competition indexes (*IC*) independent of distance, 3 indexes of density (*ID*), in addition to age (*t*) and average stand height (*H*). To select the best models, square means error (CME), coefficient of determination (R^2), F test and hypotheses of parameters test were considered.

The best eight logarithmic models featured a significant improvement when compared to the best quadratic model. Models that yielded on average a higher adjustment ($R^2 = 0.99$) and a high level of accuracy with $P > |t| = 0.0001$, explained 99% of the volume growth variation for mixed forest stands. From the group of quadratic models, seven presented an acceptable adjustment with average values of 0.92 in R^2 and a high level of accuracy with $P > |t| = 0.0001$.

On modeling the growth in volume, models with best fit included competition indexes based on basal area and diameter; while the three density indexes considered (*N*, *G1* and *VOL1*) were good predictors of best logarithmic and quadratic models. The results found in this study indicate that the increase in volume of a stand is determined largely by density and competition. Also, they can be of great utility to predict the forest productivity.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El uso de los modelos de predicción y el conocimiento de la dinámica natural de los rodales constituye una de las herramientas más importante de la silvicultura moderna. La relación existente entre los factores que regulan el crecimiento no es ampliamente conocida, aunque se acepta que el crecimiento de un árbol está determinado por la variedad de especies presentes, su edad, la calidad de sitio, el número de individuos por unidad de área y la competencia existente por la disponibilidad de recursos (Curtis, 1970). Por tal motivo, entender la relación competencia-densidad, contribuye a un mejor conocimiento sobre la dinámica de crecimiento de las masas forestales, lo cual puede apoyar la prescripción de regímenes silvícolas que permitan manejar los bosques naturales de una manera más efectiva.

La caracterización de los bosques desde el punto de vista dendrométrico, tiene la finalidad de conocer la dinámica de crecimiento y producción de las masas forestales que las conforman; sin embargo, aunque actualmente los avances científicos y tecnológicos son amplios, aún se carece de metodologías que

permitan predecir la dinámica de crecimiento para bosques mezclados, tal como sucede de manera natural, esto se debe principalmente a la complejidad de los factores biológicos que intervienen en el proceso.

Los modelos de predicción forman parte de un componente importante dentro de los programas de manejo forestal, y deben ajustarse de tal forma que se pueda procesar la información científica, para que las decisiones estén plenamente sustentadas en la ejecución de dichos programas. Los actuales métodos de ordenación forestal que se aplican en los predios bajo manejo forestal en México y particularmente en el estado de Durango, basan la estimación de las existencias volumétricas en tablas de volumen, a partir de las cuales se determinan los volúmenes de remoción.

La generalización de prácticas sistemáticas de corta en bosques bajo manejo forestal, en algunos casos, ha mermado el potencial productivo de las zonas forestales, ya que la productividad se obtiene con base en las intensidades de corta establecidas para cada prescripción silvícola, sin considerar proyecciones futuras y la simulación de la corta. Ante esta incertidumbre, en las últimas décadas se han venido desarrollando técnicas de modelaje para la predicción de cambios en el crecimiento y la productividad forestal. Un modelo de predicción es tan sólo una aproximación del comportamiento del estado real;

por lo que es de esperarse que existan sesgos, dentro de límites tolerables, entre los crecimientos observados y los estimados.

1.1 OBJETIVO GENERAL

El principal objetivo del estudio fue analizar la relación competencia-densidad y su efecto en el crecimiento de las masas forestales del Estado de Durango, México, para desarrollar modelos matemáticos que permitan modelar dentro de límites aceptables el crecimiento a nivel de rodal, a fin de poder determinar el volumen de cosecha que se puede obtener sin poner en riesgo la permanencia y productividad del recurso forestal.

1.1.1 Objetivos particulares

- Analizar la influencia de los índices de densidad en el crecimiento de los bosques naturales.
- Evaluar índices de competencia independientes de la distancia que permitan predecir con mayor exactitud el crecimiento de los bosques naturales.
- Modelizar el crecimiento de una masa forestal considerando la relación competencia-densidad.

1.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO

El crecimiento de los árboles puede ser explicado por el efecto de la densidad y la competencia interarbórea presente en los bosques naturales del Estado de Durango, México, y las técnicas de modelaje utilizadas proporcionan resultados similares y consistentes.

CAPÍTULO 2

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 DEFINICIONES Y CONCEPTOS

Evaluar la productividad de un sitio significa generalmente hacer mediciones de las características de éste y de las variables del rodal, las cuales se usan como términos en ecuaciones matemáticas o puntos para generar gráficas que expresan la capacidad productiva de dicho sitio. Un modelo de crecimiento es un sistema diseñado para cuantificar la ganancia en volumen de una masa forestal, la cual va a estar sujeta a un cierto período de tiempo y a un tratamiento en especial (Arteaga, 1985).

La calidad de sitio de un terreno forestal, es definida en términos de la máxima cantidad de volumen de madera que éste puede producir en un período determinado. Un número de métodos indirectos han sido desarrollados para medir la productividad de madera en un sitio, esos métodos procuran seleccionar algunas propiedades fáciles de medir de la vegetación del terreno, que represente todos los factores importantes del crecimiento de las especies

del lugar; entre estos métodos indirectos se encuentran el índice de sitio, el tipo de vegetación del rodal y los factores ambientales (Davis y Johnson, 1987).

La densidad es una medida del grado de ocupación de un terreno forestal en particular, es un indicador del grado de aglutinamiento del arbolado presente, definido por el número de árboles y sus dimensiones; puede ser medida por el número de árboles por unidad de superficie, así como por el área basal y volumen por hectárea, cobertura de copas, grado de espesura y mediante diversos índices de densidad de rodal (Cano, 1998; Zepeda y Villarreal, 1987; Davis y Johnson, 1987; Zeide, 2005a; Spurr, 1962).

El número de árboles por hectárea de un rodal depende del manejo, su edad, calidad de sitio, etc., y es de gran utilidad como una medida de densidad. La suma de las secciones de los fustes de los árboles por hectárea a 1.3 m sobre el nivel del suelo se denomina área basal por hectárea, la cual es ampliamente utilizada como una medida de densidad del rodal. Los índices de densidad del rodal son una medida del promedio de densidad del rodal, éstos pueden ser obtenidos con respecto a un determinado límite entre la relación del número de árboles por hectárea y el promedio en su tamaño, el más comúnmente utilizado es el índice de Reineke (Clutter *et al.*, 1983).

Una de las razones para considerar la densidad de un rodal es que constituye una variable importante para predecir la forma, crecimiento y sobrevivencia de los árboles; medida importante para incrementar la productividad forestal mediante el control de la competencia interarbórea.

Los índices de competencia (*IC*) son una medida del efecto que producen los árboles vecinos en el crecimiento de un individuo dentro de un rodal (Vanclay, 1991). Dentro de la amplia variedad de clasificaciones existentes para árboles individuales, varios autores coinciden al señalar dos clases de modelos para *IC*: los dependientes de la distancia e independientes de la distancia (Munro, 1974; Peng, 2000).

En los modelos independientes de la distancia cada árbol es modelado separadamente y su posición competitiva se determina comparando su diámetro individual, su altura y su condición con las características del rodal. Mientras que en los modelos dependientes de la distancia, además de la altura, diámetro y otras variables del árbol usadas en los modelos independientes de la distancia, cada árbol individual es literalmente mapeado para determinar la distancia y el tamaño de los árboles adyacentes que están compitiendo con el árbol sujeto de estudio por la disponibilidad de recursos.

En la literatura se reporta una amplia variedad de índices de competencia dependientes de la distancia, desde los que consideran la superposición de zonas de influencia (Staebler, 1951; Gerrard, 1969; Bella, 1971; Arney, 1973; Ek y Monserud, 1974), hasta los índices basados en las dimensiones de los árboles vecinos ponderados por la distancia (Hegyi, 1974; Martin y Ek, 1984; Daniels, 1976; Biging y Dobbertin, 1992). Los índices independientes de la distancia son fáciles de calcular y demandan menor cantidad de información, lo cual representa una ventaja en algunos casos con respecto a los dependientes de distancia (Tomé y Burkhart, 1989). Glover y Hool (1979) desarrollaron un índice de competencia independiente de la distancia que considera simplemente las dimensiones del arbolado; tomando como base éste índice, se han desarrollado algunas ecuaciones que lo consideran en modelos que simulan el crecimiento en altura o en diámetro para una especie en particular (Valles *et al.*, 1998; 2003).

Algunos autores coinciden al señalar que los índices dependientes de la distancia son los más eficientes para predecir el crecimiento en bosques coetáneos; sin embargo, la importancia de los índices independientes de la distancia radica en que los bosques naturales presentan una gran variedad de estructuras y especies, con medidas de competencia interarbórea que pueden ser la base para la generación de nuevos modelos de predicción del crecimiento (Torres-Rojo, 2000).

Existen reportadas una gran variedad de ecuaciones de crecimiento y producción y cada año aparecen nuevos desarrollos. La complejidad de estas aproximaciones es muy variada, desde la simplicidad de una ecuación de regresión, hasta la complejidad de los sistemas de ecuaciones que simulan el crecimiento de cada árbol individual en un rodal. Una revisión de los modelos de crecimiento y producción, revela una amplia variedad de metodologías sin un patrón definido para el desarrollo de los modelos, ya que en términos generales involucran diferentes variables consideradas a criterio de sus constructores (Vanclay, 1995).

2.2 ANTECEDENTES

Adler (1979), desarrolló un modelo de simulación del incremento en diámetro para *Cupressus lusitanica*, *Pinus patula* y *Pinus radiata* en plantaciones comerciales en Kenia, Tanzania, Uganda y Malawi. Para la predicción de un diámetro dado, los efectos del sitio y la edad fueron unificados en una medida única expresada por la altura total del rodal como variable predictora básica del incremento; la distribución de diámetros fue representada por un vector de valores en los que cada uno correspondió a la distinta probabilidad acumulativa. El modelo parece mantener una base legítima para predecir la productividad de las especies estudiadas.

Con una base de datos recabada en el Estado de Missouri por el Servicio Forestal de Estados Unidos y la información de 224 sitios del Mark Twain National Forest, Shifley y Brand (1984), modificaron la función de crecimiento de Chapman-Richards para proyectar el crecimiento en altura de seis especies de coníferas, concluyendo que la adaptación asegura el total de los incrementos para un árbol individual en particular, siempre que no exceda sus límites biológicos de crecimiento.

En la predicción del incremento en área basal y diámetro para las especies Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) y Abeto grande (*Grand fir*) del este central de Oregon, Ritchie y Hann (1985) utilizaron una selección de 136 rodales con una cantidad significativa de las dos especies. Los mejores modelos fueron definidos como aquellos que minimizan el cuadrado medio del error obtenido mediante las suposiciones de los análisis de regresión, que caracterizan la relación entre el crecimiento en área basal y las variables independientes consideradas. En la predicción del incremento en diámetro, se proyectó el área basal a nivel árbol como una función del diámetro cuadrático y el crecimiento en área basal. Los resultados obtenidos indican que el crecimiento en área basal puede ser modelado adecuadamente como una simple función exponencial.

Nevárez (1986), mediante información de parcelas temporales desarrolló el simulador silvícola (SIMSIL), un modelo para simular la dinámica del crecimiento de rodales coetáneos de *Pinus douglasiana* Mtz. SIMSIL usa modelos a nivel rodal para predecir la producción a través del tiempo, el autor de SIMSIL indica que una nueva versión de este simulador debería estar basado en información proveniente sitios permanentes de investigación silvícola (SPIS) con mediciones periódicas ubicadas en rodales coetáneos en un amplio rango de edades y calidad de sitio.

Knoebel *et al.*, (1986) emplearon la distribución Weibull en el desarrollo de un modelo de simulación en Yellow Poplar, para predecir el crecimiento y rendimiento futuro por clase diamétrica, incluyendo un algoritmo que incorpora seis regímenes de aclareo y proyecta la influencia en cada régimen sobre el rendimiento futuro del bosque. Bajo los criterios de Knoebel *et al.* (1986), Magaña *et al.* (1993), citados por Valles e Islas (2000), desarrollaron un simulador para *Pinus montezumae*, empleando información de 64 parcelas permanentes de la Estación Experimental de San Juan Tetla, Puebla.

Aguirre (1987), desarrolló un sistema de modelos para predecir el crecimiento y la productividad de rodales puros coetáneos de *Pinus cooperi* (Blanco) de la región de El Salto, Dgo. Como parte de la construcción de los modelos, analizó varias metodologías para construir índices de sitio para estimar el volumen

comercial. La predicción de la distribución diamétrica se obtuvo a partir de la distribución Weibull, siendo validado el modelo con una base de datos independiente usando las pruebas de ajuste Chi-cuadrada y Kolmogorov-Smirnov como criterios de comparación. Concluye que la producción y el crecimiento de un rodal pueden ser modelados de acuerdo al tipo de copas de los árboles presentes, ya que proveen importante información para manejar las existencias del rodal.

El crecimiento en volumen para rodales irregulares de *Juniperus* piñonero del norte de Arizona, fue modelado por Chojnacky (1987). La base de datos, se obtuvo de 91 sitios al azar seleccionados de 300 que fueron instalados en 1985. Al no haber diferencias significativas en la altura de los árboles, el modelo consideró las variables crecimiento en diámetro y área basal, con estimadores obtenidos mediante regresión. Una comparación del volumen de crecimiento proyectado a 10 años, mostró un ajuste razonable, donde los coeficientes de determinación (R^2) y variación (CV) fueron 0.92 y 22 %, respectivamente.

Hann y Wang (1990), desarrollaron dos series de ecuaciones para modelar la mortalidad en bosques del estado de California. El primer modelo fue usado para predecir la mortalidad de árboles individuales, mientras que el segundo modelo es un conjunto de ecuaciones que se aplican en la versión del sistema ORGANON para el suroeste de Oregon. La probabilidad de muerte en los

árboles individuales, se predijo utilizando en la ecuación logística atributos representativos como el diámetro normal, radio de copa, área basal (posición en el rodal), área basal actualizada por acre e índice de sitio del rodal. La segunda serie de ecuaciones limitó las densidades máximas a valores razonables. Los resultados indican que la tasa de mortalidad disminuye si el diámetro normal y el radio de copa aumentan; mientras una disminución en el área basal (posición en el rodal), área basal actualizada por acre e índice de sitio del rodal aumentan la probabilidad de muerte.

Miina (1994), estudió el crecimiento individual de pino Scots (*Pinus silvestris* L.) en rodales irrigados de Noruega. Un primer modelo de crecimiento fue preparado para el crecimiento anual después de irrigada el área, mientras que el segundo modelo se utilizó para examinar los efectos de la distribución espacial en el crecimiento en diámetro y volumen de los árboles. La muestra comprendió 1277 árboles, a los que se les tomó información referente a altura, doble espesor de corteza y diámetro normal. Ambos modelos de tipo logarítmico, determinaron que el crecimiento en volumen del rodal al nivel máximo y la variación al mínimo en diámetro de los árboles, se presenta cuando se ubican en medio de dos canales de riego.

Un modelo de predicción del rendimiento para rodales puros y mezclados fue desarrollado por Wenk (1994). El elemento central del modelo, un algoritmo que

describe el incremento en volumen en relación con la edad presente. La condición inicial fue representada en base al volumen, densidad y altura del arbolado del rodal a una cierta edad a la que posteriormente se le aplicaron diversas intensidades de aclareo. Actualmente, el modelo se utiliza en los bosques del Este de Alemania, ya que comprueba que el crecimiento está relacionado con los incrementos a nivel rodal y los tratamientos de corta de aclareo que se aplican.

Lynch y Murphy (1995), con base en datos provenientes de 183 sitios establecidos entre 1985 y 1989 por el USDA, Estación Experimental Forestal del Sureste y la Universidad Estatal de Oklahoma, desarrollaron un modelo para predecir la altura total de árboles individuales en rodales coetáneos de Shortleaf pine (*Pinus echinata* Mill.), el intervalo de remediciones fue entre cuatro y cinco años. Aplicando regresión no lineal, ajustaron dos ecuaciones para predecir la altura a cualquier edad. Una primera ecuación utilizó valores presentes de altura para proyectar la altura futura; mientras que, la segunda con desconocimiento de la altura actual, estima la altura total a partir del índice de sitio, edad y diámetro normal del árbol individual. Ambas ecuaciones forman parte de un sistema compatible diámetro, altura-edad y pueden explicar la relación del diámetro existente en un rodal en particular.

Khatry Chhetri y Fowler (1996), a partir de mediciones de tocones de *Schima* (*Schima wallichii*) y *Castanopus spp.*, mediante regresión lineal múltiple predijeron el diámetro normal y basal para bosques de estas especies en la región central de Nepal. Los modelos de predicción fueron desarrollados con un 75 % de una muestra al azar de 163 árboles medidos, el restante 25 % de la información se utilizó para la validación de los modelos. Los resultados obtenidos arrojan que en todos los modelos finales los coeficientes de determinación fueron aceptables (0.9004 a 0.9806), excepto el modelo de predicción del diámetro normal que arrojó una R^2 de 0.8802.

Hitch *et al.* (1996) concluyeron que la mortalidad en Loblolly pine (*Pinus taeda* L.) en la región este de Piedmont, región de Georgia, es altamente variable debido a las interacciones en la calidad del sitio, preparación del sitio, morfología de la semilla y competencia. Desarrollaron modelos para predecir la sobrevivencia por acre desde el establecimiento de la masa forestal hasta la edad de cinco años, con un promedio de error en la predicción absoluta del 1.9 y 9.2 %, respectivamente.

Quicke *et al.* (1997) con muestras provenientes de 202 sitios permanentes de muestreo localizados en Alabama, Mississippi, Georgia y Florida, predijeron la proporción de sobrevivencia en longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.), con datos de azimut y distancia desde el centro del sitio, diámetro a la altura del pecho, clase

de copa, status de sobrevivencia y causa de muerte. Los parámetros fueron estimados utilizando técnicas no lineales, en la que el valor de β_0 fue 0.9977 para la tasa máxima de sobrevivencia de un árbol; $\beta_0 - \alpha_0$ fue estimado en 0.7894, como el rango mínimo de sobrevivencia anual.

Murphy y Graney (1998), consideraron las variables de área basal por acre, número de árboles por acre y diámetro cuadrático promedio, para simular el crecimiento en área basal, sobrevivencia y altura total de encinos (*Quercus alba* L., *Q. rubra* L. y *Q. velutina* Lam.) asociados con otras especies de latifoliadas. La base de datos proviene de 87 sitios permanentes localizados en las montañas Boston (provincia fisiográfica de Ozark Plateau, centro de Arkansas y Este de Oklahoma). Las especies estudiadas fueron divididas en grupos, a los que se les aplicaron tres modelos ajustados mediante procedimientos logísticos con el programa estadístico SAS. Concluyeron que los coeficientes negativos del diámetro cuadrático y del índice de sitio, indican que el crecimiento aumenta conforme incrementan estas variables; mientras que el coeficiente negativo de la ecuación de sobrevivencia demuestra que un incremento en su valor bajará su probabilidad. Los modelos ajustados arrojaron resultados consistentes con la dinámica de crecimiento de las especies bajo estudio, ya que representaron una significancia biológica funcional.

Valles e Islas (2000), dieron a conocer el Modelo de Simulación del Crecimiento Maderable para la Región de San Dimas, Dgo., "Sicremars Versión 1.0", construido para reflejar el crecimiento de un rodal con base en un grupo de funciones, concretamente en las relaciones del crecimiento biológico de los árboles para la especie de *Pinus cooperi* Blanco; estima el índice de sitio, la competencia, el crecimiento en diámetro y altura, la mortalidad y la incorporación de los árboles a través del tiempo. Permite hacer estimaciones a nivel de árbol individual para rodales de estructura, ya sea coetánea o incoetánea; el modelo se ubica en la clase de simuladores de árboles individuales dependientes de la distancia, el cual fue creado para estudiar la dinámica global del bosque.

Dunbar *et al.*, (2002) considerando un total de 117 rodales puros de Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) distribuidos en toda Irlanda, modelaron la productividad considerando los factores de sitio, tales como el tipo de suelo, pendiente, exposición y método de plantación. La ecuación obtenida mediante análisis de regresión lineal arrojó rangos de precisión que fluctúan entre ± 1.0 a $\pm 6.4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El estudio mostró la significativa influencia del tipo de suelo en la productividad de los rodales de Douglas fir.

Zeide (2005b), propuso un modelo para representar el crecimiento en volumen en rodales coetáneos de loblolly pine (*Pinus taeda* L.), la base de datos

considerada corresponde a 40 sitios de una plantación ubicada en el sureste de Arkansas; en la construcción del modelo consideró el tamaño de cada árbol (diámetro o volumen), edad y densidad. El autor concluye que la densidad es un eficiente predictor dentro de un modelo de crecimiento en volumen, ya que los resultados arrojaron una aceptable correlación en los datos analizados con valores en $R^2 = 0.886$.

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La base de datos para el desarrollo de los modelos proviene de 29 Sitios Permanentes de Investigación Silvícola (SPIS), el área de estudio se ubica en el Ejido Pueblo Nuevo del Estado de Durango, México, entre las coordenadas geográficas 23.60° y 23.41° de latitud Norte, 105.38° y 105.40° de longitud Oeste. Se localizan aproximadamente a 135 km de la Ciudad de Durango, correspondiendo esta distancia a 100 km hasta La Ciudad de El Salto, para continuar con rumbo a La Peña por 32 km y concluir con 3 km de bordo de segundo orden hasta la ubicación de los SPIS (Figura 1).

3.1.1 Fisiografía

Los SPIS del Ejido Pueblo Nuevo, se localizan en el macizo montañoso denominado “Sierra Madre Occidental”, incluido en la provincia fisiográfica del mismo nombre y en las subprovincias Gran Meseta y Cañones Duranguenses,

con un sistema de topoforma de meseta escalonada asociada con cañadas. El terreno es en su mayoría ondulado, presentando algunas quebradas no muy pronunciadas y pocas partes planas. Se presenta una variación altitudinal de entre 1,379 y 2,643 msnm, por la orografía del predio se pueden encontrar todas las exposiciones francas y combinaciones posibles (CONABIO, 2009).

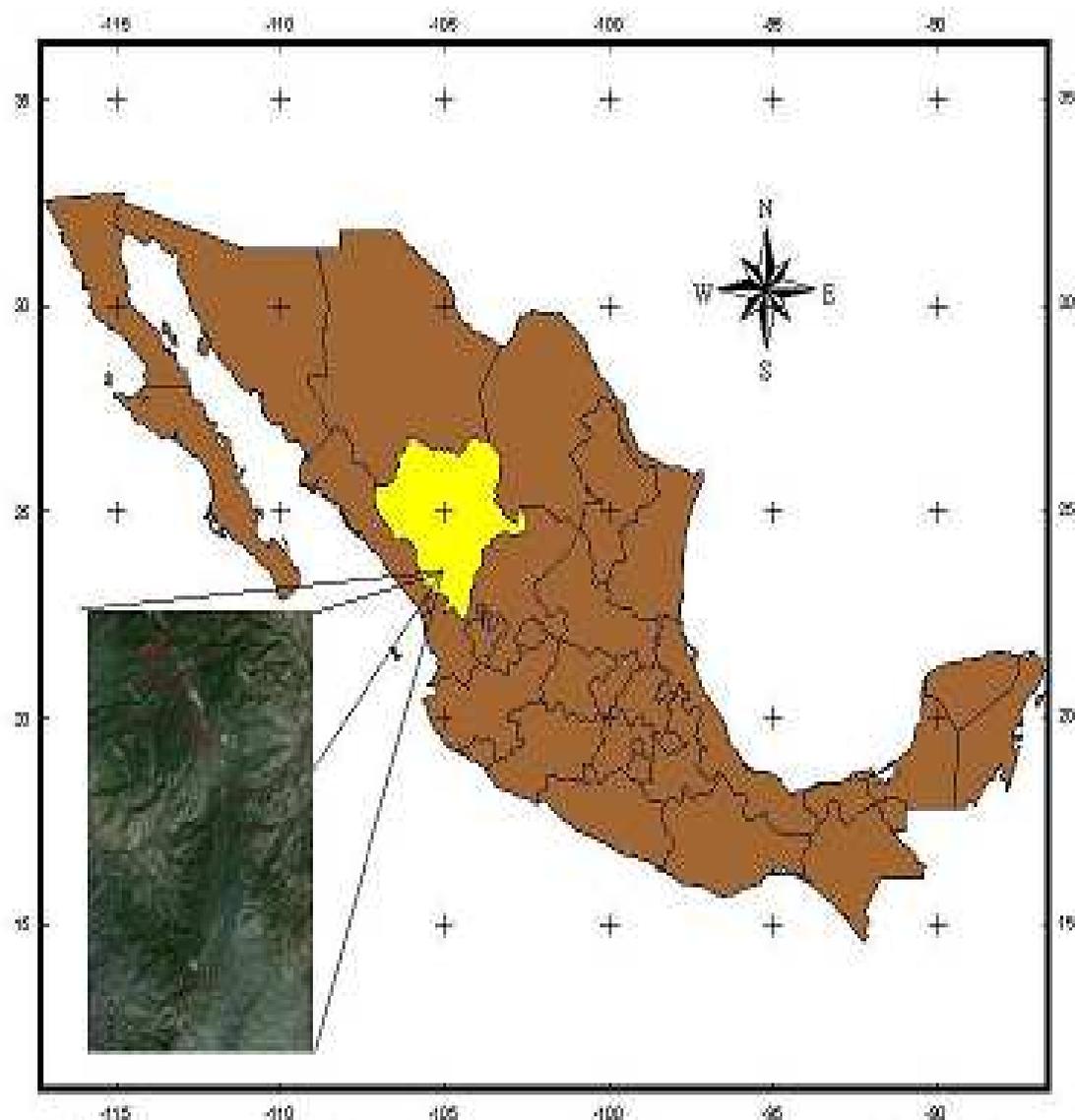


Fig. 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

3.1.2 Geología, suelo y clima

El material parental del terreno está formado por rocas ígneas extrusivas ácida pertenecientes a la era Cenozoica Período Terciario (CT). El área presenta un suelo con una asociación de Cambisol éútrico, con suelos jóvenes poco desarrollados y Litosol con Regosol de textura media en pendientes mayores a 20 %; su profundidad es variable, la mayoría en rangos de 30 a 60 cm, el drenaje superficial es rápido; en la asociación edáfica predominan los suelos limo-arcillosos, limo-arenosos y caliche. Según la clasificación climática de Köeppen adaptada para México por García (1973), los climas predominantes en la región son del tipo C(W2) y C(E) (W2), que corresponden respectivamente al templado subhúmedo y semifrío subhúmedo. El régimen de lluvias presentadas en la región es escaso aunque con intensidad en ciertas épocas del año, principalmente en Junio, Julio, Agosto y Septiembre, siendo la precipitación promedio media anual de 1200 mm, con precipitación del mes más seco menor de 40 mm y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 mm, temperaturas mínimas y máximas que pueden ser desde -18 hasta 32° C.

3.1.3 Hidrología

La superficie del predio se ubica geográficamente en la vertiente del Océano Pacífico, Región Hidrológica Presidio-San Pedro, subcuencas quebradas de El Baluarte y Guadalupe, formando parte de la cuenca alta del Río Baluarte, los

escurrimientos superficiales que existen dentro del área de estudio se clasifican del tipo perenne, intermitentes y efímeros, entre los que destacan el Río Baluarte y Río San Diego; terminando todos los escurrimientos en el Océano Pacífico en costas de Sinaloa y Nayarit.

3.1.4 Vegetación

Las comunidades vegetales más importantes del predio corresponden a rodales naturales de Pino y Pino-Encino, además de la vegetación arbustiva y herbácea asociada a estos bosques. Las especies maderables que destacan para el aprovechamiento forestal son: *Pinus durangensis*, *Pinus herrerae*, *Pinus douglasiana*, *Pinus lumholtzii*, *Pinus michoacana*, *Pinus leiophylla*, *Pinus oocarpa*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus maximinoi*, *Pinus teocote*, *Pinus cooperi*, *Pinus engelmannii*, *Quercus spp.*, *Juniperus spp.*, *Arbutus spp.*, y *Alnus spp.*, principalmente (Meraz, 2008).

Pinus durangensis es la especie más representativa y abundante, llegando a formar masa puras o mezcladas; mientras que *Pinus herrerae* es la segunda especie con mayor presencia, encontrándose principalmente en sitios con buena calidad de sitio y en suelos con mayor humedad.

3.2 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

3.2.1 Descripción de sitios permanentes

Bajo la metodología de Valles y Quiñones (2004), en el año 2001 se establecieron 29 Sitios Permanentes de Investigación Silvícola (SPIS) de 50x50 m y una parcela útil de 30x30 m (dividida en cuatro cuadrantes de 15x15 m), cada sitio tiene una franja de protección de 10 m en el perímetro. Los sitios se establecieron en la mayoría de los casos en bosques jóvenes de segundo crecimiento, con edades que oscilan entre 11 y 21 años, preferentemente en rodales en los que se aplicó preaclareo, primero y segundo aclareo; sin embargo, también se encuentran sitios establecidos en rodales con edades mayores a 48 años en los que se presenta el tratamiento silvícola de tercer aclareo.

De los 29 sitios establecidos originalmente, se concluyó que 28 se encontraban en buen estado para realizar la remediación correspondiente al año 2007, la cual permitió la obtención de incremento por cada sitio (*S*) y cuadrante (*C*) en diámetro normal (*D*), altura total (*h*), número de árboles (*N*), grosor de corteza (*GC*), vitalidad (*V*), sanidad (*SAN*), forma (*F*), posición (*P*), proyección de copa (*PC*), edad (*t*) y estado de desarrollo de cada árbol con respecto a la primera medición del año 2001.

3.2.2 Análisis de la información

Tomando como base los datos de la medición realizada en el año 2001, se consideraron sólo las variables diámetro (D), altura (h) y edad (t) para determinar el área basimétrica, volumen y edad para cada árbol; posteriormente, se obtuvieron los promedios a nivel cuadrante que generaron los índices de densidad N (número de árboles por hectárea), $G1$ (área basimétrica por hectárea del año 2001), y $V1$ (volumen por hectárea del año 2001), que permitieron estimar cada uno de los índices de competencia que se señalan en la Tabla 1, mismos que fueron desarrollados a partir del índice de Glover y Hool (1979). La base de datos de la remediación del año 2007, se empleó para calcular el crecimiento en volumen de los mismos árboles presentes en los SPIS en el año 2001.

En una primera fase, los cálculos básicos por cada sitio y cuadrante se efectuaron mediante una hoja de cálculo de Microsoft Office Excel[®], mientras que el análisis estadístico se realizó mediante regresión lineal múltiple utilizando el paquete estadístico SAS 9.1[®], para su posterior evaluación.

3.2.3 Descripción de Modelos matemáticos

Para lograr los mejores modelos de crecimiento maderable, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

Tabla 1. Descripción de los Índices de Competencia independientes de la distancia evaluados.

Nombre	Expresión matemática
1. Índice de competencia de área basal de Glover and Hool (1979)	$IGi = \frac{\left[\sum_{j=1}^n \left(\pi \left((Dj/2)^2 \right) \right) / n \right]}{\pi (Di/2)^2}$
2. Índice de competencia de área basal densidad	$IGNi = \frac{\left[\sum_{j=1}^n \left(\pi \left((Dj/2)^2 \right) \right) / n \right]}{\pi (Di/2)^2} (N)$
3. Índice de competencia de diámetro cuadrático	$IDCi = \frac{\sqrt{\left[\sum_{j=1}^n (Dj^2) \right]} / n}{(Di/100)}$
4. Índice de competencia de diámetro cuadrático densidad	$IDC Ni = \frac{\sqrt{\left[\sum_{j=1}^n (Dj^2) \right]} / n}{(Di/100)} (N)$
5. Índice de competencia de área basal total	$IGTi = \frac{\sum_{j=1}^n \left[\pi \left((Dj/2)^2 \right) \right]}{\pi (Di/2)^2}$
6. Índice de competencia de área basal total densidad	$IGT Ni = \frac{\sum_{j=1}^n \left[\pi \left((Dj/2)^2 \right) \right]}{\pi (Di/2)^2}$
7. Índice de competencia de diámetro máximo	$IDMAXi = \left(\frac{Dj \max}{Di} \right)$
8. Índice de competencia de altura total máxima	$IHMAXi = \left(\frac{Hj \max}{Hi} \right)$
9. Índice de competencia de área basal máxima	$IGMAXi = \frac{\pi \left((Dj \max / 2)^2 \right)}{\pi (Di/2)^2}$
10. Índice de competencia de volumen medio	$IVMi = \frac{\left[\sum_{j=1}^n Vj / n \right]}{Vi}$

Donde: Di = Diámetro normal del árbol sujeto a competencia. Dj = Diámetro normal del árbol competidor. N = Número de árboles dentro del cuadrante. $\pi = 3.14159$. N = Número de árboles por hectárea. $Djmax$ = Diámetro normal máximo del competidor "j". $Hjmax$ = Árbol con la altura máxima del competidor "j" en el cuadrante. Hi = Altura total de cada árbol sujeto a competencia "i". Vj = Es representado por el volumen para cada árbol competidor "j". Vi = Es el volumen del árbol "i" sujeto a competencia.

- 1.- La primera fue buscar la variable de densidad con el mejor poder predictivo dentro del modelo; para ello, se probaron tres de ellas: N (número de árboles por hectárea), $G1$ (área basimétrica por hectárea del año 2001) y $V1$ (volumen por hectárea del año 2001).
- 2.- Posteriormente, se consideró cada uno de los índices de competencia que se señalan en la Tabla 1.
3. Las variables edad (t) y altura total promedio del cuadrante (H), fueron constantes en todos los modelos.

Los modelos generales se presentan en las ecuaciones 1 y 2; mismos que dieron origen a un total de sesenta modelos cuadráticos y logarítmicos, en los cuales aparecen como constantes las variables edad (t) y altura total promedio del cuadrante (H); mientras que el número total de los modelos está determinado por los tres índices de densidad considerados (N , $G1$ y $V1$) que incorporan cada uno de los diez índices de competencia evaluados (Tabla 1); el proceso involucró la combinación y transformación de las variables independientes, comparándose posteriormente el desempeño relativo de esos modelos, hasta que fueron aceptados en su forma general. En los modelos logarítmicos, el mejor ajuste se obtuvo al aplicar logaritmo natural a la variable esperada, así como a las variables independientes H y a cada uno de los índices de competencia evaluados. Mientras que en los cuadráticos, se obtuvo mayor exactitud elevando la variable edad media al cuadrado (t^2).

$$1. \ln Y = \beta_1 \cdot ID + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LNH + \beta_4 \cdot LNIC \quad (\text{Logarítmico})$$

$$2. Y = \beta_1 \cdot ID + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IC \quad (\text{Cuadrático})$$

Donde:

Y = Crecimiento en volumen ($\text{m}^3 \text{r ha}^{-1}$) en 6 años

ID = Índices de Densidad (N , $G1$ y $V1$)

t = Edad promedio del cuadrante en años

H = Altura total promedio por cuadrante en metros

IC = Índices de Competencia (IG , IGN , IDC , $IDCN$, IGT , $IGTN$, $IDMAX$, $IHMAX$, $IGMAX$ e IVM)

\ln = Logaritmo natural

β_1 , β_2 , β_3 y β_4 = Parámetros a ser estimados

En la Tabla 2, se muestran los sesenta modelos en sus correspondientes ecuaciones cuadráticas y logarítmicas (1 al 30 y 31 al 60, respectivamente), probadas para predecir el crecimiento de los bosques naturales del Ejido Pueblo Nuevo, Dgo. Se ajustaron mediante el programa estadístico SAS a través del Método de Cuadrados Mínimos Ordinarios (CMO) (Apéndice B).

Tabla 2. Modelos de crecimiento ($m^3 r ha^{-1}$ en 6 años).

$Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IG$	(1)
$Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IGN$	(2)
$Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IDC$	(3)
$Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IDCN$	(4)
$Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IGT$	(5)
$Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IGTN$	(6)
$Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IDMAX$	(7)
$Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IHMAX$	(8)
$Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IGMAX$	(9)
$Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IVM$	(10)
$Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IG$	(11)
$Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IGN$	(12)
$Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IDC$	(13)
$Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IDCN$	(14)
$Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IGT$	(15)
$Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IGTN$	(16)
$Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IDMAX$	(17)
$Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IHMAX$	(18)
$Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IGMAX$	(19)
$Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IVM$	(20)

$$Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IG \quad (21)$$

$$Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IGN \quad (22)$$

$$Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IDC \quad (23)$$

$$Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IDCN \quad (24)$$

$$Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IGT \quad (25)$$

$$Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IGTN \quad (26)$$

$$Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IDMAX \quad (27)$$

$$Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IHMAX \quad (28)$$

$$Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IGMAX \quad (29)$$

$$Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 \cdot IVM \quad (30)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IG \quad (31)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IGN \quad (32)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IDC \quad (33)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IDCN \quad (34)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IGT \quad (35)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IGTN \quad (36)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IDMAX \quad (37)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IHMAX \quad (38)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IGMAX \quad (39)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IVM \quad (40)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IG \quad (41)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IGN \quad (42)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IDC \quad (43)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IDCN \quad (44)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IGT \quad (45)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IGTN \quad (46)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IDMAX \quad (47)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IHMAX \quad (48)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IGMAX \quad (49)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IVM \quad (50)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IG \quad (51)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IGN \quad (52)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IDC \quad (53)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IDCN \quad (54)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IGT \quad (55)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IGTN \quad (56)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IDMAX \quad (57)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IHMAX \quad (58)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IGMAX \quad (59)$$

$$\ln Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \ln H + \beta_4 \cdot \ln IVM \quad (60)$$

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En la selección de los mejores modelos matemáticos, fueron considerados los estadísticos: cuadrado medio del error (CME), coeficiente de determinación (R^2), prueba de F y la prueba de hipótesis de los parámetros. Además, el nivel de exactitud de los parámetros y que no tuvieran problemas con el signo del estimador, de tal manera que sus valores reflejaran la dinámica natural de las variables independientes incluidas en el modelo. Los que presentaron mayor grado de ajuste y menor varianza fueron los modelos logarítmicos (Tablas 1 a 30 del Apéndice A), contrario a lo observado en los modelos con un ajuste ligeramente menor (Tablas 31 a 60 del Apéndice A).

En la Tabla 3, se presentan los estadísticos de regresión que demuestran el grados de ajuste y la varianza de los mejores 15 modelos obtenidos, los modelos logarítmicos presentan una variación significativa con respecto a los mejores modelos, ya que se nota en promedio un ajuste mayor ($R^2= 0.99$), explicando dichos modelos un 99% de la variación del crecimiento en volumen a nivel rodal para bosques naturales; al aplicar logaritmos a los datos

observados del crecimiento maderable; se generó una reducción implícita en la varianza y se mejoró el grado de ajuste. En relación a los 45 modelos restantes

Tabla 3. Estadísticos de regresión de los mejores 15 modelos de crecimiento.

Modelo	CME	Prob>F	R ²	CV
1. $Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot HT + \beta_4 \cdot IDC$	450.14	0.0001	0.9051	37.9
2. $Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot HT + \beta_4 \cdot IDMAX$	465.28	0.0001	0.9019	38.5
3. $Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot HT + \beta_4 \cdot IHMAX$	434.60	0.0001	0.9084	37.2
4. $Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot HT + \beta_4 \cdot IGN$	373.25	0.0001	0.9213	34.5
5. $Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot HT + \beta_4 \cdot IDCN$	354.09	0.0001	0.9254	33.6
6. $Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot HT + \beta_4 \cdot IGT$	374.68	0.0001	0.9210	34.5
7. $Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot HT + \beta_4 \cdot IGTN$	464.97	0.0001	0.9020	38.5
8. $\ln Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LHT + \beta_4 \cdot LIGN$	0.12696	0.0001	0.9917	9.48
9. $\ln Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LHT + \beta_4 \cdot LIDCN$	0.12869	0.0001	0.9916	9.54
10. $\ln Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LHT + \beta_4 \cdot LIGTN$	0.11651	0.0001	0.9924	9.08
11. $\ln Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LHT + \beta_4 \cdot LIGN$	0.08791	0.0001	0.9943	7.89
12. $\ln Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LHT + \beta_4 \cdot LIDCN$	0.08865	0.0001	0.9942	7.92
13. $\ln Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LHT + \beta_4 \cdot LIGTN$	0.07915	0.0001	0.9948	7.48
14. $\ln Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LHT + \beta_4 \cdot LIHMAX$	0.24062	0.0001	0.9843	13.05
15. $\ln Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LHT + \beta_4 \cdot LIGTN$	0.09900	0.0001	0.9935	8.37

no se hace referencia, ya que aún y cuando presentaron un coeficiente de determinación igual o similar a los modelos presentados, el nivel de significancia de las estimaciones de sus parámetros fue menor.

El R^2 y el CME indican cuáles fueron los mejores modelos para predecir el crecimiento en volumen. En cuanto a los índices de densidad considerados, se observa que el N , $G1$ y $V1$, pueden ser buenos predictores dentro de un modelo; mientras que los mejores índices de competencia resultaron ser el índice de área basal densidad (IGM), índice de área basal total densidad ($IGTM$) y el índice de diámetro densidad ($IDCM$), ya que los modelos logarítmicos números 11, 12 y 13 que consideraron esos índices, prueban su efectividad con los bajos valores en el CME y su alto grado de significancia con $\text{Prob}>F=0.0001$.

Los bajos valores de los modelos logarítmicos en el coeficiente de variación (CV), indican la alta efectividad de esos modelos con respecto a los modelos para describir los resultados esperados de la variable dependiente; lo anterior, se debe a que los modelos fueron ajustados con el mismo procedimientos de cuadrados mínimos, donde no provocó efecto significativo considerar la variable diámetro en su forma cuadrática.

Con respecto a los estimadores, en la Tabla 4 se presenta la estimación de cada parámetro: β_1 (ID), β_2 (t), β_3 (HT) y β_4 (IC), en términos de su nivel de

Tabla 4. Pruebas de hipótesis y grado de exactitud de los mejores 15 modelos de crecimiento.

Modelo	Estimador β_1	Estimador β_2	Estimador β_3	Estimador β_4	Prob> t
Modelo 1	0.04647000	-0.03849	9.22978	-28.90731	0.0001
Modelo 2	0.04783000	-0.03639	8.54538	-17.74497	0.0001
Modelo 3	0.04929000	-0.03654	8.75882	-22.40065	0.0001
Modelo 4	0.03091100	-0.04666	4.25691	0.02531	0.0001
Modelo 5	0.34435000	-0.04371	3.33757	0.03395	0.0001
Modelo 6	0.30990000	-0.04660	4.23592	1.12648	0.0001
Modelo 7	0.27112000	-0.05484	6.79995	0.00049	0.0001
Modelo 8	0.00072175	-0.02757	1.28760	0.18763	0.0001
Modelo 9	0.00073997	-0.02735	1.32929	0.17696	0.0001
Modelo 10	0.00054960	-0.02651	1.23438	0.15738	0.0001
Modelo 11	0.05668000	-0.03301	0.63002	0.37700	0.0001
Modelo 12	0.05846000	-0.03232	0.66503	0.37038	0.0001
Modelo 13	0.04475000	-0.03107	0.81092	0.24339	0.0001
Modelo 14	0.05002000	-0.06283	2.02026	1.56419	0.0001
Modelo 15	0.00494000	-0.03766	0.66845	0.30721	0.0001

significancia ($Prob > |t|$). Para este último estadístico, se observa que no existen diferencias significativas ya que todos los modelos seleccionados presentan un alto nivel de exactitud con $Prob > |t| = 0.0001$. Las estimaciones de los coeficientes de regresión de cada variable independiente de los modelos tiene un valor significativo, lo cual demuestra que contribuyen a estimar con precisión la variable dependiente, definida como el crecimiento en volumen para rodales que crecen de manera natural en bosques mezclados.

En las Figuras 2 y 3, se pueden observar las gráficas de dispersión de los valores observados y predichos con los modelos propuestos en el presente trabajo. En general los modelos presentan una ligera sobrestimación al inicio del crecimiento, la cual se equilibra posteriormente a lo largo de la curva. Algunos modelos presentan una mayor dispersión entre los volúmenes observados y predichos; sin embargo, esta situación se considera aceptable dentro de los parámetros estadísticos obtenidos en el análisis de varianza.

4.1 MODELIZACIÓN DEL CRECIMIENTO

La modelización del crecimiento, puede realizarse con el sistema de cómputo SAS®; a manera de ejemplo, en el Programa 3 del Apéndice B, se presenta el desarrollado para el modelo logarítmico número 15. Los altos ajustes de este modelo pueden apreciarse en la Tabla 5.

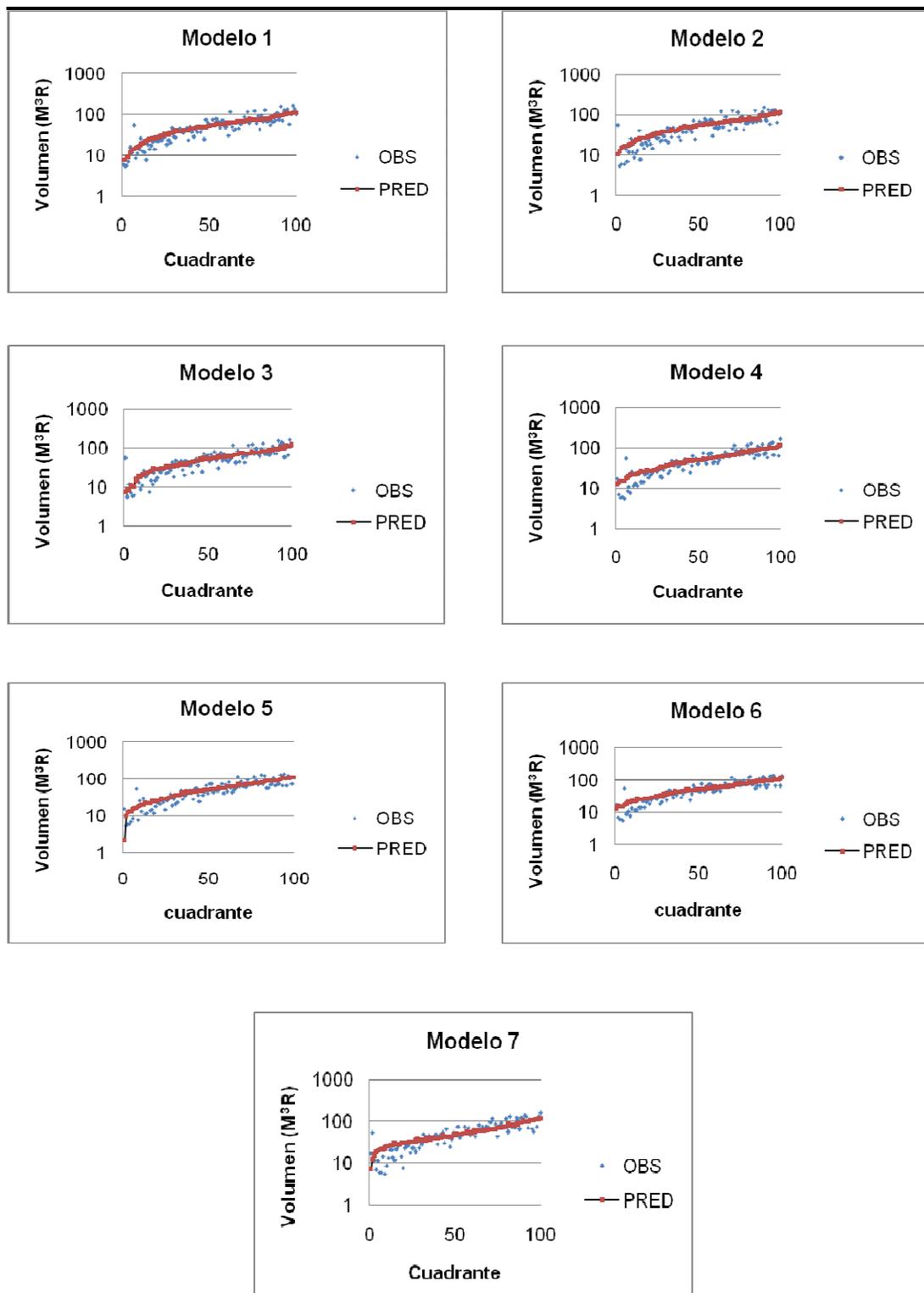


Figura 2. Gráficas de dispersión, modelos cuadráticos.

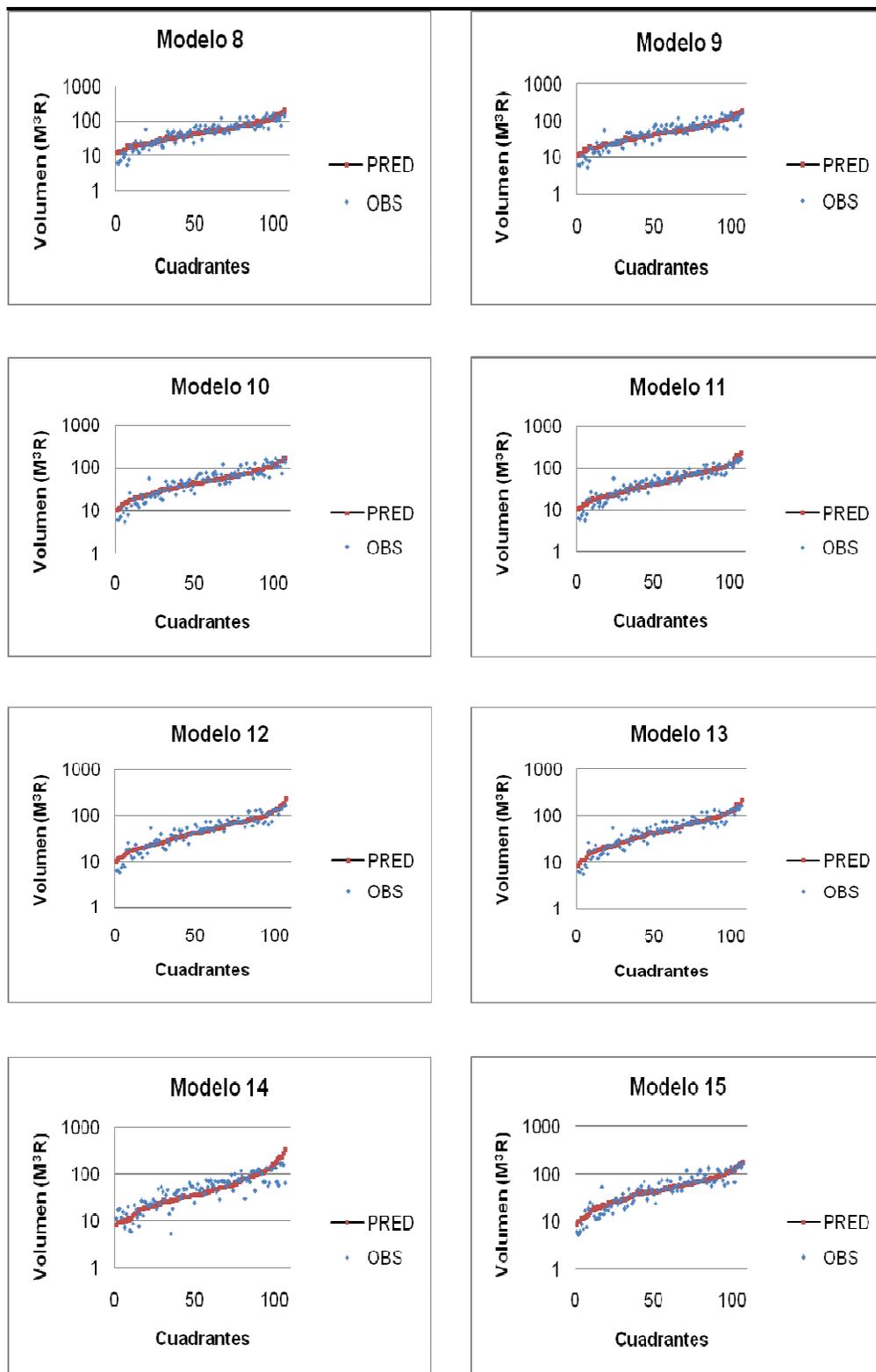


Figura 3. Gráficas de dispersión, modelos logarítmicos.

Tabla 5. Modelización del crecimiento modelo 15 logarítmico.

S	C	V1	t	H	IGTN	V2	INCVOL	INCVPRED
4	4	49.766	19.3	10.84	5065.75	92.682	42.916	41.790
7	4	30.500	13.6	5.45	23054.35	79.259	48.759	47.372
10	1	66.119	14.3	8.52	19587.22	134.997	68.878	70.544
12	1	13.203	14.4	5.73	2276.36	36.277	23.074	21.428
12	3	20.042	14.5	5.60	6024.82	49.105	29.063	29.323
15	3	72.807	13.4	6.98	106552.41	181.113	108.306	111.078
16	1	24.541	17.3	5.61	15484.01	59.431	34.890	36.101
16	3	18.610	15.3	4.92	17800.79	54.969	36.359	36.142
21	1	6.289	11.6	4.70	3688.89	28.193	21.904	23.379
25	2	48.048	14.7	5.97	62504.74	119.618	71.569	71.566
29	4	15.849	10.9	4.84	16245.82	58.251	42.402	40.466

Donde: *S* = Sitio. *C* = Cuadrante. *V1* = volumen del año 2001, m³r ha⁻¹. *t* = Edad promedio del cuadrante en años. *H* = Altura total promedio del cuadrante en metros. *IGTN* = Factor del índice de competencia. *V2* = volumen del año 2007, m³r ha⁻¹. *INCVOL* = Incremento en volumen en 6 años, m³r ha⁻¹. *INCVPRED* = Incremento en volumen predicho, m³r ha⁻¹.

Para modelizar el crecimiento en volumen, se tomaron como datos base los obtenidos en el año 2001 (*V1*, *t* y *H*), además del valor del índice de competencia *IGTN* obtenido con esos mismos datos; los valores de los estimadores (β 's), fueron tomados de la Tabla 4. El valor del *V2* (volumen por hectárea del año 2007), sirvió de referencia para calcular el incremento en volumen durante ese período de 6 años (*INCVOL*). En la columna marcada

como *INCVPRED*, se relacionan los volúmenes predichos por el modelo para los sitios y cuadrantes elegidos al azar. Siguiendo la anterior metodología se puede mostrar el funcionamiento del resto de los mejores modelos obtenidos en la presente investigación. En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos

Tabla 6. Modelización del crecimiento modelo 5 cuadrático.

S	C	V1	t	H	IDCN	V2	INCVOL	INCVPRED
1	2	94.354	16.9	7.35	1931.99	196.957	102.603	110.129
2	2	54.695	15.6	6.40	1145.67	118.518	63.822	68.453
5	3	38.570	31.7	6.81	702.11	55.897	17.327	15.923
7	2	65.114	15.2	6.65	1288.81	142.107	76.993	78.273
10	1	66.119	14.3	8.52	907.4	134.997	68.878	73.072
12	1	13.203	14.4	5.73	315.84	36.277	23.074	25.330
15	3	72.807	13.4	6.98	2132.67	181.113	108.306	112.923
17	1	8.693	12.8	5.58	219.43	31.624	22.931	21.905
20	3	28.052	15.4	6.06	988.54	77.407	49.356	53.080
24	4	50.214	13.5	5.70	1218.42	122.089	71.875	69.715
27	2	16.919	12.9	5.11	657.25	54.162	37.243	37.920

Donde: S = Sitio. C = Cuadrante. V1 = volumen del año 2001, $m^3r ha^{-1}$. t = Edad promedio del cuadrante en años. H = Altura total promedio del cuadrante en metros. IDCN = Factor del índice de competencia. V2 = volumen del año 2007, $m^3r ha^{-1}$. INCVOL = Incremento en volumen en 6 años, $m^3r ha^{-1}$. INCVPRED = Incremento en volumen predicho, $m^3r ha^{-1}$.

en la modelización del crecimiento maderable para un modelo cuadrático, realizado mediante el programa en SAS[®] para el modelo número 5 (Programa 4 del Apéndice B).

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN

El estudio del crecimiento forestal y su modelación puede realizarse mediante la cuantificación del volumen generado en un período de tiempo determinado, lo cual puede estimarse mediante tablas de volúmenes y diversas metodologías que involucran una serie de gráficos (Clutter *et al.* 1983; Cano, 1988; Davis y Johnson, 1987; Zepeda y Villarreal, 1987); sin embargo, los modelos de crecimiento como los obtenidos en el presente trabajo permiten modelizar la condición futura de un rodal para ayudar en la toma de decisiones con fines de manejo (Vanclay, 1995; Diéguez-Aranda *et al.*; 2006; Vargas *et al.*, 2008).

La efectividad de los modelos logarítmicos se corrobora con los valores en el CME y su alto grado de significancia con $Prob>F=0.0001$, mientras que los bajos valores en el coeficiente de variación (CV) indican muy poca variación de los modelos para describir los resultados esperados del crecimiento volumétrico, lo cual coincide con trabajos similares realizados por Martin y Ek (1984), Biging y Dobbertin (1992). Los valores del grupo de modelos logarítmicos, mantiene una variación significativa con respecto a los modelos

cuadráticos ya que presentan un grado de ajuste mayor ($R^2 = 0.99$); Lo anterior se confirma con lo señalado por Hokka *et al.* (1997), quienes indican que las mejores predicciones, por lo general se encuentran en los modelos de tipo logarítmico, ya que se reduce la varianza y mejora el grado de ajuste.

La mejor manera de comprobar la efectividad de un modelo de crecimiento es comparando los volúmenes observados y predichos, evaluando como se relacionan las variables involucradas a nivel rodal (Vanclay, 1955). Modelizar el crecimiento de la masa forestal en un bosque mezclado o natural es más complejo, debido principalmente a la variedad de especies presentes las cuales a menudo presentan tasas de crecimiento diferentes; sin embargo, considerando índices de competencia y de densidad a nivel rodal, se mejora significativamente el volumen de crecimiento predicho por los modelos (Gadow *et al.*, 2001; Perot *et al.*, 2010).

En la modelización del crecimiento mostrado para cada sitio (S) y cuadrante (C), se observa cierta diferencia en el incremento medio anual (IMA) en volumen para cada uno de ellos, ya que los sitios y cuadrantes usados en los mejores modelos logarítmicos presentan incrementos que van desde los 3.651 a 18.051 $m^3 r ha^{-1}$, mientras esos mismos valores van de 2.888 a 18.051 $m^3 r ha^{-1}$ en los mejores modelos cuadráticos; incrementos aceptables para bosques naturales con poblaciones jóvenes y calidad de sitio muy variable, lo cual a menudo refleja una dinámica de crecimiento mayor que disminuye conforme

aumenta la edad (Zepeda y Domínguez, 1998). En la modelización del incremento en volumen para el sitio 15, cuadrante 13, se puede apreciar la aceptable efectividad tanto del modelo cuadrático como del logarítmico empleado para proyectar el crecimiento en volumen, ya que la diferencia con respecto al volumen observado es de $4.617 \text{ m}^3 \text{r ha}^{-1}$ y $2.772 \text{ m}^3 \text{r ha}^{-1}$, respectivamente; en la literatura se reportan resultados similares a los obtenidos en la presente investigación (Nevárez, 1986; Aguirre, 1987; Chojnacky, 1987; Wenk, 1994; Valles e Islas, 2000).

Con respecto a los 15 mejores modelos encontrados, los niveles de exactitud observados son dependientes de los modelos y las variables independientes implícitas. En los resultados obtenidos se observa que los modelos que mayor contribuyen a modelar el crecimiento son los que contienen información de área basal; al respecto Biging y Dobbertin (1995) señalan que los modelos con índices independientes de la distancia mejoran al incluir variables con densidad puntual (rodal), mientras que Daniels *et al.* (1986) concluyeron que en general todos los índices de competencia se correlacionan significativamente con el crecimiento del área basal. Con respecto a la bondad de ajuste de las variables de área basal, es posible que se deba a que relacionan la competencia y la densidad tal y como se presenta en un bosque mezclado o natural.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que el incremento en volumen de un rodal, está determinado en gran medida por los niveles de densidad y los índices de competencia que explican el crecimiento de la masa forestal.

Con la validación de los modelos propuestos, se confirma la hipótesis de que el crecimiento de los bosques mezclados y su dinámica natural pueden ser modelados matemáticamente y que generan un conocimiento importante para predecir la productividad forestal; por lo tanto, las técnicas de manejo forestal que se aplican actualmente, pueden servir de base para incorporar modelos de simulación validados que permitan medir sus efectos y probar alternativas de manejo.

Contrario a lo señalado por algunos autores quienes aseguran que en relación con los índices dependientes de la distancia, los índices independientes de la distancia no son tan eficientes como los primeros para predecir el crecimiento

de los árboles (Álvarez *et al.*, 2004); los resultados obtenidos en la presente investigación, demuestran que también es posible modelar el crecimiento a nivel rodal con índices independientes de la distancia de una manera aceptable, lo cual concuerda con lo señalado por Daniels *et al.* (1986) y Biging y Dobbertin (1995).

Con los resultados obtenidos en la presente investigación, se avanza en el conocimiento para modelar el crecimiento en los bosques naturales; lo cual resulta de gran importancia porque son del tipo con los que se cuenta en el estado de Durango y en la mayor parte de las regiones forestales del país.

Lograr un mejor conocimiento de la dinámica de crecimiento de los ecosistemas forestales con bases científicas sólidas, permitirá en un futuro coadyuvar para manejar los bosques naturales de una manera realmente sustentable.

CAPÍTULO 7

LITERATURA CITADA

Álvarez T., M. F.; Márquez G., R.; Fernández M., A.; Castedo V., F. 2004.

Influencia de la competencia en el crecimiento en sección de *Pinus radiata* D. Don. en el Bierzo (León). Cuad. Soc. Esp. Cien. For. 188: 129-133.

Adler, D. 1979. A distance independent tree model for exotic conifer plantations in East Africa. For. Sci. Vol. 25 (1): 59-71.

Aguirre B., C. 1987. Stand average and diameter distribution growth and yield models for natural even-aged stands of *Pinus cooperi*. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA. 135 p.

Arney, J. D. 1973. Tables to quantifying competitive stress individual trees. Can. For. Serv. Pac. For. Res. Cent. Inf. Rep. BC-X-78.

Arteaga M., B. 1985. Evaluación de la productividad de sitios forestales. Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. México. 75 p.

Bella, L. E. 1971. A new competition model for individual trees. For. Sci. 17: 364-372.

Biging, G. S.; Dobbertin, M. 1992. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. For. Sci. 38(3): 695-720.

Biging, G. S.; Dobbertin, M. 1995. Evaluation of competition indices in individual tree growth models. For. Sci. 4(2): 360-377.

Cano C., J. 1998. El sistema de manejo regular en los bosques de México. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. México. 224 p.

Chojnacky, D. C. 1987. Modeling volume growth for Arizona's Pinyon-Juniper forests. *In*: IUFRO Forest Growth Modeling and Prediction Conference. Minneapolis, MN, USA. pp. 247-254.

Clutter, J. L.; Fortson, J. C.; Pienaar, L. V.; Brister, H. G., y Bailey, R. L. 1983. Timber management: a quantitative approach. New York, John Wiley and Sons. 333 p.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2009. Portal de geoinformación. Sitio de internet: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis>.

Curtis, R. O. 1970. Stand density measures: an interpretation. *For. Sci.* 16(4): 403-414.

Daniels, R. F. 1976. Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. *For. Sci.* 22:454-456.

Daniels, R. F.; H. E. Burkhart; T. R. Clason. 1986. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. *Can. J. For. Res.* 16:1230-1237.

Davis, L. S. y Johnson, K. N. 1987. *Forest Management*. Third Edition. McGraw-Hill Book Company. pp. 1-166.

Diéguez-Áranda, U.; Castedo, F.; Álvarez J., G.; Rojo, A. 2006. Dynamic growth model for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in Galicia (north-western Spain). *Ecological Modelling*, 191: 225-242.

Dunbar, A.; Dhubhain, A. I., y Bulfin, M. 2002. The productivity of *Douglas fir* in Ireland. *Forestry*. 75 (5): 537-545.

Ek, A. R.; Monserud, R. A. 1974. *Forest: A Computer model for simulating the growthland reproduction of mixed species forest stands*. Res. Rep. R2635, University of Wisconsin, College of Agriculture and Life Science. 90 p.

García A., E. 1973. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (adaptada para la República Mexicana). Instituto de Geografía. México, D.F. 246 p.

Gadow, K.V.; Real, P.; Álvarez, J. G. 2001. Modelización del crecimiento y la evolución de los bosques. IUFRO World Series vol. 12, Viena, 242 p.

Gerrard, D. I. 1969. Competition quotient: a new measure for the competition affecting individual forest trees. En: Michigan State University Agricultural Research Station, Research Bulletin 20: 1-32.

Glover, G. R.; Hool, J. N. 1979. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. For. Sci. 25. 275-282.

Hann, D. W., y C. H. Wang. 1990. Mortality equations for individual trees in the mixed-conifer zone of southwest Oregon. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis. Research Bulletin 67.17 p.

- Hegy, F. 1974. A simulation model for managing jack-pine stands. In: Fries, J. (Ed.): Growth models for tree and stand simulation. Royal College of Forest, Stockholm: 74-90.
- Hitch, K. L.; Shiver, B. D., y Borders, B. E. 1996. Mortality models for newly regenerated *Loblolly pine* plantations in the Georgia Piedmont. Warnell School of Forest Resources, University of Georgia. SJAF 20 (4): 197-202.
- Hokka H. V, A.; Penttila, T. 1997. Individual-trees basal area growth models for Scots Pine, Pubescent Birch and Norway Spruce on Drained Peatlands in Finland. *Silva Fennica*. 31(2):161-178.
- Khatri Chhetri, D. B., y Fowler G. W. 1996. Estimating diameter at breast height and basal diameter of trees from stump measurements in Nepal's lower temperate broad-leaved forests. *For. Ecol. Manage.* 81: 75-84.
- Knoebel, B. R; H. E. Burkhart; D. E. Beck. 1986. A growth and yield model for thinned stands of Yellow-poplar. Published by Society of American Foresters. Washington, D. C. EUA. 48 p.

Lynch, P. A., y Murphy, T. B. 1995. A compatible height prediction and projection system for individual trees in natural, even-aged Shortleaf Pine stands. *For. Sci.* 41 (1): 194-209.

Martin, G. L.; Ek, A. R. 1984. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. *For. Sci.* 30:731-743.

Meraz A., R. 2008. Modificación al Programa de Manejo Forestal para el Ejido Pueblo Nuevo, Dgo. Servicios Técnicos Forestales del Ejido Pueblo Nuevo, p. 6-32.

Miina, J. 1994. Spatial growth model for *Scots pine* on drained peatlands. *Silva Fennica* 28 (1): 15-27.

Murphy, P. A., y Graney, D. L. 1998. Individual-Tree Basal Area Growth, Survival, and Total Height Models for Upland Hardwoods in the Boston Mountains of Arkansas. *Southern Journal of Applied Forestry.* 22 (3): 184-192.

Munro D., D. 1974. Forest growth models: a prognosis, in Growth Models for Tree and Stand Simulation. Stockholm: Royal College of Forestry, (ed. J. Fries), Res. Note 30, Dept. Forest Yield. p. 7-21.

Nevárez Ch., J. D. 1986. SIMSIL. Un modelo para simular el efecto de determinadas políticas de manejo silvícola en la dinámica de crecimiento de rodales coetáneos de *Pinus douglasiana* Mtz. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx. 135 p.

Peng, C. 2000. Growth and yield models for unevenaged stands: past, present and future. For. Ecol. Manage. 132: 259–279.

Perot, T.; Goreaud, F.; Ginisty, Ch.; Dothe, J. 2010. A model bridging distance-dependent and distance-independent tree models to simulate the growth of mixed forests. Ann. For. Sci. 67, 502:1-11.

Quicke, H. E.; Meldahl, R. S., y Kush, J. S. 1997. A survival rate model for naturally regenerated Longleaf pine. School of forestry and Alabama

agricultural Experiment Station, Auburn University, AL. JAF 21(2): 97-101.

Ritchie, M. W., y Hann, D. W. 1985. Equations for Predicting basal area increment in *Douglas fir* and *Grand fir*. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, Research Bulletin 51. 9 p.

SAS INSTITUTE. 2009. SAS User's guide: Statistics. Ver. 9.1. SAS Institute Inc. Cary, N.C. USA. 1028 p.

Shifley, S. R., y Brand, G. J. 1984. Chapman–Richards growth function constrained for maximum tree size. For. Sci. Vol. 30 (4): 1066-1070.

Spurr, S. H. 1962. A measure of point density. For. Sci. 8(1): 85-96.

Staebler, G. R. 1951. Growth and spacing in an unevenaged stand of Douglas Fir. University Mich. M. F. thesis. 100 p.

Tomé, M.; Burkhardt, H. E. 1989. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *For. Sci.* 35(3): 816-831.

Torres-Rojo, J. M. 2000. El área de ocupación promedio: una medida de competencia independiente de la distancia. *Agrociencia* 34: 485-495.

Valles G., A. G.; González L., R. F.; Gallegos, I. A.; Torres-Rojo, J. M.; Návar CH., J. J.; Rocha F., M. 2003. Evaluación de índices de competencia independientes de la distancia con modelos de crecimiento en diámetro en *Pinus cooperi* Blanco. Resumen VI Congreso Mexicano de Recursos Forestales. SOMEREF. UASLP. P 53-55.

Valles G., A. G.; Islas G., F. 2000. Sistema de Ecuaciones del Simulador del Crecimiento Maderable para la Región de San Dimas, Dgo., "SICREMARS Versión 1.0". Publicación especial No. 14. Durango, Dgo. 55 p.

Valles G., A. G; Quiñones Ch., A. 2004. Manual para el establecimiento de sitios permanentes de investigación silvícola (SPIS) en bosques naturales. Folleto técnico No. 22. SAGARPA-INIFAP-CEVAG. 36 p.

- Valles G., A. G.; Torres-Rojo, J. M.; Velázquez M., A.; Rodríguez F., C. 1998. Relación de nueve índices de competencia con el crecimiento en diámetro de *Pinus cooperi* Blanco. *Agrociencia* 32(3): 255-260.
- Vanclay, J. K. 1991. Review of Competition Indices: What have we learned, where should we use them and what additional research is required?. Royal Veterinary and Agricultural University Thorvaldsensvej 57, DK-1871 Frederiksberg, Denmark. 19 p.
- Vanclay, J. K. 1995. Growth models for tropical forests: A synthesis of models and methods. *For. Sci.* 41(1):7-42.
- Vargas L., B.; Corral R., J.; Cruz C., F.; Aguirre C., O.; Nagel J. 2008. Uso y aplicación de los simuladores de crecimiento forestal en la toma de decisiones silviculturales. *Revista Forestal Latinoamericana*. 23(2):33-52.
- Wenk, G. 1994. A yield prediction model for pure and mixed stands. *For. Ecol. Manage.* 69: 259-268.

Zeide, B. 2005a. Optimal stand density: a solution. *Can. J. For. Res.* 34: 846–854.

Zeide, B. 2005b. How to measure stand density. *Trees.* 19: 1-14.

Zepeda B., E. M.; Villarreal D., M. E. 1987. Guía de densidad para *Pinus hartwegii Lindl.* de Zoquiapan, Méx. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo, Méx. 52 p.

Zepeda B., M; Domínguez, A. 1998. Niveles de incremento y rendimiento maderable de poblaciones naturales de *Pinus arizonica* Engl., en El Poleo, Chihuahua. *Madera y Bosques*, 4: 27-39.

CAPÍTULO 8

APÉNDICES

8.1 APÉNDICE A

Tabla 1. Análisis de varianza del modelo 1 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	436359	109090	214.86	0.0001
Error	103	52296	507.73035		
Total	107	488656			

Raíz del CME	22.53287	R ²	0.8930
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.8888
C.V.	40.25272		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr> t
N	1	0.04231	0.00470	9.00	0.0001
t	1	-0.03318	0.00736	-4.51	0.0001
H	1	8.00725	1.14219	7.01	0.0001
IG	1	-15.84024	5.86654	-2.70	0.0081

Tabla 2. Análisis de varianza del modelo 2 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	437718	109430	221.28	0.0001
Error	103	50938	494.53932		
Total	107	488656			

Raíz del CME	22.23824	R ²	0.8958
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.8917
C.V.	39.72639		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr> t
N	1	0.00937	0.00943	0.99	0.3229
t	1	-0.03008	0.00713	-4.22	0.0001
H	1	5.76032	0.78447	7.34	0.0001
IGN	1	0.02127	0.00665	3.20	0.0018

Tabla 3. Análisis de varianza del modelo 3 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	442291	110573	245.64	0.0001
Error	103	46365	450.14326		
Total	107	488656			

Raíz del CME	21.21658	R ²	0.9051
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.9014
C.V.	37.90129		

Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.04647	0.00449	10.35	0.0001
t	1	-0.03849	0.00708	-5.44	0.0001
H	1	9.22978	1.05460	8.75	0.0001
IDC	1	-28.90731	6.24885	-4.63	0.0001

Tabla 4. Análisis de varianza del modelo 4 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	442431	110608	246.46	0.0001
Error	103	46225	448.78582		
Total	107	488656			

Raíz del CME	21.18457	R ²	0.9054
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.9017
C.V.	37.84410		

Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	-0.16919	0.04425	-3.82	0.0002
t	1	-0.02913	0.00679	-4.29	0.0001
H	1	5.35551	0.75308	7.11	0.0001
IDCN	1	0.19148	0.04103	4.67	0.0001

Tabla 5. Análisis de varianza del modelo 5 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	437483	109371	220.14	0.0001
Error	103	51172	496.81951		
Total	107	488656			
Raíz del CME		22.28945	R ²	0.8953	
Media de Y		55.97851	R ² ajustada	0.8912	
C.V.		39.81786			
Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.00937	0.00963	0.97	0.3328
t	1	-0.03005	0.00715	-4.20	0.0001
H	1	5.75666	0.78629	7.32	0.0001
IGT	1	0.94396	0.30289	3.12	0.0024

Tabla 6. Análisis de varianza del modelo 6 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	435587	108897	211.35	0.0001
Error	103	53069	515.23298		
Total	107	488656			
Raíz del CME		22.69874	R ²	0.8914	
Media de Y		55.97851	R ² ajustada	0.8872	
C.V.		40.54903			
Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.02186	0.00744	2.94	0.0041
t	1	-0.03230	0.00738	-4.38	0.0001
H	1	6.51633	0.85629	7.61	0.0001
IGTN	1	0.00027819	0.00011668	2.38	0.0189

Tabla 7. Análisis de varianza del modelo 7 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	440731	110183	236.81	0.0001
Error	103	47925	465.28645		
Total	107	488656			

Raíz del CME	21.57050	R ²	0.9019
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.8981
C.V.	38.53353		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.04783	0.00484	9.88	0.0001
t	1	-0.03639	0.00711	-5.11	0.0001
H	1	8.54538	1.00782	8.48	0.0001
IDMAX	1	-17.74497	4.25999	-4.17	0.0001

Tabla 8. Análisis de varianza del modelo 8 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	443892	110973	255.34	0.0001
Error	103	44764	434.60266		
Total	107	488656			

Raíz del CME	20.84713	R ²	0.9084
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.9048
C.V.	37.24130		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.04929	0.00461	10.68	0.0001
t	1	-0.03654	0.00683	-5.35	0.0001
H	1	8.75882	0.93870	9.33	0.0001
IHMAX	1	-22.40065	4.40600	-5.08	0.0001

Tabla 9. Análisis de varianza del modelo 9 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	434184	108546	205.25	0.0001
Error	103	54472	528.85433		
Total	107	488656			
Raíz del CME		22.99683	R ²	0.8885	
Media de Y		55.97851	R ² ajustada	0.8842	
C.V.		41.08154			
Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.04035	0.00483	8.35	0.0001
t	1	-0.03045	0.00740	-4.12	0.0001
H	1	6.49706	0.91110	7.13	0.0001
IGMAX	1	-2.95000	1.73673	-1.70	0.0924

Tabla 10. Análisis de varianza del modelo 10 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	434669	108667	207.32	0.0001
Error	103	53987	524.14335		
Total	107	488656			
Raíz del CME		22.89418	R ²	0.8895	
Media de Y		55.97851	R ² ajustada	0.8852	
C.V.		40.89815			
Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.03810	0.00433	8.81	0.0001
T	1	-0.02840	0.00736	-3.86	0.0002
H	1	7.17954	1.07407	6.68	0.0001
IVM	1	-7.49188	3.82473	-1.96	0.0528

Tabla 11. Análisis de varianza del modelo 11 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	467681	116920	574.16	0.0001
Error	103	20975	203.63674		
Total	107	488656			

Raíz del CME	14.27013	R ²	0.9571
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.9554
C.V.	25.49216		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	4.98821	0.26451	18.86	0.0001
t	1	-0.03590	0.00449	-7.99	0.0001
H	1	0.77208	0.85634	0.90	0.3694
IG	1	7.40749	3.30259	2.24	0.0270

Tabla 12. Análisis de varianza del modelo 12 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	467320	116830	564.00	0.0001
Error	103	21336	207.14593		
Total	107	488656			

Raíz del CME	14.39257	R ²	0.9563
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.9546
C.V.	25.71087		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	4.52458	0.37541	12.05	0.0001
t	1	-0.03685	0.00450	-8.19	0.0001
H	1	2.14296	0.57618	3.72	0.0003
IGN	1	0.00474	0.00265	1.79	0.0765

Tabla 13. Análisis de varianza del modelo 13 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	467077	116769	557.37	0.0001
Error	103	21579	209.50193		
Total	107	488656			

Raíz del CME	14.47418	R²	0.9558
Media de Y	55.97851	R² ajustada	0.9541
C.V.	25.85667		

Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	5.01406	0.26853	18.67	0.0001
t	1	-0.03664	0.00478	-7.66	0.0001
H	1	1.26578	0.87990	1.44	0.1533
IDC	1	5.30008	3.74182	1.42	0.1597

Tabla 14. Análisis de varianza del modelo 14 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	466854	116714	551.41	0.0001
Error	103	21801	211.66241		
Total	107	488656			

Raíz del CME	14.54862	R²	0.9554
Media de Y	55.97851	R² ajustada	0.9537
C.V.	25.98965		

Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	4.72416	0.39046	12.10	0.0001
t	1	-0.03784	0.00473	-8.00	0.0001
H	1	2.12411	0.58736	3.62	0.0005
IDCN	1	0.00350	0.00362	0.97	0.3360

Tabla 15. Análisis de varianza del modelo 15 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	467256	116814	562.25	0.0001
Error	103	21400	207.76344		
Total	107	488656			

Raíz del CME	14.41400	R ²	0.9562
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.9545
C.V.	25.74917		

Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	4.54587	0.37678	12.07	0.0001
t	1	-0.03698	0.00451	-8.20	0.0001
H	1	2.14300	0.57715	3.71	0.0003
IGT	1	0.20139	0.11857	1.70	0.0924

Tabla 16. Análisis de varianza del modelo 16 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	466844	116711	551.13	0.0001
Error	103	21812	211.76805		
Total	107	488656			

Raíz del CME	14.55225	R ²	0.9554
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.9536
C.V.	25.99614		

Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	4.76354	0.36684	12.99	0.0001
t	1	-0.03903	0.00431	-9.05	0.0001
H	1	2.34056	0.59915	3.91	0.0002
IGTN	1	0.00005410	0.00005758	0.94	0.3497

Tabla 17. Análisis de varianza del modelo 17 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	466769	116692	549.17	0.0001
Error	103	21886	212.48911		
Total	107	488656			

Raíz del CME	14.57701	R ²	0.9552
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.9535
C.V.	26.04036		

Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	4.97822	0.27142	18.34	0.0001
t	1	-0.03839	0.00472	-8.13	0.0001
H	1	1.80042	0.80504	2.24	0.0275
IDMAX	1	1.74082	2.39089	0.73	0.4682

Tabla 18. Análisis de varianza del modelo 18 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	466763	116691	549.00	0.0001
Error	103	21893	212.55285		
Total	107	488656			

Raíz del CME	14.57919	R ²	0.9552
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.9535
C.V.	26.04426		

Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	4.99131	0.27034	18.46	0.0001
t	1	-0.03850	0.00468	-8.22	0.0001
H	1	1.81550	0.80213	2.26	0.0257
IHMAX	1	1.82488	2.58312	0.71	0.4815

Tabla 19. Análisis de varianza del modelo 19 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	466686	116671	546.98	0.0001
Error	103	21970	213.29944		
Total	107	488656			
Raíz del CME		14.60477	R ²	0.9550	
Media de Y		55.97851	R ² ajustada	0.9533	
C.V.		26.08996			
Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	4.97715	0.27604	18.03	0.0001
t	1	-0.03950	0.00439	-9.01	0.0001
H	1	2.08079	0.67334	3.09	0.0026
IGMAX	1	0.36708	0.99237	0.37	0.7122

Tabla 20. Análisis de varianza del modelo 20 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	467344	116836	564.67	0.0001
Error	103	21312	206.90973		
Total	107	488656			
Raíz del CME		14.38436	R ²	0.9564	
Media de Y		55.97851	R ² ajustada	0.9547	
C.V.		25.69621			
Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	5.05637	0.26857	18.83	0.0001
t	1	-0.03951	0.00415	-9.51	0.0001
H	1	1.15309	0.81456	1.42	0.1599
IVM	1	4.33158	2.37660	1.82	0.0713

Tabla 21. Análisis de varianza del modelo 21 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	429915	107479	188.46	0.0001
Error	103	58741	570.30207		
Total	107	488656			
Raíz del CME		23.88100	R ²	0.8798	
Media de Y		55.97851	R ² ajustada	0.8751	
C.V.		42.66101			
Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.58952	0.07563	7.79	0.0001
t	1	-0.06617	0.00740	-8.94	0.0001
H	1	0.40536	1.68778	0.24	0.8107
IG	1	35.05437	6.50220	5.39	0.0001

Tabla 22. Análisis de varianza del modelo 22 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	450210	112553	301.54	0.0001
Error	103	38445	373.25502		
Total	107	488656			
Raíz del CME		19.31981	R ²	0.9213	
Media de Y		55.97851	R ² ajustada	0.9183	
C.V.		34.51290			
Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.30911	0.05242	5.90	0.0001
t	1	-0.04666	0.00652	-7.16	0.0001
H	1	4.25691	0.70791	6.01	0.0001
IGN	1	0.02531	0.00255	9.94	0.0001

Tabla 23. Análisis de varianza del modelo 23 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	430253	107563	189.70	0.0001
Error	103	58403	567.01980		
Total	107	488656			

Raíz del CME	23.81218	R ²	0.8805
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.8758
C.V.	42.53807		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.67359	0.08428	7.99	0.0001
t	1	-0.06202	0.00761	-8.15	0.0001
H	1	-0.88674	1.88769	-0.47	0.6395
IDC	1	44.16737	8.08689	5.46	0.0001

Tabla 24. Análisis de varianza del modelo 24 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	452184	113046	319.25	0.0001
Error	103	36472	354.09339		
Total	107	488656			

Raíz del CME	18.81737	R ²	0.9254
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.9225
C.V.	33.61534		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.34435	0.05073	6.79	0.0001
t	1	-0.04371	0.00645	-6.78	0.0001
H	1	3.33757	0.74065	4.51	0.0001
IDCN	1	0.03395	0.00324	10.47	0.0001

Tabla 25. Análisis de varianza del modelo 25 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	450063	112516	300.30	0.0001
Error	103	38592	374.68163		
Total	107	488656			

Raíz del CME	19.35669	R ²	0.9210
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.9180
C.V.	34.57879		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.30990	0.05251	5.90	0.0001
t	1	-0.04660	0.00654	-7.13	0.0001
H	1	4.23592	0.71120	5.96	0.0001
IGT	1	1.12648	0.11378	9.90	0.0001

Tabla 26. Análisis de varianza del modelo 26 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	440763	110191	236.98	0.0001
Error	103	47892	464.97284		
Total	107	488656			

Raíz del CME	21.56323	R ²	0.9020
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.8982
C.V.	38.52055		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.27112	0.05958	4.55	0.0001
t	1	-0.05484	0.00705	-7.78	0.0001
H	1	6.79995	0.65897	10.32	0.0001
IGTN	1	0.00049458	0.00006440	7.68	0.0001

Tabla 27. Análisis de varianza del modelo 27 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	427813	106953	181.06	0.0001
Error	103	60843	590.70479		
Total	107	488656			
Raíz del CME		24.30442	R ²	0.8755	
Media de Y		55.97851	R ² ajustada	0.8707	
C.V.		43.41741			
Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.55731	0.07510	7.42	0.0001
t	1	-0.06292	0.00778	-8.09	0.0001
H	1	1.79699	1.56270	1.15	0.2528
IDMAX	1	22.55056	4.55561	4.95	0.0001

Tabla 28. Análisis de varianza del modelo 28 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	427610	106903	180.37	0.0001
Error	103	61045	592.67382		
Total	107	488656			
Raíz del CME		24.34489	R ²	0.8751	
Media de Y		55.97851	R ² ajustada	0.8702	
C.V.		43.48971			
Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.59842	0.07983	7.50	0.0001
t	1	-0.06501	0.00766	-8.49	0.0001
H	1	1.54998	1.61970	0.96	0.3408
IHMAX	1	25.77423	5.25245	4.91	0.0001

Tabla 29. Análisis de varianza del modelo 29 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	420796	105199	159.67	0.0001
Error	103	67860	658.83372		
Total	107	488656			

Raíz del CME	25.66776	R ²	0.8611
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.8557
C.V.	45.85287		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.41997	0.07039	5.97	0.0001
t	1	-0.06991	0.00793	-8.81	0.0001
H	1	5.86780	1.12128	5.23	0.0001
IGMAX	1	5.86200	1.74243	3.36	0.0011

Tabla 30. Análisis de varianza del modelo 30 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	416026	104007	147.50	0.0001
Error	103	72629	705.14034		
Total	107	488656			

Raíz del CME	26.55448	R ²	0.8514
Media de Y	55.97851	R ² ajustada	0.8456
C.V.	47.43691		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.43381	0.07763	5.59	0.0001
t	1	-0.07867	0.00801	-9.82	0.0001
H	1	6.32811	1.44850	4.37	0.0001
IVM	1	9.23395	4.73011	1.95	0.0536

Tabla 31. Análisis de varianza del modelo 31 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1561.59959	390.39990	2456.99	0.0001
Error	103	16.36606	0.15889		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.39861	R ²	0.9896
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9892
C.V.	10.61134		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.00102	0.00008434	12.09	0.0001
t	1	-0.03526	0.00662	-5.32	0.0001
LH	1	1.89608	0.08463	22.40	0.0001
LIG	1	-0.00752	0.25316	-0.03	0.9764

Tabla 32. Análisis de varianza del modelo 32 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1564.88882	391.22221	3081.47	0.0001
Error	103	13.07683	0.12696		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.35631	R ²	0.9917
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9914
C.V.	9.48527		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.00072175	0.00009541	7.56	0.0001
t	1	-0.02757	0.00598	-4.61	0.0001
LH	1	1.28760	0.14047	9.17	0.0001
LIGN	1	0.18763	0.03686	5.09	0.0001

Tabla 33. Análisis de varianza del modelo 33 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1561.60312	390.40078	2457.52	0.0001
Error	103	16.36253	0.15886		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.39857	R ²	0.9896
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9892
C.V.	10.61020		

Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.00102	0.00008434	12.09	0.0001
t	1	-0.03551	0.00662	-5.36	0.0001
LH	1	1.89192	0.08608	21.98	0.0001
LIDC	1	0.11881	0.78178	0.15	0.8795

Tabla 34. Análisis de varianza del modelo 34 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1564.71059	391.17765	3039.69	0.0001
Error	103	13.25506	0.12869		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.35873	R ²	0.9916
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9913
C.V.	9.54969		

Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.00073997	0.00009482	7.80	0.0001
t	1	-0.02735	0.00605	-4.52	0.0001
LH	1	1.32929	0.13713	9.69	0.0001
LIDCN	1	0.17696	0.03599	4.92	0.0001

Tabla 35. Análisis de varianza del modelo 35 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1568.88312	392.22078	4447.96	0.0001
Error	103	9.08254	0.08818		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.29695	R ²	0.9942
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9940
C.V.	7.90500		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.00001629	0.00012700	0.13	0.8982
t	1	-0.02874	0.00488	-5.89	0.0001
LH	1	1.15820	0.10188	11.37	0.0001
LIGT	1	0.71463	0.07863	9.09	0.0001

Tabla 36. Análisis de varianza del modelo 36 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1565.96544	391.49136	3360.24	0.0001
Error	103	12.00022	0.11651		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.34133	R ²	0.9924
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9921
C.V.	9.08642		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.00054960	0.00010538	5.22	0.0001
t	1	-0.02651	0.00573	-4.63	0.0001
LH	1	1.23438	0.12916	9.56	0.0001
LIGTN	1	0.15738	0.02571	6.12	0.0001

Tabla 37. Análisis de varianza del modelo 37 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1562.09756	390.52439	2534.90	0.0001
Error	103	15.86809	0.15406		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.39250	R ²	0.9899
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9896
C.V.	10.44866		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.00096043	0.00008929	10.76	0.0001
t	1	-0.03565	0.00638	-5.59	0.0001
LH	1	1.82328	0.09082	20.08	0.0001
LIDMAX	1	0.43202	0.24026	1.80	0.0751

Tabla 38. Análisis de varianza del modelo 38 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1562.17948	390.54487	2548.19	0.0001
Error	103	15.78618	0.15326		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.39149	R ²	0.9900
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9896
C.V.	10.42165		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.00095721	0.00008879	10.78	0.0001
t	1	-0.03638	0.00638	-5.70	0.0001
LH	1	1.83987	0.08613	21.36	0.0001
LIHMAX	1	0.54674	0.28104	1.95	0.0545

Tabla 39. Análisis de varianza del modelo 39 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1562.00689	390.50172	2520.35	0.0001
Error	103	15.95877	0.15494		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.39362	R ²	0.9899
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9895
C.V.	10.47847		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.00096708	0.00008932	10.83	0.0001
t	1	-0.03593	0.00641	-5.61	0.0001
LH	1	1.83116	0.09082	20.16	0.0001
LIGMAX	1	0.18661	0.11508	1.62	0.1079

Tabla 40. Análisis de varianza del modelo 40 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1561.67183	390.41796	2467.99	0.0001
Error	103	16.29382	0.15819		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.39773	R ²	0.9897
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9893
C.V.	10.58790		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
N	1	0.00102	0.00008430	12.05	0.0001
t	1	-0.03401	0.00673	-5.05	0.0001
LH	1	1.90731	0.08434	22.61	0.0001
LIVM	1	-0.10202	0.15083	-0.68	0.5003

Tabla 41. Análisis de varianza del modelo 41 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1548.35674	387.08918	1346.56	0.0001
Error	103	29.60892	0.28747		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.53616	R ²	0.9812
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9805
C.V.	14.27281		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	0.05518	0.00937	5.89	0.0001
t	1	-0.06193	0.00835	-7.41	0.0001
LH	1	2.31010	0.09618	24.02	0.0001
LIG	1	-0.52047	0.35340	-1.47	0.1439

Tabla 42. Análisis de varianza del modelo 42 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1568.91117	392.22779	4461.82	0.0001
Error	103	9.05448	0.08791		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.29649	R ²	0.9943
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9940
C.V.	7.89278		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	0.05668	0.00500	11.33	0.0001
t	1	-0.03301	0.00495	-6.67	0.0001
LH	1	0.63002	0.11947	5.27	0.0001
LIGN	1	0.37700	0.02429	15.52	0.0001

Tabla 43. Análisis de varianza del modelo 43 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1548.38987	387.09747	1348.10	0.0001
Error	103	29.57578	0.28714		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.53586	R ²	0.9813
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9805
C.V.	14.26482		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	0.05487	0.00929	5.90	0.0001
t	1	-0.06169	0.00837	-7.37	0.0001
LH	1	2.32054	0.09713	23.89	0.0001
LIDC	1	-1.63729	1.08270	-1.51	0.1335

Tabla 44. Análisis de varianza del modelo 44 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1568.83461	392.20865	4424.19	0.0001
Error	103	9.13105	0.08865		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.29774	R ²	0.9942
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9940
C.V.	7.92608		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	0.05846	0.00503	11.62	0.0001
t	1	-0.03232	0.00499	-6.48	0.0001
LH	1	0.66503	0.11811	5.63	0.0001
LIDCN	1	0.37038	0.02401	15.43	0.0001

Tabla 45. Análisis de varianza del modelo 45 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1569.98338	392.49585	5064.61	0.0001
Error	103	7.98227	0.07750		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.27838	R ²	0.9949
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9947
C.V.	7.41074		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	0.01908	0.00506	3.77	0.0003
t	1	-0.03203	0.00465	-6.89	0.0001
LH	1	1.15160	0.08366	13.77	0.0001
LIGT	1	0.66730	0.03938	16.94	0.0001

Tabla 46. Análisis de varianza del modelo 46 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1569.81304	392.45326	4958.25	0.0001
Error	103	8.15262	0.07915		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.28134	R ²	0.9948
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9946
C.V.	7.48940		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	0.04475	0.00475	9.42	0.0001
t	1	-0.03107	0.00472	-6.58	0.0001
LH	1	0.81092	0.10192	7.96	0.0001
LIGTN	1	0.24339	0.01457	16.70	0.0001

Tabla 47. Análisis de varianza del modelo 47 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1537.70450	384.42612	983.48	0.0001
Error	103	40.26116	0.39089		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.62521	R ²	0.9745
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9735
C.V.	16.64337		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	0.05620	0.01221	4.60	0.0001
t	1	0.45462	0.18217	2.50	0.0142
LH	1	0.74316	0.29946	2.48	0.0147
LIDMAX	1	1.14744	0.37009	3.10	0.0025

Tabla 48. Análisis de varianza del modelo 48 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1553.18139	388.29535	1613.70	0.0001
Error	103	24.78427	0.24062		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.49053	R ²	0.9843
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9837
C.V.	13.05829		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	0.05002	0.00826	6.05	0.0001
t	1	-0.06283	0.00747	-8.41	0.0001
LH	1	2.02026	0.10453	19.33	0.0001
LIHMAX	1	1.56419	0.32873	4.76	0.0001

Tabla 49. Análisis de varianza del modelo 49 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1550.58656	387.64664	1458.32	0.0001
Error	103	27.37909	0.26582		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.51557	R ²	0.9826
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9820
C.V.	13.72485		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	0.04488	0.00891	5.04	0.0001
t	1	-0.06239	0.00787	-7.93	0.0001
LH	1	2.07789	0.11294	18.40	0.0001
LIGMAX	1	0.47269	0.14428	3.28	0.0014

Tabla 50. Análisis de varianza del modelo 50 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1549.18502	387.29625	1386.05	0.0001
Error	103	28.78064	0.27942		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.52861	R ²	0.9818
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9811
C.V.	14.07176		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
G1	1	0.05565	0.00908	6.13	0.0001
t	1	-0.05844	0.00848	-6.89	0.0001
LH	1	2.31143	0.09449	24.46	0.0001
LIVM	1	-0.46555	0.20424	-2.28	0.0247

Tabla 51. Análisis de varianza del modelo 51 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1538.38356	384.59589	1000.79	0.0001
Error	103	39.58210	0.38429		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.61991	R ²	0.9749
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9739
C.V.	16.50242		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	-0.00006591	0.00133	-0.05	0.9605
t	1	-0.06299	0.01036	-6.08	0.0001
LH	1	2.59309	0.09666	26.83	0.0001
LIG	1	0.04415	0.41767	0.11	0.9160

Tabla 52. Análisis de varianza del modelo 52 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1564.82431	391.20608	3066.22	0.0001
Error	103	13.14135	0.12759		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.35719	R ²	0.9917
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9913
C.V.	9.50863		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.00636	0.00084651	7.51	0.0001
t	1	-0.04295	0.00611	-7.03	0.0001
LH	1	0.45122	0.15810	2.85	0.0052
LIGN	1	0.49329	0.03426	14.40	0.0001

Tabla 53. Análisis de varianza del modelo 53 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1538.38165	384.59541	1000.74	0.0001
Error	103	39.58400	0.38431		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.61993	R ²	0.9749
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9739
C.V.	16.50282		

Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.00001446	0.00132	0.01	0.9913
t	1	-0.06283	0.01037	-6.06	0.0001
LH	1	2.59917	0.09874	26.32	0.0001
LIDC	1	-0.10127	1.28352	-0.08	0.9373

Tabla 54. Análisis de varianza del modelo 54 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1564.55573	391.13893	3004.29	0.0001
Error	103	13.40993	0.13019		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.36082	R ²	0.9915
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9912
C.V.	9.60531		

Estimación de parámetros					
Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.00667	0.00086791	7.68	0.0001
t	1	-0.04259	0.00618	-6.89	0.0001
LH	1	0.48989	0.15787	3.10	0.0025
LIDCN	1	0.48939	0.03451	14.18	0.0001

Tabla 55. Análisis de varianza del modelo 55 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1569.47937	392.36984	4762.28	0.0001
Error	103	8.48628	0.08239		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.28704	R ²	0.9946
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9944
C.V.	7.64112		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.00158	0.00058543	2.69	0.0083
t	1	-0.03343	0.00502	-6.66	0.0001
LH	1	1.12108	0.08701	12.88	0.0001
LIGT	1	0.73775	0.03797	19.43	0.0001

Tabla 56. Análisis de varianza del modelo 56 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1567.76894	391.94223	3959.12	0.0001
Error	103	10.19672	0.09900		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.31464	R ²	0.9935
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9933
C.V.	8.37584		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.00494	0.00069762	7.09	0.0001
t	1	-0.03766	0.00544	-6.92	0.0001
LH	1	0.66845	0.12120	5.52	0.0001
LIGTN	1	0.30721	0.01783	17.23	0.0001

Tabla 57. Análisis de varianza del modelo 57 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1544.27335	386.06834	1180.24	0.0001
Error	103	33.69230	0.32711		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.57194	R ²	0.9786
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9778
C.V.	15.22522		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	-0.00004364	0.00115	-0.04	0.9699
t	1	-0.05883	0.00958	-6.14	0.0001
LH	1	2.23538	0.12000	18.63	0.0001
LIDMAX	1	1.38207	0.32559	4.24	0.0001

Tabla 58. Análisis de varianza del modelo 58 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1544.53946	386.13487	1189.84	0.0001
Error	103	33.42619	0.32453		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.56967	R ²	0.9788
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9780
C.V.	15.16497		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.00085651	0.00117	0.73	0.4650
t	1	-0.06401	0.00949	-6.74	0.0001
LH	1	2.29128	0.10961	20.90	0.0001
LIHMAX	1	1.68728	0.38727	4.36	0.0001

Tabla 59. Análisis de varianza del modelo 59 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1543.86432	385.96608	1165.78	0.0001
Error	103	34.10134	0.33108		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.57540	R ²	0.9784
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9775
C.V.	15.31736		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	-0.00030291	0.00116	-0.26	0.7952
t	1	-0.05924	0.00963	-6.15	0.0001
LH	1	2.25268	0.11993	18.78	0.0001
LIGMAX	1	0.63954	0.15712	4.07	0.0001

Tabla 60. Análisis de varianza del modelo 60 de crecimiento.

Fuente	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Pr > F
Modelo	4	1538.73444	384.68361	1009.97	0.0001
Error	103	39.23122	0.38089		
Total	107	1577.96566			

Raíz del CME	0.61716	R ²	0.9751
Media de Y	3.75650	R ² ajustada	0.9742
C.V.	16.42911		

Estimación de parámetros

Variable	GL	Estimador del Parámetro	Error Estándar	T para Ho parámetro=0	Pr > t
V1	1	0.00040218	0.00132	0.30	0.7613
t	1	-0.06110	0.01045	-5.85	0.0001
LH	1	2.61761	0.09400	27.85	0.0001
LIVM	1	-0.23899	0.24748	-0.97	0.3365

8. 2 APÉNDICE B

Programa 1. Programa en SAS® para el análisis de los modelos propuestos para predecir el crecimiento maderable.

```
DATA ARBOL;
```

```
INFILE 'C: MATRIZ PUEBLO NUEVO.SAS';
```

```
INPUT Obs S C N G1 V1 t H IG IGN IDC IDCN IGT IGTN IDMAX IHMAX  
IGMAX IVM V2 INCVOL;
```

```
T2=T*T;
```

```
RUN;
```

```
TITLE 'MODELOS CUADRATICOS DE INCREMENTO EN VOLUMEN N';
```

```
PROC REG;
```

```
MODEL INCVOL= N t2 H IG / NOINT;
```

```
RUN;
```

```
PROC REG;
```

```
MODEL INCVOL= N t2 H IGN / NOINT;
```

```
RUN;
```

```
PROC REG;
```

```
MODEL INCVOL= N t2 H IDC / NOINT;
```

```
RUN;
```

```
PROC REG;
```

```
MODEL INCVOL= N t2 H IDCN / NOINT;
```

```
RUN;
```

```
PROC REG;

MODEL INCVOL= N t2 H IGT / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL INCVOL= N t2 H IGTN / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL INCVOL= N t2 H IDMAX / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL INCVOL= N t2 H IHMAX / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL INCVOL= N t2 H IGMAX / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL INCVOL= N t2 H IVM / NOINT;

RUN;

TITLE 'MODELOS CUADRATICOS DE INCREMENTO EN VOLUMEN G1';

PROC REG;
```

```
MODEL INCVOL= G1 t2 H IG / NOINT;  
  
RUN;  
  
PROC REG;  
  
MODEL INCVOL= G1 t2 H IGN / NOINT;  
  
RUN;  
  
PROC REG;  
  
MODEL INCVOL= G1 t2 H IDC / NOINT;  
  
RUN;  
  
PROC REG;  
  
MODEL INCVOL= G1 t2 H IDCN / NOINT;  
  
RUN;  
  
PROC REG;  
  
MODEL INCVOL= G1 t2 H IDCN / NOINT;  
  
RUN;  
  
PROC REG;  
  
MODEL INCVOL= G1 t2 H IGT / NOINT;  
  
RUN;  
  
PROC REG;  
  
MODEL INCVOL= G1 t2 H IGTN / NOINT;  
  
RUN;  
  
PROC REG;  
  
MODEL INCVOL= G1 t2 H IDMAX / NOINT;  
  
RUN;  
  
PROC REG;
```

```
MODEL INCVOL= G1 t2 H IHMAX / NOINT;
```

```
RUN;
```

```
PROC REG;
```

```
MODEL INCVOL= G1 t2 H IGMAX / NOINT;
```

```
RUN;
```

```
PROC REG;
```

```
MODEL INCVOL= G1 t2 H IVM / NOINT;
```

```
RUN;
```

```
TITLE 'MODELOS CUADRATICOS DE INCREMENTO EN VOLUMEN V1';
```

```
PROC REG;
```

```
MODEL INCVOL= V1 t2 H IG / NOINT;
```

```
RUN;
```

```
PROC REG;
```

```
MODEL INCVOL= V1 t2 H IGN / NOINT;
```

```
RUN;
```

```
PROC REG;
```

```
MODEL INCVOL= V1 t2 H IDC / NOINT;
```

```
RUN;
```

```
PROC REG;
```

```
MODEL INCVOL= V1 t2 H IDCN / NOINT;
```

RUN;

PROC REG;

MODEL INCVOL= V1 t2 H IGT / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL INCVOL= V1 t2 H IGTN / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL INCVOL= V1 t2 H IDMAX / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL INCVOL= V1 t2 H IHMAX / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL INCVOL= V1 t2 H IGMAX / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL INCVOL= V1 t2 H IVM / NOINT;

RUN;

```
PROC PRINT;
```

```
VAR Obs S C N G1 V1 t H IG IGN IDC IDCN IGT IGTN IDMAX IHMAX IGMAX  
IVM V2 INCVOL;
```

```
RUN;
```

Programa 2. Programa en SAS para el análisis de los modelos logarítmicos propuestos para predecir el crecimiento maderable.

```
INFILE 'C: MATRIZ PUEBLO NUEVO.SAS';
```

```
INPUT Obs S C N G1 V1 t H IG IGN IDC IDCN IGT IGTN IDMAX IHMAX  
IGMAX IVM V2 INCVOL;
```

```
LH=LOG (H);
```

```
LIG=LOG (IG);
```

```
LIGN=LOG (IGN);
```

```
LIDC=LOG (IDC);
```

```
LIDCN=LOG (IDCN);
```

```
LIGT=LOG (IGT);
```

```
LIGTN=LOG (IGTN);
```

```
LIDMAX=LOG (IDMAX);
```

```
LIHMAX=LOG (IHMAX);
```

```
LIGMAX=LOG (IGMAX);
```

```
LIVM=LOG (IVM);
```

```
LINCV=LOG (INCVOL);
```

```
RUN;
```

```
TITLE 'MODELOS LOGARITMICOS DE INCREMENTO EN VOLUMEN N';
```

```
PROC REG;
```

MODEL LINC= N t LH LIG / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC= N t LH LIGN / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC= N t LH LIDC / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC= N t LH LIDCN / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC= N t LH LIGT / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC= N t LH LIGTN / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC= N t LH LIDMAX / NOINT;

RUN;

```
PROC REG;

MODEL LINCV= N t LH LIHMAX / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINCV= N t LH LIGMAX / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINCV= N t LH LIVM / NOINT;

RUN;

TITLE 'MODELOS LOGARITMICOS DE INCREMENTO EN VOLUMEN G1';

PROC REG;

MODEL LINCV= G1 t LH LIG / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINCV= G1 t LH LIGN / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINCV= G1 t LH LIDC / NOINT;

RUN;

PROC REG;
```

MODEL LINC= G1 t LH LIDCN / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC= G1 t LH LIGT / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC= G1 t LH LIGTN / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC= G1 t LH LIDMAX / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC= G1 t LH LIHMAX / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC= G1 t LH LIGMAX / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC= G1 t LH LIVM / NOINT;

RUN;

TITLE 'MODELOS LOGARITMICOS DE INCREMENTO EN VOLUMEN V1';

PROC REG;

MODEL LINC_V= V1 t LH LIG / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC_V= V1 t LH LIGN / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC_V= V1 t LH LIDC / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC_V= V1 t LH LIDCN / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC_V= V1 t LH LIGT / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC_V= V1 t LH LIGTN / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC_V= V1 t LH LIDMAX / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC_V = V1 t LH LIHMAX / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC_V = V1 t LH LIGMAX / NOINT;

RUN;

PROC REG;

MODEL LINC_V = V1 t LH LIVM / NOINT;

RUN;

PROC PRINT;

VAR Obs S C N G1 V1 t H IG IGN IDC IDCN IGT IGTN IDMAX IHMAX IGMAX
IVM V2 INCVOL;

RUN;

Programa 3. Programa en SAS[®] para la modelización del crecimiento con el modelo número 15 logarítmico.

```
TITLE 'SIMULADOR FORLIN';
```

```
OPTIONS NODATE NONUMBER LS=150 PS=100;
```

```
DATA ARBOL;
```

```
INFILE 'C: MATRIZ PUEBLO NUEVO.SAS';
```

```
INPUT Obs S C N G1 V1 t H IG IGN IDC IDCN IGT IGTN IDMAX IHMAX  
IGMAX IVM V2 INCVOL;
```

```
VOLTOTAL=(V1);
```

```
LH=LOG(H);
```

```
LIGTN=LOG(IGTN);
```

```
B1=0.00494;
```

```
B2=-0.03766;
```

```
B3=0.66845;
```

```
B4=0.30721;
```

```
LINCV= (V1*B1) + (t*B2) + (LH*B3) + (LIGTN*B4);
```

```
INCVPRED=(EXP(LINCV));
```

```
PROC PRINT;
```

```
VAR Obs S C N G1 V1 t H IG IGN IDC IDCN IGT IGTN IDMAX IHMAX IGMAX  
IVM V2 INCVOL;
```

```
RUN;
```

Programa 4. Programa en SAS[®] para la modelización del crecimiento con el modelo número 5.

```
TITLE 'SIMULADOR FORLIN';
```

```
OPTIONS NODATE NONUMBER LS=150 PS=100;
```

```
DATA ARBOL;
```

```
INFILE 'C: MATRIZ PUEBLO NUEVO.SAS';
```

```
INPUT Obs S C N G1 V1 t H IG IGN IDC IDCN IGT IGTN IDMAX IHMAX  
IGMAX IVM V2 INCVOL;
```

```
VOLTOTAL=(V1);
```

```
t2=t*t;
```

```
B1= 0.34435;
```

```
B2= -0.04371;
```

```
B3= 3.33757;
```

```
B4= 0.03395;
```

```
INCV= (V1*B1) + (t2*B2) + (H*B3) + (IDCN*B4);
```

```
INCVPRED=INCV;
```

```
PROC PRINT;
```

```
VAR Obs S C N G1 V1 t H IG IGN IDC IDCN IGT IGTN IDMAX IHMAX IGMAX  
IVM V2 INCVOL;
```

```
RUN;
```

CURRICULUM VITAE



Nacido en junio de 1966 en la Ciudad de Durango, Dgo., José Luis Reyes Muñoz, inicio sus estudios forestales de Bachillerato Técnico Forestal en el CBTF 4; posteriormente estudios de licenciatura y maestría en la Facultad de Ciencias Forestales de la

Universidad Juárez del Estado de Durango. En el año 2007 obtuvo una beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), para realizar estudios de Doctorado en Manejo de Recursos Naturales en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En el ámbito laboral se ha desempeñado en los servicios técnicos forestales en el Estado de Querétaro, además de diversas instancias de gobierno como el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA); habiendo sido reconocido con el premio a conductas sobresalientes en la administración pública federal durante los años 2003, 2004 y 2005. La evaluación en la aplicación de Programas de Manejo Forestal, ha sido la principal función realizada durante los últimos 17 años. El estudio del crecimiento forestal y la generación de nuevos modelos biométricos, son los temas desarrollados en materia de investigación forestal. A principios del año 2011, obtuvo satisfactoriamente el grado de Doctor en la Facultad de Ciencias Forestales en Linares, Nuevo León, México.