



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**MODELOS BIOMÉTRICOS FORESTALES EN HIDALGO, MÉXICO:
ESTADO DEL ARTE Y UNA PROPUESTA PARA VALIDAR MODELOS
DE VOLUMEN**

TESIS

que como requisito parcial para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS FORESTALES**

Presenta:

NEHEMÍAS VÁSQUEZ BAUTISTA

Chapingo, Estado de México. Agosto de 2015.



DIRECCION GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



La Tesis titulada: **Estado del arte de los modelos biométricos en el estado de Hidalgo y propuesta de método de validación de modelos de volumen** realizada por **Nehemías Vásquez Bautista** bajo la dirección del **Dr. Francisco José Zamudio Sánchez** y del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Director: _____


Dr. Francisco José Zamudio Sánchez

Asesor: _____


Dr. Arturo Antonio Alvarado Segura

Asesor: _____


Dr. José Luis Romo Lozano

*—Los traemos a una Casa para Débiles
Mentales y quien no lo acepta es nuestro
hombre. Es un método cruel, pero funciona. No
sirve decirle a alguien: «Puedes crear. Hazlo».
Es mucho más seguro esperar a que él mismo
diga: «Puedo crear, y lo haré aunque los demás
se opongan»...*

Profession. Isaac Asimov

*Acuérdate, pues, de tu Creador en los días de
tu juventud, antes que vengan los días malos, y
se acerquen los años en que digas:
No tengo en ellos placer.*

Eclesiastés 1,12

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, por la oportunidad de obtener un grado mediante el programa de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para efectuar los estudios durante los dos años del programa.

Al Dr. Francisco J. Zamudio Sánchez, por sus enseñanzas de vida.

Al Dr. Arturo A. Alvarado Segura, por su asesoría, amistad y confianza.

Al Dr. José Luis Romo Lozano, por la revisión de la presente tesis.

Al Dr. Dante A. Rodríguez Trejo y la Maestra Soledad Leura, por la revisión y asesoría en la construcción del *Abstract* para la tesis y los artículos.

A Saúl Viana Carrillo, por su apoyo en el diseño del programa de simulación.

A la comunidad de profesores y administrativos que conforman el programa de Maestría en Ciencias Forestales.

A Nancy Díaz Echavarría, Saira Y. Martínez Santiago y Miguel A. Cruz, por su apoyo durante la revisión de literatura.

A todos los compañeros de generación, gracias por el apoyo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Nehemías Vásquez Bautista (18 de abril de 1987) nació en Plan de San Luis, municipio de San Juan Guichicovi, Oaxaca. Realizó sus estudios de nivel básico en la misma localidad. Cursó la Preparatoria Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) (2001-2004). Estudió la Carrera de Ingeniero Agrónomo Especialista en Zonas Tropicales (CIAEZT) en el Centro Regional Universitario del Sureste (hoy Unidad Regional Universitaria Sureste) de la Universidad Autónoma Chapingo durante el periodo 2004-2008. Desde su egreso laboró en consultorías ejecutando proyectos de investigación y elaborando proyectos productivos, tanto para el sector forestal como el sector agrícola. En otoño de 2013 ingresó al programa de posgrado en Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	I
LISTA DE CUADROS	III
LISTA DE FIGURAS	IV
RESUMEN GENERAL	v
ABSTRACT	v
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. OBJETIVOS	4
1.2. REFERENCIAS	4
2. MODELOS BIOMÉTRICOS FORESTALES EN HIDALGO, MÉXICO: ESTADO DEL ARTE	7
2.1. RESUMEN	7
2.2. INTRODUCCIÓN	8
2.3. MÉTODO	11
2.4. RESULTADOS	13
2.4.1. INSTITUCIONES, FUENTES DE INFORMACIÓN Y ESPECIES ESTUDIADAS	13
2.4.2. ESTADO ACTUAL DE LOS MODELOS BIOMÉTRICOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	18
2.4.3. ANÁLISIS DE LAS REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	20
2.5. DISCUSIÓN	22
2.6. CONCLUSIONES	25
2.7. REFERENCIAS	26

3. MÉTODO DE VALIDACIÓN DE MODELOS DE VOLUMEN DE FUSTE TOTAL PARA ESPECIES FORESTALES	38
3.1. RESUMEN	38
3.2. INTRODUCCIÓN	39
3.3. METODOLOGÍA	41
3.3.1. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	43
3.3.2. ALGUNAS PRECISIONES CUANDO SE UTILIZA EL MÉTODO	45
3.3.3. EJEMPLIFICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO.	46
3.4. RESULTADOS	50
3.5. DISCUSIÓN	53
3.6. CONCLUSIONES	57
3.7. REFERENCIAS	58
4. DISCUSIÓN GENERAL	66
4.1. REFERENCIAS	68
5. CONCLUSIÓN GENERAL	71
6. ANEXO I	72

LISTA DE CUADROS

CUADRO 1. INSTITUCIONES CONSULTADAS Y TIPO DE CONSULTA REALIZADA.	11
CUADRO 2. FUENTES DE INFORMACIÓN Y TIPO DE CONSULTA.	12
CUADRO 3. TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN PARA EL MANEJO FORESTAL GENERADOS EN LA UMAFOR 1302 ZACUALTIPÁN-MOLANGO, HIDALGO, MÉXICO.	14
CUADRO 4. TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN PARA EL MANEJO FORESTAL GENERADOS EN LA UMAFOR 1303 PACHUCA-TULANCINGO, HIDALGO, MÉXICO.	15
CUADRO 5. CUADRO RESUMEN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA EL MANEJO FORESTAL GENERADO A ESCALA ESTATAL EN HIDALGO, MÉXICO.	16
CUADRO 6. MODELOS MÁS UTILIZADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE VARIABLES EN EL MANEJO FORESTAL.	19
CUADRO 7. ECUACIONES DE VOLUMEN AJUSTADAS EN LA UMAFOR 1302 (ZACUALTIPÁN - MOLANGO) VALIDADAS EN ESTE ESTUDIO.	47
CUADRO 8. MODELOS DE MEJOR AJUSTE (COLUMNA 4) RESPECTO AL MODELO EVALUADO (COLUMNA 3) EN LA COMPARACIÓN PAREADA DE LA ESTIMACIÓN DE VOLUMEN DE LOS NUEVE MODELOS.	51

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. TIPOS DE MODELOS BIOMÉTRICOS REPORTADOS E IMPORTANCIA DE LAS ESPECIES FORESTALES ESTUDIADAS.	17
FIGURA 2. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL MÉTODO DE VALIDACIÓN DE MODELOS DE VOLUMEN.	42
FIGURA 3. RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS NUEVE MODELOS DE VOLUMEN VALIDADOS.	52

MODELOS BIOMÉTRICOS FORESTALES EN HIDALGO, MÉXICO: ESTADO DEL ARTE Y UNA PROPUESTA PARA VALIDAR MODELOS DE VOLUMEN

Por Nehemías Vásquez-Bautista.

Tesis de Maestría dirigida por Dr. Francisco José Zamudio-Sánchez. Agosto de 2015.

RESUMEN

Los modelos biométricos forestales proveen información clave para el manejo forestal y permiten evaluar el estado del bosque previo a su aprovechamiento; se clasifican en modelos de índice de sitio, crecimiento, mortalidad, incorporación y de volumen. Para seleccionar el modelo a emplearse en campo, generalmente se usan criterios estadísticos. En este trabajo se presenta el estado del arte de los modelos biométricos forestales en Hidalgo y se propuso un método para validar modelos de volumen de fuste total. Se encontraron 32 documentos de investigación que contienen 289 modelos; el género más estudiado fue *Pinus* con el 86 % de las investigaciones. La mayor cantidad de modelos están enfocados al aprovechamiento forestal (244 modelos) y los modelos de crecimiento y de volumen fueron los más frecuentes. A partir de 2007, los estudios de biomasa y carbono se han incrementado. Por otro lado, el método propuesto, éste utiliza el volumen como criterio de validación para evaluar modelos previamente ajustados bajo los supuestos de la regresión. Se ejemplificó con nueve modelos ya ajustados, mostrando tres modelos robustos. El método permite validar la vigencia de un modelo y puede ser replicable si se cumplen los criterios de selección de los modelos a comparar.

Palabras clave: Aprovechamiento forestal, biomasa y carbono, ecuación ajustada de volumen, estimación de volumen forestal, modelos robustos, precisión.

FOREST BIOMETRIC MODELS IN HIDALGO, MEXICO: STATE OF ART AND A PROPOSAL TO VALIDATE VOLUME MODELS

ABSTRACT

The forest biometric models provide information for forest management. These allow to evaluate the state of the forest before exploitation and they are classified in index site, growth, mortality, incorporation and volume models. In order to select the optimal model to use in field, statistical criteria is needed. In this research, the state of art of forest biometric models in Hidalgo was shown and also a method for evaluating stem total volume models was proposed. There were thirty-two studies that contain 289 models; the genus *Pinus* is the most studied with 86 % of the researches. Most of the fitted models are focused to forest exploitation (244 models); the growth and volume models were the most frequent. Since 2007, the studies of biomass and carbon content have increased. On the other hand, the proposed method uses the volume like a validation criterion for evaluating previously fitted models under regression assumptions. Nine models were used to exemplify the method, and three robust models were found. The method allows to evaluate the validity of a model and could be replicable if the selection criteria is met.

KEYWORDS: Logging, biomass and carbon, Volume-fitted equation, forest volume estimation, robust models, precision.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La biometría forestal se refiere al uso de la modelación estadística y matemática que se aplica en la evaluación y análisis del estado de los recursos forestales y ofrece herramientas relevantes para el manejo forestal (Gregoire y Köhl, 2001; Salas, 2013). La información que proviene de los modelos resulta de gran importancia, sin embargo su aplicación se basa en las validaciones cuantitativas y cualitativas del comportamiento de los modelos (Vanclay y Skovsgaard, 1997).

Los modelos biométricos incluyen modelos de índice de sitio, competencia, crecimiento (diámetro y altura), mortalidad, incorporación, y volumen (Valles, 2007). La importancia que los modelos tienen, recae en que la evaluación del estado de bosque, previo a su aprovechamiento, la cual es requisito indispensable para la implementación de programas de manejo. Los modelos se construyen con base a relaciones existentes entre variables que pueden ser tomadas en campo, con los valores observados que se esperan estimar (Salas-Meza *et al.*, 2002).

Sin embargo, el comportamiento biológico de los árboles obedece a condiciones ambientales particulares, por ello, se recomienda la construcción de modelos a escala local y regional (Carrillo *et al.*, 2004; Corral *et al.*, 2007; Shao y Reynolds, 2006), lo que conlleva a la generación de una gran cantidad de modelos.

El desarrollo de los modelos biométricos, tiene su origen a partir de la primer tabla de volumen desarrollado por Henrich Cotta en 1804 (Spurr, 1952), quien reconoció que el volumen dependía de la altura y el coeficiente mórfico (Salas-Meza *et al.*, 2002; Spurr, 1952). En México, los primeros estudios sobre modelos biométricos se registran a partir de 1970, en el estado de Hidalgo, el primer trabajo está registrado en 1976, con la elaboración del inventario forestal estatal (Musalem, 1970; Pimentel, 1979; Secretaría de Agricultura y Ganadería [SAG], 1976).

En Hidalgo, la actividad forestal depende principalmente del aprovechamiento maderable de dos géneros: *Pinus* provee cerca del 70 % del volumen aprovechado, mientras que *Quercus*, aproximadamente el 10 % (Secretaría de Recursos Naturales [SEMARNAT], 2014). Por ello, los estudios relacionados al bosque en la entidad, están dirigidos en su mayoría al manejo y aprovechamiento forestal.

El primer objetivo de este trabajo fue revisar el estado del arte de los modelos biométricos forestales en el estado de Hidalgo (Capítulo 2). Se desarrolló mediante la recopilación, sistematización y análisis de los trabajos de investigación desarrollados y publicados en el área de estudio. Se encontró que los modelos más frecuentes en la literatura son los de crecimiento y de volumen. Sin embargo, la selección y confiabilidad de los modelos se basan, principalmente, en criterios estadísticos como el coeficiente de determinación (R^2) y el cuadrado medio del error (CME).

El segundo objetivo consistió en proponer un método de validación de modelos de volumen de fuste total, haciendo válidos los supuestos de la regresión (Capítulo 3). La validación consistió en evaluar las estimaciones de volumen que un conjunto de modelos competidores realiza respecto a los volúmenes reales. La validación se realizó mediante simulación, utilizando el cuadrado medio del error reportado en los modelos ajustados reportados como estimador de la varianza de la distribución de los diámetros.

En la validación de modelos, se utilizó el volumen como criterio de selección del modelo más robusto. El volumen es la medida más importante que se toma en cuenta en el manejo forestal (Köhl *et al.*, 2006; West, 2009) y es una variable de fácil manejo e interpretación por parte de los usuarios de los modelos, sin embargo, frecuentemente se emplean estadísticos como el coeficiente de determinación (R^2) y el cuadrado medio del error (CME) (Salas *et al.*, 2005) para la selección de mejor modelo a utilizar para su estimación en campo.

Cuando existan dos o más modelos que efectúen las mismas estimaciones, el usuario podrá elegir el más adecuado respecto a otros criterios como la parsimonia (Todd, 2010) o la compatibilidad dimensional del modelo (Sharma y Oderwald, 2001).

El presente trabajo de tesis se encuentra dividido en cinco capítulos. El Capítulo 1 es la presente introducción, que incluye un panorama general de los modelos biométricos y establece los objetivos de la tesis. El Capítulo 2, consiste en la descripción del estado actual de los modelos biométricos en Hidalgo, así

como el estado actual de la investigación forestal. En el Capítulo 3, se propone el método para validar modelos de volumen de fuste total y se ejemplifica con modelos ajustados en el área de estudio, como trabajos de investigación que han sido reportados. Finalmente, en los Capítulos 4 y 5, se presentan la discusión y conclusiones generales de la tesis.

1.1. OBJETIVOS

1. Presentar el estado del arte de los modelos biométricos en el estado de Hidalgo, México, para conocer los avances en el área del conocimiento y describir sus tendencias.
2. Proponer un método de validación para modelos de volumen de fuste total que permita la selección de un modelo a partir de un criterio de mayor facilidad de interpretación por parte de los usuarios.

1.2. REFERENCIAS

- Carrillo, A.F., Acosta M.M., Tenorio, G.G. & Becerra, L.F. 2004. Tabla de volumen para *Pinus patula* Sch. et Cham. en el Estado de Hidalgo. INIFAP. (Folleto técnico).
- Corral, J.J., Barrio, A.M., Aguirre, C.O.A. & Diéguez, A.U. 2007. Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volume for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). *Forestry* 80 (1): 29-40. doi: 10.1093/forestry/cpl048

- Gregoire, T.G., Köhl, M. 2001. Editorial: Statistical ecology and forest biometry. *Environmental and Ecological Statistics* 7: 213-216.
- Köhl, M., Magnussen, S.S. & Marchetti, M. 2006. *Sampling methods, remote sensing and GIS Multiresource forest inventory*. Springer-Verlag. New York, USA.
- Musalem, S.M.A. 1970. El uso de coeficientes mórficos en la elaboración de tablas de volúmenes de tres especies de pino del grupo ponderosa. Tesis. Escuela Nacional de Agricultura. Departamento de Bosques. Chapingo, México.
- Pimentel, B.L. 1979. Determinación del volumen óptimo en bosques de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. Tesis de grado. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Salas, C., Nieto, L. & Irisarri, A. 2005. Modelos de volumen para *Pinus pinaster* Ait. en la comarca del Baixo Miño, Galicia, España. *Quebracho* 12: 11-22. <http://fcf.unse.edu.ar/archivos/quebracho/q12-01-Pinus-pinaster.pdf>
- Salas, C., Real, P. 2013. *Biometría de los bosques naturales de Chile: estado del arte*. In: Silvicultura en los bosques nativos: avances en la investigación en Chile, Argentina y Nueva Zelanda. Donoso y Promis (Eds.). Editorial María Cuneo. Valdivia, Chile. 109-151 p.
- Salas-Meza, L.M., Terrazas-Domínguez, S., Vargas-Pérez, E. 2002. Programa de cómputo para la generación de tablas de volúmenes maderables. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 8(1): 57-70.
- Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). 1976. Inventario Forestal del Estado de Hidalgo. Publicación 39. Octubre de 1976. [Folleto]
- Secretaría de Recursos Naturales (SEMARNAT). 2014. Anuario estadístico de la producción forestal 2013. SEMARNAT. México, D.F. 213 pp.
- Shao, G. & Reynolds, K.M. (2006). Computer applications in sustainable forest management. Springer. Dordrecht, The Netherlands.
- Sharma, M & Oderwald, R.G. 2001. Dimensionally compatible volume and taper equations. *Canadian Journal Forest Research*. 31(5): 797-803. doi: 10.1139/cjfr-31-5-797

- Spurr, S.H. 1952. *Forest inventory*. Ronald Press. Ney York. USA. 442 pp.
- Todd, W.A. 2010. Uninformative parameters and model selection using Akaike's Information Criterion. *Journal of Wildlife Management*. 74(6):1175-1178.
doi: <http://dx.doi.org/10.2193/2009-367>
- Vanclay, J.K. & Skovsgaard, J.P. 1997. Evaluating forest growth models. *Ecological modeling*. 98:1-12.
- West, P.W. 2009. *Tree and Forest Measurement*. 2nd Edition. Springer. School of Environmental Science and Management. Lismore, Australia.

2. MODELOS BIOMÉTRICOS FORESTALES EN HIDALGO, MÉXICO: ESTADO DEL ARTE

Nehemías Vásquez-Bautista, Francisco J. Zamudio-Sánchez, Arturo A. Alvarado-Segura, José Luis Romo-Lozano

2.1. RESUMEN

El aprovechamiento de los bosques ha sido históricamente la principal razón que ha motivado la investigación forestal. Desde el año 2000, se ha incrementado la búsqueda de información sobre la captura y contenido de carbono, mediante modelos biométricos y tecnología de sensores remotos. El objetivo de este trabajo fue recopilar, sistematizar y analizar los documentos de difusión científica y tecnológica relacionados con los modelos biométricos usados para el manejo forestal en una región del centro de México (Hidalgo). Se encontraron 32 trabajos de investigación generados de 1976 a 2015, donde resalta el uso de modelos de crecimiento, volumen, biomasa, carbono, índice de sitio, densidad y mortalidad. Los modelos de crecimiento han sido los más estudiados, mientras que los estudios de los modelos de biomasa y carbono se han incrementado consistentemente desde 2007. El género *Pinus* ha sido el más estudiado, mientras que *Quercus* prácticamente no figura en los trabajos. Pese a su importancia económica, cinco especies forestales no cuentan con modelos ajustados. Todos los modelos reportados basan su confiabilidad en criterios estadísticos, pero no se reporta si han logrado satisfacer la demanda de los usuarios finales.

Palabras Clave: Volumen, aprovechamiento forestal, biomasa y carbono.

FOREST BIOMETRIC MODELS IN HIDALGO, MEXICO: STATE OF THE ART

ABSTRACT

Historically, logging has been the main reason for encouraging forest research. Since 2000, searching information about carbon capture and content has increased through the use of biometric models and remote sensing technology. The aim of this paper was to compile, to systematize, and to analyze scientific and technological reports related with biometric models that have been used in forest management in a Mexico's central region (Hidalgo State). Thirty-two research works were published from 1976 to 2015. These researches emphasize the use of models of growth, volume, biomass, carbon, site index, density, and mortality. The growth models have been more studied while the studies of biomass and carbon models have increased consistently since 2007. *Pinus* has been the most studied genus, while research on *Quercus* was practically not found. Five species do not have adjusted models, even though their economic importance. The reliability of all published models is based in statistical criteria, but it has not been reported if they have satisfied final user's demand.

Keywords: Volume, logging, biomass and carbon.

2.2. INTRODUCCIÓN

La biometría forestal hace referencia al uso de la modelación estadística y matemática aplicados en la evaluación y análisis de los recursos forestales (Gregoire y Köhl, 2001; Salas y Real, 2013). El cálculo de volumen, la estimación de biomasa y de contenido de carbono forman parte de la biometría forestal. La información generada a partir de los modelos resulta de gran importancia en el manejo forestal, sin embargo, su aplicación se basa en verificaciones y validaciones cuantitativas y cualitativas del comportamiento del modelo, lo que caracteriza su complejidad (Salas y Real, 2013; Vanclay y Skovsgaard, 1997).

Particularmente, en las ciencias forestales existen varios enfoques teóricos para explicar la variación de la forma del tronco, como: la nutricional, la de conducción de agua, la teoría mecánica y la teoría hormonal (Brack, 1998). Es probable que la forma del árbol sea consecuencia de la combinación de todas estas teorías, sin embargo su interpretación práctica es muy compleja, por lo que deberían emplearse procedimientos más sencillos para describirla (Diéguez *et al.*, 2003). Con los avances en las ciencias cuantitativas y computacionales, han surgido diferentes metodologías que tratan de describir la forma de los troncos.

El primer modelo biométrico fue propuesto por Cotta en 1804 (Spurr, 1952). Desde entonces han surgido diferentes modelos para las diversas condiciones existentes de clima, pendiente, exposición o tipos de suelo. Estos modelos se han ido adaptando con la adición de nuevos parámetros para describir y explicar los factores que influyen el comportamiento biológico de los árboles, lo que ha permitido desarrollar y validar modelos por especie, para

usos regionales y locales (Carrillo, Acosta, Tenorio & Becerra, 2004; Corral, Barrio, Aguirre & Diéguez, 2007; Shao & Reynolds, 2006).

El estado del arte en los modelos biométricos permite dimensionar el impacto que han tenido y la distribución de su uso; también describe cómo ha sido tratado el tema, el grado de avance de su conocimiento y cuáles son sus tendencias (Londoño, Maldonado & Calderón, 2014). Diversos autores han presentado el estado del arte de los modelos biométricos forestales en determinadas regiones alrededor del mundo y coinciden en el amplio uso de los modelos de crecimiento, la tendencia a la integración de simuladores a partir de modelos ya creados y el creciente interés hacia los modelos de biomasa y contenido de carbono, mediante el ajuste de ecuaciones alométricas (Cheng, Gamarra & Birigazzi, 2014; Fernández, 2005; Hong-gang, Jian-guo, Ai-oguo & Cai-yun, 2007; Porté & Bartelink, 2002; Vacchiano, Magnani & Collati, 2012). Otros autores han presentado el estado del arte de la modelación forestal a una escala más amplia (Landsberg, 2003; Mäkelä *et al.*, 2000; Peng, 2000). Estos trabajos resaltan que se deberían combinar los modelos basados en procesos con los modelos estáticos (volumen, altura-diámetro) y dinámicos (crecimiento), que se debe identificar las necesidades de los usuarios y continuar en la investigación sobre el comportamiento de los procesos de carbono, nutrientes y el consumo de éstos.

En México se tiene registro de modelos de estudios de crecimiento forestal desde la década de 1970 (De los Santos, 1976; Garzón y Flores, 1977; Musalem, 1970; Pimentel, 1979; Ramírez y Musalem, 1977). No obstante, es necesario actualizar, validar y calibrar los sistemas biométricos existentes, ya que de otro

modo podrían subestimarse o sobreestimarse volúmenes considerables de madera y conducir a programar intensidades de corta fuera del rango del potencial forestal real de un sitio (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2014).

Por otro lado, la importancia de la actividad forestal en el estado de Hidalgo radica en que es una actividad primaria que cubre aproximadamente el 37 % del total de su territorio, de la cual cerca del 57 % corresponde a bosques y el resto a selvas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2013). De dicha superficie arbolada se extrae, en promedio 123,592 m³ de madera en rollo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] 2010, 2011, 2012, 2013, 2014), que representa aproximadamente el 2 % nacional. El método de aprovechamiento que se ha utilizado en los últimos 30 años ha sido el “Método de Desarrollo Silvícola” (Aguirre, 2007; Santiago, 2009; Soriano, 2014), siendo los géneros más aprovechados, en orden de importancia: *Pinus*, *Quercus* y *Abies* (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2014).

En este contexto, el objetivo principal del presente capítulo fue recopilar, sistematizar, analizar y sintetizar los documentos de investigación, divulgación y todas las publicaciones relacionadas con los modelos biométricos empleados para el manejo forestal en Hidalgo, México. Con lo anterior, se pretende dar a conocer el estado actual de la investigación forestal y mostrar sus tendencias en el área de estudio.

2.3. MÉTODO

La construcción del estado del arte se realizó mediante una revisión en tesis, revistas, folletos e informes técnicos sobre aspectos relacionados a los sistemas biométricos para las especies forestales económicamente importantes en Hidalgo, México. Para ello, se efectuó la búsqueda de información en bibliotecas de instituciones educativas y de investigación relacionadas con la actividad forestal, por medio de visitas presenciales. Las consultas en las bibliotecas digitales como en las revistas científicas se hicieron en línea (Cuadro 1 y Cuadro 2).

Cuadro 1. Instituciones consultadas y tipo de consulta realizada.

Institución	Entidad	Tipo de Consulta
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)	Distrito Federal	Presencial / En línea
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)	Distrito Federal	Presencial
Universidad Autónoma Metropolitana (UAM)	Estado de México	Presencial / En línea
Universidad Autónoma Chapingo (UACH)	Estado de México	Presencial / En línea
Colegio de Posgraduados (ColPos)	Estado de México	Presencial / En línea
Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo	Estado de México	Presencial
Universidad Tecnológica de la Sierra Hidalguense	Hidalgo	Presencial
Universidad Tecnológica de Tulancingo	Hidalgo	Presencial

Cuadro 2. Fuentes de información y tipo de consulta.

Revista	Institución Responsable	Tipo de consulta
Revista Bosque	Universidad Austral de Chile	En línea
Interciencia	Asociación Interciencia, Venezuela	En línea
UNASYLVA	FAO	En línea
Revista Mexicana de Ciencias Forestales	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias	Presencial/En línea
Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente	Universidad Autónoma Chapingo	Presencial/En línea
Botanical Sciences	Sociedad Botánica de México	En línea
Madera y Bosques	Instituto de Ecología	En línea
Revista Fitotecnia Mexicana	Sociedad Mexicana de Fitogenética	En línea
Terra Latinoamericana	Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo	En línea
Agrociencia	Colegio de Postgraduados	Presencial/En línea

Se usó la técnica de “bola de nieve” donde los trabajos, mediante su bibliografía, sugirieran otros trabajos del mismo tema que han sido elaborados en el área de estudio. Una vez capturada la información obtenida, se clasificó en siete grupos de modelos de acuerdo a su finalidad de uso: ecuaciones de volumen y ahusamiento (modelos estáticos), de índice de sitio (indicador de productividad), de biomasa, estimación de carbono, de crecimiento (modelo dinámico), densidad y mortalidad (ambos describen al rodal).

Para conocer las fuentes de información con las que se sustentan los trabajos de investigación, se capturó la literatura citada de cada uno de los trabajos recopilados. La literatura citada se agrupó de acuerdo a la fuente de origen en: artículos, informes, libros y tesis. También fue clasificada de acuerdo al idioma en el que fueron publicadas.

2.4. RESULTADOS

2.4.1. Instituciones, fuentes de información y especies estudiadas

Instituciones y fuentes de información. Se encontraron 32 trabajos de investigación, mismos que se concentraron, principalmente, en dos de las cinco Unidades de Manejo Forestal (UMAFOR) del estado de Hidalgo: la UMAFOR 1302 (Zacualtipán-Molango) en la que se reportó el 52 % de los trabajos y la UMAFOR 1303 (Pachuca-Tulancingo) que alberga el 43 %. El inventario forestal es el único trabajo realizado a escala estatal (Secretaría de Agricultura y Ganadería [SAG], 1976).

La mayor cantidad de trabajos de investigación fueron publicados en los últimos 8 años, 27 en total (de 2007 a 2015). En 2013, se encontraron 7 investigaciones, siendo el año con mayor número de publicaciones.

Las instituciones que mayor información en forma de tesis han generado, son el Colegio de Posgraduados (ColPos) y la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), con seis y cuatro, respectivamente. En la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y la Universidad Agraria Autónoma Antonio Narro (UAAAN) se ha elaborado una tesis por institución para el área de estudio.

Cuadro 3. Trabajos de investigación para el manejo forestal generados en la UMAFOR 1302 Zacualtipán-Molango, Hidalgo, México.

Autor	Área de Influencia	Ecuaciones	Tipo de modelo	Muestra	Especie	Publicación
Brosovich, 1998	Zacualtipán de Ángeles	10	Densidad, IS, Volumen	52 (D)	<i>P. patula</i>	Tesis
Tenorio, 2003	Estatal	2	Volumen	101 (D)	<i>P. patula</i>	Tesis
Carrillo <i>et al.</i> , 2004	Estatal	1	Volumen	101 (D)	<i>P. patula</i>	Folleto
Cruz, 2007	Zacualtipán de Ángeles	13	Biomasa, Volumen	62 (D)	<i>P. patula</i> , <i>P. teocote</i> , <i>latifoliadas</i>	Tesis
Aguirre <i>et al.</i> , 2008	Zacualtipán de Ángeles	1	Carbono	75 (ND)*	<i>P. patula</i>	Artículo
Santiago, 2009	Zacualtipán de Ángeles	23	Crecimiento, Densidad, IS, Mortalidad, Volumen	84 (ND)	<i>P. patula</i>	Tesis
Cruz <i>et al.</i> , 2010	Zacualtipán de Ángeles	4	Volumen	114 (ND)*	<i>P. patula</i> , <i>P. teocote</i>	Artículo
Figueroa, 2010	Zacualtipán de Ángeles	9	Biomasa	18 (D)	<i>Alnus spp.</i> , <i>Clethra sp.</i> , <i>P. patula</i> , <i>Quercus spp.</i> , otras	Tesis
Olvera, 2010	Barranca de Metztitlán	4	Volumen	87 (D)	<i>P. greggii</i>	Tesis
Acosta <i>et al.</i> , 2011	Zacualtipán de Ángeles	4	Biomasa, Carbono	40 (D)	<i>Alnus acuminata</i> , <i>Clethra mexicana</i>	Artículo
Vásquez, 2011	Zacualtipán de Ángeles	5	Carbono	18 (D)	<i>P. patula</i>	Tesis
Hernández, 2012	Zacualtipán de Ángeles	12	Volumen	78 (D)	<i>P. patula</i>	Tesis
Muñoz <i>et al.</i> , 2012	Barranca de Metztitlán	4	Volumen	87 (D)	<i>P. greggii</i>	Artículo
Santiago, 2013	Zacualtipán de Ángeles	1	Volumen	42 (ND)*	<i>P. patula</i>	Tesis
Soriano <i>et al.</i> , 2013	Zacualtipán de Ángeles	3	Biomasa	25 (D)	Latifoliadas, <i>P. patula</i>	Capítulo
González, 2014	UMAFOR 1302 Zacualtipán - Molango	16	IS, Volumen	159 (D)	<i>P. patula</i> , <i>P. teocote</i>	Informe
Soriano, 2014	Zacualtipán de Ángeles	12	Biomasa, Volumen	71 (D)	<i>P. patula</i> , <i>L. macrophylla</i> , <i>Quercus spp.</i> , <i>Alnus Jorullensis</i> , <i>Cletra mexicana</i> , <i>Prunus serotina</i> , <i>Carpinus caroliniana</i> , <i>Virburum ciliatum</i>	Tesis

Nota: D: Destructivo; ND: No Destructivo; IS: Índice de Sitio; *Sitios de muestreo.

Cuadro 4. Trabajos de investigación para el manejo forestal generados en la UMAFOR 1303 Pachuca-Tulancingo, Hidalgo, México.

Autor	Área de Influencia	Ecuaciones	Tipo de modelo	Muestra	Especie	Publicación
Rodríguez, 2000	Acaxochitlán	8	Crecimiento	12 (D)	<i>P. patula</i>	Tesis
Pacheco <i>et al.</i> , 2007	Cuaunepantla, Acaxochitlán	2	Biomasa, Carbono	20 (D)	<i>P. greggii</i>	Artículo
Acosta y Carrillo, 2008	UMAFOR 1303, Pachuca-Tulancingo	2	Volumen	43 (D)	<i>P. montezumae</i>	Folleto
Rodríguez, 2009	Singuilucan, Zempoala, Tepeapulco y Cuauhtepic de Hinojosa	2	Densidad	122 (ND)	<i>P. montezumae</i>	Folleto
Hernández R.A., 2012	Sureste del Estado, Singuilucan	1	Crecimiento	36 (D)	<i>P. montezumae</i>	Tesis
Velarde, 2012	UMAFOR 1303 Pachuca - Tulancingo	106	Crecimiento, Volumen	185 (D)	<i>P. montezumae</i> , <i>P. patula</i>	Informe
González, 2013	Mineral del Monte	2	Biomasa, Volumen	4 (D)	<i>P. patula</i>	Tesis
Hernández, 2013	UMAFOR 1303, Pachuca-Tulancingo	2	Densidad	131 (ND)	<i>P. teocote</i>	Artículo
Razo <i>et al.</i> , 2013	Parque Nacional El Chico	2	Biomasa, Carbono	5 (ND)	<i>Abies religiosa</i>	Artículo
Rodríguez y Calva, 2013	Parque Nacional El Chico	2	Biomasa, Carbono	250 (ND)	<i>Abies religiosa</i>	Capítulo
Rodríguez, 2013	Sierra de Pachuca	12	Biomasa, Carbono, Crecimiento	250 (ND)	<i>Abies religiosa</i>	Tesis
Hernández <i>et al.</i> , 2014	Metztitlán	3	IS	25 (D)	<i>P. greggii</i>	Artículo
Velarde, 2014	UMAFOR 1303 Pachuca - Tulancingo	8	IS, Volumen	120 (D)	<i>P. rudis</i> , <i>P. teocote</i>	Informe
Hernández <i>et al.</i> , 2015	Acaxochitlán, Cuauhtepic de Hinojosa, Singuilucan y Tulancingo de Bravo	1	IS	345 (ND)	<i>P. teocote</i>	Artículo

Nota: D: Destructivo; ND: No Destructivo; IS: Índice de Sitio; *Sitios de muestreo.

Cuadro 5. Cuadro resumen del trabajo de investigación para el manejo forestal generado a escala estatal en Hidalgo, México.

Autor	Área de Influencia	Ecuaciones	Tipo de modelo	Muestra	Especie	Tipo de publicación
SAG, 1976	Estatal	12	Volumen	899 (D)	<i>Alnus sp.</i> , <i>Quercus sp.</i> , <i>Cedrela odorata</i> , <i>Inga spuria</i> , <i>Cupania dentata</i> , <i>Bursera simaruba</i> , <i>Juniperus flaccida</i> , <i>P. cembroides</i> , <i>P. patula</i> , <i>P. ayacahuite</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. greggii</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>Platanus sp.</i> , <i>Liquidámbar styraciflua</i> , <i>Psidium guajava</i> , <i>Dendropanax arborea</i>	Folleto

Nota: D: Destructivo; ND: No Destructivo; IS: Índice de Sitio; *Sitios de muestreo.

Especies estudiadas. Las especies más estudiadas son del género *Pinus*, cuya importancia con respecto al número de trabajos que la usaron como objeto de estudio son: *P. patula* (17), *P. teocote* (7), *P. greggii* (5), *P. montezumae* (5), *P. cembroides* (1), *P. ayacahuite* (1), *P. pseudostrobus* (1) y *P. rudis* (1). Otras especies como *Abies religiosa* (3), *Alnus sp.* (4), *Clethra sp.* (3), *Quercus sp.* (3), *Cedrela odorata* (1), *Inga spuria* (1), *Cupania dentata* (1), *Bursera simaruba* (1), *Juniperus flaccida* (1), *Platanus sp* (1), *Liquidámbar styraciflua* (1), *Psidium guajava* (1), *Dendropanax arborea* (1), *Prunus spp.* (1) y latifoliadas (2) y otras no especificadas (2) son menos frecuentes en la literatura estatal (Cuadros 3, 4 y 5; Figura 1).

2.4.2. Estado actual de los modelos biométricos en el área de estudio

Distribución de modelos por especie. En total se encontraron 289 modelos, los cuales se distribuyen entre los géneros *Pinus*, *Abies*, *Quercus* y otras latifoliadas. El género *Pinus* concentró el 86 % de las ecuaciones ajustadas (249) distribuidas en las siguientes especies: 148 en *P. patula*, 58 en *P. montezumae*, 23 en *P. teocote*, 13 en *P. greggii*, cuatro en *P. rudis* y una en *P. cembroides*. Por su parte, *Abies religiosa* concentró el 5 % (16) y el género *Quercus*, solo el 1 % (3). El 8 % restante de las ecuaciones (22) están distribuidas en 18 especies (Figura 1).

Clasificación de los modelos. Del total de modelos, los estudios de manejo forestal son los que han recibido mayor atención: 116 modelos de crecimiento, 82 de volumen, 23 de índice de sitio, 7 de densidad y 1 de mortalidad. A partir de 2007, los modelos de biomasa (44) y estimación de carbono (16) se han vuelto más frecuentes. El enfoque de los estudios muestra dos grupos principales, por un lado el aprovechamiento forestal y por otro los servicios ambientales (estimación de biomasa y carbono) (Figura 1).

A partir de 2007, se ha iniciado la incorporación del género *Pinus* a los estudios sobre servicios ambientales en el área de estudio. Bajo este enfoque, *Abies religiosa* y las latifoliadas son las especies más recurrentes. Durante el periodo que abarca la revisión, los modelos de volumen fueron los más reportados en los trabajos de investigación (ver nube de modelos en Figura 1).

El Inventario forestal del estado (Secretaría de Agricultura y Ganadería [SAG], 1976) generó ecuaciones de volumen para dos grupos de especies: para el grupo de *P. montezumae*, *P. patula* y *P. ayacahuite*, y para el grupo de *P.*

teocote, *P. greggii* y *P. pseudostrobus*. Dado que los modelos fueron ajustados para masas forestales mixtas, es probable que no efectúen buenas estimaciones para masas monoespecíficas.

Modelos más utilizados. El modelo con mayor frecuencia de uso fue el de Schumacher para el estudio de crecimiento e índice de sitio (Schumacher, 1939) y el de Schumacher para estimación de volumen (Schumacher & Hall, 1933), (Cuadro 6).

Cuadro 6. Modelos más utilizados en el manejo forestal en Hidalgo, México.

Tipo de modelo	Nombre	Modelo	Frecuencia
Biomasa	Biomasa total	$B = \beta_0 + \beta_1 * d^2 + h$	(1) 10
	Modelo de la Variable Combinada	$B = \exp(-\beta_0) * (d^2 * h)^{\beta_1}$	(2) 9
Carbono	Modelo alométrico	$C = \beta_0 * d^{\beta_1}$	(3) 6
Crecimiento	Schumacher	$d = \exp(\beta_0 + \beta_1 (1/E)^{\beta_2})$	(4) 24
	Chapman-Richards modificado	$h = \beta_0 * ((1 + \beta_1) * \exp(-\beta_2 (1/E)))^{\beta_3}$	(5) 18
Densidad	Reineke	$N = \beta_0 * Dc^{\beta_1}$	(6) 4
Índice de Sitio	Schumacher	$IS = \beta_0 * e^{(-\beta_1 (1/E))}$	(7) 9
	Chapman-Richards	$IS = \beta_0 (1 - e^{(-\beta_1 * E)})^{\beta_2}$	(8) 7
Mortalidad	Mortalidad	$N_2 = N_1 * e^{(\beta_1 * (E^2 - E^1))}$	(9) 1
Volumen	Schumacher	$V = \beta_0 * d^{\beta_1} * h^{\beta_2}$	(10) 16
	Schumacher lineal	$V = \exp[\beta_0 + \beta_1 * \log(d) + \beta_2 * \log(h)]$	(11) 12

Nomenclatura: B: Biomasa, C: carbono, d: diámetro normal, Dc: Diámetro de copa, E: edad, h: altura, IS: Índice de sitio, N: Número de árboles, V: volumen; β_0 , β_1 , β_2 , β_3 : parámetros de regresión.

Validación y selección del modelo. Para validar y seleccionar un modelo, los autores emplearon criterios como el coeficiente de determinación (R^2), raíz del cuadrado medio del error (RCME), coeficiente de variación, F calculada, número de parámetros de la ecuación, número de variables y desviación agregada. En trabajos recientes, se han incluido el criterio de parsimonia (criterio de información de Akaike [AIC], el criterio de información bayesiano [BIC] y el criterio de selección de Schwarz) (Velarde, 2014). Los criterios no estadísticos empleados son el ajuste gráfico y la facilidad de aplicación del modelo, sin embargo son criterios de segundo orden para la selección.

En muchos de los modelos ajustados en el área de estudio, no se reportaron los valores de R^2 , CME, rango de diámetro y rango de altura, información que facilita la verificación y posterior validación de los mismos.

Tamaños de muestra. Los tamaños de muestra que se usaron en el ajuste de los modelos, varían de acuerdo a la finalidad del estudio. Los trabajos dirigidos a modelos para aprovechamiento forestal (crecimiento, ahusamiento, volumen e índice de sitio) presentan tamaños de muestra más grandes y de tipo destructivo comparados con los modelos de estimación de biomasa, los cuales, emplean el muestreo no destructivo (Cuadros 3, 4 y 5). Los trabajos que emplearon percepción remota usaron el método no destructivo, un coeficiente de forma y un factor de contenido de carbono proveniente de la literatura.

2.4.3. Análisis de las referencias bibliográficas.

En los 32 trabajos revisados, se encontraron 1,547 referencias citadas; que correspondieron a 1,022 documentos. Esto significa que cerca del 34 % de las referencias se citó en dos o más trabajos.

El 19.2 % de proviene de las principales revistas forestales con factor de impacto del JCR (Journal Citation Report): Forest Ecology and Management (7.4 %), Forest Science (3.8 %), Agrocienca (2.7 %), Canadian Journal of Forest Research (2.7 %) y Madera y Bosques (2.6 %). De la UACH y el COLPOS, proviene cerca del 10.2 % (6.8 % y 3.4 %, respectivamente). Aproximadamente el 7.2 % de las referencias documentales proviene de libros de consulta. Otro 3.4 % provino de memorias de congresos o reuniones gremiales. El 60 % de la

información restante, de artículos publicados en revistas con menor impacto, folletos, informes técnicos, tesis en otras instituciones y de trabajos inéditos.

De acuerdo al idioma en que están escritos, 56.7 % son en español (580 referencias), 42.4 % en inglés (434 documentos), y menos del 1 % en alemán (5) y portugués (3).

Las diez citas más frecuentes dentro de los 32 trabajos revisados, ordenados de acuerdo a la frecuencia en que fueron referidos son: Clutter *et al.* (1983), en trece trabajos; Romahn de la Vega *et al.* (1994) en nueve; Spurr (1952) y Figueroa (2010) en ocho; Acosta *et al.* (2002), Aguirre (2007), Caballero (1972), Díaz *et al.*, (2007), Perry (1991) y Torres y Magaña (2001), siete trabajos cada uno.

Dentro de la literatura citada de los 32 documentos, aparecen otros trabajos publicados previamente en el estado de Hidalgo: Figueroa (2010) aparece en ocho documentos, Carrillo, Acosta, Tenorio y Becerra (2004) en seis, y Cruz (2007) en cinco. Los tres mencionados, están relacionados al cálculo de biomasa y volumen de coníferas. Por otro lado, los trabajos que más referencia hacen de publicaciones previas fueron: Soriano (2014), quien cita a 10 trabajos. González (2014) a ocho; Vásquez (2011) a cuatro; Cruz, Valdéz, Ángeles y De los Santos (2010) y Santiago (2009) a tres. Otros nueve solo citan dos trabajos; siete documentos solo a uno, y finalmente 11 trabajos no citan a ninguna publicación de las 32 revisadas.

2.5. DISCUSIÓN

La superficie forestal del estado de Hidalgo es de 403,685 Ha (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2013), en la que se aprovechan anualmente, en promedio 123,592 m³ de madera. *Pinus* y *Quercus* son los géneros que mayor volumen maderable aportan a la producción forestal de la entidad con el 70 % y el 23 %, respectivamente. A nivel nacional, el porcentaje coincide con *Pinus* con el 70 %, pero difiere en el caso de *Quercus* con el 10 % (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2010, 2011, 2012, 2013).

El género *Quercus* ha sido poco estudiado, no obstante su importancia económica en la actividad forestal. La dificultad que representa su identificación taxonómica, alta variabilidad morfológica (Bárcenas, 2011) y la capacidad de formar híbridos (Zúñiga *et al.*, 2009) son las probables razones que justifican esta situación. En cambio, las coníferas han sido más estudiadas, posiblemente debido a las características del fuste, que presentan formas más uniformes por lo que los estudios de estimación de volumen, pueden realizarse con mayor precisión. Otras especies de importancia económica que no han sido estudiadas son: *P. leiophylla*, *P. ayacahuite*, *P. lindleyi*, *A. xalapensis* y las especies del género *Quercus*, por lo que se sugiere ampliar la base de modelos para estas especies forestales.

En su mayoría, las investigaciones se han dirigido al aprovechamiento y manejo forestal, aunque desde 2007 se han incrementado los estudios sobre estimación de biomasa y contenido de carbono. Por esta razón, la mayor cantidad

de modelos correspondieron a modelos de crecimiento y de volumen, que emplean principalmente como variables de entrada el diámetro normal (d) y la altura total (h). Los modelos han sido ajustados empleando datos provenientes de sitios establecidos con fines silviculturales o en áreas bajo aprovechamiento. El criterio de ajuste predominante es el coeficiente de determinación R^2 y no se sigue un tamaño de muestra estándar en los estudios.

Las investigaciones han sido publicadas en revistas nacionales, y los autores corresponden a un grupo reducido de investigadores e instituciones, quienes constantemente se citaron como coautores. El ColPos y la UACH son las instituciones que mayor información han generado, quizás por la antigüedad de sus programas académicos, pues la UACH inició con la licenciatura en 1933 y con su programa de maestría en 1986, mientras que el ColPos creó el programa de Posgrado Forestal en 1976 (Caballero, 2004). Este escenario refleja que la información sólo se difunde de manera local y en idioma español; por lo que es importante que trabajos futuros sean publicados en revistas con un mayor espectro de difusión.

El camino a seguir en la investigación forestal en la entidad, consiste en la creación de simuladores de crecimiento (Santiago, 2013), que reúnan los modelos matemáticos ya creados en un programa que permita predecir y calcular diferentes escenarios de crecimiento (Salas y Real, 2013; Santiago, 2013), para la correcta toma de decisiones.

También se propone el uso de los sitios de medición del Inventario Nacional Forestal como parcelas permanentes de medición, para conocer el comportamiento de las masas forestales en un contexto de población natural.

Respecto a las publicaciones, se debe enfocar la investigación forestal a una comunidad científica más amplia, generando no solo descripciones de caso, sino información con principios generales que rijan y describan el comportamiento de las áreas bajo aprovechamiento forestal o en las zonas potenciales para servicios ambientales. También se debe buscar la vinculación entre grupos académicos a nivel nacional e internacional así como con actores representativos del gremio forestal (prestadores de servicios, técnicos, poseedores, tomador de decisión, representantes de gobierno).

2.6. CONCLUSIONES

Los modelos biométricos en Hidalgo, México han sido ajustados principalmente para el género *Pinus*. Por ello, se sugiere ampliar la base de modelos para otros géneros con importancia económica como *Abies*, *Quercus*, *Arbutus* y *Cupressus*. Se propone verificar, validar y actualizar los modelos biométricos existentes. Los modelos reportados basan su confiabilidad en el coeficiente de determinación (R^2) pero hacen falta trabajos con criterios de selección con significado biológico, económico o de manejo. En los trabajos revisados no se menciona si los modelos ajustados son vigentes, válidos en campo o si han logrado satisfacer la demanda de los usuarios. Los estudios están restringidos para uso local, con una proyección mínima en las revistas internacionales y realizado por un grupo pequeño de autores. En este contexto, se recomienda que la investigación forestal debe encaminarse a identificar principios generales que expliquen los factores subyacentes de las actividades forestales. Particularmente con los modelos de volumen, debe buscarse que sean útiles para los usuarios y que cumplan los criterios estadísticos. Es conveniente buscar modelos que disminuyan las pérdidas económicas como consecuencia de las subestimaciones o sobrestimaciones de volumen. Finalmente, se sugiere integrar un sistema estatal o regional de información forestal.

2.7. REFERENCIAS

- Acosta, M.M., Vargas, H.J., Velázquez, M.A. & Etchevers, B.J.D. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36 (6): 725–736. Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30236610>> ISSN 1405-3195
- Acosta, M.M. & Carrillo, A.F. 2008. Tabla de volumen total con y sin corteza para *Pinus montezumae* Lamb. en el estado de Hidalgo. INIFAP, Hidalgo. [Folleto técnico núm. 7]. Hidalgo.
- Acosta, M.M., Carrillo, A.F. & Gómez, V.R.G. 2011. Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2 (4): 529-543. En http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000400005&lng=es&tlng=es
- Aguirre, S.C.A. 2007. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula*: Estimación mediante percepción remota. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, México. En <http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/1172>
- Aguirre, S.C.A., Valdéz, L.J.R., Ángeles, P.G., De los Santos, P.H.M., Haapanen, R., & Aguirre, S.A.L. 2008. Mapeo de carbono arbóreo en bosques manejados de *Pinus patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43 (2): 209-220. En

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000200011&lng=es&tlng=es.

Bárcenas, P.G.M. 2011. Evaluación tecnológica de la madera de los encinos de la sierra de Álvarez, S.L.P. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Posgrado en Ciencias Ambientales. San Luis Potosí.

Brack, C.L. 1998. *Forest mensuration. Measuring trees, stands and forests for effective forest management*. Computer-based course resources for forest mensuration at the Australian National University. Available in <http://fennerschool-associated.anu.edu.au/mensuration/BrackandWood1998/MENSHOME.HTM>

Brosovich, G.M.M. 1998. Determinación del rendimiento para *Pinus patula* Sch. et Cham., en la región de Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, México.

Caballero, D.M. 1972. Tablas y Tarifas de volúmenes. Inventario Nacional Forestal. Chapingo. S. F. F. Nota INF. No. 7: 30 p.

Caballero D, M. 2004. Aplicaciones del internet en la actividad forestal, con especial referencia a México. *Madera y Bosques* 10 (1): 69–88. En [:<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61710105>](http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61710105)

Carrillo, A.F., Acosta, M.M., Tenorio, G.G. & Becerra, L.F. 2004. Tabla de volumen para *Pinus patula* Schl. et Cham. en el estado de Hidalgo. INIFAP, Hidalgo. [Folleto técnico núm. 2].

- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2014. Estrategia Nacional de Manejo Forestal Sustentable para el Incremento a la Producción y Productividad. CONAFOR, México. [Folleto].
- Corral, J.J., Barrio, A.M., Aguirre, C.O.A. & Diéguez, A.U. 2007. Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volume for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). *Forestry* 80 (1): 29-40. doi: 10.1093/forestry/cpl048
- Cheng, Z., Gamarra, J.G.P. & Birigazzi L. 2014. Inventory of allometric equations for estimation tree biomass—a database for China. UNREDD Programme, Roma, Italia. [Folleto].
- Clutter, J.L., Fortson, J.C., Pienaar, L.V., Brister, G.H. & Bailey R.L. 1983. *Timber management: A quantitative approach*. John Wiley & Sons, Inc. 333 p.
- Cruz, L.I.A., Valdéz, L.J.R., Ángeles, P.G. & De los Santos, P.H.M. 2010. Modelación espacial del área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *Pinus teocote* en el Ejido Atopixco, Hidalgo. *Madera y Bosques* 16 (3): 75-97. En http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712010000300006&lng=es&tlng=es.
- Cruz, M.Z. 2007. Sistema de ecuaciones para la estimación y partición de biomasa aérea en Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México.
- De los Santos, V.M. 1976. Tablas de volumen para montes de la Península de Yucatán. Tesis profesional. Escuela Nacional de Agricultura. Departamento de Bosques. Chapingo, México.

- Díaz, F.R., Acosta, M.M., Carrillo, A.F., Buendía, R.E., Flores, A.E. & Etchevers, B.J.D. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13 (1): 25-34. En http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186-32312011000200009&script=sci_arttext
- Diéguez, A.U., Barrio, A.M., Castedo, D.F., Ruíz, G.A.D., Álvarez, T.M.F., Álvarez, G.J.G., & Rojo, A.A. 2003. *Dendrometría*. Ediciones Mundi-prensa. Madrid, España. 310 pp.
- Fernández, Q.M.P. 2005. Estado del arte en modelación funcional-estructural de plantas. *Bosque* 26 (2): 71-79. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002005000200009>
- Figuroa, N.C.M. 2010. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en el Ejido la Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México. <http://www.biblio.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/95>
- Garzón, R.G.J.C. & Flores, R.L.J. 1977. Tabla normal de producción para *Pinus hartwegii* Lind. en la estación experimental Zoquiapan, México. *Chapingo* 3: 3-13.
- González, A.J. 2014. Estudio de crecimiento para *Pinus Patula* y *Pinus Teocote* en la región forestal 1302 Zacualtipán-Molango. (Informe técnico). Hidalgo.
- González, M.E. 2013. Manejo forestal y servicios ambientales en Mineral del Monte, estado de Hidalgo. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México, Distrito Federal. En <http://132.248.9.195/ptd2013/junio/0696380/0696380.pdf>

- Gregoire, T.G. & Köhl, M. 2001. Editorial: Statistical ecology and forest biometry. *Environmental and Ecological Statistics* 7: 213-216. doi: 10.1023/A:1009687231250
- Hernández, P.D. 2012. Modelos de volumen comercial variable para *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México. En <http://www.biblio.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/682>
- Hernández, R.A. 2012. Determinación de turno e índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb., en el sureste del estado de Hidalgo. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. En <http://uaaan.dspace.escire.net/handle/123456789/1024>
- Hernández, R.J., García, M.J.J., Muñoz, F.H.J., Sáenz, R.T., Flores, L.C., & Hernández, R.A. 2013. Guía de densidad para manejo de bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. et Cham. en Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5 (16): 63-76. En <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/Forestales/articloe/view/3037/2512#>
- Hernández, R.J., García, M.J.J., Olvera, D.E.H., Velarde, R.J.C., García, C.X., & Muñoz, F.H.J. 2014. Índice de sitio para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. en Metztlán, Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 20 (2): 167-176. Doi: dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.04.016

- Hernández, R.J., García, M.J.J., García, C.X., Hernández, R.A., Muñoz, F.H.J., & Samperio, J.M. 2015. Índice de sitio para bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. en el oriente del estado de Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 6 (27): 24-36. En http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322015000100003&lng=es&tlng=es.
- Hong-gang, S., Jian-guo, Z., Ai-oguo, D. & Cai-yun, H. 2007. A review of stand basal area growth models. *Forestry Studies in China* 9 (1): 85-94. Doi: 10.1007/s11632-007-0014-2
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013. *Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2013*. México, D.F.
- Landsberg, J. 2003. Modelling forest ecosystems: state of the art, challenges, and future directions. *Canadian Journal Forest Research* 33: 385-397. Doi: 10.1139/X02-129
- Londoño, P.O.L., Maldonado, G.L.F., & Calderón, V.L.C. 2014. Guía para construir estados del arte. International Corporation of Network of knowledge. Bogotá, Colombia. 35 p.
- Mäkelä, A., Landsberg J., Ek, A.R., Burk, T.E., Ter-Mikaelian, M., Agren, G.I., Oliver, Ch.D., & Puttonen P. 2000. Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation. *Tree Physiology* 20: 289-298.
- Muñoz, F.H.J., Velarde, R.J.C., García, M.J.J., Sáenz, R.J.T., Olvera, D.E.H. & Hernández, R.J. 2012. Predicción de volúmenes de fuste total para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Mexicana de Ciencias*

Forestales 3 (14): 11-22. En

<http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/Forestales/articulo/view/2504/2101#>

Musalem, S.M.A. 1970. El uso de coeficientes m3rficos en la elaboraci3n de tablas de vol3menes de tres especies de pino del grupo ponderosa. Tesis. Escuela Nacional de Agricultura. Departamento de Bosques. Chapingo, M3xico.

Olvera, D.E.H. 2010. Comparaci3n de cuatro modelos matem3ticos para la elaboraci3n de tablas de volumen para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm en el municipio de Metztl3n, Hidalgo. Tesis de licenciatura. Universidad Michoacanan de San Nicol3s de Hidalgo. Morelia, Michoac3n. <http://www.remeri.org.mx/portal/REMERI.jsp?id=oai:bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:123456789/5174>

Pacheco, E.F.C., Aldrete, A., C3mez, G.A., Fierros, G.A.M., Cetina, A.V.M. & Vaquera, H.H. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa a3rea de una plantaci3n joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30 (3): 251-254.

Peng, Ch. 2000. Understanding the role of forest simulation models in sustainable forest management. *Environmental Impact Assessment Review*. 20: 481-501. Doi: 10.1016/S0195-9255(99)00044-X

Perry, J. P. 1991. *The pines of Mexico and Central America*. Timber Press. Portland, Oregon. 231 pp.

- Pimentel, B.L. 1979. Determinación del volumen óptimo en bosques de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. Tesis de grado. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Porté, A. & Bartelink, H.H. 2002. Modelling mixed forest growth. A review of models for forest management. *Ecological Modelling*. 150: 141-188. Doi: 10.1016/S0304-3800(01)00476-8
- Ramírez, M.H. & Musálem, S.M.A. 1977. Estudio dasométrico de una plantación forestal en Chapingo. *Chapingo*. Núm. (7-8): 3-13.
- Razo, Z.R., Gordillo, M.A.J., Rodríguez, L.R., Maycotte, M.C.C. & Acevedo, S.O. 2013. Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego en el Parque nacional "El Chico", Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 19 (2): 73-86. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4502296>
- Rodríguez, L.R., Razo, Z.R., Díaz, H.D. & Meza, R.J. 2009. Guía de densidad para *Pinus montezumae* en su área de distribución natural en el Estado de Hidalgo. Fundación Produce Hidalgo. [Folleto].
- Rodríguez, S.D.F. 2000. Evaluación dasométrica de una plantación forestal en la presa de El Tejocotal en el estado de hidalgo. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado de México.
- Rodríguez, S.V.M. 2013. Estimación dasométrica de carbono almacenado en un bosque de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. del paraje El Cedral del Parque Nacional "El Chico", Hidalgo. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México, Distrito Federal.

- Rodríguez, S.V.M. & Calva, V.G. 2013. Estimación del carbono contenido en el bosque de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. en el Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo. *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México* (pp. 7-13). Programa Mexicano del Carbono. México.
- Romahn de la Vega, C.F., Ramírez, M.H. y Treviño, J.L. 1994. *Dendrometría*. Universidad Autónoma Chapingo. 353 p.
- Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). 1976. Inventario Forestal del Estado de Hidalgo. Publicación 39. Octubre de 1976. [Folleto].
- Salas, C. & Real, P. 2013. *Biometría de los bosques naturales de Chile: estado del arte*. In: *Silvicultura en los bosques nativos: avances en la investigación en Chile, Argentina y Nueva Zelanda*. Donoso y Promis (Eds.). Editorial María Cuneo. Valdivia, Chile. 109-151 p.
<https://sites.google.com/site/alvaropromis/Home/libro-silvicultura-bosques-nativos>
- Santiago, G.W. 2009. Sistema de crecimiento y rendimiento para *Pinus patula* de Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México.
<http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/1235>
- Santiago, G.W. 2013. Simulador de crecimiento para manejo de rodales coetáneos de *Pinus patula*. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México.
<http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/2060>

- Schumacher, F.X. & Hall F.S. 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*. 47(9): 719-773.
- Schumacher F.X. 1939. A new growth curve and its applications to timber yield studies. *Journal of Forestry*. 37:819-820.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2010. *Anuario estadístico de la producción forestal 2009*. Primera edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Tlalpan, México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2011. *Anuario estadístico de la producción forestal 2010*. Primera edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Tlalpan, México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2012. *Anuario estadístico de la producción forestal 2011*. Primera edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Tlalpan, México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2013. *Anuario estadístico de la producción forestal 2012*. Primera edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Tlalpan, México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2014. *Anuario estadístico de la producción forestal 2013*. SEMARNAT. México, D.F. 213 pp.
- Shao, G. & Reynolds, K.M. 2006. *Computer applications in sustainable forest management*. Springer. Dordrecht, The Netherlands
- Soriano, L.M.A., Ángeles, P.G., Martínez, T.T., Plascencia, E.F.O. & Razo, Z.R. 2013. Ecuación de biomasa para *Pinus patula* en bosques de Zacualtipán, Hidalgo. *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus*

- Interacciones en México* (pp. 213-219). Programa Mexicano del Carbono. México.
- Soriano, L.M.A. 2014. Estimación de biomasa y carbono en bosques manejados de Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México. <http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/2261>
- Spurr, S.H. 1952. *Forest inventory*. Ronald Press. Ney York. USA. 442pp.
- Tenorio, G.G. 2003. Tabla de volumen para *Pinus patula* Schl. et Cham. en el estado de Hidalgo. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado de México. <http://www.chapingo.mx/dicifo/tesislic/2003/Tenorio%20Galindo%20Gabriela%202003.pdf>
- Torres, R.J.M. & Magaña, T.O.S. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Ed. Noriega-Limusa, México. 482 p.
- Vacchiano, G., Magnani, F. & Collati, A. 2012. Modeling Italian forests: state of the art and future challenges. *iForest* 5: 113-120, Doi: 10.3832/ifor0614-005
- Vanclay, J.K. & Skovsgaard, J.P. 1997. Evaluating forest growth models. *Ecological modeling* 98:1-12.
- Vásquez, I.A. 2011. Aplicabilidad del modelo de contabilidad de carbono CBM-CFS3 en bosques templados de los ejidos “La Mojonera” y “Atopixco”, Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México. <http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/403>

- Velarde, R.J.C. 2012. Estudio de crecimiento, determinación de índices de sitio y elaboración de tablas de volumen para *Pinus patula* y *Pinus montezumae* en la región forestal Pachuca-Tulancingo, Hidalgo. (Informe técnico). Hidalgo.
- Velarde, R.J.C. 2014. Estudio de crecimiento, determinación de índices de sitio y elaboración de tablas de volumen para *Pinus teocote* y *Pinus rudis* en la región forestal Pachuca - Tulancingo. Estado de Hidalgo. (Informe técnico). Hidalgo.
- Zúñiga, E.A., Sánchez-González, A. & Granados, S.D. 2009. Análisis de la variación morfológica foliar en *Quercus laeta* Liebm. en el parque nacional los mármoles, Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 15 (2): 87-93.
<http://www.chapingo.mx/revistas/phpscript/download.php?file=completo&id=NzQ1>

3. MÉTODO DE VALIDACIÓN DE MODELOS DE VOLUMEN DE FUSTE TOTAL PARA ESPECIES FORESTALES

Nehemías Vásquez-Bautista, Francisco J. Zamudio-Sánchez, Arturo A. Alvarado-Segura, Saúl Viana-Carrillo, José Luis Romo-Lozano

3.1. RESUMEN

Los modelos de volumen maderable en un bosque son herramientas clave del manejo forestal. La validación de los modelos ajustados es relevante porque permite conocer qué tan bien los modelos representan el sistema estudiado. Proponemos un método de validación, mediante simulación, de k modelos que han sido ajustados para estimar el volumen de fuste total para una especie en una región determinada. Utilizando como criterio la precisión del volumen total estimado, se efectúan comparaciones pareadas mediante regresión. Con cada modelo se generan volúmenes reales, que se comparan con los volúmenes estimados por los $k-1$ modelos restantes, llamados modelos competidores. El modelo competidor cuyas estimaciones resulten más cercanas a los valores reales (pendiente estimada cercana a uno), es calificado como el "mejor". El modelo que con mayor frecuencia resulte ser el "mejor" en las k validaciones individuales, se considera el más robusto. El método propuesto se ejemplificó utilizando nueve ecuaciones de volumen de fuste total en Hidalgo, México. Los modelos competidores australiano, Schumacher-Hall y no lineal de la variable combinada presentaron la mayor robustez. Por lo tanto se sugiere el uso de cualquiera de estos modelos para la estimación de volumen de fuste total de *Pinus patula* en el área de estudio. Este método de validación permite probar la validez de los modelos ajustados en una región sin necesidad de cortar árboles. Además, puede ser extendido con facilidad para otras especies y áreas de aprovechamiento.

PALABRAS CLAVE: Ecuación ajustada de volumen, modelo generador, modelo competidor, estimación de volumen forestal, análisis de regresión, modelos robustos, precisión, línea de regresión ajustada.

A VALIDATION METHOD FOR TOTAL STEM VOLUME MODELS IN FOREST SPECIES

ABSTRACT

Wood volume models in a forest are key tools for the forest management. Fitted-models validation is relevant because allows to know how well models represent the studied system. We propose a validation method, by simulation, for k models that have been fitted for estimating total stem volume for a species in a given region. Using the precision of estimated total volume as a criteria, paired comparisons are done by regression. Each model generates real volumes that are compared with estimated volumes by the $k-1$ remaining models, we called them competing models. The competing model with the closest estimations to real values (estimated slope close to one) is called the best model. The model with higher frequency being the "best" in individual validations, is considered the more robust model. The proposed method was exemplified using nine equations of total stem volume in Hidalgo, Mexico. The competing models that showed the higher robustness were: Australian, Schumacher-Hall and combined variable model. Therefore, we suggest these models for estimating total stem volume for *Pinus patula* in the study area. This validation method allows to test the validity of the fitted models in a region without cutting trees. Furthermore, it could be easily extended for other species and logging areas.

KEYWORDS: Volume-fitted equation, generating model, competing model, forest volume estimation, regression analysis, robust models, precision, fitted regression line.

3.2. INTRODUCCIÓN

El volumen maderable de un árbol es la medida más importante que se toma en cuenta en el manejo forestal y se estima en función de variables de fácil medición en campo (Köhl *et al.*, 2006; West, 2009). Para cuantificarlo, se emplea una tabla de volumen que efectúa la estimación de este valor a través de un modelo matemático expresado en forma gráfica, tabular o como una función matemática. A las herramientas de estimación de volumen se les denomina *modelos de volumen*, aunque siguen siendo vigentes los términos *tabla de volumen* y *ecuación de volumen* (Malone *et al.*, 2013). El ajuste de los modelos de volumen se realiza mediante métodos estadísticos, siendo el ajuste por mínimos cuadrados el enfoque de estimación más utilizado. Generalmente se selecciona el mejor de los modelos ajustados utilizando los supuestos de la regresión, la bondad de ajuste y la dispersión de las estimaciones (Salas *et al.*, 2005; Van Laar y Akça, 2007). Usualmente se prefieren valores altos del coeficiente de determinación (R^2) y valores bajos del cuadrado medio del error (CME) y de la varianza (S^2) (Cruz *et al.*, 2008). El empleo de los residuales ajustados, la R^2 , el criterio de información de Akaike [AIC] (Akaike, 1973) y el criterio de información Bayesiano [BIC] (Schwarz, 1978) involucran en su comparación al número de parámetros usados en el modelo y, consecuentemente, se han sugerido también para la comparación de diferentes modelos (Picard *et al.*, 2012).

Una vez seleccionada la mejor ecuación ajustada, es conveniente validarla. La validación consiste en determinar si un modelo es aceptable para

representar la realidad (Brosovich, 1998; Rykiel, 1996) y puede realizarse apartando una sub-muestra aleatoria de la muestra empleada para el ajuste de la ecuación, utilizando una muestra aleatoria diferente o mediante validación cruzada (Corral *et al.*, 1999; Corral y Návar, 2009; Picard *et al.*, 2012). El ajuste también emplea criterios estadísticos como: R^2 , CME (Corral-Rivas y Návar-Cháidez, 2009; Fonweban *et al.*, 2012; Tapia y Návar, 2011), pruebas de hipótesis individuales o simultáneas sobre los parámetros (Reyes *et al.*, 2011), el AIC y el BIC (Alegria y Tomé, 2011; Li y Weiskittel, 2010). En todos los casos se considera que los datos provienen de parcelas de muestreo (Picard *et al.*, 2012; Valles, 2007; Vallet *et al.*, 2006).

El objetivo del presente capítulo es proponer un método de validación de k modelos de volumen de fuste total que han sido ajustados bajo los supuestos de la regresión en una región forestal determinada. El método emplea como criterio de validación la precisión en la estimación del volumen, en vez de buscar que sólo se cumplan criterios estadísticos, físicos, matemáticos o fisiológicos.

El método de validación propuesto tiene la ventaja de ser útil y comprensible para los usuarios finales, a quienes la subestimación o sobreestimación de volumen se traduce en pérdida o ganancia de dinero. Al final, se ejemplifica el método con datos de *Pinus patula* en la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) No. 1302, en Hidalgo, México.

3.3. METODOLOGÍA

Los modelos de volumen son herramientas básicas en el manejo forestal (Burkhardt y Tomé, 2012; Landsberg y Sands, 2011). El uso de las ecuaciones en los inventarios forestales permite estimar el volumen de una población de árboles a partir de medidas tomadas sobre una muestra. Sin embargo, el desarrollo de los árboles está condicionado por factores internos y ambientales conocidos o desconocidos, por lo que debe ajustarse un modelo para cada especie y cada región (Corral *et al.*, 2007; Van Laar y Akça, 2007).

En este trabajo se propone un método de validación para k modelos de volumen de fuste total que han sido ajustados para una especie en una región determinada. La idea básica es comparar los valores reales de volumen con los valores estimados por las ecuaciones ajustadas (Vanclay y Skovsgaard, 1997). El método propuesto se centra en la precisión de la estimación de volumen que un grupo de modelos competidores realizan respecto al volumen “real” generado mediante simulación, utilizando un modelo generador. El proceso se repite haciendo que cada uno de los modelos asuma el papel de modelo generador y los $k-1$ modelos restantes, el papel de modelos competidores.

Con un conjunto de n árboles, la validación se realiza mediante regresiones que utilizan los valores “reales” de volumen individual como variable de respuesta y los volúmenes estimados generados con el modelo competidor como variable independiente. Con k modelos por validar, se hacen $k(k-1)$ comparaciones pareadas mediante regresión. En la Fig. 2 se presenta un esquema conceptual del método propuesto. Se ejemplifica en un escenario con

$k=3$ modelos generadores (columnas $j=1,2,3$) a ser validados mediante $k=3$ modelos competidores (filas $i=1,2,3$), de modo que se hacen 6 comparaciones pareadas que se resumen en la cuarta fila del esquema. El proceso de validación de modelos puede ejecutarse con el programa R (R Core Team) utilizando el código del Anexo I.

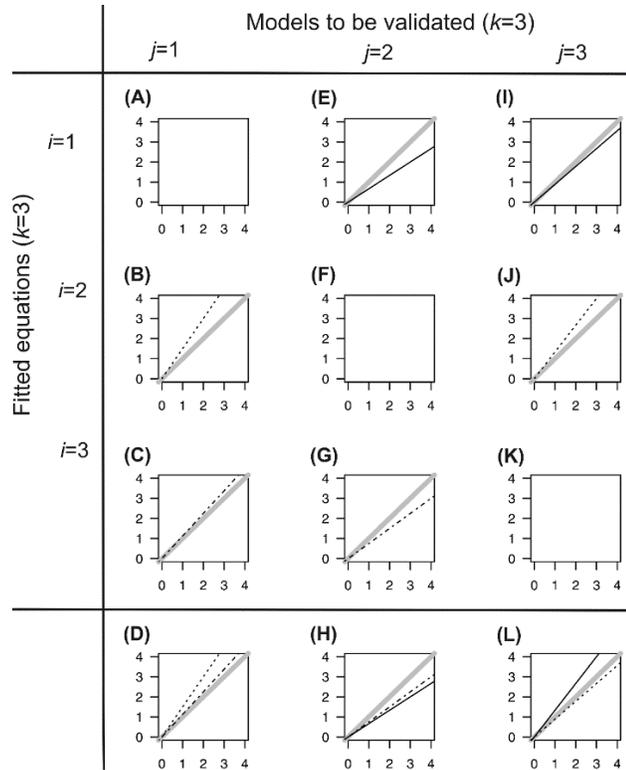


Figura 2. Esquema conceptual del método de validación de modelos de volumen.

Suponga $k=3$ modelos por validar (columnas) de la forma $y = f(d, h, \beta_l) + \varepsilon$, donde y representa el volumen real, d el diámetro normal, h la altura total, β_l los parámetros de regresión y ε el error aleatorio. En las filas, se encuentran representadas las ecuaciones bajo la forma $\hat{y} = f(d, h, (\hat{\beta}_l))$, donde \hat{y} representa el volumen estimado, d el diámetro normal, h la altura total y $(\hat{\beta}_l)$ los coeficientes de regresión. Se observa que la mejor ecuación para estimar los volúmenes del modelo 1 es la ecuación 3 (Fig. 2C); la mejor para el modelo 2, nuevamente es la ecuación 3 (Fig. 2G); y la mejor para el modelo 3, es la ecuación 1 (Fig. 2I). Estos resultados se concentran en las Figs. 2D, 2H y 2L. Entre todas las comparaciones, la ecuación 3 es la que se repite más veces como “mejor” ecuación (Figs. 2D y 2H), por lo que el modelo 3 que le corresponde, se designa como el modelo más robusto.

3.3.1. Descripción del método

Se cuenta con k modelos de volumen por validar, con $j=1, 2, \dots, k$ que se denominan modelos generadores, y k modelos competidores reportados en la literatura, con $i=1, 2, \dots, k$. Cada modelo generador de volumen tiene un modelo competidor correspondiente (Fig. 2).

El cálculo de los volúmenes se efectúa mediante un modelo de simulación que genera el diámetro normal (d) y la altura total (h) para n árboles individuales; posteriormente se calculan los volúmenes de fuste total. Para ser comparables, se utilizan las mismas dimensiones de d y h para todos los modelos a validar.

Se generan los valores “reales” utilizando el j -ésimo modelo generador y la adición de errores aleatorios a la estimación que el modelo realiza (Ver la sección *Algunas precisiones cuando se utiliza el método*). Los errores aleatorios provienen de una distribución normal con media cero y varianza igual al cuadrado medio del error del ajuste del modelo generador. Posteriormente se hace un análisis de regresión de los valores “reales” contra los valores estimados de volumen obtenidos mediante cada uno de los modelos competidores, $i=1, 2, \dots, k$ con $i \neq j$. El proceso se repite para todas las $j=1, \dots, k$.

El modelo de regresión sin ordenada al origen empleado para las validaciones es $V_{real} = \beta_1(V_{est}) + \varepsilon$, donde V_{real} es el volumen generado con el modelo generador (eje Y, Fig. 2), V_{est} es el volumen estimado con el modelo competidor correspondiente (eje X, Fig. 2), β_1 es la pendiente de la recta de regresión y ε es el error aleatorio. En el esquema conceptual (Fig. 2), el modelo generador 1 es validado con los modelos competidores 2 y 3; el modelo

generador 2, con los modelos competidores 1 y 3; el modelo generador 3, con los modelos competidores 1 y 2.

En cada validación, el modelo competidor que efectúe la estimación más cercana a los volúmenes “reales” del modelo generador, se considera el “mejor”. Entre dos o más modelos competidores que efectúan estimaciones cercanas a los valores reales del mismo modelo, donde la diferencia en el valor de la pendiente no es mayor al 3%, ambos se consideran como “mejor” modelo; esta situación permite que puedan seleccionarse dos o más modelos competidores en la validación de cada modelo generador.

Entre todas las comparaciones, se considera el modelo más robusto aquél cuyo correspondiente modelo competidor resulte como “mejor” en un mayor número de validaciones. La robustez se define como la capacidad del modelo competidor para efectuar buenas estimaciones de volumen en cada uno de los modelos generadores, empleando los parámetros reportados en su ajuste y las mismas variables de entrada (d , h).

El modelo más robusto será el más conveniente de recomendar para la construcción de las tablas de volumen de fuste total en condiciones similares. En casos donde se identifique más de un modelo robusto para un área forestal, puede usarse el criterio de parsimonia (Moreira *et al.*, 2008; Todd, 2010), el uso de AIC y BIC (Sánchez-González *et al.*, 2007; Bueno-López y Bevilacqua, 2012; Hill, *et al.*, 2014), el índice de Furnival (Furnival, 1961; Salas, 2002; Segura, 2005) y/o de compatibilidad dimensional (Sharma y Oderwald, 2001) para tomar la decisión final.

3.3.2. Algunas precisiones cuando se utiliza el método

Criterios de selección de los modelos a comparar. Dada la cantidad de modelos de volumen existentes y sus aplicaciones locales, se recomienda que exista homogeneidad en las características de los modelos a evaluar. Algunos criterios sobre los modelos que pueden ser considerados son los siguientes: (i) que hayan sido ajustados para la misma especie forestal en una región dada, (ii) que empleen las mismas variables de entrada, (iii) que la fuente de información haya reportado los valores de R^2 y el CME.

Suma de errores aleatorios. El CME fue empleado como estimador insesgado de la varianza poblacional (Casella & Berger, 2002; Montgomery, 2014) supuesta en el modelo correspondiente. Los errores se consideran aleatorios, con distribución normal ($\mu=0$, $\sigma^2=CME$). La adición del vector de errores a los volúmenes estimados por el modelo generador, considerando válidos los supuestos de la regresión, produce los volúmenes reales con base en la variabilidad reportada en el ajuste de la misma ecuación. Los modelos que cuentan con el CME pueden ser empleados como modelos generadores, en caso contrario, solo podrán ser evaluados como modelo competidor.

Generación de las variables de entrada de las ecuaciones a evaluar. Los modelos emplean como variables de entrada el diámetro y la altura (d , h), mismos que pueden ser generados mediante simulación, bajo el principio de la distribución uniforme en el rango de valores del diámetro. Partiendo de datos tomados en campo, de la región donde se construyeron los modelos a evaluar, se genera una función de regresión, donde d sea la variable explicativa para la variable de

respuesta h ; con la regresión se genera la ecuación de la recta ajustada con la que es posible generar valores promedio de h partiendo de los valores aleatorios de d , dentro del rango de diámetros, que se obtenga en campo, para el ajuste de dicha regresión.

Criterio de ajuste. El criterio de ajuste que se propone consiste en calificar el valor de la pendiente de la recta de regresión que relaciona los valores provenientes del modelo generador con los valores estimados por el modelo competidor, de manera análoga a la propuesta de Vanclay y Skovsgaard, (1997). En la regresión de validación se emplea como variable de respuesta a los volúmenes “reales” generados por el j -ésimo modelo generador y como variable explicativa a los volúmenes estimados por cada uno de los modelos competidores, $i=1, 2, \dots, k$ con $i \neq j$.

En la interpretación del criterio de ajuste, si el valor de la pendiente de la recta de regresión es aproximadamente 1, significa que la estimación de volumen es igual al volumen “real” del modelo generador. De otro modo, hay una sobreestimación (pendiente > 1) o una subestimación (pendiente < 1).

3.3.3. Ejemplificación del método propuesto.

Se emplearon nueve ecuaciones de volumen ajustadas para *Pinus patula* con datos de la Unidad de Manejo Forestal 1302 (UMAFOR 1302, Zacualtipán-Molango) en Hidalgo, México (Cuadro 7).

Cuadro 7. Ecuaciones de volumen ajustadas en la UMAFOR 1302 (Zacualtipán - Molango) validadas en este estudio.

Nombre del Modelo	Modelo matemático		Parámetros estimados	CME	R ²	Tamaño de Muestra
Schumacher	$V = \beta_0 d^{\beta_1} h^{\beta_2}$	(1)	$\beta_0: 0.000024813$ $\beta_1: 1.685697526$ $\beta_2: 1.368561449$	0.008348	0.9992	51
Aritmético Variable Combinada	$V = \beta_0 + \beta_1 d^2 h$	(2)	$\beta_0: 0.010424$ $\beta_1: 0.000034$	0.0314	0.9716	125
Artimético Australiano	$V = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 h + \beta_3 d^2 h$	(3)	$\beta_0: -0.05359$ $\beta_1: -0.00006$ $\beta_2: 0.004262$ $\beta_3: 0.000035$	0.0316	0.9718	125
Coficiente Mórfico Constante	$V = \beta_1 d^2 h$	(4)	$\beta_1: 0.000034$	0.0312	0.9715	125
No lineal de Schumacher-Hall	$V = \exp^{\beta_0} d^{\beta_1} h^{\beta_2}$	(5)	$\beta_0: -10.264$ $\beta_1: 1.915849$ $\beta_2: 1.089547$	0.0314	0.9718	125
No lineal de la Variable Combinada	$V = \beta_0 (d^2 h)^{\beta_1}$	(6)	$\beta_0: 0.000039$ $\beta_1: 0.987297$	0.0313	0.9716	125
No lineal de la Variable Combinada	$V = \exp^{\beta_0} * (d^2 h)^{\beta_1}$	(7)	$\beta_0: -9.7688$ $\beta_1: 0.9451$	0.020919	0.9851	101
Modelo de Stoffels	$\ln(V) = \beta_0 \ln d - \beta_1$	(8)	$\beta_0: 2.3088$ $\beta_1: 8.19451$	0.0414610	0.97	101
Aritmético Variable Combinada	$V = \beta_0 + \beta_1 d^2 h$	(9)	$\beta_0: 0.083638764$ $\beta_1: 0.318479436$	0.067260752	0.93	101

V: volumen, d: diámetro normal, h: altura; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$: parámetros de regresión.

Fuente: Brosovich, 1998 (1); González, 2014 (2), (3), (4), (5), (6); Carrillo *et al.*, 2004 (7); Tenorio, 2003 (8), (9).

Las variables de diámetro normal (d) y altura (h) empleadas en el cálculo del volumen para los modelos, fueron generadas mediante simulación de valores aleatorios. Se utilizaron 111 pares de datos de d y h de *Pinus patula*, tomados en campo en el área de estudio, para ajustar la ecuación de regresión h versus d , i. e., $h = 12.2510 + 0.3138d$. Con base en la ecuación de altura ajustada se generaron los valores promedio de h , a partir de valores aleatorios de d en un rango de 10 a 70 centímetros. El rango de valores del d fue definido con base en los datos de campo y los valores extremos reportados en las fuentes de donde

proviene las ecuaciones (ver Cuadro 7). El proceso de simulación se realizó utilizando el programa estadístico R conforme a los siguientes pasos:

1. Se generaron 60 valores aleatorios de d siguiendo una distribución uniforme en el rango de 10 a 70 centímetros. Estos valores se sustituyeron en la ecuación de altura ajustada para generar el vector de los valores respectivos de h .
2. Utilizando los 60 pares de datos generados, (d, h) , se calcularon los volúmenes individuales de fuste total con el modelo generador $j=1$ y se almacenó en el vector $(VE)_1$, que se denominó volumen estimado. Para este cálculo, se utilizaron los coeficientes de regresión de la respectiva ecuación del modelo generador (Cuadro 7).
3. Siguiendo los supuestos de la regresión, se generó un vector de errores aleatorios (E) de una distribución normal con media cero y varianza CME , reportado para el modelo generador $j=1$ y se sumó al volumen estimado $(VE)_1$. El resultado de la suma generó los volúmenes “reales”, $(VR)_1$, del conjunto de valores calculados con el modelo generador 1.
4. Utilizando los 60 pares de datos (d, h) generados en el paso 1, se estimó el $(VE)_i$ para los modelos competidores $(i=2, \dots, 9)$, utilizando un procedimiento análogo al descrito en el paso 2. Los vectores de los correspondientes volúmenes estimados se añadieron al vector $(VR)_1$ en una misma base de datos, utilizando en cada caso la denominación y el subíndice del número del modelo correspondiente para diferenciarlos.
5. Para calificar la estimación del volumen que el modelo competidor $(VE)_2$ tiene respecto del volumen real $(VR)_1$, se realizó un análisis de regresión

tomando el volumen estimado $(VE)_2$ como variable explicativa y al volumen real $(VR)_1$ del modelo generador como la variable de respuesta.

6. Se estimaron los parámetros de la regresión del $(VR)_1$ contra $(VE)_2$, y se usó el valor estimado de la pendiente de la recta de regresión para efectuar la evaluación. La regresión considera que el intercepto debe pasar por el origen del eje de coordenadas ($\beta_0=0$).
7. Para comparar la estimación de los otros modelos competidores, se siguió el procedimiento descrito en el punto 5 con el modelo competidor 3, hasta llegar con el modelo competidor 9.
8. A partir de las regresiones efectuadas entre $(VR)_1$ con los modelos competidores, aquel modelo que haya generado una pendiente más cercana a uno, se califica como “la mejor”.
9. Una vez realizada la validación del modelo generador $j=1$ contra los modelos competidores restantes, ahora se toma como modelo generador $j=2$ y se ejecuta el mismo procedimiento para compararlo con los modelos competidores restantes ($i=1, \dots, 9$, con $i \neq j$).
10. El procedimiento se repite para todos los modelos, generando así $k(k-1)=72$ comparaciones por análisis de regresión.
11. Para calificar al mejor modelo competidor, se colocaron en una tabla los modelos generadores y los “mejores” modelos competidores para cada uno; el modelo competidor que más veces se repite en la tabla, es calificado como el modelo más robusto.

3.4. RESULTADOS

La ejemplificación del método de validación propuesto se hizo con datos de *Pinus patula* en Hidalgo, México. Los modelos más robustos fueron el modelo aritmético australiano (Stoate, 1945), el modelo no lineal de Schumacher-Hall (Schumacher y Hall, 1933) y el modelo no lineal de la variable combinada (Spurr, 1952) (Cuadro 7, modelos 3, 5, 6). Cada uno de los modelos competidores que representan a los modelos mencionados, generaron estimaciones cercanas a uno en cinco modelos evaluados (Fig. 3).

El modelo competidor aritmético australiano (Modelo 3, Cuadro 7), efectuó estimaciones cercanas para los modelos generadores: 2, 4, 5, 6 y 9 (Cuadro 8; Figs. 3D, 3B 3E, 3H, 3I). El modelo competidor no lineal de Schumacher-Hall (Modelo 5, Cuadro 7), hizo buenas estimaciones en los modelos generadores: 3, 6, 7, 8 y 9 (Cuadro 8; Figs. 3G, 3H, 3C, 3F, 3I). El modelo competidor no lineal de la variable combinada (Modelo 6, Cuadro 7) efectuó estimaciones cercanas a 1 en los modelos generadores: 2, 3, 4, 5 y 9 (Cuadro 8; Figs. 3D, 3G, 3B, 3E, 3I).

En sentido opuesto, el modelo competidor de Schumacher (Modelo 1, Cuadro 7), efectuó las estimaciones más alejadas de los valores reales de todos los modelos generadores (Cuadro 8; Figs. 3B-3I). En la validación del modelo generador 1 de Schumacher, la pendiente estimada de la recta de regresión obtenida con los datos de volumen estimados con el mejor modelo competidor fue de 0.80 (Cuadro 8; Fig. 3A), el valor más bajo de todas las validaciones realizadas.

Cuadro 8. Modelos de mejor ajuste (columna 4) respecto al modelo evaluado (columna 3) en la comparación pareada de la estimación de volumen de los nueve modelos.

Nombre del modelo	Modelo matemático	MMA	Est.	EStd.
Schumacher (1)	$V = \beta_0 d^{\beta_1} h^{\beta_2}$	(7)	0.806	0.00082
		(8)	0.778	0.00281
		(9)	0.744	0.00101
Aritmético de la Variable Combinada (2)	$V = \beta_0 + \beta_1 d^2 h$	(4)	1.004	0.00158
		(3)	1.010	0.00150
		(6)	1.015	0.00151
Artimético Australiano (3)	$V = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 h + \beta_3 d^2 h$	(6)	1.004	0.00149
		(5)	1.005	0.00149
		(4)	0.993	0.00144
Coeficiente Mórfo Constante (4)	$V = \beta_0 d^2 h$	(2)	0.997	0.00183
		(3)	1.006	0.00187
		(6)	1.011	0.00190
No lineal de Schumacher-Hall (5)	$V = \exp^{\beta_0} d^{\beta_1} h^{\beta_2}$	(6)	0.998	0.00172
		(3)	0.995	0.00184
		(4)	0.989	0.00187
No lineal de la Variable Combinada (6)	$V = \beta_0 (d^2 h)^{\beta_1}$	(5)	1.002	0.00194
		(3)	0.998	0.00200
		(4)	0.992	0.00204
No lineal de la Variable Combinada (7)	$V = \exp^{\beta_0} * (d^2 h)^{\beta_1}$	(8)	0.955	0.00321
		(9)	0.923	0.00378
		(5)	0.900	0.00438
Modelo de Stoffels (8)	$\ln(V) = \beta_0 \ln d - \beta_1$	(9)	0.962	0.00441
		(7)	1.040	0.00373
		(5)	0.937	0.00531
Aritmético Variable Combinada (9)	$V = \beta_0 + \beta_1 d^2 h$	(5)	0.979	0.00513
		(6)	0.978	0.00518
		(3)	0.974	0.005289

Fuente: Brosovich, 1998 (1); González, 2014 (2), (3), (4), (5), (6); Carrillo *et al.*, 2004 (7); Tenorio, 2003 (8), (9). MMA: Modelo de Mejor Ajuste; Est.: Estimación; EStd: Error Estándar.

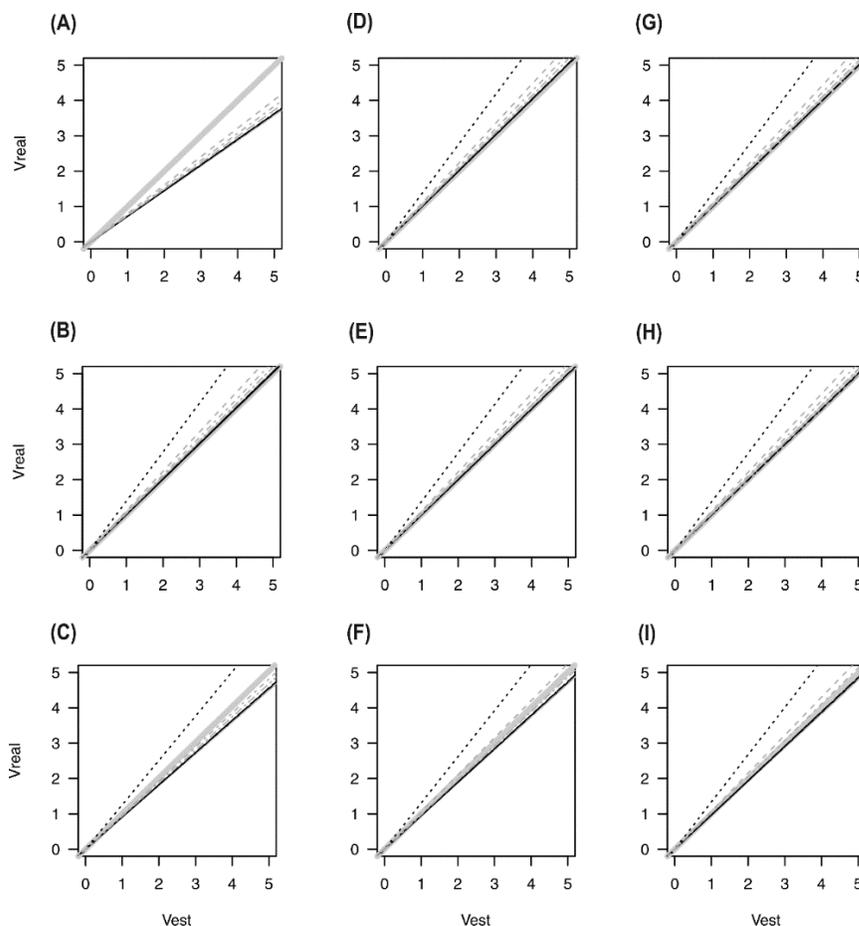


Figura 3. Resumen de resultados de los nueve modelos de volumen validados.

Los modelos validados corresponden a los presentados en el Cuadro 7: modelo 1 (Schumacher, Fig. 3A), modelo 2 (aritmético de la variable combinada, Fig. 3D), modelo 3 (aritmético australiano, Fig. 3G), modelo 4 (coeficiente mórfico constante, Fig. 3B), modelo 5 (no lineal de Schumacher-Hall, Fig. 3E), modelo 6 (no lineal de la variable combinada, Fig. 3H), modelo 7 (no lineal de la variable combinada, Fig. 3C), modelo 8 (Stoffels, Fig. 3F), modelo 9 (aritmético de la variable combinada, Fig. 3I). Las Figs. 3C y 2H representan la validación del mismo modelo así como las Figs. 3D y 3I; en ambos casos se trata del mismo modelo pero ajustado por otro autor, por lo que tienen coeficientes de regresión diferentes. Cada gráfica (Fig. 3A-3I) resume la validación pareada de cada modelo respecto a las ocho ecuaciones restantes. La representación de la recta de regresión estimada correspondiente a cada ecuación ajustada se hizo del siguiente modo: línea punteada negra (Schumacher), línea discontinua gris con guiones largos (coeficiente mórfico constante), línea discontinua gris con guiones cortos (no lineal de la variable combinada), línea continua gris (aritmético de la variable combinada), línea discontinua negra con segmentos de guiones largos y cortos (no lineal de Schumacher-Hall), línea discontinua gris con segmentos de guiones y puntos (Stoffels), línea continua negra (Aritmético australiano), línea discontinua negra con guiones largos (no lineal de la variable combinada), línea discontinua gris con segmentos de guiones largos y cortos (Aritmético de la variable combinada). Ver descripción de resultados en el texto.

Se encontró que existió correspondencia en la estimación que hacen los modelos más robustos cuando se validaron los modelos generadores correspondientes. Cuando el modelo aritmético australiano (Modelo 3, Cuadro 7) fue el generador, los modelos competidores 5 y 6 efectuaron las mejores estimaciones (Cuadro 8, Fig. 3D); cuando el modelo de Schumacher-Hall (Modelo 5, Cuadro 7) fue validado (modelo generador), los modelos competidores 3 y 6 efectuaron las mejores estimaciones (Cuadro 2, Fig. 3E); cuando el modelo no lineal de la variable combinada (Modelo 6, Cuadro 7) fue el modelo generador, los modelos competidores 3 y 5, fueron las mejores (Cuadro 2, Fig. 3H).

También existió correspondencia entre el modelo aritmético de la variable combinada (Modelo 2, Cuadro 7) con el modelo del coeficiente mórfico constante (Modelo 4, Cuadro 7). Cuando el modelo generador 2 fue validado, el modelo competidor 4, efectuó la estimación más precisa (Cuadro 8, Figura 3D); a su vez, cuando se validó el modelo generador 4, la estimación más precisa la efectuó el modelo competidor 2 (Cuadro 8, Figura 3B).

3.5. DISCUSIÓN

Para garantizar que un modelo es útil y confiable es necesario validarlo (Vanclay, 2012). La validación sirve para mostrar el nivel en que un modelo representa un fenómeno real dentro del dominio en que es aplicado. El hecho de que un modelo sea válido no significa que reproduce con precisión absoluta el fenómeno ni que sea el mejor modelo disponible, pero provee una base para su uso aceptable

(Rykiel, 1996; Augusiak *et al.*, 2014). En este contexto, es importante que el usuario comprenda en qué consiste el método de validación, cómo funciona y las ventajas que ofrece (Augusiak *et al.*, 2014).

El método propuesto en este trabajo retoma uno de los argumentos de validación de Vanclay y Skovsgaard (1997), quien propone utilizar como criterio la correlación más alta, cercana a uno, de los valores observados de un conjunto de individuos contra los valores predichos por el modelo. Algunas de las ventajas del método propuesto en este artículo son:

- El uso de la precisión del volumen como criterio de validación tiene sentido práctico para el usuario final (Malone *et al.*, 2013); la sobreestimación o subestimación de volumen significa ganancia o pérdida de dinero en la comercialización maderable.
- El método permite determinar la robustez de un modelo a partir de la frecuencia en la precisión de sus estimaciones de volumen en diferentes modelos validados.
- Permite encontrar posibles errores debido al mal ajuste de los modelos de volumen usados. En la ejemplificación del método, la subestimación que genera el modelo de Schumacher (Modelo 1, Cuadro 7), probablemente se deba al mal ajuste del modelo, o a un error de captura del parámetro por parte del autor de la fuente donde fue tomada la ecuación.
- Puede ser aplicado en la comparación de modelos de volumen comercial, o entre modelos de ahusamiento, asumiendo siempre que el criterio de validación es el volumen.

En la ejemplificación del método propuesto, los modelos más robustos, coinciden con lo reportado por Moret *et al.* (1998), quien encontró que el modelo aritmético australiano, aritmético de la variable combinada, no lineal de la variable combinada y no lineal de Schumacher-Hall, efectuaron las mejores estimaciones. El uso de cualquiera de los tres modelos más robustos, se sugieren desde diferentes enfoques. Del modelo australiano, su capacidad de efectuar buenas estimaciones de volumen; del modelo de la variable combinada, su capacidad predictiva, el menor número de parámetros y el buen comportamiento en tamaño de muestras pequeños (Burkhart y Tomé, 2012; Spurr, 1952); finalmente la compatibilidad biológica del modelo de Schumacher-Hall, siempre y cuando la suma de los exponentes de d y h sea igual a 3 (Sharma y Oderwald, 2001).

En diversos trabajos que abordan el ajuste de modelos de volumen, es común que el modelo de Schumacher-Hall se presente como el mejor. Sin embargo, cuando la comparación incluye el modelo australiano y/o el modelo de la variable combinada, se observa que los tres modelos realizan buenas estimaciones, con buen ajuste de R^2 y valores bajos de CME (Corral-Rivas y Návar-Cháidez, 2009; Fonweban *et al.*, 2012; Tapia y Návar, 2011).

El método propuesto también corrobora, mediante las estimaciones de volumen, la correspondencia del modelo aritmético de la variable combinada (Modelo 2, Cuadro 7) con el modelo del coeficiente mórfico constante (Modelo 4, Cuadro 7); coinciden por la similitud en la estructura de cada modelo, pues el modelo del coeficiente mórfico es igual al modelo de la variable combinada pero con el intercepto $\beta_0 = 0$ (Burkhart y Tomé, 2012).

Se encontró que el modelo no lineal de la variable combinada (Modelo 7, Cuadro 7), ha sido utilizado en la estimación de volumen en algunos estudios (Cruz, 2007; Cruz *et al.*, 2010; Soriano, 2014; Vásquez, 2011); sin embargo, la validación muestra que el modelo presenta inconsistencias que deben ser verificados con otros estudios.

Con una base de datos biométricos de diferentes regiones forestales, se pueden validar los modelos de volumen que han sido generados, utilizando datos reales tomados en campo. En este caso los volúmenes reales pueden obtenerse mediante métodos como los de Newton, Huber y Smalian (Diéguez *et al.*, 2003). Lo anterior permitirá a su vez, evaluar el método de validación que se propone en este trabajo donde no se requiere cortar árboles para la cubicación de trozas.

3.6. CONCLUSIONES

El método propuesto permite comparar las estimaciones de volumen de fuste total para ecuaciones ajustadas bajo los principios de la regresión. Los resultados obtenidos usando el método de validación propuesto con datos simulados de un área forestal, sugieren la posibilidad de extender el método para otras especies y áreas de estudio, sin necesidad de cubicar trozas, lo que representa una ventaja para hacer la validación.

Otra ventaja consiste en que el volumen es un criterio práctico y de fácil interpretación para los diferentes usuarios de los mismos. Adicionalmente, la precisión en la estimación del volumen como criterio de validación, tiene implicaciones económicas para el usuario, dependiendo si se subestima o sobreestima el volumen. Para usar el método propuesto, es necesario contar con el CME de los modelos ajustados que se quieren comparar.

En el ejemplo, el modelo australiano de Stoate, el modelo de Schumacher-Hall y el modelo no lineal de la variable combinada fueron las más robustas. Para los usuarios, el mejor modelo no depende de la estructura matemática de las ecuaciones, sino de su capacidad en la estimación del volumen, por esta razón, es posible utilizar cualquiera de los tres modelos en la estimación de volumen fuste total en esas condiciones.

3.7. REFERENCIAS

- Augusiak, J., Van den Brink, P.J. & Grimm, V. 2014. Merging validation and evaluation of ecological models to 'evaluation': A review of terminology and a practical approach. *Ecological Modelling* 280: 117-128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.11.009>
- Akaike, H. 1973. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. En Petrov BN, Csaki F (eds.) Second international symposium on information theory, pp 267–281. Akademiai Kiado, Budapest, Hungría.
- Alegria, C. & Tomé, M. 2011. A set of models for individual tree merchantable volume prediction for *Pinus pinaster* Aiton in central inland of Portugal. *European Journal Forest Research* 130: 871-879. doi 10.1007/s10342-011-0479-3
- Bueno-López, S.W. & Bevilacqua, E. 2012. Nonlinear mixed model approaches to estimating merchantable bole volume for *Pinus occidentalis*. *iForest Biogeosciences and Forestry* 5: 247-254. doi: 10.3832/ifor0630-005
- Brosovich, G.M.M. 1998. Determinación del rendimiento para *Pinus patula* Schl. et Cham., en la región de Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de grado. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, México. 83 p.
- Burkhart, H.E. & Tomé, M. 2012. Tree-stem volume equations. In *Modelling forest trees and stands*. Dordrecht, The Netherlands. Springer Science+Business Media. doi: 10.1007/978-90-481-3170-9 3

- Carrillo, A.F., Acosta M.M., Tenorio, G.G. & Becerra, L.F. 2004. Tabla de volumen para *Pinus patula* Sch. et Cham. en el Estado de Hidalgo. INIFAP. [Folleto técnico].
- Casella, G. & Berger, R.L. 2002. *Statistical Inference*. Second edition, CA, USA.
- Corral, R.S., Návar, Ch.J.J. & Fernández, S.F. 1999. Ajuste de funciones de ahusamiento a los perfiles fustales de cinco pináceas en la región del Salto, Durango. *Madera y Bosques* 5(2): 53-65.
- Corral-Rivas, S. & Návar-Cháidez, J.J. 2009. Comparación de técnicas de estimación de volumen fustal total para cinco especies de pino de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15 (1): 5-13. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-32312009000100001&lng=es&tlng=es.
- Cruz C.F., Santos, P.H.M. & Valdez, L.J. R. 2008. Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus Cooperi* Blanco En Durango, México. *Agrociencia* 42: 473-485, Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952008000400010&lng=es&tlng=es.
- Cruz, L.I.A., Valdéz, L.J.R., Ángeles, P.G. & De los Santos, P.H.M. 2010. Modelacion espacial del área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *Pinus teocote* en el Ejido Atopixco, Hidalgo. *Madera y Bosques* 16 (3), 2010: 75-97, http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712010000300006&lng=es&tlng=es.

- Cruz, M.Z. 2007. Sistema de ecuaciones para la estimación y partición de biomasa aérea en Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México.
- Diéguez, A.U., Barrio, A.M., Castedo, D.F., Ruíz, G.A.D., Álvarez, T.M.F., Álvarez, G.J.G. & Rojo, A.A. 2003. *Dendrometría*. Ediciones Mundi-prensa. Madrid, España. 310 p.
- Fonweban, J., Gardiner, B. & Auty, D. 2012. Variable-top merchantable volumen equations for Scots pine (*Pinus sylvestris*) and Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) in Northern Britain. *Forestry* 85 (2): 237-253 doi: 10.1093/forestry/cpr069
- Furnival, G.M. 1961. An index for comparing equations used in constructing volume equations. *Forest Science* 7: 337-341.
- González, A.J. 2014. Estudio de crecimiento para *Pinus patula* y *Pinus teocote* en la región forestal 1302 Zacualtipán-Molango. Informe Técnico. 78 p.
- Hill, A., Breschan, J. & Mandallaz, D. 2014. Accuracy Assessment of Timber Volume Maps Using Forest Inventory Data and LiDAR Canopy Height Models. *Forests* 5: 2253-2275, doi:10.3390/f5092253
- Köhl, M., Magnussen, S.S. & Marchetti, M. 2006. *Sampling methods, remote sensing and GIS Multiresource forest inventory*. Springer-Verlag. New York, USA. doi: 10.1007/978-3-540-32572-7
- Landsberg, J. & Sands, P. 2011. *Modelling tree growth: Concepts and review in Physiological Ecology of Forest Production: Principles, Processes and Models*. ELSEVIER, San Diego. USA. <http://www.sciencedirect.com/science/bookseries/19367961/4>

- Li, R. & Weiskittel, A.R. 2010. Comparison of model forms for estimating stem taper and volume in the primary conifer species of the North American Acadian Region. *Annals of Forest Science*. 67 (3): <http://dx.doi.org/10.1051/forest/2009109>
- Malone, T., Jingjing, L. & Packee S.E. 2013. Total and Merchantable Volume of White Spruce in Alaska. *Western Journal of Applied Forestry* 28 (2): 71-77 <http://dx.doi.org/10.5849/wjaf 12-003>.
- Montgomery, D.C. 2014. *Diseño y análisis de experimentos*. 2a. ed. México. LIMUSA WILEY.
- Moreira, F., Catry, F, Duarte, I., Acácio, V. & Sande, S.J. 2008. A conceptual model of sprouting responses in relation to fire damage: an example with cork oak (*Quercus suber* L.) trees in Southern Portugal. *Plant Ecology*. 201 (1): 77-85. doi: 10.1007/s11258-008-9476-0
- Moret, A.Y., Jerez, M. & Mora, A. 1998. Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) en la unidad experimental de la reserva forestal caparo, estado Barinas – Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 42 (1): 41-50. Disponible en: http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/24242/1/articulo42_1_5.pdf
- Picard N., Saint-André L. & Henry M. 2012. *Manual for building tree volume and biomass allometric equations. From field measurement to prediction*. FAO-ONU & Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier, 223.

- R Core Team. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org/>.
- Reyes, M.J.L., Aguirre, C.O.A., Jiménez, P.J., Treviño, G.E.J., Jurado, E. & González, L.R.F. 2011. Modelos de predicción del incremento en volumen para bosques mezclados del Estado de Durango, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17 (1): 103-113. doi: <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.05.026>
- Rykiel Jr. E.J. 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological modelling* 90: 229-244.
- Salas E., C. 2002. Ajuste y validación de volumen para un relicto del bosque de roble-laurel-lingue. *Bosque* 23 (2): 81-92 <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002002000200009>
- Salas, C., Nieto, L. & Irisarri, A. 2005. Modelos de volumen para *Pinus pinaster* Ait. en la comarca del Baixo Miño, Galicia, España. *Quebracho* 12: 11-22. <http://fcf.unse.edu.ar/archivos/quebracho/q12-01-Pinus-pinaster.pdf>
- Sánchez-González, M., Cañellas, I. & Montero, G. 2007. Generalized height-diameter and crown diameter prediction models for cork oak forests in Spain. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 16 (1): 76-88 doi: 10.5424/srf/2007161-00999
- Schmolke, A., Thorbek, P., De Angelis, D.L. & Grimm, V. 2010. Ecological models supporting environmental decision making: a strategy for the future. *Trends in Ecology and Evolution* 25, 479–486. doi:10.1016/j.tree.2010.05.001

- Schwarz, G.E. 1978. Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics* 6: 461-464. doi:10.1214/aos/1176344136
- Segura, M. & Kanninen, M. 2005. Allometric Models for Tree Volume and Total Aboveground Biomass in a Tropical Humid Forest in Costa Rica. *Biotropica* 37 (1): 2-8. Available in <http://www.sidalc.net/repdoc/A11090i/A11090i.pdf>
- Soriano, L.M.A. 2014. Estimación de biomasa y carbono en bosques manejados de Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México. Disponible en: <http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/2261>
- Schumacher, F.X. & Hall, F.S. 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research* 47 (9): 719-773.
- Sharma, M. & Oderwald, R.G. 2001. Dimensionally compatible volume and taper equations. *Canadian Journal Forest Research* 31 (5): 797-803. doi: 10.1139/cjfr-31-5-797
- Spurr, S.H. 1952. *Forest inventory*. Ronald Press. New York, USA.
- Stoate, T.N. 1945. The use a volume equation in pine stands. *Australian Forestry* 9: 1, 48-52. doi: 10.1080/00049158.1945.10675220
- Tapia, J. & Návar, J. 2011. Ajuste de modelos de volumen y funciones de ahusamiento para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en bosques de pino de la sierra madre oriental de Nuevo León, México. *Foresta Veracruzana* 13 (2): 19-28. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49721457004>
- Tenorio, G.G. 2003. Tabla de volumen para *Pinus patula* Sch. et Cham. en el Estado de Hidalgo. Tesis profesional. Chapingo, México. 78 p. Disponible en:

<http://www.chapingo.mx/dicifo/tesislic/2003/Tenorio%20Galindo%20Gabriela%202003.pdf>

Todd, W.A. 2010. Uninformative parameters and model selection using Akaike's Information Criterion. *Journal of Wildlife Management*. 74(6):1175-1178. doi: <http://dx.doi.org/10.2193/2009-367>

Valles, G.A.G. 2007. Modelos biométricos que conforman a SINCREMARS versión 2.0. Libro científico 1. 162 p. <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/handle/123456789/1960>

Vallet, P., Dhote, J.F., Le Moguédec, G., Ravart, M. & Pignard, G. 2006. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management* 229: 98-110. doi:10.1016/j.foreco.2006.03.013

Van Laar, A. & Akça, A. 2007. *Forest Mensuration*. Dordrecht, The Netherlands. Springer. doi: 10.1007/978-1-4020-5991-9

Vanclay, J.K. & Skovsgaard, J.P. 1997. Evaluating forest growth models. *Ecological modelling* 98:1-12. doi:10.1016/S0304-3800(96)01932-1

Vanclay, J.K. 2012. Modelling continuous cover forests. In T. Pukkala and K. von Gadow (eds.), *Continuous Cover Forestry, Managing Forest Ecosystems* 23, doi 10.1007/978-94-007-2202-6 7

Vásquez, I.A. 2011. Aplicabilidad del modelo de contabilidad de carbono CBM-CFS3 en bosques templados de los ejidos “La Mojonera” y “Atopixco”, Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México. Disponible en:

http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/403/Vasquez_Ibanez_A_MC_Forestal_2011.pdf?sequence=1

West, P.W. 2009. *Tree and Forest Measurement*. 2nd Edition. Springer. School of Environmental Science and Management. Lismore, Australia. doi: 10.1007/978-3-540-95966-3

4. DISCUSIÓN GENERAL

El género *Pinus* y *Quercus* son las especies de las que mayor volumen de madera se aprovecha en Hidalgo (SEMARNAT, 2014). Sin embargo, mientras que el género *Pinus* es el más estudiado, *Quercus* es el género que se reporta en menor número de trabajos, probablemente debido a la dificultad que representa su identificación taxonómica, alta variabilidad morfológica (Bárceñas, 2011) y la capacidad de formar híbridos (Zúñiga *et al.*, 2009).

La mayor cantidad de modelos reportados se ajustaron enfocados al aprovechamiento forestal (229 modelos); a partir de 2007, los modelos de estimación de biomasa y contenido de carbono se han incrementado (44 y 16 respectivamente). Existe una gran cantidad de modelos generados, por lo que se sugiere la creación de simuladores de crecimiento (Santiago, 2013), para reunir los modelos matemáticos ya creados en un programa que permita crear escenarios que simulen el comportamiento de las masas forestales (Salas y Real, 2013; Santiago, 2013).

Debido a que la mayoría de los trabajos de investigación están publicados en revistas nacionales, se observa que la información sólo se difunde de manera local y en español; por lo que es importante que trabajos futuros sean publicados en revistas con mayor difusión internacional.

Considerando que los modelos de volumen son herramientas básicas para el manejo forestal (Burkhart y Tomé, 2012), y al encontrar gran cantidad de ellas en la literatura, se propuso un método de validación que emplea el volumen como criterio para la selección del mejor para hacer las estimaciones en campo. Con

este criterio, la sobreestimación o subestimación se puede trasladar a ganancia o pérdida de dinero en la comercialización de la madera. También permite conocer la robustez de un modelo, así como encontrar posibles errores debidos al mal ajuste, o errores en la captura del mismo. Además, el método puede extenderse para un cualquier número de modelos que sean seleccionados a partir de criterios homogéneos. Tiene como ventaja adicional que se puede ejecutar masiva y simultáneamente en diferentes regiones forestales de México, ya que no requiere de la cubicación de trozas y, en consecuencia, del derribo de árboles.

En la ejemplificación del método, los modelos más robustos, fueron el modelo aritmético australiano, el modelo no lineal de la variable combinada y el modelo no lineal de Schumacher y Hall, que coincide con lo reportado por Moret *et al.* (1998), quien encontró resultados similares. Se encontró que el modelo de volumen ajustado por Carrillo *et al.* (2004), fue utilizado para la estimación de volumen en otros trabajos de investigación (Cruz, 2007; Cruz, 2010; Vásquez, 2011; Soriano, 2014), dicho modelo fue validado con el método propuesto en este trabajo y se encontró que es el segundo modelo con las estimaciones de volumen más alejadas.

El método propuesto, ofrece una herramienta basada en la estimación de volumen, si el usuario aún se encuentra indeciso en su elección, puede emplear otros criterios como la parsimonia (Moreira *et al.*, 2008; Todd, 2010) que evalúa el número de parámetros que emplea el modelo, o bien utilizar el criterio de dimensionalidad (Sharma y Oderwald, 2001), el cual emplea las unidades de estimación que resulta de la aplicación del modelo ajustado.

4.1. REFERENCIAS

- Bárceñas, P.G.M. 2011. Evaluación tecnológica de la madera de los encinos de la sierra de Álvarez, S.L.P. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Posgrado en Ciencias Ambientales. San Luis Potosí.
- Burkhart, H.E. & Tomé, M. 2012. Tree-stem volume equations. In *Modelling forest trees and stands*. Dordrecht, The Netherlands. Springer Science+Business Media. doi: 10.1007/978-90-481-3170-9 3
- Carrillo, A.F., Acosta M.M., Tenorio, G.G. & Becerra, L.F. 2004. Tabla de volumen para *Pinus patula* Sch. et Cham. en el Estado de Hidalgo. INIFAP. (Folleto técnico).
- Corral, R.S., Návar, Ch.J.J. & Fernández, S.F. 1999. Ajuste de funciones de ahusamiento a los perfiles fustales de cinco pináceas en la región del Salto, Durango. *Madera y Bosques* 5(2): 53-65.
- Cruz, L.I.A., Valdéz, L.J.R., Ángeles, P.G. & De los Santos, P.H.M. 2010. Modelación espacial del área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *Pinus teocote* en el Ejido Atopixco, Hidalgo. *Madera y Bosques* 16 (3), 2010:75-97, http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712010000300006&lng=es&tlng=es.
- Cruz, M.Z. 2007. Sistema de ecuaciones para la estimación y partición de biomasa aérea en Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México.
- Malone, T., Jingjing, L. & Packee S.E. 2013. Total and Merchantable Volume of White Spruce in Alaska. *Western Journal of Applied Forestry* 28 (2): 71-77 <http://dx.doi.org/10.5849/wjaf-12-003>.

- Moreira, F., Catry, F., Duarte, I., Acácio, V. & Sande, S.J. 2008. A conceptual model of sprouting responses in relation to fire damage: an example with cork oak (*Quercus suber* L.) trees in Southern Portugal. *Plant Ecology*. 201 (1): 77-85. doi: 10.1007/s11258-008-9476-0
- Moret, A.Y., Jerez, M. & Mora, A. 1998. Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) en la unidad experimental de la reserva forestal Caparo, estado Barinas – Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 42 (1): 41-50. Disponible en: http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/24242/1/articulo42_1_5.pdf
- Salas, C. & Real, P. 2013. *Biometría de los bosques naturales de Chile: estado del arte*. In: *Silvicultura en los bosques nativos: avances en la investigación en Chile, Argentina y Nueva Zelanda*. Donoso y Promis (Eds.). Editorial María Cuneo. Valdivia, Chile. 109-151 p. <https://sites.google.com/site/alvaropromis/Home/libro-silvicultura-bosques-nativos>
- Santiago, G.W. 2013. Simulador de crecimiento para manejo de rodales coetáneos de *Pinus patula*. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México. <http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/2060>
- Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). 1976. Inventario Forestal del Estado de Hidalgo. Publicación 39. Octubre de 1976. [Folleto]
- SEMARNAT. 2014. Anuario estadístico de la producción forestal 2013. SEMARNAT. México, D.F. 213 pp.

- Sharma, M. & Oderwald, R.G. 2001. Dimensionally compatible volume and taper equations. *Canadian Journal Forest Research* 31 (5): 797-803. doi: 10.1139/cjfr-31-5-797
- Soriano, L.M.A. 2014. Estimación de biomasa y carbono en bosques manejados de Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México. Disponible en: <http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/2261>
- Todd, W.A. 2010. Uninformative parameters and model selection using Akaike's Information Criterion. *Journal of Wildlife Management*. 74(6):1175-1178. doi: <http://dx.doi.org/10.2193/2009-367>
- Vásquez, I.A. 2011. Aplicabilidad del modelo de contabilidad de carbono CBM-CFS3 en bosques templados de los ejidos “La Mojonera” y “Atopixco”, Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México. <http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/403>
- Zúñiga, E.A., Sánchez-González, A. & Granados, S.D. 2009. Análisis de la variación morfológica foliar en *Quercus laeta* Liebm. en el parque nacional los mármoles, Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 15 (2): 87-93. <http://www.chapingo.mx/revistas/phpscript/download.php?file=completo&id=NzQ1>

5. CONCLUSIÓN GENERAL

El estado actual de los modelos biométricos en el estado de Hidalgo, refleja una polarización de la investigación hacia el aprovechamiento forestal en una sola especie. Sin embargo, existen especies de importancia económica que deberían ser estudiadas.

Por la cantidad de modelos reportados, se sugiere verificar, validar y actualizar los modelos biométricos ya existentes, para corroborar la vigencia de los modelos e incorporarlas al manejo forestal. Se debe explorar también, si con el número de modelos generados hasta ahora, se ha logrado satisfacer la demanda de los usuarios, pues se encontró, que para la especies de interés económico, no se ha sido suficiente.

Es importante indagar sobre criterios de selección de modelos con significado biológico, económico o de manejo para tener confiabilidad al momento de elegir al mejor modelo para utilizar en campo, pues hasta ahora, se ha realizado usando principalmente el coeficiente de determinación (R^2).

En el ejemplo, el modelo australiano de Stoate, el modelo de Schumacher-Hall y el modelo no lineal de la variable combinada fueron las más robustas. Sin embargo, para los usuarios, el modelo más adecuado, depende de su capacidad en la estimación del volumen, por esta razón, es posible utilizar cualquiera de los tres modelos en la estimación de volumen fuste total en esas condiciones.

6. ANEXO I

Código en R para efectuar la validación del modelo de Schumacher (Modelo 1, cuadro 1).

```
suppressWarnings(suppressMessages(library(dplyr)))
BDN<-c()
  Dn<-runif(60,10,70)
  H=12.25143+Dn*0.31378
  Datos<-as.data.frame(cbind(Dn,H))
  Datos1<-as.data.frame(cbind(Dn,H))
  #Volumenes
  #Modelo de Schumacher
  a=0.000024813
  b=1.685697526
  c=1.368561449
  Datos$E<-rnorm(60,0,0.008348)
  Datos$VE1=a*((Datos$Dn)^b)*(Datos$H^c)
  Datos1$VR1=a*((Datos$Dn)^b)*(Datos$H^c)+Datos$E
  #Modelo aritmetico (lineal) de la variable combinada
  b0=0.010424
  b1=0.000034
  Datos$E<-rnorm(60,0,0.0314)
  Datos$VE2=b0+(b1*((Datos$Dn)^2)*Datos$H)
  Datos1$VR2=b0+(b1*((Datos$Dn)^2)*Datos$H)+Datos$E
  #Modelo aritmetico (lineal) Australiana
  b0=-0.05359
  b1=-0.00006
  b2=0.004262
  b3=0.000035
  Datos$E<-rnorm(60,0,0.0316)
  Datos$VE3=b0+(b1*((Datos$Dn)^2))+(b2*Datos$H)+(b3*((Datos$Dn)^2)*Datos$H)

  Datos1$VR3=b0+(b1*((Datos$Dn)^2))+(b2*Datos$H)+(b3*((Datos$Dn)^2)*Datos$H)+Datos$E
  #Modelo aritmetico (lineal) del coeficiente morfico
  b1=0.000034
  Datos$E<-rnorm(60,0,0.0312)
  Datos$VE4=b1*((Datos$Dn)^2)*Datos$H
  Datos1$VR4=b1*((Datos$Dn)^2)*Datos$H+Datos$E
  #Modelo logaritmico (no lineal) Schumacher-Hall
  b0=-10.264
  b1=1.915849
  b2=1.089547
  Datos$E<-rnorm(60,0,0.0314)
  Datos$VE5=exp(b0)*((Datos$Dn)^b1)*((Datos$H)^b2)
  Datos1$VR5=exp(b0)*((Datos$Dn)^b1)*((Datos$H)^b2)+Datos$E
  #Modelo logaritmico (no lineal) de la variable combinada
  b0=0.000039
  b1=0.987297
  Datos$E<-rnorm(60,0,0.0313)
  Datos$VE6=b0*(((Datos$Dn)^2)*(Datos$H))^b1
  Datos1$VR6=b0*(((Datos$Dn)^2)*(Datos$H))^b1+Datos$E
  #####Modelo logaritmico de la variable combinada
```

```

b0=-9.7688
b1=0.9451
Datos$E<-rnorm(60,0,0.020919)
Datos$VE7=exp(b0)*((Datos$Dn)^2*Datos$H)^b1
Datos1$VR7=exp(b0+Datos$E)*((Datos$Dn)^2*Datos$H)^b1
#Sin nombre Tenorio Galindo
b0=2.3088
b1=8.19451
Datos$E<-rnorm(60,0,0.041461)
Datos$VE8=exp((b0*log(Datos$Dn))-b1)
Datos1$VR8=exp((b0*log(Datos$Dn))-b1)+Datos$E
#Modelo de la variable combinada
b0=0.083638764
b1=0.318479436
Datos$E<-rnorm(60,0,0.067260752)
Datos$VE9=b0+(b1*(((Datos$Dn)/100)^2)*Datos$H)
Datos1$VR9=b0+(b1*(((Datos$Dn)/100)^2)*Datos$H)+Datos$E

Datos_0<-Datos[1:2]
Datos_1<-Datos[4:12]
Datos_2<-Datos1[3:11]
Datos<-cbind.data.frame(Datos_0,Datos_1,Datos_2)
BDN<-rbind(BDN,Datos)
rm(Datos,Datos1,Datos_0,Datos_1,Datos_2)

regresion1 <- lm(VR1 ~ 0 + VE1, data = BDN)
regresion2 <- lm(VR1 ~ 0 + VE2, data = BDN)
regresion3 <- lm(VR1 ~ 0 + VE3, data = BDN)
regresion4 <- lm(VR1 ~ 0 + VE4, data = BDN)
regresion5 <- lm(VR1 ~ 0 + VE5, data = BDN)
regresion6 <- lm(VR1 ~ 0 + VE6, data = BDN)
regresion7 <- lm(VR1 ~ 0 + VE7, data = BDN)
regresion8 <- lm(VR1 ~ 0 + VE8, data = BDN)
regresion9 <- lm(VR1 ~ 0 + VE9, data = BDN)

plot(BDN$VR1, BDN$VE1, xlab = "Eje X", ylab="Eje Y", main="MODELO 1", col="white")
abline(regresion1,col = "black")
abline(regresion2,col = "red")
abline(regresion3,col = "orangered")
abline(regresion4,col = "blue")
abline(regresion5,col = "green")
abline(regresion6,col = "purple")
abline(regresion7,col = "brown")
abline(regresion8,col = "deeppink")
abline(regresion9,col = "gold")

#Regresiones
summary(regresion1)
summary(regresion2)
summary(regresion3)
summary(regresion4)
summary(regresion5)
summary(regresion6)
summary(regresion7)
summary(regresion8)
summary(regresion9)

```