

NOTA TÉCNICA

Simulación del crecimiento de bosques nativos del Chaco Semiárido. Aplicación del sistema informático MOSIMAFO

Growth simulation in natural forests of Semiárid Chaco. Application MOSIMAFO computer system

Iturre, M. C.¹; P. A. Araujo¹ y C. J. Trejo²

Recibido en abril de 2016; aceptado en marzo de 2017

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue la aplicación de un programa informático para realizar experimentos de simulación basados en la distribución diamétrica. El sistema sirve de apoyo al estudio y manejo de bosques del Chaco Semiárido Santiagueño. El Modelo de Simulación de Manejo Forestal (MOSIMAFO) permite predecir el desarrollo de los parámetros dasométricos que caracterizan al bosque. Un primer prototipo del sistema se implementó utilizando la herramienta EVOLUCION desarrollada por la Universidad Industrial de Santander que permite realizar simulaciones basadas en los principios de dinámica de sistemas. Para su construcción se determinaron previamente los parámetros dasométricos que caracterizan al bosque, las ecuaciones y expresiones matemáticas que posibilitan proyectar la dinámica de la masa forestal. En una segunda etapa se efectuó el análisis y especificación de requisitos, identificándose las necesidades, funcionalidades y características del sistema informático. Se definieron las variables esenciales, sus unidades y el conjunto de ecuaciones que integran el modelo matemático del sistema. Se realizaron distintas ejecuciones del simulador y comprobación de los resultados mediante un análisis de los cambios en la distribución diamétrica, área basal y volumen.

Palabras Claves: Modelo de simulación; Chaco Semiárido; Bosques; Dinámica

ABSTRACT

The objective of the work was the application of software to perform simulation experiments based on the diametric distribution. The computer system serves as a support for the study and management of forests in the Chaco Semiárido Santiagueño. As a result the Forest Management Simulator (MOSIMAFO) computer system was obtained to predict the development of mensuration parameters that characterize a Chaco semiárid forest. A first prototype was implemented using the EVOLUTION tool developed by the Industrial University of Santander that allows simulations based on the principles of system dynamics. To build the system previously determined the dasometric parameters characterizing the forest and equations and mathematical expressions that enable project the dynamics of forests. In a second step the analysis and specification of requirements was made, identifying the needs, capabilities and features of the computer system to develop. The essential variables, their units and the set of equations that make up the mathematical model and entering the system is then defined. Different runs of the simulator and verification of the results was performed by analysis of changes in the diameter distribution, basal area and volume during the simulation.

Key words: Simulation model; Chaco Semiárido; Forests; Dynamic

¹ Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Av Belgrano (s) N° 1912 Santiago del Estero. E-mail: miturre@unse.edu.ar

² Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques son ecosistemas dinámicos en constante cambio. Para la toma de decisiones es necesario proyectar esos cambios. En general la planificación forestal se basa en valores promedio que generan *Tablas* de producción, construidas con datos de inventarios forestales. Sin embargo, es posible mejorar la toma de decisiones cuando se usan modelos de crecimiento que predicen el desarrollo de una masa forestal. Una herramienta adicional son los simuladores de crecimiento (Vargas *et al.*, 2008). Ofrecen una amplia gama de información adicional como la distribución de productos y parámetros estructurales (Diéguez-Aranda, 2004).

Mediante la simulación se puede predecir la dinámica del bosque (crecimiento, mortalidad, sucesión, regeneración) y estimar cual será el rendimiento, la estructura y la composición de especies.

En particular, cuando se estudian los bosques nativos del Chaco semiárido, existe una imposibilidad material de evaluar opciones en forma experimental debido al tiempo que conlleva la dinámica de estos sistemas.

En bosques regulares ese problema se resuelve mediante el uso de *Tablas* de producción basadas en modelos de rendimiento que estiman la producción en función de la edad. Por las características particulares de los bosques irregulares no es posible aplicar ese tipo de modelo, por lo que la simulación constituye una herramienta que puede ayudar en la solución de problemas de Ordenación de bosques irregulares.

La mayoría de los sistemas modernos de simulación tienen su origen en el desarrollo de *Tablas* de producción europeas del siglo XVIII, que derivaron después en modelos de crecimiento para predecir el manejo de bosques coetáneos el siglo pasado (Vargas *et al.*, 2008).

En el caso de bosques irregulares, también hubo un avance en su modelización desde los primeros modelos predictivos de Moser y Hall (1969). Desde entonces se han utilizado para predecir el crecimiento a nivel de árbol individual y de masa.

Simuladores de uso generalizado se han desarrollado en Europa y Estados Unidos, por ejemplo, Forest Vegetation Simulator (FVS) ampliamente aplicado en los Estados Unidos (Dixon, 2002; Salas, 2000). El sistema STAND (Pukkala y Miina, 2006) y BWINPro (Nagel, 1999), fueron aplicados por Vargas *et al.* (2008) en rodales irregulares y mixtos de la región de El Salto, Durango, México.

En bosques tropicales con el programa informático STANDPRO se simuló la evolución de rodales en Sarawak, Malasya, aplicando el concepto de tiempo de paso y cociente de De Liocourt (q) para predecir el movimiento de los árboles a través de las clases diamétricas.

El diámetro es la variable más usada en las decisiones de manejo de bosques irregulares. Por ello los modelos de distribuciones diamétricas se usan para proyectarlos según categorías de tamaño. Constituyen el método clásico para estimar el crecimiento y producción utilizando el incremento en diámetro de los árboles y otras variables referidas a la masa. La mortalidad, ingresos y la corta pueden ser analizados separadamente.

Para la aplicación del método se definen previamente las ecuaciones que estiman las variables y parámetros dasométricos y la forma en que se aplicarán.

Si bien existen estudios importantes sobre los bosques de la ecorregión del Gran Chaco Sudamericano la modelización del crecimiento y producción aún se encuentra en una etapa inicial, principalmente por la falta de inventarios forestales continuos en parcelas permanentes, por lo tanto, el objetivo de este trabajo es presentar el Modelo de Simulación de Manejo Forestal (MOSIMAFO) y su aplicación para predecir como evolucionarían los parámetros de la masa en un bosque del Chaco Semiárido.

2. METODOLOGIA

El primer prototipo del (MOSIMAFO) se implementó utilizando la herramienta “Evolución” desarrollada por la Universidad Industrial de Santander, que permite realizar modelos de simulación basada en los principios de dinámica de sistemas (Trejo, 2003). Este software es un desarrollo colombiano llevado a cabo en el grupo SIMON de Investigación en Modelado y Simulación de la Universidad Industrial de Santander. Es una herramienta creada para la comunidad latinoamericana brindando la posibilidad y flexibilidad de adaptarla a las necesidades específicas de investigación y aplicación en la región (Sosa *et al.*, 2010).

El prototipo final de MOSIMAFO se construyó bajo el lenguaje de programación “Microsoft Visual FoxPro 5.0” el cual permite manipular un entorno visual para interfaces gráficas (Trejo, 2003). Es un sistema basado en un modelo de distribuciones diamétricas, determinístico y dinámico, en el que las variables no están condicionadas a funciones de probabilidad y se incluye la variable tiempo en la simulación (Olivares, 1977).

Las características del bosque se describen por los parámetros dasométricos obtenidos de un inventario forestal continuo en parcelas permanentes. Después de generar una distribución diamétrica virtual el modelo predice los cambios. Los resultados de las simulaciones se analizan como alternativas de las cuales se pueden obtener diferentes distribuciones de diámetros, de área basal y de volúmenes por clases diamétricas.

El Sistema MOSIMAFO requirió la determinación previa de los siguientes parámetros: reclutamiento (Ingresos) definido como el número de individuos que se incorporan a la población; crecimiento de los árboles; número de individuos muertos.

El modelo conceptual responde al principio de distribución balanceada de De Liocourt. En base a la constante q , diámetro mínimo de inventario, diámetro máximo de la distribución y crecimiento diamétrico, se define la distribución ideal que sirve de referencia para determinar la corta por clase diamétrica (Araujo, 2003).

El punto de partida de la simulación es la distribución diamétrica obtenida en el primer inventario del año 1996. Para el crecimiento de los árboles, el área basal y volumen, el simulador utiliza las ecuaciones de la *Tabla 1*.

Tabla 1. Parámetros y ecuaciones usadas en el cálculo del crecimiento, altura y volumen para las especies principales.

Parámetros	Ecuación	Especie	Autor
Crecimiento anual en diámetro	$y = 0,02 + 0,01 * DAP$	<i>A. quebracho blanco</i>	(Araujo <i>et al.</i> 2007)
	$y = 0,1212 + 0,0045 * DAP$	<i>S. lorentzii</i>	
Altura (ht)	$ht = 0,90 + 0,47 * DAP - 0,0049 * DAP^2$	<i>A. quebracho blanco</i>	(Araujo 2003)
	$ht = - 5,77 + 5,50 * \ln DAP$	<i>S. lorentzii</i>	
Volumen (V)	$V = e^{(-10,97613 + 1,11062 * \ln(DAP^2 * ht))}$	<i>A. quebracho blanco</i>	(Araujo 2003)
	$V = 0,000033 * DAP^{2,3455} * ht^{0,68753}$	<i>S. lorentzii</i>	(Pece <i>et al.</i> 1997)

Los ingresos a la primera clase diamétrica se estimaron por un Tanto Anual de Promoción de Ingresos (TAI) (Tabla 2). En forma análoga se estimó la mortalidad, definiéndose un índice de condición de los árboles (Tabla 2) (Araujo 2003).

Tabla 2. Índices para la estimación de Ingresos y Mortalidad de la masa forestal.

Índices	Acrónimos
$TAI_{(%) } = \frac{N_i}{N_{pc}} * n * 100$	TAI: tanto anual de ingresos en la primera clase N _i : número de individuos que ingresan en la clase N _{pc} : número de individuos de la primera clase diamétrica
$TAM_{(%) } = \frac{N_{am}}{N_c} * n * 100$	TAM: tanto anual de árboles muertos N _{am} : número árboles que morirán en la clase N _c : número de árboles de la clase

En la etapa siguiente se efectuó el análisis y especificación de requisitos. Se identificaron las necesidades para determinar las funcionalidades y características del sistema informático. Se generaron las listas de requisitos y se refinaron para ser incluidos en el sistema (Tabla 3).

Tabla 3. Requisitos, entradas y salidas solicitadas al sistema.

Requisitos	Entrada	Proceso	Salida
Distribución diamétrica	- N° /clase actual - Ingresos - Crecimientos - Mortalidad - Tratamientos	Calcular según ecuaciones	Tabla N° de individuos por clase diamétrica
Gráfico de distribución diamétrica	- N° de Individuos por clase diamétrica	Generar informe gráfico	Histograma de distribución diamétrica
Área basal	- Marcas de clase - N° Individuos por clase diamétrica - Fórmula sumatoria de secciones normales	Generar informe gráfico	Gráfico de distribución del área basal
Gráfico de volumen	- Marcas de clase - N° de Individuos por clase diamétrica - Ecuación de volumen	Generar informe gráfico	Gráfico de distribución del volumen
Posibilidad de corta	- Distribución diamétrica observada - Distribución diamétrica objetivo (ideal)	Diferencia entre N° de individuos observados y distribución ideal. Calcular volumen de la diferencia.	Tabla de producción por clase diamétrica
Tratamientos Selvícolas <i>on-line</i> . (Cortas de mejora y de regeneración)	- N° de individuos cortados por clase diamétrica (%)	Reducir N° de individuos por clase según intensidad de corta. Generar nuevo resultado	Nueva Tabla de distribución diamétrica
Modificar Valores de Parámetros	- Nuevos valores de parámetros	Calcular parámetros y generar nuevo resultado	Nueva distribución diamétrica

La Figura 1 muestra la estructura inicial del sistema, en la que se observan las interrelaciones existentes entre las distintas variables. Para mantener un adecuado número de individuos por clase diamétrica, esta variable recibe la influencia de factores tales como ingresos o reclutamientos, la mortalidad, y el crecimiento.

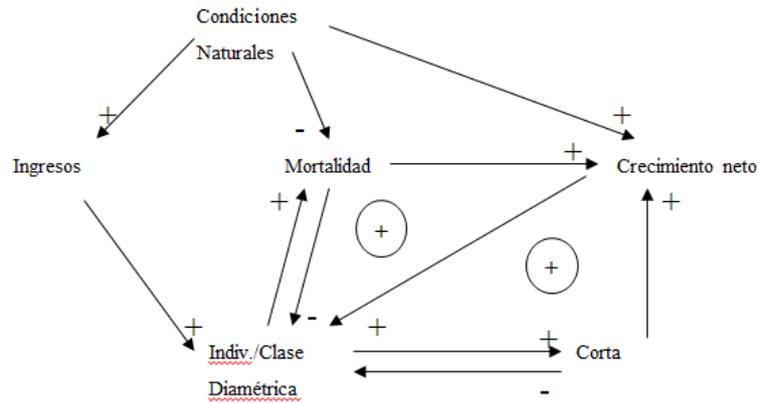


Figura 1. Diagrama causal del sistema forestal.

En el diagrama causal también pueden observarse los dos bucles de retroalimentación positiva donde interactúan la mortalidad y la corta, las cuales afectan el crecimiento y el número de individuos de la clase diamétrica.

La estructura lógica y los pasos que sigue el sistema se han representado gráficamente mediante el diagrama de Forrester (1961) (Figura 2).

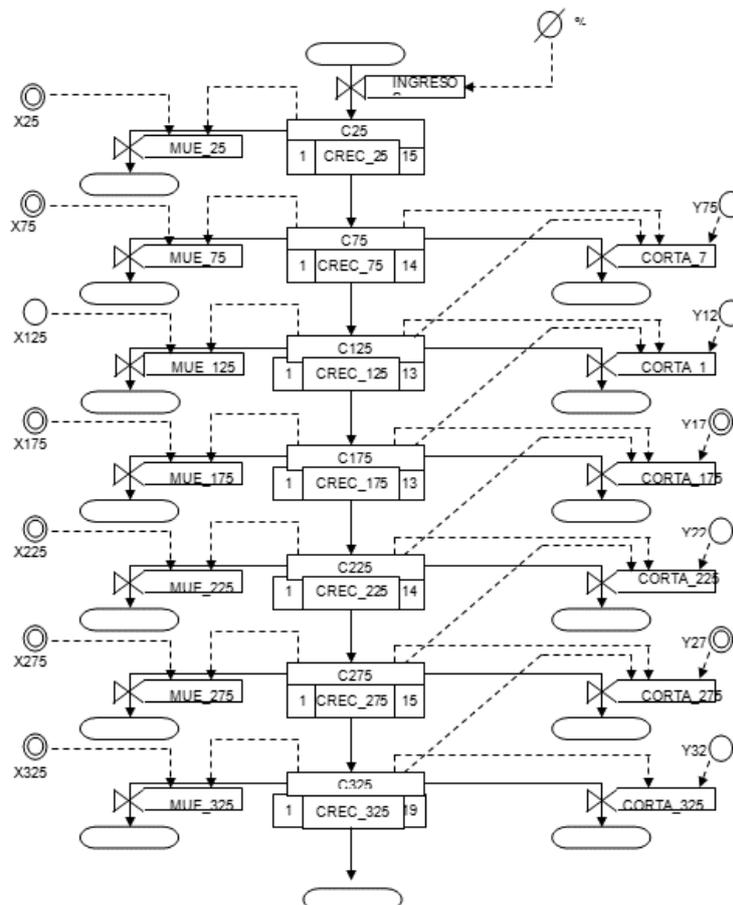


Figura 2. Diagrama de Forrester. Estructura y funcionalidad del modelo de simulación del crecimiento y producción (Trejo, 2003).

Por el sistema circulan dos tipos de flujos: de materiales (individuos) y de información. Las flechas “llenas” representan los flujos de material y las flechas “punteadas” los flujos de información.

En cada periodo ingresa una cantidad de individuos regulada por el parámetro REG (Ingresos). En la clase diamétrica de 7,5 cm los individuos se almacenan en el nivel C75 durante 15 años (número a la derecha en el recuadro del nivel). Desde esa clase diamétrica los individuos también pueden salir por muerte (MUE_75) regulada por un parámetro de muertes por año (X75) o por crecimiento.

En el diagrama las flechas “llenas” representan las dos opciones de salida de material (muerte o crecimiento). Las flechas punteadas indican que la válvula de mortalidad (MUE_75) necesita información del parámetro de muertes X75 (%) y de la cantidad de individuos que se encuentran en el nivel (C75) para calcular cuántos individuos morirán en ese periodo ($C75 * X75$).

A partir de la siguiente clase de 12,5 cm el funcionamiento es el mismo con sus propios parámetros de crecimiento y porcentajes de muertes. Además se agrega otra opción de salida que es la corta. La válvula de corta (CORTA_75) necesita información sobre la cantidad de individuos en la clase C75, la cantidad de la clase siguiente (C125) y también sobre un parámetro de cantidad de individuos ideales (Y75) para la clase (C75). Con estos datos evalúa la ecuación correspondiente y determina si existen individuos cortables en este periodo.

El sistema funciona en todos los niveles, válvulas y parámetros, en forma simultánea y periodo por periodo. En la última clase (C35) después del crecimiento los individuos salen y van a parar a una “nube” que representa la salida del sistema.

Las variables, válvulas y niveles que componen el Diagrama de Forrester se expresaron en forma de ecuaciones matemáticas para simular su comportamiento a través del tiempo.

Las ecuaciones y fórmulas matemáticas que se aplican en el modelo para el cálculo de los parámetros REG, MUE, X, CREC, CORTA, Y, están descritas por Araujo (2003), Araujo *et al.* (2007) y Cid Lendines *et al.* (2013).

3. RESULTADOS

Se realizaron distintas ejecuciones demostrativas para evaluar el funcionamiento de válvulas y ecuaciones del modelo. Por razones de simplicidad y extensión del trabajo se tomaron los datos de la especie quebracho blanco.

En la Figura 3 se muestra la pantalla de ingreso de datos iniciales que debe realizar el usuario para ejecutar la simulación. El programa tiene la opción de almacenar distintas ejecuciones para ser re ejecutadas cuando el usuario lo requiera.

Períodos de Tiempo: 15		Ing. por Regeneración: 2.80	
Clase 2.5 cm.	Cantidad Inicial: 77.22 Tasa de Mortalidad: 12.50 Cantidad IDEAL: 110.00	Clase 7.5 cm.	Cantidad Inicial: 51.48 Tasa de Mortalidad: 1.66 Cantidad IDEAL: 71.16
Clase 17.5 cm.	Cantidad Inicial: 24.50 Tasa de Mortalidad: 0.00 Cantidad IDEAL: 28.93	Clase 22.5 cm.	Cantidad Inicial: 16.00 Tasa de Mortalidad: 0.66 Cantidad IDEAL: 18.44
Clase 32.5 cm.	Cantidad Inicial: 1.50 Tasa de Mortalidad: 0.00 Cantidad IDEAL: 7.50	Clase 37.5 cm.	Cantidad Inicial: 1.00 Tasa de Mortalidad: 0.00 Cantidad IDEAL: 4.80
Clase 12.5 cm.	Cantidad Inicial: 45.50 Tasa de Mortalidad: 0.00 Cantidad IDEAL: 45.37	Clase 27.5 cm.	Cantidad Inicial: 9.50 Tasa de Mortalidad: 0.00 Cantidad IDEAL: 11.76
Clase 42.5 cm.	Cantidad Inicial: 1.00 Tasa de Mortalidad: 0.00 Cantidad IDEAL: 3.07		

Figura 3. Parámetros ingresados al sistema para su validación.

La Figura 4 muestra la salida del sistema en el caso descrito en la figura anterior. Cada Línea en el gráfico representa el estado de las clases en cada tiempo de la simulación. Al ejecutar el simulador, se observa que la distribución diamétrica que se genera en cada año se aleja de la actual (1996) y de la ideal, lo cual ocurre por la baja cantidad de ingresos desde la regeneración natural.

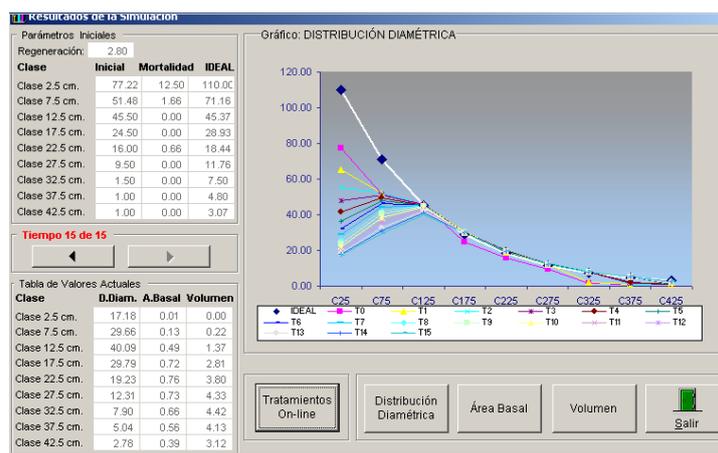


Figura 4. Cambios en la distribución diamétrica durante la simulación.

Con el objeto de ejemplificar un experimento de simulación, se efectuaron ejecuciones variando el parámetro Ingresos. Bajo la hipótesis de que ingresan 16,8 individuos por año, resulta una distribución (Figura 4) que tiende a la forma ideal en un período de 15 años.

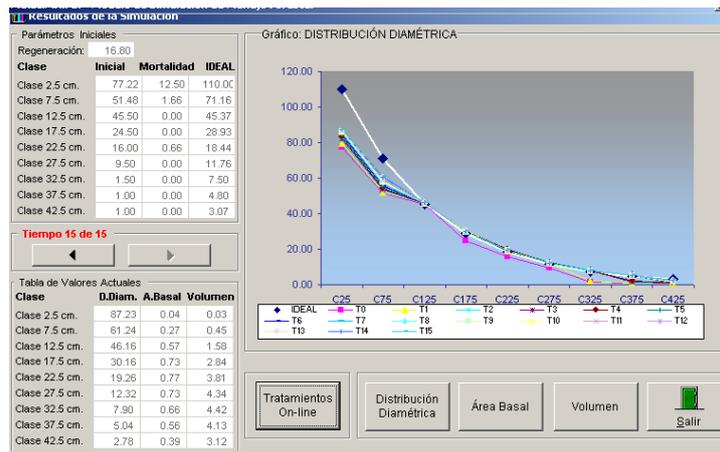


Figura 4. Cambios en la distribución diamétrica cuando varía el parámetro Ingresos.

El simulador también ofrece la posibilidad de visualizar y analizar la distribución del área basal y volumen con el mismo tipo de gráfico.

4. CONCLUSIONES

MOSIMAFO es un modelo de simulación en desarrollo que se puede ir perfeccionando a medida que se amplía la base de datos de las remediciones forestales, lo que permite contar con datos cada vez más confiables.

El sistema es una aplicación sencilla que permite predecir el valor de los parámetros dasométricos en un período de tiempo determinado.

La aplicación presentada es para un caso particular de estudio de la dinámica natural de un bosque chaqueño semiárido, pero tiene la suficiente flexibilidad para ser utilizado en otras situaciones.

Constituye una herramienta de ayuda en la toma de decisiones y también es una herramienta didáctica para la enseñanza de disciplinas como la Ordenación Forestal, Silvicultura, Dasometría.

Las salidas en forma de planillas y gráficos permiten al experto analizar y realizar modificaciones en los parámetros durante las ejecuciones, lo cual ayuda en la selección de la mejor alternativa. Esta elección no se hace en forma automática, sino que se deja por parte del profesional elegir en base a su experiencia y criterios técnicos propios.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Araujo, P. 2003. *Bases para la gestión sostenible de bosques en regeneración del chaco semiárido (Santiago del Estero, Argentina)*. Tesis Doctoral ETSI Montes. Universidad Politécnica de Madrid. España. 161 p.
- Araujo, P. A.; M. Juárez de Galíndez y M. Iturre. 2007. Crecimiento de las especies principales de un bosque en regeneración del chaco santiagueño. *Quebracho* 14: 36-46.

- Cid Lendines, D.; M. Iturre; P. Araujo y C. Gonzalez Garcia 2013 Crecimiento del área basal en parcelas permanentes de inventario forestal continuo. *Quebracho* 21(1,2):115-120. ISSN 0328-0543.
- Diéguez-Aranda, U. 2004. *Modelo dinámico de crecimiento para masas de Pinus sylvestris L. procedentes de repoblación en Galicia*. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela, Escuela Politécnica Superior, 240 p.
- Dixon, G. E. 2002. *Essential FVS: A User's Guide to the Forest Vegetation Simulator*. Internal Report, Fort Collins, CO. USA.
- Forrester, J. W. 1961. *Dinámica Industrial*. El Ateneo, Buenos Aires.
- Nagel, J. 1999. *Konzeptionelle Überlegungen zum schrittweisen Aufbau eines waldwachstumskundlichen Simulationssystems für Nordwestdeutschland*. *Schriften aus d. Forstl. Fak. D. Univ. Göttingen u. d. Nieders. Forstl. Vers.*, Band 128, 122 p.
- Moser, J. W. and Hall, O. F. 1969 Deriving growth and yield functions for uneven-aged forest stands. *Forest Science* 15:183-188.
- Olivares, B. 1977 Modelos de simulación y su empleo en Manejo Forestal. *Revista Bosque* Vol. 2 (1): 32-40.
- Pece, M. G.; C. Gaillard y N. Ríos. 1997. *Tabla de volumen para quebracho colorado santiaguense (Schinopsis quebracho-colorado) utilizando el método de mínimos cuadrados ponderados*. *Quebracho* 3:41-50.
- Pukkala, T. and J. Miina. 2006 STAND: A Decision Support System for the Management of Even-Aged Stands in Finland. In Hasenauer, H. (Ed.) *Sustainable Forest Management, Growth Models for Europe*. Springer. Germany. 398 p.
- Salas, E. CH. 2000 *Uso y aplicación de un programa computacional visualizador de rodales*. Documento del curso de Inventario Forestal, Silvicultura II. Departamento de Ciencias Forestales, Universidad de la Frontera, Temuco. Chile, 45 p.
- Sosa, A. H. H.; E. J. L. Mercado; A. E. H. Cuadrado y A. J. M. Quintero 2010. Evolución: herramienta software para modelado y simulación con dinámica de sistemas. *Revista de Dinámica de Sistemas* 4 (1).
- Trejo, C. J. 2003. *Modelo de proceso de software aplicable en Ingeniería del Software y en Ingeniería del Conocimiento. Su validación en un modelo de simulación para el Manejo Forestal de Bosques en el Chaco Semiárido*. Trabajo Final de graduación. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías. Universidad Nacional de Santiago del Estero, 151 p.
- Vargas, B. L.; J. R. Corral; F. C. Cruz; O. C. Aguirre y J. Nagel. 2008. Uso y aplicación de los simuladores de crecimiento forestal en la toma de decisiones silviculturales. *Revista Forestal Latinoamericana* 23(2):33-52.

