



Avances y perspectivas en la modelación aplicada a la planeación forestal en México

Advances and perspectives in modeling applied to forest planning in Mexico

Wenceslao Santiago-García^{1*}, Gregorio Ángeles-Pérez², Gerónimo Quiñonez-Barraza³, Héctor Manuel De los Santos-Posadas² y Gerardo Rodríguez-Ortiz⁴

¹ Universidad de la Sierra Juárez. División de Estudios de Postgrado. Instituto de Estudios Ambientales. Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.

² Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Ciencias Forestales. Texcoco, Estado de México, México.

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valle del Guadiana. Durango, Durango, México.

⁴ Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Xoxocotlán, Oaxaca, México.

* Autor de correspondencia. wsantiago@unsij.edu.mx

RESUMEN

En el ámbito forestal existe una larga historia en la parametrización y uso de modelos para cuantificar y predecir el crecimiento y rendimiento de las masas forestales, como un requisito fundamental para optimizar la aplicación de la silvicultura y el manejo forestal sustentable. La situación en México en el uso y generación de modelos ha avanzado de manera importante en los últimos años, lo que ha resultado en la constante generación de herramientas biométricas para la implementación de sistemas de planeación y ejecución de programas de manejo forestal. Sin embargo, aún existe la necesidad apremiante de generar herramientas biométricas para optimizar los procesos de planeación y aprovechamiento de los recursos forestales. Actualmente, se tiene un acervo importante de modelos para fines diversos, desde modelos de volumen, modelos de ahusamiento, sistemas compatibles ahusamiento-volumen, modelos de altura-diámetro, de clasificación de la productividad de terrenos forestales, de biomasa, carbono y contenido nutrimental de ecosistemas, de control de la densidad, de totalidad del rodal, de distribución diamétrica y de árbol individual. Dado el entorno dinámico que implica modelar procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento forestal que involucran variables biológicamente más realistas, aún queda mucho por hacer en la modelación forestal. Sin embargo, se han dado pasos importantes en el establecimiento de sitios permanentes para la medición periódica del crecimiento y cambios estructurales de los rodales forestales, y aunado a la formación de especialistas en biometría y diseminados a lo largo del país, hacen que para un futuro cercano se pronostiquen avances importantes en esta área.

PALABRAS CLAVE: biometría forestal, cambio climático, manejo forestal, modelos de crecimiento, silvicultura.

ABSTRACT

In forestry there is a long history in the parameterization and use of models to quantify and predict the growth and yield of forest stands, as a fundamental requirement to optimize the application of silvicultural practices for sustainable forest management. The status of Mexico on the use and parameterization of forest models shows significant advances in recent years, which has resulted in the constant generation of biometric tools for the implementation of planning systems and forest management plans. Nevertheless, there is still an urgent need to generate biometric tools to optimize the processes of planning and utilization of forest resources. Currently, in Mexico there is an important collection of models for various purposes, such as volume models, taper models, compatible taper-volume systems, height-diameter models, site index models, biomass, carbon and nutrient content of ecosystems, density management; whole-stand, diameter distributions and individual tree growth models. Given the dynamic environment that involves using biologically more realistic variables to model physiological processes related to forest growth, much remains to be done in forest modeling in Mexico. However, important steps have been taken in the establishment of permanent sampling plots for the periodic measurement of forest growth, and the characterization of structural changes of forest stands. These, coupled with capacity building in biometrics and modeling throughout the country, make it possible to prognosticate important advances in this area in the near future.

KEYWORDS: forest biometrics, climate change, forest management, growth models, silviculture.

INTRODUCCIÓN

Una planificación eficiente del manejo forestal sustentable requiere proyecciones confiables de crecimiento y rendimiento maderable. Estas estimaciones están fuertemente ligadas a dos factores: i) la adecuada medición de las variables forestales relevantes (variables de estado como área basal, volumen, altura dominante, distribución de diámetros, edad de los rodales, entre otras) y ii) los modelos que aplicados a estas variables de estado permiten estimar la condición actual y futura del bosque bajo manejo. En muchas situaciones, se requieren modelos sencillos que describan el curso de variables de rodal en el tiempo. Sin embargo, en bosques con manejo intensivo (que implica además una inversión considerable de capital humano y financiero), es relevante contar con sistemas de modelación de crecimiento y rendimiento para predecir el comportamiento de rodales en condiciones de manejo y regímenes silvícolas diferentes (García, 1994; Vanclay, 1994).

La forma del fuste de los árboles, por otra parte, se ha demostrado que tiende a modificarse con la silvicultura, específicamente con los tratamientos intermedios (aclareos o selecciones individuales). En rodales naturales y plantaciones con manejo intensivo los árboles presentan una forma más cilíndrica, por tanto, tienen mayor concentración de volumen con respecto a rodales naturales con manejo extensivo (Hernández, De los Santos, Ángeles, Valdez y Volke, 2013; Uranga-Valencia, De los Santos-Posadas, Valdez-Lazalde, López-Upton y Navarro-Garza, 2015). Por lo anterior, resulta necesario utilizar modelos precisos que permitan conocer el crecimiento de las masas forestales y la distribución de los productos maderables para las especies de interés comercial en el país, ya sea coníferas o latifoliadas y que puedan ser implementados en la elaboración de programas de manejo forestal (PMF).

El proyecto denominado “Sistema Biométrico para la Planeación del Manejo Forestal Sustentable de los Ecosistemas con Potencial Maderable en México [SiBiFor]”, buscó generar, validar y calibrar modelos de volumen y crecimiento por región (Unidad de Manejo

Forestal [Umafor]) y especies forestales de interés comercial para los ecosistemas con potencial de producción maderable (templado frío y selvas), en los estados con mayor producción maderable del país. El proyecto se desarrolló en los estados de Chihuahua, Durango, Jalisco, Oaxaca, Michoacán, Estado de México, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Guerrero y Tlaxcala. Estos modelos son la base para los nuevos PMF maderable en dichos estados (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2015). El proyecto SiBiFor se enmarcó en la Estrategia Nacional de Manejo Forestal Sustentable para el Incremento de la Producción y Productividad [Enaipros], la cual surgió debido a la necesidad de satisfacer los criterios e indicadores de sustentabilidad del manejo forestal.

En un país con una gran diversidad de ecosistemas forestales como México, es indudable que se requieren herramientas y esquemas de planificación más eficientes para el uso y aprovechamiento de los recursos forestales. La estimación adecuada de las existencias maderables, la distribución potencial de los productos maderables y de la capacidad de producción de materias primas es fundamental para establecer criterios silvícolas de planeación a corto y largo plazo. En el país, los bosques cubren 65 millones de hectáreas, aproximadamente una tercera parte del territorio nacional, de estos, los bosques templados abarcan 51%, y el remanente 49% está cubierto por bosques tropicales (Torres-Rojo, Moreno-Sánchez y Mendoza-Briseño, 2016), y se tiene un potencial de productividad alta en 15 millones de hectáreas. Este ensayo centra la atención en i) presentar antecedentes en la construcción y uso de modelos de alusamiento-volumen y modelos de crecimiento en México, ii) discutir la situación actual de la modelación forestal en México, y iii) describir las tendencias y perspectivas de la modelación forestal en México y la situación en el contexto global.

ANTECEDENTES

El origen de la metodología para estimar los volúmenes que en conjunto sustentan los árboles de una determinada masa forestal o rodal, se remonta a más de 200 años de antigüedad. Quien recibe el crédito de haber elaborado la



primera tabla “moderna” de volúmenes fue Heinrich Cotta en 1804, la cual fue desarrollada en Alemania para la cubicación de *Fagus sylvatica* (De los Santos, 1976; Romahn y Ramírez, 2006; Acosta y Carrillo, 2008). Para el caso de México, los primeros estudios reportados fueron los de Martínez (1937), quien elaboró tablas de volumen para árboles de pino colorado, pino blanco y pino ayacahuite, calculados para categorías diamétricas de 5 cm y alturas de 2 m.

A lo largo de la historia forestal de México, los trabajos para generar tablas de volumen en coníferas y latifoliadas han sido importantes para la ejecución del manejo forestal. A mediados de los 70's se presentaron ecuaciones de volumen con y sin corteza para especies tropicales de la península de Yucatán (De los Santos, 1976); en 1985 se publicaron las tablas de volumen desarrolladas durante el inventario forestal del estado de Oaxaca (Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos [SARH], 1985). Paralelamente, Jiménez (1988) elaboró tablas de volúmenes para *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *P. teocote* Schlehd. et Cham., en una fracción de la Sierra Madre Oriental en el Noreste de México; Castellanos, Ruíz, Gómez y Santiago (1994) construyeron tablas de volumen para siete especies de *Pinus* en la Sierra Norte de Oaxaca. Por otra parte, Velasco, Madrigal, Vásquez, Moreno y González (2007) elaboraron tablas de volumen fustal para *P. douglasiana* Martínez y *P. pseudostrobus* Lindl. del suroccidente de Michoacán; Acosta y Carrillo (2008) elaboraron una tabla de volumen total con y sin corteza para *P. montezumae* Lamb., en el estado de Hidalgo; Tapia y Návar (2011) ajustaron y validaron ocho modelos de volumen para *P. pseudostrobus* Lindl. de una fracción de la Sierra Madre Oriental de Nuevo León; Ramírez-Martínez, Santiago-García, Quiñonez-Barraza, Ruiz-Aquino, y Martínez-Antúnez (2016) generaron tablas de volumen para fuste total con y sin corteza de *P. ayacahuite* Ehren., en bosques de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, y más recientemente, Rodríguez-Justino (2017) ajustó modelos para calcular volumen total árbol y volumen fustal con y sin corteza para *P. patula* Schiede ex Schlehd. & Cham. y *P. pseudostrobus* Lindl. que crecen en rodales mezclados de estos mismos bosques.

En el caso de los modelos de ahusamiento, estos se han utilizado a nivel mundial desde hace varias décadas (Tapia y Návar, 1998). Sin embargo, en México recientemente se han incorporado al manejo forestal a nivel de especie y uso regional (Vargas-Larreta *et al.*, 2017). Estas funciones son más avanzadas y de mayor utilidad que las ecuaciones clásicas de volumen, porque ofrecen la posibilidad de estimar la distribución de productos comerciales a diferentes alturas y diámetro de punta de los árboles en pie (Hernández *et al.*, 2013; Vargas-Larreta *et al.*, 2017).

Los estudios sobre modelos de ahusamiento son diversos, a partir de mediados de la década de los 90's comenzó el desarrollo de modelos más intensivo en México, sobre todo para especies de coníferas. Návar, Domínguez, Contreras y Estrada (1997) realizaron ajustes de siete modelos de ahusamiento a los perfiles fustales de *Pinus hartwegii* Lindl., del Noreste de México. Por su parte, Corral, Návar y Fernández (1999) realizaron el ajuste de funciones de ahusamiento a los perfiles fustales de cinco pináceas de la región de El Salto, Durango. Maldonado-Ayala y Návar (2000) ajustaron funciones de ahusamiento de cinco especies de pino en plantaciones en la región de El Salto, Durango. Rentería, Ramírez y Zamudio (2006) publicaron un sistema de cubicación para *P. cooperi* Blanco mediante ecuaciones de ahusamiento en San Dimas, Durango. Pompa y Solís (2008) presentaron ecuaciones de volumen y ahusamiento para el género *Quercus* en la región noroeste de Chihuahua. Pompa, Corral, Díaz y Ramírez (2009) realizaron un estudio sobre ahusamiento para *P. arizonica* Engelm. en el Suroeste de Chihuahua. Asimismo, Tapia y Návar (2011) trabajaron en el ajuste de modelos de volumen y funciones de ahusamiento para *P. pseudostrobus* Lindl., en bosques de pino de la Sierra Madre Oriental de Nuevo León. En tanto que, Ramírez-Martínez, Santiago-García, Quiñonez-Barraza, Ruiz-Aquino y Antúnez (2018) ajustaron cinco modelos de ahusamiento puro para modelar el perfil y volumen fustal de *P. ayacahuite* Ehren., de bosques mezclados de Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

En cuanto a modelos segmentados de ahusamiento-volumen, es decir, modelos que tienen la capacidad de diferenciar las formas dendrométricas de los árboles

(cambio de neiloide a paraboloide y de paraboloide a cono), Tamarit *et al.* (2013) construyeron un sistema de cubicación de árbol individual para plantaciones de *Tectona grandis* L. f. en el sureste mexicano, integrado por modelos de volumen total y volumen comercial variable. Hernández *et al.* (2013) generaron funciones de ahusamiento y volumen comercial para *P. patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. Quiñonez-Barraza, De los Santos-Posadas, Álvarez-González y Velásquez-Martínez (2014) construyeron sistemas compatibles de ahusamiento y volumen comercial como ecuaciones simultáneas para cinco especies de *Pinus* en un predio de Durango, México. Uranga-Valencia *et al.* (2015) estimaron el volumen total y comercial en pie de plantaciones de *P. patula* localizadas en Zacualpan, Veracruz, y compararon el ahusamiento-volumen con dos poblaciones de *P. patula* procedentes de bosques naturales, localizadas en Zacualtipán, Hidalgo, y en el Ejido El Carrizal municipio de San Pedro Yolox, distrito de Ixtlán de Juárez, Oaxaca; y además analizaron cómo influyen los sistemas silvícolas en el factor de forma del árbol para las tres poblaciones. Asimismo, Ramírez-Martínez, Santiago-García, Quiñonez-Barraza, Ruiz-Aquino y Rodríguez-Ortiz (2016) ajustaron tres modelos compatibles segmentados de ahusamiento-volumen comercial para estudiar los cambios de forma del fuste y el volumen comercial de *P. ayacahuite* Ehren, de rodales mezclados de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Hernández *et al.* (2018) obtuvieron un sistema compatible de ahusamiento-volumen comercial para *Swietenia macrophylla* King en bosques tropicales de Quintana Roo, en tanto que, Martínez-Ángel, De los Santos-Posadas, Fierros-González, Cruz-Cobos y Quiñonez-Barraza (2019) obtuvieron un sistema de cubicación para *P. chiapensis* (Martínez) Andresen en una plantación forestal comercial en Tlatlauquitepec, Puebla, a partir de funciones segmentadas compatibles de ahusamiento-volumen. Últimamente, Quiñonez-Barraza, Zhao y De los Santos-Posadas (2019) compararon 10 sistemas compatibles de ahusamiento y volumen basados en razón de volumen total y comercial con un sistema segmentado para 5 especies comerciales de Durango.

En el caso de los modelos de crecimiento y rendimiento forestal, los primeros estudios datan de la década de los 70's. En 1976 se construyó la primera tabla de rendimiento normal para rodales de *Pinus hartwegii* Lind., de Zoquiapan, México; en 1977 se publicó una metodología para construir tablas de producción preliminares; y en 1979 se dieron a conocer resultados de la simulación de algunos parámetros de crecimiento para rodales naturales de *P. douglasiana* Martínez de Atenquique, Jalisco (Rivero y Zepeda, 1990). En 1984 se realizó una tabla empírica de producción para rodales naturales de *P. montezumae* Lamb., del Campo Experimental Forestal San Juan Tetla, Puebla (Carrillo, 1984), y una serie de tablas de rendimiento para *P. hartwegii* Lind., de Zoquiapan, México (Torres, 1984).

Con respecto a modelos de predicción del rendimiento maderable como sistemas de ecuaciones, en 1981 se generó el primer modelo y se incorporó a un sistema de cómputo, que permitió estimar el comportamiento probable de las poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lind., de Zoquiapan, México, sujetas a prescripciones silvícolas distintas (Sarukhan y Franco, 1981). En 1984 se construyó un modelo compatible para masas coetáneas naturales de *P. patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., de la región de Perote, Veracruz (Aguirre, 1984). En 1985 se adecuó el modelo PROGNOSIS para *P. ponderosa* var. *arizonica* Shaw, que crece en rodales naturales del estado de Chihuahua (Zepeda, 1992). Algunos otros autores entre ellos Nevárez (1986) e Islas (1987) programaron modelos para obtener simuladores silvícolas. Por otra parte, Torres (1987) construyó un modelo compatible de totalidad del rodal para *Pinus hartwegii* Lind., en Zoquiapan, México. Rodríguez (1987) estudió el efecto de la densidad sobre el crecimiento de *P. montezumae* Lamb. de Puebla y cuantificó relaciones alométricas de algunas variables dasométricas. En tanto que, Castillo (1988) y Fierros (1989) generaron un sistema de estimación de producción neta y modelos de estimación del incremento y rendimiento en rodales de *P. caribaea* var. *bondurensis* Barr. et Golf. de “La Sabana” en Oaxaca. En 1989 se generó el “Simulador Silvícola Atenquique”. En 1990 en el marco del convenio de intercambio técnico en materia forestal entre México y Finlandia, y como parte de



los trabajos del sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola (Sicodesi), se propuso un modelo de árbol individual independiente de la distancia (Zepeda, 1992). Zepeda (1990) construyó un modelo de estimación del incremento y rendimiento maderable independiente de la distancia para *Pinus patula* de Perote, Veracruz. Acosta (1991) preparó un modelo de estimación del incremento y rendimiento maderable para *P. montezumae* Lamb. de San Juan Tetla, Puebla. Zepeda y Domínguez (1998) generaron un modelo de crecimiento para evaluar los niveles de incremento y rendimiento maderable de poblaciones naturales de *Pinus arizonica* Engl., de El Poleo, Chihuahua. De la Fuente *et al.* (1998) propusieron un modelo de crecimiento y rendimiento para *Pinus rufa* Endl., que crece en rodales de Pueblos Mancomunados, Ixtlán, Oaxaca. El desarrollo de Sistemas de Crecimiento y Rendimiento Maderable (SCRMs) ha adquirido mayor importancia en los últimos 20 años en México, sobre todo para masas naturales coetáneas y plantaciones cuyo fin es la producción de madera con turnos silvícolas más cortos (Valdez y Lynch, 2000; Zepeda y Acosta, 2000; Maldonado y Návar, 2002; Galán, De los Santos y Valdez, 2008; Magaña, Torres, Rodríguez, Aguirre, y Fierros, 2008, Santiago-García *et al.*, 2017).

DESARROLLO DE LA MODELACIÓN FORESTAL

Fundamentos de la modelación forestal

La mayoría de los autores, cuando se refieren a la modelación matemática, lo hacen como el proceso que utiliza conceptos y técnicas esencialmente matemáticas, para el análisis de situaciones reales (Bassanezi y Biembengut, 1997). En la modelación forestal el objetivo es formular un modelo matemático capaz de representar la biometría del proceso de crecimiento de un árbol o rodal. Es un proceso complejo que demanda la comprensión no sólo de aspectos matemáticos sino también de un entendimiento de la dinámica del rodal y de los procesos ecofisiológicos que rigen el crecimiento de los árboles, de tal modo que sea posible obtener un modelo realista.

En general, un modelo es una representación simplificada de algún aspecto de la realidad y tiene un propósito en particular. García (1994) menciona que se pueden plantear modelos en forma verbal, por ejemplo, la descripción en palabras del funcionamiento de alguna máquina. Un modelo matemático es como un modelo verbal, pero expresado en lenguaje matemático, con la ventaja de que el lenguaje matemático es más conciso y menos ambiguo. Para construir un modelo se debe tener claridad de la dinámica del proceso que se pretende representar.

Los modelos de volumen, de ahusamiento puro, segmentados y no segmentados constituyen herramientas para cuantificar de manera objetiva el volumen maderable y la distribución de productos de árboles en pie. Un modelo de ahusamiento “puro” permite determinar el volumen hasta un determinado diámetro de punta en el fuste o a una determinada altura comercial (Demaerschalk, 1972; Trincado, Gadow y Sandoval, 1997). La mayoría de las ecuaciones de ahusamiento pueden ser convertidas a funciones de volumen compatibles. La función de ahusamiento compatible tiene la propiedad de que el volumen total obtenido por la integración de esta debe dar exactamente el mismo volumen total estimado por la función de volumen. Cao, Burkhart y Max (1980) mencionan que las funciones de ahusamiento compatibles han sido utilizadas para la estimación de volúmenes comerciales, con un nivel de precisión alto. Por otra parte, los modelos segmentados consideran la premisa de que el fuste del árbol se puede dividir en las formas de los cuerpos dendrométricos: neiloide en la parte basal, cilindro o paraboloide en la sección central y cono en la parte superior. Cada sección se une imponiendo condiciones de continuidad de la curva, con lo que se tienen puntos de inflexión o unión en las diferentes formas que componen el fuste del árbol (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009). Estos modelos permiten estimar el volumen comercial y total de fuste, de lo que resulta una ventaja adicional; la de conformar un sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial; puesto que al compartir los mismos parámetros pueden ajustarse mediante regresión de manera

simultánea (Tamarit *et al.*, 2013) y la optimización en el ajuste es más precisa. Por otra parte, están los modelos de razón de volumen comercial y volumen total, los cuales se diferencian para representar una ecuación de ahusamiento y conformar un sistema compatible algebraicamente completo (Zhao *et al.*, 2019; Quiñonez-Barraza *et al.*, 2019). Estos sistemas presentan estructuras matemáticas más simples y sencillas para aplicar en el manejo forestal.

Los modelos de crecimiento y rendimiento forestal representan abstracciones de la dinámica natural de los bosques, basados en relaciones funcionales entre la magnitud del crecimiento y los factores o variables que explican dicho crecimiento. Estos modelos generalmente se refieren a un sistema de ecuaciones que permiten predecir el crecimiento y rendimiento maderable de un rodal bajo una variedad de condiciones (Vanclay, 1994). El sistema comprende los valores numéricos de dichas ecuaciones, la lógica necesaria para relacionarlas de un modo coherente y el código de programación requerido para implementar el modelo en un simulador (Vanclay, 1994; Crecente-Campo, 2008). En un sentido amplio, el término puede incluir diagramas y tablas de rendimiento, que son análogas a las ecuaciones, pero que han sido formuladas en una forma gráfica o tabular, más que en forma matemática (Davis, Johnson, Bettinger y Howard, 2001).

Un modelo de crecimiento predice valores futuros de variables de interés (salidas), por ejemplo, el volumen de madera, o la cantidad de biomasa o de carbono, en función de variables de entrada (variables de control o entradas) tales como tratamientos silviculturales, y variables de estado del rodal tales como la altura dominante y la edad. Tanto las entradas como las salidas son funciones del tiempo. A grandes rasgos, un estado de un sistema en un instante dado es la información necesaria para determinar el comportamiento del sistema en el futuro. En el enfoque de espacio de estados, se describe el estado del sistema en cada instante, y se modela la tasa de cambio de estado. La descripción del estado debe ser tal que, con suficiente aproximación, los estados futuros queden determinados por el estado actual y las acciones futuras. En la modelación siempre se puede describir un sistema con suficiente detalle

como para determinar su comportamiento futuro o tasa de cambio dentro del nivel de exactitud deseado (Ramírez, Bailey y Bordes 1987; García, 1988; García, 1994).

En el manejo forestal, los modelos de predicción permiten pronosticar el estado actual del rodal y los modelos de proyección el estado futuro, este tipo de modelos integran los SCRM con enfoque dinámico. Estos explican cuantitativamente el crecimiento forestal, reflejado en cambios en la altura dominante, diámetro, área basal, número de árboles, volumen, biomasa, entre otras variables (Santiago-García, De los Santos-Posadas, Ángeles-Pérez, Valdez-Lazalde y Ramírez-Valverde, 2013, Santiago-García *et al.*, 2015). En un sistema cada ecuación describe una relación diferente entre un conjunto de variables, pero se asume que todas las relaciones ocurren simultáneamente (Borders y Bailey, 1986).

La metodología de desarrollo de ecuaciones de diferencia algebraica es la más utilizada cuando se tienen datos de sitios permanentes o de análisis troncales, porque permite generar ecuaciones dinámicas. Estas, también llamadas funciones de transición, describen las tasas de cambio del sistema en cualquier punto del tiempo, en función de su estado actual (Sullivan y Clutter, 1972; Ramírez, Bailey y Borders, 1987; García, 1988; García, 1994).

El método de diferencia algebraica consiste en expresar en forma de diferencia la ecuación que va a ser ajustada. Esta forma de diferencia expresa el valor de alguna variable dasométrica de interés (Y) como una función de la edad de medición (E), de la edad inicial (E_0) y del valor inicial (Y_0) (Clutter, Forston, Pienaar, Brister y Bailey, 1983). En general una ecuación de diferencia algebraica tiene la forma siguiente:

$$Y = f(Y_0, E, E_0, \beta)$$

donde; Y_0, Y son los valores de la variable definida sobre el árbol o rodal en el periodo inicial y final de la medición; E_0, E son las edades del árbol o rodal, correspondientes a los periodos inicial y final, respectivamente, y β es el vector de parámetros de la función.



El principal uso de las ecuaciones dinámicas de crecimiento es la simulación de escenarios de manejo, donde a través de una tabla de rendimiento se muestra el cambio en la magnitud de cada una de las variables dasométricas de interés a medida que cambia la edad, y con ello, es posible representar innumerables combinaciones para el manejo de la densidad y tratamientos silvícolas que pueden ser aplicados en un ciclo de corta o turno (Santiago-García *et al.*, 2015; 2017).

Importancia de los modelos forestales

Los modelos de ahusamiento-volumen o volumen-ahusamiento son herramientas estadísticas importantes en la determinación de volúmenes de árboles y trozas, ya que son necesarias para cuantificar las existencias maderables de un rodal (como la suma de los volúmenes de cada árbol) y para describir la distribución de productos forestales maderables previo a la corta (Pompa y Solís, 2008). Además, permiten estimar tres características básicas de los árboles: diámetro a cualquier altura del fuste, altura a cualquier diámetro predefinido y volumen entre dos alturas (Prodan, Peters, Cox y Real, 1997; Tamarit *et al.*, 2013). Estos modelos además son insumos para construir los SCRMs, y cuando se tiene interés en conocer la distribución de productos a obtener de la simulación de diferentes estrategias de manejo forestal (Prodan *et al.*, 1997).

Hynynen (2011) señala que los modelos de crecimiento y rendimiento forestal son herramientas para apoyar la toma de decisiones en el manejo forestal, porque permiten obtener información sobre el desarrollo futuro de los bosques. En el mejor de los casos, un modelo de crecimiento ofrece de manera concisa, la información relevante sobre las características de crecimiento y comportamiento de las especies de árboles en diferentes condiciones de crecimiento.

En general, los modelos de crecimiento se elaboran para realizar estimaciones confiables del crecimiento y rendimiento futuro; para generar la información necesaria que permita mantener las cosechas dentro de la capacidad natural del bosque y considerando un aprovechamiento

sustentable en el ciclo de corta o turno; para comparar alternativas de manejo que permitan analizar las opciones más adecuadas de uso de la tierra; para determinar la edad óptima de cosecha, la programación de las cortas intermedias, la estimación de la producción anual, periódica o total durante el periodo de rotación y las clases de productos a obtener; para realizar análisis financieros; para explorar alternativas silviculturales; para examinar los impactos del manejo forestal y de la cosecha sobre otros valores del bosque y para determinar un régimen de manejo que maximice el volumen maderable o el valor de la producción (Vanclay, 1994).

Los modelos de crecimiento son las herramientas más importantes para la toma de decisiones en el manejo forestal. En general, los escenarios en la toma de decisiones consideran los resultados de un modelo y esta información se toma como representativa de los sucesos más probables considerando las variables de entrada del modelo. El realismo no es necesariamente una virtud en un modelo de crecimiento, y el uso más útil es para obtener los aspectos relevantes al pronosticar el comportamiento de las variables de interés (García, 1994; Vanclay, 1994).

Tipos de modelos

En el campo forestal existen diferentes enfoques en la concepción y diseño de los modelos al considerar sus objetivos y a la tradición de donde provienen, ya sea la investigación científica o tecnológica. Por un lado, los modelos de ahusamiento-volumen o volumen-ahusamiento, y los modelos de crecimiento y rendimiento orientados a la planeación del manejo forestal (empíricos o instrumentales, “modelos para predicción”) y, por el otro, los modelos basados en procesos biológicos (mecanicistas o explicativos, “modelos para comprensión”) (García, 1994; Vanclay, 1994; Hauhs, 1990; Mohren y Burkhardt 1994).

Los modelos mecanicistas fueron desarrollados con la finalidad de sintetizar la información fisiológica y biogeoquímica a nivel de proceso (también llamados modelos de procesos). Están caracterizados por un fuerte

control de abajo hacia arriba (*bottom-up*) a través de procesos clave bien definidos. Estos procesos, que intervienen en los intercambios de energía, dióxido de carbono y agua entre la planta y la atmósfera generalmente son estudiados bajo condiciones controladas y se escalan hasta el nivel de ecosistema. Los modelos para comprensión son útiles principalmente en investigación para identificar vacíos donde se necesitan más estudios. Los beneficios surgen del desarrollo del modelo, y no tanto de un uso posterior. Pese a que, inicialmente, fueron desarrollados como herramientas de investigación, actualmente hay un interés creciente en la aplicación de estos modelos en el manejo forestal y en la toma de decisiones, especialmente por la capacidad de predicción adaptadas a condiciones ambientales variables como las que se pronostican con escenarios de cambio climático. Ambos enfoques de modelación, mecanicistas y empíricos son necesarios y complementarios: los modelos basados en procesos pueden ayudar a plantear y comprender algunos de los problemas fundamentales de fisiología y ecología forestales, mientras que los modelos empíricos siguen aportando información condensada de los resultados de las prácticas de manejo y en la estimación de existencias y productos forestales maderables (Gracia, Pla, Sánchez y Sabaté, 2004).

Necesidad de datos

Los modelos empíricos de ahusamiento-volumen y los modelos de crecimiento y rendimiento son representaciones estadísticas del desarrollo de un rodal. Los primeros desde el punto de vista estático y los segundos desde un enfoque dinámico. Para desarrollar estos modelos es necesaria la obtención de variables de individuos y de rodales (diámetro normal, altura, edad, número de árboles por hectárea, diámetro cuadrático promedio, área basal, volumen, altura dominante, etc.) en distintas condiciones de productividad de sitio y regímenes de manejo, y a través del tiempo. Hynynen (2011) señala que existen diferentes tipos de datos forestales en función de la utilidad y del fenómeno a explicar. Para propósitos prácticos, los inventarios forestales son la forma más común de obtener

datos del bosque. Para fines de investigación, por lo general se prefieren los datos de unidades de muestreo permanentes, parcelas de intervalo (en las que se hacen sólo dos mediciones en el tiempo), análisis troncales, y los experimentos aplicados. Los datos de inventarios forestales constituyen una muestra grande representativa y objetiva de la superficie forestal inventariada que se utiliza en la evaluación de recursos forestales, generación de PMFs y rara vez son adecuados para modelar la respuesta de diferentes prácticas de manejo, a menos que se tengan varios pasos de inventario. Por otra parte, los datos derivados de un muestreo destructivo del componente estructural de los individuos que componen la vegetación son de utilidad como insumos en la construcción de modelos estáticos que predicen características dadas; por ejemplo, volumen, biomasa y concentración de carbono.

Los experimentos que se establecen con fines de investigación tienen un diseño estadístico que permite el análisis y la comparación de tratamientos silvícolas aplicados. El objetivo del experimento es obtener la respuesta a un tratamiento dado y, al mismo tiempo, minimizar la variación originada por causas diferentes al tratamiento. Este tipo de experimentos son adecuados para evaluar los efectos de las prácticas de manejo forestal, tales como respuesta al espaciamiento, aclareos pre-comerciales y comerciales, fertilización, podas, etc. (Gadow y Bredenkamp, 1992). Las parcelas permanentes implican medir cada cierto tiempo (de 1 a 5 años) durante períodos de plazo largo a todos los individuos dentro de la parcela, las parcelas de intervalo requieren dos mediciones sobre la misma unidad muestral en periodos distintos. Ambas estrategias permiten conocer la tasa de cambio del crecimiento de las masas forestales, y con los datos de análisis troncales es posible reconstruir la dinámica del crecimiento a nivel de árbol individual y rodal. El tamaño de la parcela y un número suficientemente grande de unidades muestrales remediadas en el tiempo, así como datos de análisis troncales de árboles creciendo en diferentes calidades de sitio, permiten la modelación dinámica del crecimiento forestal (Gadow, Sánchez y Álvarez, 2007; Hynynen, 2011).



Los modelos de procesos, por otra parte, utilizan funciones basadas en datos experimentales para una mejor representación teórica de los procesos fisiológicos que determinan el crecimiento de los árboles. En este caso, el crecimiento de un rodal no se modela directamente como función del tiempo, sino que es el resultado de la interacción de distintos procesos fisiológicos con las condiciones meteorológicas y de sitio en un periodo de tiempo determinado. La intención es incluir en forma explícita, relaciones causa-efecto entre variables meteorológicas y de suelo y los procesos fisiológicos que finalmente regulan el crecimiento de los árboles (Flores y Allen, 2004).

Enfoques actuales de la modelación forestal en México

Los retos y necesidades de los silvicultores son cada día mayores por las restricciones ambientales en los sistemas de planeación forestal de largo plazo, y para mejorar la competitividad del sector forestal mexicano (Conafor-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología [Conacyt], 2013). Uno de estos es la necesidad de técnicas precisas que describan los volúmenes y distribución de productos forestales del arbolado en pie, así como el potencial productivo de las masas forestales, como un principio del manejo forestal sustentable. Los PMFs e inventarios forestales se basan en la filosofía operativa de estos conceptos. De tal manera que los modelos de ahusamiento-volumen definen objetivamente el volumen y la distribución de productos de los fustes de árboles (Corral-Rivas y Návar, 2009). Por su parte, los modelos de altura dominante e índice de sitio permiten conocer el nivel de productividad de las masas forestales (Clutter *et al.*, 1983). Por tanto, es importante contar con estas herramientas, fundamentadas en procedimientos matemáticos y estadísticos rigurosos para garantizar la aplicación operativa de acuerdo con los requerimientos que marca la legislación forestal y ambiental vigente (Pompa y Solís, 2008).

Con el desarrollo tecnológico y la evolución de las tecnologías de la información, específicamente el desarrollo computacional y la disponibilidad de programas estadísticos

más potentes, en los últimos años se han generado diferentes funciones de ahusamiento-volumen, sobre todo compatibles, modelos de razón de volumen y de tipo segmentado que estiman de manera simultánea el ahusamiento y el volumen comercial al tomar en cuenta las formas de los cuerpos dendrométricos a los cuales se asemejan las formas de los árboles (Tamarit *et al.*, 2013; Hernández *et al.*, 2013; Uranga-Valencia *et al.*, 2015; Ramírez-Martínez *et al.*, 2016). Asimismo, los modelos dinámicos de crecimiento en altura dominante e índice de sitio dominan la vanguardia de la modelación forestal en México. Con la disponibilidad de datos del proyecto nacional del sistema biométrico, se han construido este tipo de modelos, al utilizar la metodología de diferencia algebraica y en su forma generalizada; esta última representa un enfoque más potente para describir el crecimiento forestal complejo, porque más de un parámetro de crecimiento depende de la calidad de estación (Castillo *et al.*, 2013; Quiñonez-Barraza *et al.*, 2015; Hernández-Cuevas, Santiago-García, De los Santos-Posadas, Martínez-Antúnez y Ruiz-Aquino, 2018; Castillo-López *et al.*, 2018) y se pueden variar las potencialidades de crecimiento de los rodales y las tasas de crecimiento de manera simultánea. Lo anterior implica que, en cada sitio o rodal, el modelo puede describir las tasas de crecimiento y el crecimiento potencial a una edad de referencia o edad base.

Los patrones de crecimiento se usan para evaluar de manera cuantitativa y simplificada el conjunto de factores bióticos y abióticos que influyen sobre la productividad del rodal (calidad de estación). El desarrollo de curvas nuevas puede mejorar la habilidad de predecir la altura dominante, al permitir obtener proyecciones de la producción cada vez más precisas para las especies de interés comercial (Vargas-Larreta, Aguirre-Calderón, Corral-Rivas, Crecente-Campo y Diéguez-Aranda, 2013). Por tanto, una correcta predicción de la altura dominante basada en modelos dinámicos de índice de sitio, no sesgados y precisos, permiten definir estrategias de manejo y son esenciales para construir SCRM's (Vargas-Larreta *et al.*, 2013, Hernández-Cuevas *et al.*, 2018).

La conversión de un modelo de crecimiento en un sistema de cómputo para representar de forma interactiva situaciones diferentes en un rodal, resulta en el desarrollo de un simulador de crecimiento (Santiago-García, 2013). Actualmente, algunos modelos de crecimiento forestal han pasado a simuladores: SICREMARS, SIFOR-DGO, BWINPro7 versión El Salto, Durango, SiCrepp, y SIPLAFOR (Valles, 2006a, 2009b; Vargas-Larreta, Corral-Rivas, Aguirre-Calderón y Nagel, 2010; Santiago-García, 2013; Corral, Briseño, López, Diéguez y González, 2015). Las funciones básicas de un simulador de crecimiento y su nivel de resolución están determinadas por las predicciones proporcionadas por los modelos de crecimiento, los cuales pueden ser a nivel de rodal, o bien distribuciones de clases diamétricas y de árboles individuales. El tipo de modelo en conjunto con la escala de su aplicación, y los recursos disponibles, son los factores más importantes para considerar en la construcción de un simulador de crecimiento forestal (Vargas, Corral, Cruz, Aguirre y Nagel, 2008).

Tendencias de la modelación forestal y adaptación al cambio climático

El número potencialmente infinito de caminos que pueden seguir los rodales no es enteramente obvio. Aun sin efectos de tratamientos silviculturales, el tratar con desviaciones causadas por el ambiente presenta dificultades conceptuales importantes (García, 1994). Esta situación se ha abordado ampliamente en la investigación forestal y se han generado estrategias que permiten acortar la brecha entre los modelos de procesos y los modelos alométricos empíricos destinados al manejo forestal (Woollons, Snowdon y Mitchell, 1997; Snowdon, Jovanovic y Booth, 1998; Ung *et al.*, 2001; Zhang y Borders, 2001; Valentine y Mäkelä, 2005). Los modelos de crecimiento alométricos pueden ser modificados o adaptados en respuesta a otro tipo de necesidades. Por ejemplo, el poder modelar el crecimiento considerando procesos fisiológicos o biogeoquímicos bajo escenarios de cambio ambiental, puede ser una necesidad apremiante en el marco del cambio climático global.

El análisis de los efectos del cambio climático o el balance de carbono en los bosques requiere herramientas capaces de describir las relaciones entre las condiciones ambientales y el crecimiento de los árboles. El desarrollo de modelos híbridos que combinan las ventajas de los modelos de procesos y de los modelos empíricos alométricos ha dado respuesta a esta necesidad (Zhang y Borders, 2001; Valentine y Mäkelä, 2005). Estas herramientas deben permitir, además, la exploración del manejo forestal y el efecto en el crecimiento de árboles. Las combinaciones de estas relaciones permiten establecer proyecciones futuras sobre la respuesta de los bosques frente a los distintos escenarios de cambios ambientales y de manejo (Sabaté, Gracia, Pla, Sánchez y Vayreda, 2004).

Los modelos de crecimiento desarrollados en México podrían ser susceptibles de modificaciones importantes, de tal manera que, ante el cambio climático, fueran modelos funcionales o fisiológicamente realistas para simular el crecimiento de la masa forestal. Por ejemplo, las tasas de crecimiento del rodal podrían formularse a partir de los flujos y balances de agua y carbono, como en el caso del modelo propuesto por Valentine y Mäkelä (2005) o de acuerdo con la partición de biomasa usando datos dendrométricos como en el modelo de Zhang y Borders (2001), además, teniendo en cuenta las condiciones ambientales, la fisiología y la estructura del ecosistema. Pero, llegar a tal nivel de análisis aun requeriría mucha información y sería costoso. No obstante, podría implementarse en los modelos de crecimiento puramente empíricos, algún indicador que permita hacer predicciones de crecimiento con mayores elementos de juicio ante condiciones ambientales cambiantes. Por ejemplo, asociar la respuesta de las variables dasométricas con la cantidad de precipitación, la temperatura promedio, el índice de presión de vapor, los grados-días o alguna otra variable ambiental o edáfica que esté disponible, como en el caso de los modelos de índice de sitio biofísicos desarrollados por Ung *et al.* (2001) o los modelos de Wollons *et al.* (1997) y Snowdon *et al.* (1998). Asociar datos climáticos a los modelos de creci-



miento empíricos puede ser la alternativa mejor para modelar el crecimiento y rendimiento con mayor sensibilidad ante esa dinámica que representa el cambio climático y que acerque a un modelo fisiológicamente más realista.

Las modificaciones a los modelos de crecimiento deben de proveer un marco que sirva como base para modelar algunos procesos y probar hipótesis fisiológicas relacionadas con el crecimiento, usando la información dasométrica del rodal. Considerando lo anterior y sin perder de vista el motivo que dio origen a los modelos de crecimiento instrumentales, una forma de mejorar los vínculos de estos modelos empíricos a los factores climáticos y edáficos (o biofísicos) que determinan la productividad de un sitio podría ser a través del uso de variables biofísicas (Ung *et al.*, 2001) tales como: grados-día (DD), índice de aridez (AI), precipitación (PRE), déficit de presión de vapor acumulado en la estación de crecimiento (VPD), capacidad de retención de humedad del suelo (W), disponibilidad de nitrógeno, tasas de fotosíntesis, entre otros. De esta manera pueden plantearse funciones de crecimiento, tales como un modelo de índice de sitio biofísico (Ung *et al.*, 2001):

$$IS_{BIO} = C_0 f_{DD} f_{AI} f_{PRE} f_{VPD} f_W$$

donde el parámetro C_0 representa el valor promedio de IS_{BIO} . Este modelo biofísico (IS_{BIO}) es una función (f) de las cuatro variables climáticas y una edáfica. Así, la productividad de los rodales se definiría con este índice biofísico. Al considerar que el IS es la variable predictora más importante del crecimiento y rendimiento forestal, este índice al interrelacionarse con las ecuaciones que componen un SCRM estaría reflejando de una manera más apropiada la productividad del sitio forestal. En este sentido, por usar las variables climáticas y edáficas, el índice de sitio biofísico ofrece el potencial para explicar el crecimiento y el rendimiento, por predecir explícitamente la respuesta del arbolado a la variación ambiental.

CONCLUSIONES

El avance tecnológico, la disponibilidad de paquetes estadísticos potentes, los recursos humanos capacitados en el área de biometría forestal, así como la interacción de profesionales de otras disciplinas han permitido el desarrollo de la modelación forestal en México con diferentes estrategias de modelaje. Por consecuencia se han generado modelos de ahusamiento-volumen y modelos de crecimiento y rendimiento para especies y zonas forestales altamente productivas, sustentados en bases de datos tanto biológica como estadísticamente realistas. Sin embargo, es necesario seguir trabajando en la modelación de la biometría del proceso de crecimiento y en la evaluación de unidades permanentes de investigación silvícola, para que las inferencias estadísticas sobre los procesos de crecimiento y rendimiento puedan apoyarse en explicaciones biológicas más completas, considerando el entorno en cambio constante.

Los modelos de crecimiento y de rendimiento constituyen la herramienta de manejo más poderosa para tomar decisiones, por lo que a través de su uso es posible determinar las estrategias más adecuadas a seguir en el aprovechamiento y conservación de los recursos forestales maderables, tanto en el presente como en el futuro. Por tanto, la generación, validación y calibración de dichos modelos es una necesidad indispensable.

Los modelos de crecimiento basados en procesos fisiológicos representan una oportunidad para la investigación forestal en México, si bien, la capacidad estadística de predicción es menor comparada con los modelos empíricos instrumentales, estos modelos en los años siguientes representarán una necesidad para el manejo forestal en la modificación de sistemas de toma de decisiones, simuladores de crecimiento y planeación del manejo forestal sustentable. Este tipo de modelos es la herramienta que en el presente tenemos para pronosticar el desarrollo de los ecosistemas ante la variabilidad climática que estos experimentan.

REFERENCIAS

- Acosta M., M. (1991). *Modelo de crecimiento para Pinus montezumae Lamb. en el CEF San Juan Tetla, Puebla.* Tesis de maestría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Acosta M., M., & Carrillo A., F. (2008). Tabla de volumen total con y sin corteza para *Pinus montezumae* Lamb. en el estado de Hidalgo. Folleto Técnico No.7. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Campo Experimental Pachuca. Pachuca, Hidalgo. México.
- Aguirre B., C. (1984). *Preliminary growth and yield study of Pinus patula natural stands.* M.S thesis. Colorado State University. Forest and Wood Science Department. Fort Collins. Co. U.S.A.
- Bassanezi, R. C., & Biembengut, M. S. (1997). Modelación matemática: Una antigua forma de investigación-un nuevo método de enseñanza. *Revista de didáctica de las matemáticas*, 32, 13-25.
- Borders, B. E. & Bailey, R. L. (1986). A compatible system of growth and yield equations for slash pine fitted with restricted three-stage least squares. *Forest Science*, 32(1), 185-201. doi: 10.1093/forestscience/32.1.185
- Cao, Q. V., Burkhardt, H. E., & Max, T. A. (1980). Evaluation of two methods for cubic-volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. *Forest Science*, 26(1), 71-80. doi: 10.1093/forestscience/26.1.71
- Carrillo E., G. (1984). *Elaboración de una tabla de producción empírica para rodales de Pinus montezumae Lamb. en el C.E.F. San Juan Tetla, Puebla.* Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Castellanos B., J. F., Ruiz, M. M., Gómez C., M., & Santiago P., L. (1994). Tablas de volúmenes para siete especies de pinos en la Sierra Norte de Oaxaca. Folleto Técnico Forestal No. 3. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Sur. Campo experimental Valles Centrales, Oaxaca, México.
- Castillo L., A., Vargas-Larreta, B. Corral R., J. J., Nájera L., J.A., Cruz C., F., & Hernández, F.J. (2013). Modelo compatible altura-índice de sitio para cuatro especies de pino en Santiago Papasquiaro, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 18(4), 89-103.
- Castillo-López, A., Santiago-García, W., Vargas-Larreta, B., Quiñonez-Barraza, G., Solis-Moreno, R., & Corral-Rivas, J.J. (2018). Modelos dinámicos de índice de sitio para cuatro especies de pino en Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(49). doi: 10.29298/rmcf.v9i49.185
- Castillo S., M. A. (1988). *Modelo para la estimación de incremento y producción maderable neta en Pinus caribea var. hondurensis Barr. & Golf. De la Sabana, Oax.* Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México.
- Clutter, J. L., Forston, J. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H., & Bailey, R. L. (1983). *Timber Management: A Quantitative Approach.* Nueva York, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- Comisión Nacional Forestal [Conafor]. (2015). Estrategia nacional de manejo forestal sustentable para el incremento de la producción y la productividad (Enaipros): Conafor.
- Comisión Nacional Forestal [Conafor]-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología [Conacyt]. (2013). *Fondo sectorial para la investigación, el desarrollo y la innovación tecnológica forestal Conafor-Conacyt.* Sistema Nacional de Gestión Forestal. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Corral R., S., Návar C., J. J., & Fernández S., F. (1999). Ajuste de funciones de ahusamiento a los perfiles fustales de cinco Pináceas de la región de El Salto, Durango. *Madera y Bosques*, 5(2), 53-65. doi: 10.21829/myb.1999.521347
- Corral-Rivas, J. J., Briseño-Reyes, J., López-Sánchez, C. A., Diéguez-Aranda, U., & González- González, J. M. (2015). Sistema de Planeación Forestal para Bosque Templado (SiPlaFor). Innovación Forestal: *Revista Electrónica de Divulgación Científica Forestal.*
- Corral-Rivas, J. J., & Návar C., J. de 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.
- Crecente-Campo, F. (2008). *Modelo de crecimiento de árbol individual para Pinus radiata D. Don en Galicia.* Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. Escola Politécnica Superior. Departamento de Enxeñaría Agroforestal. Lugo, España.
- Davis, L. S., Johnson., K. N., Bettinger, P. S., & Howard, T. E. (2001). *Forest management: To sustain ecological, economic, and social value* (4th ed.). McGraw-Hill series in Forest Resources.
- De la Fuente E., A., Velásquez M., A., Torres R., J. M., Ramírez M., H., Rodríguez F., C., & Trinidad S., A. (1998). Predicción del crecimiento y rendimiento de *Pinus rufa* Endl., en Pueblos Mancomunados, Ixtlán, Oaxaca. *Revista Ciencia Forestal en México*, 23(84), 3-8.
- De los Santos V., M. (1976). *Tablas de volúmenes para montes de la península de Yucatán.* Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Demaerschalk, J. P. (1972). Converting volume equations to compatible taper equations. *Forest Science*, 18(3), 241-245. doi: 10.1093/forestscience/18.3.241



Diéguez-Aranda, U., Rojo A., A., Castedo-Dorado, F., Álvarez G., J. G., Barrio-Anta, M., Crecente-Campo, F., González G., J. M., Pérez-Cruzado, C., Rodríguez S., R., López-Sánchez, C.A., Balboa-Murias, M. Á., Gorgoso V., J. J., & Sánchez R., F. (2009). *Herramientas silvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia*. Universidad de Santiago de Compostela. Galicia, España.

Fierros G., A. M. (1989). *Site quality, growth and yield and growing space occupancy by plantations of Pinus caribaea var. hondurensis in Oaxaca, México*. Ph. D. Dissertation. Yale University Graduate School. U.S.A.

Flores, F. J. & Allen, H. L. (2004). Efectos del clima y capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la productividad de rodales de pino radiata en Chile: un análisis utilizando el modelo 3-PG. *Bosque*, 25(3), 11-24. doi: 10.4067/S0717-92002004000300002

Gadow, K. V., & Bredenkamp, B. V. (1992). *Forest Management*. Pretoria: Academica Press.

Gadow, K. V., Sánchez O., S., & Álvarez G., J. G. (2007). *Estructura y crecimiento del bosque*. Universidad de Göttingen. Göttingen, Alemania.

Galán L., R., De los Santos P., H. M., & Valdez H., J. I. 2008. Crecimiento y rendimiento maderable de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosques*, 14(2), 65-82. doi: 10.21829/myb.2008.1421213

García, O. (1988). Growth modeling—a (re)view. *New Zealand Journal of Forestry*, 33, 14-17.

García, O. (1994). The state-space approach in growth modeling. *Canadian Journal of Forest Research*, 24, 1894-1903. doi: 10.1139/x94-244

Gracia A., C.A., Pla F., E., Sánchez P., A., & Sabaté, S. (2004). GOTILWA+: un modelo de crecimiento forestal basado en procesos ecofisiológicos. *Cuadernos Sociedad Española Ciencias Forestales*, 18, 21-28.

Hauhs, M. (1990). Ecosystem modelling: science or technology? *Journal of Hydrology*, 116, 25-33. doi: 10.1016/0022-1694(90)90113-C

Hernández-Cuevas, M., Santiago-García, W., De los Santos-Posadas, H. M., Martínez-Antúnez, P., & Ruiz-Aquino, F. (2018). Models of dominant height growth and site indexes for *Pinus ayacahuite* Ehren. *Agrociencia*, 52, 437-453.

Hernández P., D., De los Santos P., H. M., Ángeles P., G., Valdez L., J. R., & Volke H., V. H. (2013). Funciones de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus patula* Schldl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(16), 34-45.

Hernández R., J., Hernández R., A., García C., J., Martínez A., L., Tamarit U., J. C., & García E., G. G. (2018). Sistema compatible de ahusamiento-volumen comercial para *Swietenia macrophylla* King (caoba) en Quintana Roo, México. *Madera y Bosques*, 24(3), e2431441. doi: 10.21829/myb.2018.2431441

Hynynen, J. (2011). Conceptos básicos para la modelación del crecimiento forestal. Informe especial Proyecto CapFor. *Revista Recursos Naturales y Ambiente*, 64, 22-27.

Islas G., F (1987). *Un modelo de regeneración y mortalidad para Pinus arizonica Engelm.* Tesis de maestría. Programa Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Jiménez P., J. (1988). *Aufstellung von schafholz-massentafeln und tarifen für Pinus pseudostrobus Lindl. und Pinus teocote Schl. & Cham. in einem teil der Sierra Madre Oriental im Nordosten Mexikos*. Tesis doctoral. Georg-August-Universität, Göttingen. Alemania.

Magaña T., O. S., Torres R., J. M., Rodríguez F., C., Aguirre D., H., & Fierros G., A. M. (2008). Predicción de la producción y rendimiento de *Pinus rufa* Endl., en Aloapan, Oaxaca. *Madera y Bosques*, 14, 5-19. doi: 10.21829/myb.2008.1411214

Maldonado A., D., & Návar C., J. (2002). Ajuste y predicción de la distribución Weibull a las estructuras diamétricas de plantaciones de pino de Durango, México. *Madera y Bosques*, 8(1), 61-72. doi: 10.21829/myb.2002.811306

Maldonado-Ayala, D., & Návar, J. (2000). Ajuste de funciones de ahusamiento de cinco especies de pino en plantaciones en la región de El Salto, Durango, México. *Revista Chapino. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 6(2), 159-164.

Martínez M., J. (1937). Tablas de volúmenes para pino colorado, pino blanco y pino ayacahuite. *Instituto de Enseñanza e Investigaciones Forestales y de Caza y Pesca*. México.

Martínez-Angel, L., De los Santos-Posadas, H. M., Fierros-González, A. M., Cruz-Cobos, F., & Quiñonez-Barraza, G. (2019). Funciones compatibles de ahusamiento y volumen en una plantación forestal comercial de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen en Tlatlauquitepec, Puebla. *Agrociencia*, 53, 381-401.

Mohren, G. M. J., & Burkhart, H. E. (1994). Contrasts between biologically-based process models and management oriented growth and yield models. *Forest Ecology and Management*, 69, 1-5. doi: 10.1016/0378-1127(94)90215-1

Návar Ch., J. J., Domínguez C., P.A., Contreras A., J.C., & Estrada M., C. (1997). Ajuste de siete modelos de ahusamiento a los perfiles fustales de *Pinus hartwegii* Lindl. del Noreste de México. *Agrociencia*, 31, 73-81.

Nevárez Ch., J.D. (1986). *SIMSIL: Un modelo para simular el efecto de determinadas políticas de manejo silvícola en la dinámica de crecimiento de*

- rodales coetáneos de *Pinus douglasiana* Martínez. Tesis de maestría. Centro de Estadística y Cálculo. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Pompa G., M., & Solís M., R. (2008). Ecuación de volumen para el género *Quercus* en la región noroeste de Chihuahua, México. *Quebracho*, 16, 84-93.
- Pompa G., M., Corral R., J. J., Díaz V., M. A., & Martínez S., M. (2009). Función de ahusamiento y volumen compatible para *Pinus arizonica* Engelm. en el Suroeste de Chihuahua. *Revista Ciencia Forestal en México*, 34(105), 119-136.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). *Mensura Forestal*. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. IICA BMZ/GTZ. San José, Costa Rica.
- Quiñonez-Barraza, G., De los Santos-Posadas, H. M., Cruz-Cobos, F., Velázquez-Martínez, A., Ángeles-Pérez, G., & Ramírez-Valverde, G. (2015). Índice de sitio con polimorfismo complejo para masas forestales de Durango, México. *Agrociencia*, 49, 439-454.
- Quiñonez-Barraza, G., De los Santos-Posadas, H. M., Álvarez-González, J. G., & Velázquez- Martínez, A. (2014). Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para las principales especies de *Pinus* en Durango, México. *Agrociencia*, 48, 553-567.
- Quiñonez-Barraza, G., Zhao, D., & De los Santos-Posadas, H.M. (2019). Compatible taper and stem volume equations for five pine species in mixed-species forest in Mexico. *Forest Science*, 66(5), 602-613. doi: 10.1093/forsci/fxz030
- Ramírez M., H., Bailey, R. L., & Borders, B. E. (1987). Some implications of the algebraic difference method approach for developing growth models. In *Forest Growth Modeling and Prediction*. IUFRO. Minneapolis, U.S.A.
- Ramírez-Martínez, A., Santiago-García, W., Quiñonez-Barraza, G., Ruiz-Aquino, F., & Rodríguez-Ortiz, G. (2016). Sistema compatible segmentado de ahusamiento-volumen comercial para *Pinus ayacahuite* Ehren. En F. Gallardo-López (Ed.). *Innovando el Agro Veracruzano 2016. Frente a los retos de la relación Sociedad-Naturaleza* (pp. 639-659). Veracruz, México: Colegio de Postgraduados.
- Ramírez-Martínez, A., Santiago-García, W., Quiñonez-Barraza, G., Ruiz-Aquino, F., & Martínez-Antúnez, P. (2016). Modelos de volumen fustal para *Pinus ayacahuite* Ehren. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 3(2), 61-74.
- Ramírez-Martínez, A., Santiago-García, W., Quiñonez-Barraza, G., Ruiz-Aquino, F., & Antúnez, P. (2018). Modelación del perfil fustal y volumen total para *Pinus ayacahuite* Ehren. *Madera y Bosques*, 24(2), e2421496. doi: 10.21829/myb.2018.2421496
- Rentería A., J. B., Ramírez M., H., & Zamudio S., F. (2006). Sistema de cubicación para *Pinus cooperi* Blanco mediante ecuaciones de ahusamiento en San Dimas, Durango. En *El Sitio Permanente de Experimentación Forestal (SPEF) "Cielito Azul" a 40 años de su establecimiento* (pp. 52-69). Publicación Especial Núm. 23. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.
- Rivero B., D., & Zepeda B., M. (1990). *Principios básicos de regulación forestal*. Serie de apoyo académico No 42. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México.
- Rodríguez F., C. (1987). *Development of a competition index for Pinus montezumae Lamb. in a temperate forest Mexico*. Doctor of Forestry Dissertation. Faculty of the School of Forestry. Yale University. U.S.A.
- Rodríguez-Justino, R. (2017). *Sistemas compatibles de cubicación de árboles individuales para dos especies de interés comercial en Ixtlán de Juárez, Oaxaca*. Tesis de maestría. Universidad de la Sierra Juárez. Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.
- Romahn V., C. F., & Ramírez M., H. (2006). *Dendrometría*. Chapingo, Estado de México, México: División de Ciencias Forestales.
- Sabaté J., S., Gracia A., C. A., Pla F., E., Sánchez P., A., & Vayreda D., J. (2004). Aplicación del modelo Gotilwa+ para el análisis de los efectos del cambio climático y la gestión forestal en el balance de carbono y agua en los bosques. *Cuadernos Sociedad Española Ciencias Forestales*, 18, 13-20.
- Santiago-García, W. 2013. *Simulador de crecimiento para el manejo de rodales coetáneos de Pinus patula*. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México.
- Santiago-García, W., De los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., Valdez-Lazalde, J. R., & Ramírez-Valverde, G. (2013). Sistema compatible de crecimiento y rendimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36, 163-172.
- Santiago-García, W., De los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., Valdez-Lazalde, J. R., Corral-Rivas, J. J., Rodríguez-Ortiz, G., & Santiago-García, E. (2015). Modelos de crecimiento y rendimiento de totalidad del rodal para *Pinus patula*. *Madera y Bosques*, 21(3), 95-110. doi: 10.21829/myb.2015.213459
- Santiago-García, W., Pérez-López, E., Quiñonez-Barraza, G., Rodríguez-Ortiz, G., Santiago-García, E., Ruiz-Aquino, F., & Tamarit-Urias, J. C. (2017). A dynamic system of growth and yield equations for *Pinus patula*. *Forests*, 8(12), 465. doi: 10.3390/f8120465
- Sarukhán K., J., & Franco B., M. (1981). Un modelo de simulación de la productividad forestal de un bosque de pino. SARH-INIF. Unidad de Apoyo Técnico, Serie Premio Nacional Forestal No. 1.



Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos [SARH]. (1985). Inventario Forestal del Estado de Oaxaca. Pub. Esp. Núm. 58. SARH-SFF. México.

Snowdon, P., Jovanovic, T., & Booth, T.H. (1998). Incorporation of indices of annual climatic variation into growth models for *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management*, 117, 187-197. doi: 10.1016/S0378-1127(98)00463-0

Sullivan, A. D. & Clutter, J. L. (1972). A simultaneous growth and yield model for loblolly pine. *Forest Science* 18(1), 76-86. doi: 10.1093/forestscience/18.1.76

Tamarit U., J. C., De los Santos P., H.M., Aldrete, A., Valdez L., J.R., Ramírez M., H., & Guerra De la C., V. (2013). Sistema de cubicación para árboles individuales de *Tectona grandis* L. f. mediante funciones compatibles de ahusamiento-volumen. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(21), 58-78. doi: 10.29298/rmcf.v5i21.358

Tapia, J. & Návar, J. (1998). Ajuste de modelos de volumen y funciones de ahusamiento para *Pinus teocote* en bosques de pino de la Sierra Madre Oriental. *Ciencia e Investigación Forestal*, 12(1), 5-19.

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. *Forest Veracruzana*, 13(2), 19-28.

Torres R., J. M. (1984). *Tablas de rendimiento de densidad variable para Pinus hartwegii Lindl. en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan*, México. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

Torres R., J. M. (1987). *Economics analysis of several alternatives of forest management for Pinus hartwegii*. Master thesis. Oregon State University. U.S.A.

Torres-Rojo, J. M., Moreno-Sánchez, R., & Mendoza-Briseño, M. A. (2016). Sustainable forest management in Mexico. *Current Forestry Reports*, 2, 93-105. doi: 10.1007/s40725-016-0033-0

Trincado, G., Gadow, K. V., & Sandoval, V. (1997). Estimación de volumen comercial en latifoliadas. *Bosque*, 18(1), 39-44.

Ung, C. H., Bernier, P. Y., Raulier, F., Fournier, R. A., Lambert, M. C., & Régniere, J. (2001). Biophysical site indices for shade tolerant and intolerant boreal species. *Forest Science*, 47(1), 83-95. doi: 10.1093/forestscience/47.1.83

Uranga-Valencia, L. P., De los Santos-Posadas, H. M., Valdez-Lazalde, J. R., López-Upton, J., & Navarro-Garza, H. (2015). Volumen total y ahusamiento para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en tres condiciones de bosque. *Agrociencia*, 49(7), 787-801.

Valdez-Lazalde, J. R., & Lynch, T. B. (2000). Merchantable and total volume equations for thinned natural stands of *patula pine*. *Agrociencia*, 34, 747-758.

Valentine, H. T. & Mäkelä, A. (2005). Bridging process-based and empirical approaches to modeling tree growth. *Tree Physiology* 25, 769-779. doi: 10.1093/treephys/25.7.769

Valles G., A. G. (2006). Manual de operación del Simulador de Crecimiento Maderable para la Región de San Dimas, Durango (SICREMARS Versión 2.0). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Durango, México. Folleto Técnico Núm. 27.

Valles G., A. G. (2009). Manual de operaciones del Simulador Forestal Durango (SIFOR-DGO Versión 1.0). Folleto Técnico Núm. 35. Durango, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap)

Vanclay, J. K. (1994). *Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests*. CAB International. Wallingford, UK.

Vargas-Larreta, B., Aguirre-Calderón, O. A., Corral-Rivas, J. J., Crescente-Campo, F., & Diéguez-Aranda, U. (2013). Modelo de crecimiento en altura dominante e índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl. En el noreste de México. *Agrociencia*, 47, 91-106.

Vargas-Larreta, B., Corral R., J. J., Cruz C., F., Aguirre C., O., & Nagel, J. (2008). Uso y aplicación de los simuladores de crecimiento forestal en la toma de decisiones silviculturales. *Revista Forestal Latinoamericana*, 23(2), 33-52.

Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Aguirre-Calderón, O. A., López-Martínez, J. O., De los Santos-Posadas, H. M., Zamudio-Sánchez, F. J., & Aguirre-Calderón, C. G. (2017). SiBiFor: Forest Biometric System for forest management in Mexico. *Revista Chapingo Serie Cienias Forestales y del Ambiente*, 23(3), 437-455. doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.06.040

Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J., Aguirre-Calderón, O., & Nagel, J. (2010). Modelos de crecimiento de árbol individual: Aplicación del Simulador BWINPro7. *Madera y Bosques*, 16(4), 81-104. doi: 10.21829/myb.2010.1641162

Velasco B., E., Madrigal H., S., Vázquez C., I., Moreno S., F., & González H., A. (2007). Tablas de volumen con corteza para *Pinus douglasiana* y *Pinus pseudostrobus* del Sur-Occidente de Michoacán. *Revista Ciencia Forestal en México*, 32(101), 93- 115.

Wollons, R.C., Snowdon, P., & Mitchell, N. D. (1997). Argumenting empirical stand projection equations with edaphic and climatic variables. *Forest Ecology and Management* 98, 267-275. doi: 10.1016/S0378-1127(97)00090-X

Zepeda B., E. M., & Domínguez P., A. (1998). Niveles de incremento y rendimiento maderable de poblaciones naturales de *Pinus arizonica*

- Engl. de El Poleo, Chihuahua. *Madera y Bosques*, 4(1), 27-39. doi: 10.21829/myb.1998.411365
- Zepeda B., E.M. (1990). *Predictor de rendimientos maderables probables de Pinus patula Schiede Deppe de Perote, Ver. México*. Tesis de maestría. Programa Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Zepeda B., E. M. (1992). Modelos para estimar incremento y rendimiento maderable en México; Evolución, situación actual y perspectivas. En M. D. Arteaga, (Ed), *Memoria Primer Foro Nacional sobre Manejo Integral Forestal* (pp. 418-448). Chapingo, México: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Zepeda B., E. M., & Acosta M., M. (2000). Incremento y rendimiento maderable de *Pinus montezumae* Lamb., en San Juan Tetla, Puebla. *Madera y Bosques*, 6(1), 15-27. doi: 10.21829/myb.2000.611339
- Zhang, Y., & Borders, B. E. (2001). An iterative state-space growth and yield modeling approach for unthinned loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management*, 146 (2001), 89-98. doi: 10.1016/S0378-1127(00)00448-5
- Zhao, D., Lynch, T. B., Westfall, J., Coulston, J., Kane, M., & Adams, D. E. (2019). Compatibility, development, and estimation of taper and volume equation systems. *Forest Science*, 65(1), 1-13. doi: 10.1093/forsci/fxy036.

Manuscrito recibido el 22 de julio de 2019

Aceptado el 24 de septiembre de 2019

Publicado el 24 de abril de 2020

Este documento se debe citar como:

Santiago-García, W., Ángeles-Pérez, G., Quiñonez-Barraza, G., De los Santos-Posadas, H. M., & Rodríguez-Ortiz, G. (2020). Avances y perspectivas en la modelación aplicada a la planeación forestal en México. *Madera y Bosques*, 26(2), e2622004. doi: 10.21829/myb.2020.2622004



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C.
se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual
4.0 Internacional.