

Spatio-temporal analysis of forest modeling in Mexico

Análisis espacio-temporal de la modelación forestal en México

Saira Y. Martínez-Santiago¹; Arturo A. Alvarado-Segura^{1,2};
Francisco J. Zamudio-Sánchez^{1*}; David Cristóbal-Acevedo³.

¹Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. km 38.5 Carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Chapingo, Texcoco, Estado de México.

fzamudios@taurus.chapingo.mx, Tel.: (+52) 595 954 70 78 (*Corresponding author).

²Instituto Tecnológico Superior del Sur del Estado de Yucatán. Carretera Muna-Felipe Carrillo Puerto, tramo Oxkutzcab-Akil km 41+400. C. P. 97880. Oxkutzcab, Yucatán, México.

³Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. km 38.5 Carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Chapingo, Texcoco, Estado de México.

Abstract

There is a consensus that anthropogenic actions are degrading ecosystems at an alarming rate. Modeling and new technologies, such as information and communications technology (ICT), are increasingly being used to make decisions about the management and conservation of natural resources. In this study, the temporal evolution and spatial distribution of Mexican scientific production in forest modeling are analyzed. From 1980 to 2015, 454 authors participated in the publication of 259 papers in 37 journals (84 % of them Mexican), of which 28 are indexed in the Journal Citation Reports (JCR). Studies on forest management have been the most important but are losing relative weight, while those on environmental services and potential distribution of species are gaining importance. The authors belong to 89 institutions, of which 65 % are Mexican. During the period analyzed, the number of authors (and partnerships) increased 12 times, while the number of publications increased nine times. These increases coincide with the evolution of regulatory policies and the establishment and support of the National System of Researchers. Collaborations in the current forest-modeling network still have great growth potential.

Keywords: Scientific production, collaborative networks, forest management, environmental services, bibliometric approach.

Resumen

Hay consenso de que las acciones antropogénicas están degradando los ecosistemas a un ritmo alarmante. La modelación y las nuevas tecnologías, como las tecnologías de la información y de la comunicación (TIC), se utilizan en modo creciente para tomar decisiones sobre el manejo y la conservación de los recursos naturales. En este trabajo se analizaron la evolución temporal y la distribución espacial de la producción científica en modelación forestal en México. De 1980 a 2015, 454 autores participaron en la publicación de 259 artículos en 37 revistas (84 % mexicanas), de las cuales 28 están indizadas en el Journal Citation Reports (JCR). Los trabajos sobre manejo forestal han sido los más relevantes, aunque tienen una importancia relativa a la baja, mientras que los de servicios ambientales y distribución potencial van ganando importancia. Los autores pertenecen a 89 instituciones, de las cuales 65 % son mexicanas. Durante el periodo analizado, el número de autores (y las colaboraciones) y publicaciones incrementaron 12 y nueve veces, respectivamente. Estos incrementos coinciden con la evolución de las políticas normativas y el establecimiento y apoyo del Sistema Nacional de Investigadores. Las colaboraciones en la red actual de modelación forestal aún tienen gran potencial de crecimiento.

Palabras clave: Producción científica, redes de colaboración, manejo forestal, servicios ambientales, enfoque bibliométrico.

Introduction

A forest model is a simplified representation of a phenomenon, process or system, which can explain functional relationships in a forest (Barnsley, 2007). Statistical models are mainly used in forest modeling, with regression and experimental designs being the most common (Barnsley, 2007; Sheridan, Popescu, Gatzliolis, & Morgan, 2014). In the case of forests, modeling is a key tool to establish relationships and understand multifactorial phenomena or processes, such as growth, timber yield, site productivity, current and potential distribution of species and carbon sequestration (Hynynen, 2011; Li et al., 2015; Peng, 2000).

To have access to complete and organized information on forest modeling, in order to establish medium- and long-term development prospects, the historical evolution of scientific production must be known. In this sense, productivity can be measured by the number and quality of publications, mainly of papers that undergo peer review (Galeano, Amarilla, & Parra, 2007; Ríos & Herrero, 2005). With a bibliometric approach, the scientific production of individuals, institutions and countries, the magnitude and frequency of use (i.e. the number of citations) of such production and the form of collaboration of the researchers or institutions in the networks can be known (Huamaní & Mayta-Tristán, 2010; Prat, 2001). This information enables placing researchers and institutions into a particular field, identifying those who are subject to funding, and detecting the priorities of the collaborative networks (Huamaní & Mayta-Tristán, 2010; Prat, 2001).

Collaborative networks reflect the relationships among their members, works and academic links, which allow evaluating the process of knowledge generation (Huamaní & Mayta-Tristán, 2010). It has been reported, for example, that consolidated research networks permit increased production and citations of papers (Hill, 2008), as well as obtaining academic and logistical benefits (Gaughan & Ponomariov, 2008; Huamaní & Mayta-Tristán, 2010). Analyzing the structure of the networks allows identifying the fields of interest in each and measuring some variables related to the productivity of the groups, such as centrality and network size (Bullock & Lawler, 2015; García, 2012; Lužar, Levnajić, Povh, & Perc, 2014).

Globally, networks have been used to analyze the structure and evolution of interdisciplinarity, some particular disciplines (Bullock & Lawler, 2015; Lužar et al., 2014) and environmental management (Martínez, Brenner, & Espejel, 2015). In Mexico, network analysis has been used to investigate social sciences, economics, journal databases and natural resource management

Introducción

Un modelo forestal es una representación simplificada de un fenómeno, proceso o sistema, que puede explicar relaciones funcionales en el bosque (Barnsley, 2007). En la modelación forestal se usan principalmente modelos de tipo estadístico, siendo la regresión y los diseños experimentales los más comunes (Barnsley, 2007; Sheridan, Popescu, Gatzliolis, & Morgan, 2014). En el caso de los bosques, la modelación es una herramienta clave para establecer relaciones y comprender fenómenos o procesos multifactoriales, como el crecimiento, rendimiento maderable, productividad del sitio, distribución actual y potencial de las especies y captura de carbono (Hynynen, 2011; Li et al., 2015; Peng, 2000).

Para tener acceso a una información completa y organizada sobre la modelación en la actividad forestal, con la finalidad de establecer las perspectivas de desarrollo a mediano y largo plazo, se debe conocer la evolución histórica de la producción científica. En este sentido, la productividad se puede medir por el número y la calidad de las publicaciones, principalmente de los artículos que se someten a revisión por pares (Galeano, Amarilla, & Parra, 2007; Ríos & Herrero, 2005). Con un enfoque bibliométrico se puede conocer la producción científica de las personas, instituciones y países, la magnitud y frecuencia de uso (i. e. el número de citas) de tal producción y la forma de colaboración de los investigadores o las instituciones en las redes (Huamaní & Mayta-Tristán, 2010; Prat, 2001). Dicha información permite ubicar a los investigadores e instituciones en determinado campo y los que son sujetos de recibir financiamiento, así como detectar las prioridades de las redes de colaboración (Huamaní & Mayta-Tristán, 2010; Prat, 2001).

Las redes de colaboración reflejan las relaciones entre sus miembros y los vínculos laborales y académicos, lo que permite evaluar el proceso de generación del conocimiento (Huamaní & Mayta-Tristán, 2010). Se ha reportado, por ejemplo, que las redes de investigación consolidadas permiten el aumento de la producción y las citas de los artículos (Hill, 2008), así como la obtención de beneficios académicos y logísticos (Gaughan & Ponomariov, 2008; Huamaní & Mayta-Tristán, 2010). El análisis de la estructura de las redes permite la identificación de los campos de interés en cada una de ellas y la medición de algunas variables relacionadas con la productividad de los grupos, como la centralidad y el tamaño de la red (Bullock & Lawler, 2015; García, 2012; Lužar, Levnajić, Povh, & Perc, 2014).

A nivel mundial, las redes se han utilizado para analizar la estructura y evolución de la interdisciplinaria, algunas disciplinas particulares (Bullock & Lawler,

(Calderón & Flores, 2012; Martínez et al., 2015; Nuñez-Espinoza, Figueroa, & Jiménez-Sánchez, 2014). However, specific studies have not yet been made on the coauthorship of papers on forest modeling, despite the considerable number of institutions that form human capital and generate technical-scientific documents on the subject.

Based on the above, the aim of this study was to analyze the spatio-temporal evolution of forest modeling in Mexico, to identify the potential and prospects for scientific production. The results may help in forming public policies for allocating resources to projects and institutions. They can also facilitate the consultation and identification of the main forest sector's research projects and actors, in order to invest or manage resources or to establish exchanges between research groups.

Materials and methods

Scientific production in Mexico on forest modeling, research groups and collaborative networks were identified through peer-reviewed scientific papers published from 1980 to 2015. The search was conducted in national and international journals related to forestry and natural resource management. For this purpose, the technological resources available in the major publishing houses (Elsevier, Springer and Scopus) and web sites (Latindex, Scielo, Redalyc, Thomson-Reuters and Conricyt) were used. In addition, the major journals that address the topic of interest at the national level were consulted: *Agrociencia*, *Madera y Bosque*, *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *Botanical Science* and *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. All searches were made online and only papers on modeling of forest plant resources were considered. The keywords used for the search were "model," "growth," "tree," "forest," "forestry," "modeling," "site index," "volume," "Mexico" and "biomass", identifying them in the titles, keywords or abstracts of publications. Subsequently, the "snowball" technique, which consisted of identifying and obtaining missing papers, from the list of references of the papers initially found (Leipold, 2014), was used. The information was captured in a spreadsheet; it was systematized and classified by journal name, year of publication, article title, state of the country under study, authors, institution, keywords, language of publication and subject category of the paper. Considering the subject areas where modeling is used as an analytical tool, the papers were classified into five categories according to their purpose: (i) wood supply and technology, (ii) potential distribution, (iii) forest fires, (iv) forest management and (v) environmental services. Papers on estimating biomass and carbon sequestration were included in the category of environmental services.

2015; Lužar et al., 2014) y la gestión ambiental (Martínez, Brenner, & Espejel, 2015). En México, el análisis de redes se ha utilizado para investigar sobre ciencias sociales, economía, bases de datos de revistas y el manejo de recursos naturales (Calderón & Flores, 2012; Martínez et al., 2015; Nuñez-Espinoza, Figueroa, & Jiménez-Sánchez, 2014). Sin embargo, aún no se han realizado trabajos específicos sobre las coautorías de artículos en modelación forestal, a pesar del número considerable de instituciones que forman capital humano y generan documentos técnico-científicos en el tema.

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue analizar la evolución espacio-temporal de la modelación forestal en México, para identificar las potencialidades y las perspectivas de la producción científica. Los resultados pueden ayudar en las políticas públicas de asignación de recursos a proyectos e instituciones. También pueden facilitar la consulta e identificación de las principales investigaciones y actores del sector forestal, para invertir o gestionar recursos o para establecer intercambios entre grupos de investigación.

Materiales y métodos

La producción científica en México sobre modelación forestal, los grupos de investigación y las redes de colaboración se identificaron a través de artículos científicos de revisión por pares publicados de 1980 a 2015. La búsqueda se realizó en revistas nacionales e internacionales relacionadas con la actividad forestal y el manejo de los recursos naturales. Para ello se utilizaron los recursos tecnológicos disponibles en las principales casas editoriales (Elsevier, Springer y Scopus) y sitios web (Latindex, Scielo, Redalyc, Thomson-Reuters y Conricyt). Asimismo, se consultaron las principales revistas que abordan la temática de interés a nivel nacional: *Agrociencia*, *Madera y Bosque*, *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *Botanical Science* y *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. Todas las consultas se hicieron en línea y sólo se consideraron trabajos sobre modelación de los recursos forestales vegetales. Las palabras clave utilizadas en la búsqueda fueron "modelo", "crecimiento", "árbol", "bosque", "silvicultura", "modelaje", "índice de sitio", "volumen", "México" y "biomasa", identificándolas en los títulos, palabras clave o resúmenes de las publicaciones. Posteriormente, se utilizó la técnica "bola de nieve" que consistió en identificar y obtener los artículos faltantes, a partir de la lista de referencias de los artículos encontrados inicialmente (Leipold, 2014). La información se capturó en una hoja de cálculo; se sistematizó y clasificó por nombre de la revista, año de publicación, título del artículo, entidad federativa en estudio, autores, institución, palabras clave, idioma de la publicación y categoría temática del artículo. Considerando las áreas temáticas donde la

The names of the authors, institutions and countries of origin were standardized in the database, since the information available in the papers is sometimes incomplete or presented with some variants (Aguado-López et al., 2009). The journals *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, *Revista Ciencia Forestal en México*, and the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF) were renamed as *Botanical Science*, *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* and Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), respectively. Only the current name was used in all three renaming cases. In the case of institutions with multiple locations in Mexico, only the name of the headquarters was used. On the other hand, the authors were identified with their first surname followed by an underscore and the initials of their second surname and their name or names (e.g. Juan Pérez López was abbreviated as Pérez_LJ).

The UCINET computer program's Nodelists1 script (Borgatti, Everett, & Freeman, 2002) was used for developing the networks and obtaining the following three indicators: network size, degree centrality (in-degree or out-degree) and density (Velázquez & Aguilar, 2005). Network size is the property that measures the number of individuals participating in it (Tichy, Tushman, & Fombrun, 1979); in-degree centrality measures the number of links that reach the node, and out-degree centrality the number of those who leave it, indicating the importance of the node in terms of its connection within the system (Newman, 2010; Wasserman & Faust, 1994); density measures the proportion of relationships in the network over the maximum number of possible relationships, being minimized when there are no relationships between actors (0) and maximized when all players are interlinked (1) (Newman, 2010; Reagans & Zuckerman, 2001; Wasserman & Faust, 1994). The most productive authors (leaders) were selected based on average degree centrality, selecting the top 2 % of all authors per category (rounding up); in categories with fewer than 100 authors, a minimum of two leaders (criteria selected by the authors) was chosen.

The graphical representation of the networks was made using NetDraw software (Borgatti, 2002). On the other hand, the geographical distribution of national scientific production was carried out using the ArcGIS package (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2015), with which six layers of information were generated. The first layer consisted of the classification of Mexico's 32 states based on roundwood timber production (m^3) (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2013) and the other five corresponded to each of the five categories of papers. The distribution of papers in the states was represented with colored bubbles (article category) of variable size (number of papers).

modelación se utiliza como herramienta de análisis, los artículos se clasificaron en cinco categorías de acuerdo con su finalidad: (i) abastecimiento y tecnología, (ii) distribución potencial, (iii) incendios forestales, (iv) manejo forestal y (v) servicios ambientales. Los trabajos sobre estimación de biomasa y captura de carbono se incluyeron en la categoría de servicios ambientales.

Los nombres de los autores, instituciones y países de procedencia se estandarizaron en la base de datos, puesto que la información disponible en los artículos algunas veces está incompleta o se presenta con algunas variantes (Aguado-López et al., 2009). Las revistas *Boletín de la Sociedad Botánica de México* y *Revista Ciencia Forestal en México*, y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF), se renombraron como *Botanical Science*, *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* e Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), respectivamente. En los tres casos de cambio de nombre se utilizó únicamente el nombre actual. En el caso de las instituciones con varias sedes en México sólo se utilizó el nombre de la sede matriz. Por otro lado, los autores se identificaron con el primer apellido seguido de un guion bajo y las iniciales del segundo apellido y el nombre o nombres (v. g. Juan Pérez López se abrevió como Pérez_LJ).

El script Nodelists1 del paquete computacional UCINET (Borgatti, Everett, & Freeman, 2002) se utilizó para la elaboración de las redes y la obtención de los tres indicadores siguientes: tamaño de la red, grado de centralidad (entrada o salida) y densidad (Velázquez & Aguilar, 2005). El tamaño de la red es la propiedad que mide el número de actores que participan en ella (Tichy, Tushman, & Fombrun, 1979); el grado de centralidad de entrada mide el número de vínculos que llegan al nodo, y el grado de salida, el número de los que salen, lo que indica la importancia del nodo en términos de su conexión dentro del sistema (Newman, 2010; Wasserman & Faust, 1994); la densidad mide la proporción de las relaciones presentes en la red sobre el máximo número de relaciones posibles, siendo minimizada cuando no existen relaciones entre los actores (0) y maximizada cuando todos los actores están interrelacionados (1) (Newman, 2010; Reagans & Zuckerman, 2001; Wasserman & Faust, 1994). Los autores más productivos (líderes) se seleccionaron con base en el promedio del grado de centralidad, seleccionando el 2 % superior del total de autores por categoría (con redondeo hacia arriba); en las categorías con menos de 100 autores, se eligió un mínimo de dos líderes (criterios seleccionados por los autores).

La representación gráfica de las redes se hizo con el software NetDraw (Borgatti, 2002). Por otro lado, la distribución geográfica de la producción científica nacional se representó mediante el uso del paquete

Results and discussion

From 1980-2015, 259 scientific papers on forest modeling were published in 37 journals, of which 28 are indexed in the Journal Citation Reports (JCR). Of the total number of papers, 84 % were published in Mexican journals. A total of 454 authors participated (37 % of them as corresponding authors), belonging to 89 institutions, of which 65 % are Mexican. These results show the evolution of scientific production, the importance at the national level and the way in which public policies conform to the regulatory framework so that science and technology develop under the required standards (Bullock & Lawler, 2015), directed by geopolitical events (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2015).

Temporal distribution of scientific production

The increased rate of Mexican scientific production in forest modeling is strongly related to pertinent changes in forest regulations since the 1980s (Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 1986, 1988), with the establishment of the SNI or the National System of Researchers in 1984 (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología [CONACYT], 2006), and the creation of institutions for research and related undergraduate programs promoted by the Forestry Act of 1986 (Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 1986). On the one hand, CONACYT is an institution that provides economic incentives, through the SNI, to the most productive researchers (CONACYT, 2006); also, in conjunction with other institutions, it helps researchers to address some of Mexico's most pressing problems through sectoral programs. On the other hand, a number of the regulatory changes responded to international demands, such as the North American Free Trade Agreement -NAFTA- (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1993) and various international environmental scenarios, such as the Brundtland report, the Intergovernmental Panel on Climate Change and the Earth Summit (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2014).

Figure 1 shows increasing annual production during the study period, with a higher rate of increase from 2005 and a concentration of 70 % of the publications in the last third (2006-2015). This trend coincides with an increase in the number of researchers, in both Mexico and globally, growth that is reflected in the explosion in the number of scientific publications (Foro Consultivo Científico y Tecnológico AC [FCCTAC], 2014a; 2014b; UNESCO, 2015). From 2006 to 2012, scientific production in Mexico increased 40 %; however, it is still very low compared with most member countries of the Organisation for Economic Co-operation and

ArcGIS (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2015), con el que se generaron seis capas de información. La primera capa consistió en la clasificación de las 32 entidades federativas por su producción maderable en rollo (m³) (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2013) y las cinco restantes correspondieron a cada una de las cinco categorías de los artículos. La distribución de los artículos en las entidades federativas se representó con burbujas de colores (categoría de artículos) de tamaño variable (número de artículos).

Resultados y discusión

De 1980 a 2015 se publicaron 259 artículos científicos sobre modelación forestal en 37 revistas, de las cuales 28 están indizadas en el Journal Citation Reports (JCR). Del total de artículos, 84 % se publicaron en revistas mexicanas. Participaron 454 autores (37 % de ellos como autores de correspondencia) pertenecientes a 89 instituciones, de las cuales 65 % son mexicanas. Estos resultados muestran la evolución de la producción científica, la pertinencia a nivel nacional y la forma en que las políticas públicas adecuan el marco normativo para que la ciencia y la tecnología se desarrollen bajo los estándares requeridos (Bullock & Lawler, 2015), direccionados por los acontecimientos geopolíticos (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2015).

Distribución temporal de la producción científica

El incremento de la tasa de producción científica de modelación forestal en México se relaciona fuertemente con las modificaciones pertinentes en la normatividad forestal desde la década de 1980 (Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 1986, 1988), con el establecimiento del SNI o Sistema Nacional de Investigadores en 1984 (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología [CONACYT], 2006), y con la creación de instituciones para la investigación y de carreras afines promovidas por la Ley Forestal de 1986 (Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 1986). Por un lado, el CONACYT es una institución que otorga estímulos económicos, a través del SNI, a los investigadores más productivos (CONACYT, 2006); asimismo, en conjunto con otras instituciones, apoya a investigadores para atender problemas nacionales prioritarios del estado mexicano, mediante programas sectoriales. Por otro lado, varias de las modificaciones normativas respondieron a demandas internacionales como el Tratado de Libre Comercio de América del Norte -TLCAN- (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1993) y los diferentes escenarios ambientalistas internacionales, como el informe Brundtland, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático y la Cumbre de la Tierra (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2014).

Development (OECD), and worldwide it contributes less than 1 % of the total (CONACYT, 2013).

Mexican scientific production in forest modeling is in the multiplication stage, according to the approach described by Molina, Muñoz, and Domenech (2002). Scientific research follows a logistic curve (S-shaped) in which it is possible to first identify an appearance stage of the scientific paradigm (e. g. forest modeling in Mexico), followed by a multiplication stage, characterized by the appearance of circles of researchers that are influenced by a few highly-productive members. Then there is a third stage, known as maturity, and a final one of stabilization (Huamaní & Mayta, 2010; Molina et al., 2002). The second stage of the logistic curve can be viewed as a phenomenon of contagion, in which the number of relationships of the first wave of adopters of an innovation is critical to the subsequent result (Crane, 1972). In line with the trend shown in Figure 2, scientific production in Mexico related to forest modeling can be expected to

De acuerdo con la Figura 1 hubo un comportamiento creciente de la producción anual, con una tasa de incremento mayor a partir de 2005 y una concentración de 70 % de las publicaciones en el último tercio (2006-2015). Este comportamiento coincide con el aumento de investigadores tanto en México como a nivel mundial, crecimiento que se refleja con la explosión del número de publicaciones científicas (Foro Consultivo Científico y Tecnológico AC [FCCTAC], 2014a; 2014b; UNESCO, 2015). De 2006 a 2012, la producción científica en México incrementó 40 %; sin embargo, sigue siendo muy baja comparada con la mayoría de los países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), y a nivel mundial sólo contribuye con menos de 1 % (CONACYT, 2013).

La producción científica sobre modelos forestales en México se encuentra en la etapa de multiplicación, de acuerdo con el planteamiento de Molina, Muñoz, y Domènech (2002). La investigación científica sigue una curva logística (en forma de S) en la que es

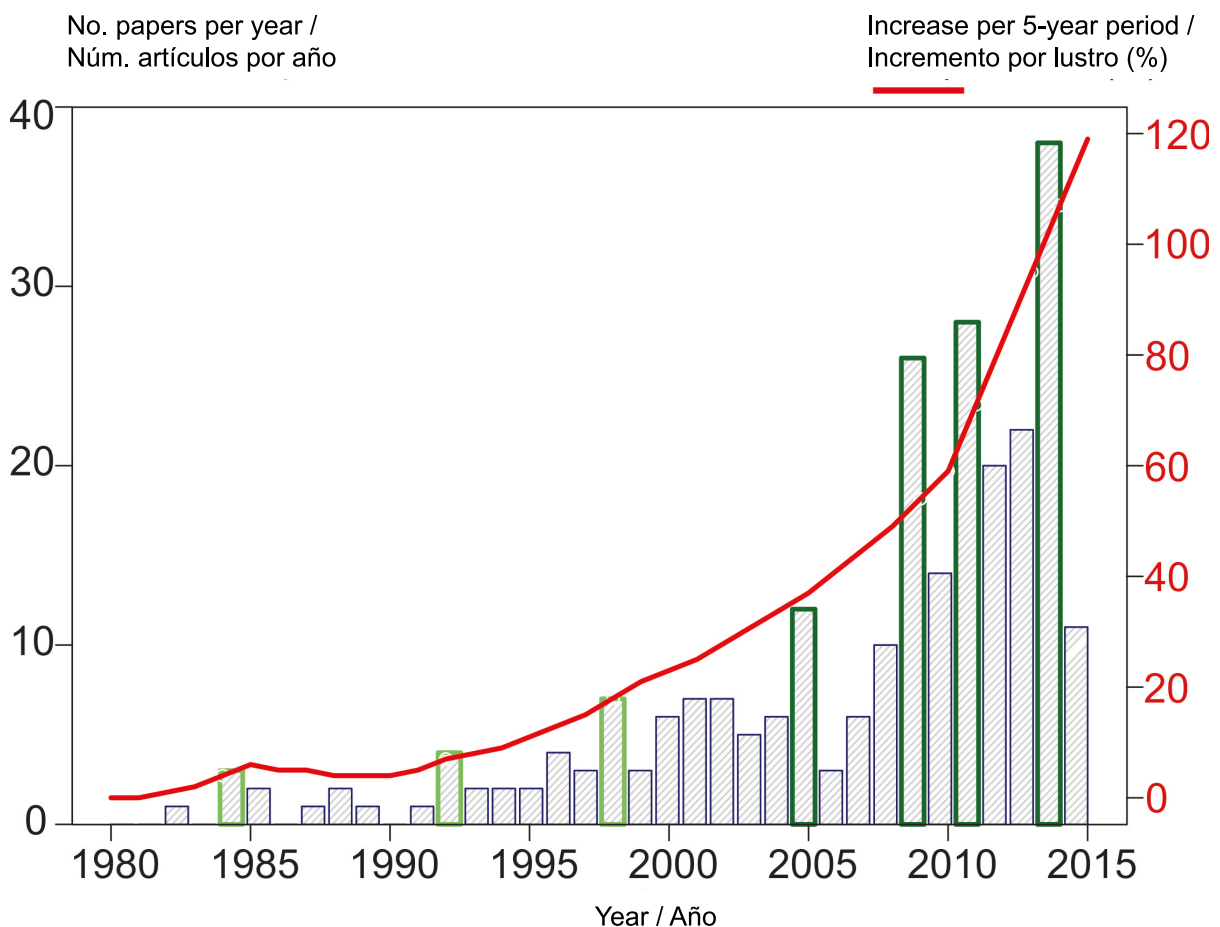


Figure 1. Growth pattern of scientific production in forest modeling in Mexico. Bars outlined in green indicate years with outstanding production.

Figura 1. Patrón de crecimiento de la producción científica en modelación forestal en México. Las barras con contorno verde indican años con producción sobresaliente.

continue to grow in the medium term, albeit with a reshuffling of the relative weights representing each of the thematic categories.

The increase in scientific production in forest modeling (more than eight times from 1980 to 2015) has been steady and significant, with the forest management category being the most important (Figure 2). However, when the analysis is done by categories, a 37 % decline in the relative importance of forest management studies and a 33 % increase in papers on environmental services and potential distribution are observed (Figure 2), while the forest fire and wood supply and technology categories have remained stable. This behavior is consistent with the following events: (i) the creation of the Forestry Act of 1960 and its amendments (Instituto Nacional de Ecología [INE] & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2003; Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 1986) and (ii) the decree in 1988 of the General Law of Ecological Balance and Environmental Protection (LGEEPA) (Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 1988), where the conservation trend and the increase in Protected Natural Areas are taken up again with greater force.

posible identificar primero una etapa de aparición del paradigma científico (v. g. modelación forestal en México). Existe una segunda etapa de multiplicación, caracterizada por la aparición de círculos de investigadores que están influenciados por pocos miembros de alta productividad. En seguida viene una tercera etapa de madurez y una última de estabilización (Huamaní & Mayta, 2010; Molina et al., 2002). La segunda etapa de la curva logística puede visualizarse como un fenómeno de contagio, en el cual el número de relaciones de la primera ola de adoptantes de una innovación es crítico para el resultado posterior (Crane, 1972). Acorde con la tendencia mostrada en la Figura 2, en el caso de México puede esperarse que la producción científica relacionada con la modelación forestal siga creciendo a mediano plazo, aunque con un reacomodo de los pesos relativos que representan cada una de las categorías temáticas.

El incremento de la producción científica en modelación forestal (más de ocho veces de 1980 a 2015) ha sido constante y significativo, siendo la categoría de manejo forestal la más importante (Figura 2). Sin embargo, cuando el análisis se hace por categorías, se nota la disminución en 37 % de la importancia relativa

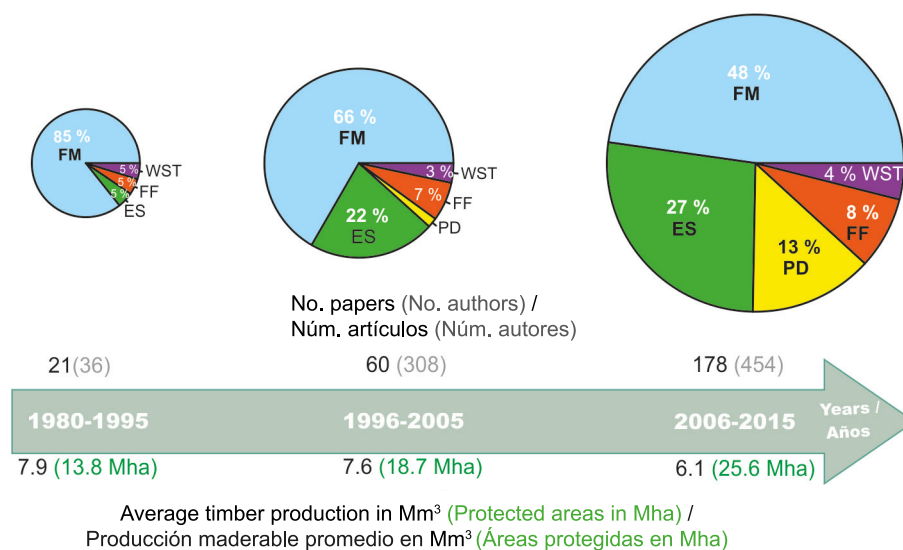


Figure 2. Temporal evolution of scientific production in forest modeling, timber production and Protected Natural Areas. The magnitude of the circles indicates the increase in the number of papers. FM: Forest management, ES: Environmental Services, PD: Potential distribution, FF: Forest fires, WST: Wood supply and technology.

Figura 2. Evolución temporal de la producción científica en modelación forestal, producción maderable y Áreas Naturales Protegidas. La magnitud de los círculos indica el incremento del número de artículos. FM: Manejo forestal, ES: Servicios ambientales, PD: Distribución potencial, FF: Incendios forestales, WST: Abastecimiento y tecnología de la madera.

The diversity of forest ecosystems in Mexico and the increase in Protected Natural Areas (SEMARNAT, 2014) allow using forests as producers of ecosystem services, a situation that is related to the relative increase in research production in the environmental services and potential distribution categories (Figure 2). This situation, in turn, is related to the global demand for soil protection functions, regulation of the hydrological cycle, environmental services, conservation of biodiversity and mitigation of greenhouse gas emissions (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2005a, 2015; Ruis, 2001), established in some international agreements and conventions (FAO 2005a; Ruis, 2001; United Nations Framework Convention on Climate Change, 2014).

Throughout the period, the forest management category has been the most important and has grown considerably in magnitude, whereas the opposite has occurred in relation to timber production (Figure 2). The total consumption of roundwood from natural forests in Latin America and the Caribbean indicates a reduction of 25 % in the period 1980-2003 (FAO, 2006). Likewise, in Mexico a 40 % reduction in production from 2000 to 2011 is reported (SEMARNAT, 2015). Among the factors that have contributed to the decline and stagnation of timber production, both in Mexico and globally, are: the growing trend towards conservation, restrictions and regulations on the management of natural forests, high certification and labeling costs to enter the international market and the increasing use of timber from forest plantations (FAO, 2006).

Geographical distribution of research

Figure 3 shows the spatial distribution of scientific production in forest modeling in Mexico. Of the papers published from 1980 to 2015, 82 % are distributed in states with a varying level of timber production. The rest of the papers (18 %) were based on larger spatial scales: 10 % at the national level (e. g. Gómez-Díaz et al., 2011; Rojas-García, De Jong, Martínez-Zurimendí, & Paz-Pellat, 2015) and 8 % in two or more states of the northeastern, southeastern and central regions (e. g. Návar, Nájera, & Jurado, 2001; Reich, Aguirre-Bravo, & Bravo, 2008). The two states with “very high” and “high” timber production (Durango and Chihuahua, respectively) account for 25 % of the production of scientific papers; another 25 % corresponds to the states of central Mexico (Hidalgo, Puebla, State of Mexico and Mexico City), where the largest number of institutions and researchers are also concentrated. The seven states with the highest number of publications (Durango, Hidalgo, State of Mexico, Oaxaca, Puebla, Veracruz and Chihuahua) account for 58 % of the total. Considering the category of papers, 55 % belong to forest management, 25 % to environmental services, 9 %

de los trabajos en manejo forestal y un aumento de 33 % de servicios ambientales y distribución potencial (Figura 2); mientras que las categorías de incendios forestales y tecnología y abastecimiento de la madera se han mantenido estables. Este comportamiento concuerda con los siguientes sucesos: (i) la creación de la ley forestal de 1960 y sus actualizaciones (Instituto Nacional de Ecología [INE] & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2003; Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 1986) y (ii) el decreto en 1988 de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) (Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos, 1988), donde la tendencia conservacionista y el aumento de las Áreas Naturales Protegidas se retoman con mayor fuerza.

La diversidad de ecosistemas forestales en México y el incremento de las áreas naturales protegidas (SEMARNAT, 2014) permiten utilizar los bosques como productores de servicios ecosistémicos, situación que está relacionada con el incremento relativo de la producción de investigaciones en la categoría de servicios ambientales y de distribución potencial (Figura 2). Esta situación, a su vez, está relacionada con la demanda global de funciones de protección de suelo, regulación del ciclo hidrológico, servicios ambientales, conservación de la biodiversidad y mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2005a, 2015; Ruis, 2001), establecidas en algunos convenios y convenciones internacionales (FAO 2005a; Ruis, 2001; United Nations Framework Convention on Climate Change, 2014).

A lo largo del periodo, la categoría de manejo forestal ha sido la más importante y ha tenido un crecimiento considerable en magnitud, en sentido opuesto a la producción maderable (Figura 2). El consumo total de madera en rollo de bosques naturales en América Latina y el Caribe indican una reducción de 25 % en el periodo 1980 a 2003 (FAO, 2006). De la misma forma, en México se reporta una reducción de 40 % en la producción del año 2000 al 2011 (SEMARNAT, 2015). Entre los factores que han contribuido a la disminución y estancamiento de la producción maderable tanto en México como a nivel global, se encuentran: el incremento de la tendencia conservacionista, las restricciones y reglamentaciones sobre el manejo en los bosques naturales, los altos costos para la certificación y etiquetado para entrar al mercado internacional y el uso creciente de la madera proveniente de plantaciones forestales (FAO, 2006).

Distribución geográfica de las investigaciones

La Figura 3 muestra la distribución espacial de la producción científica sobre modelación forestal en México. De los artículos publicados de 1980 a 2015,

to potential distribution, 7 % to forest fires and 4 % to wood supply and technology.

There are only two states where studies have been conducted in all categories: Durango and Hidalgo. In the former, the forest management category accounts for 75 % of its scientific production, which is consistent with the fact it is the state with the largest timber production. In Hidalgo, the percentages among categories are more evenly distributed, with environmental services having a greater relative importance with respect to Durango, due to there is a greater incentive to this alternative because it is a state with low timber production. Nayarit, Querétaro, Aguascalientes and Baja California Sur have very low timber production and do not have any type of work (Figure 3); however, they represent opportunity options for research in environmental services and potential

82 % se distribuye en estados con nivel variable de producción maderable. El resto de los artículos (18 %) se realizó en escalas espaciales más amplias: 10 % a escala nacional (v. g. Gómez-Díaz et al., 2011; Rojas-García, De Jong, Martínez-Zurimendí, & Paz-Pellat, 2015) y 8 % en dos o más estados de las regiones noreste, sureste y centro (v. g. Nívar, Nájera, & Jurado, 2001; Reich, Aguirre-Bravo, & Bravo, 2008). Los dos estados con producción maderable “muy alta” y “alta” (Durango y Chihuahua, respectivamente) concentran 25 % de la producción de artículos científicos; otro 25 % corresponde a los estados del centro del país (Hidalgo, Puebla, Estado de México y Ciudad de México), donde también se concentra el mayor número de instituciones e investigadores. Los siete estados con la mayor cantidad de publicaciones (Durango, Hidalgo, Estado de México, Oaxaca, Puebla, Veracruz y Chihuahua) concentran 58 % del total. Considerando la categoría

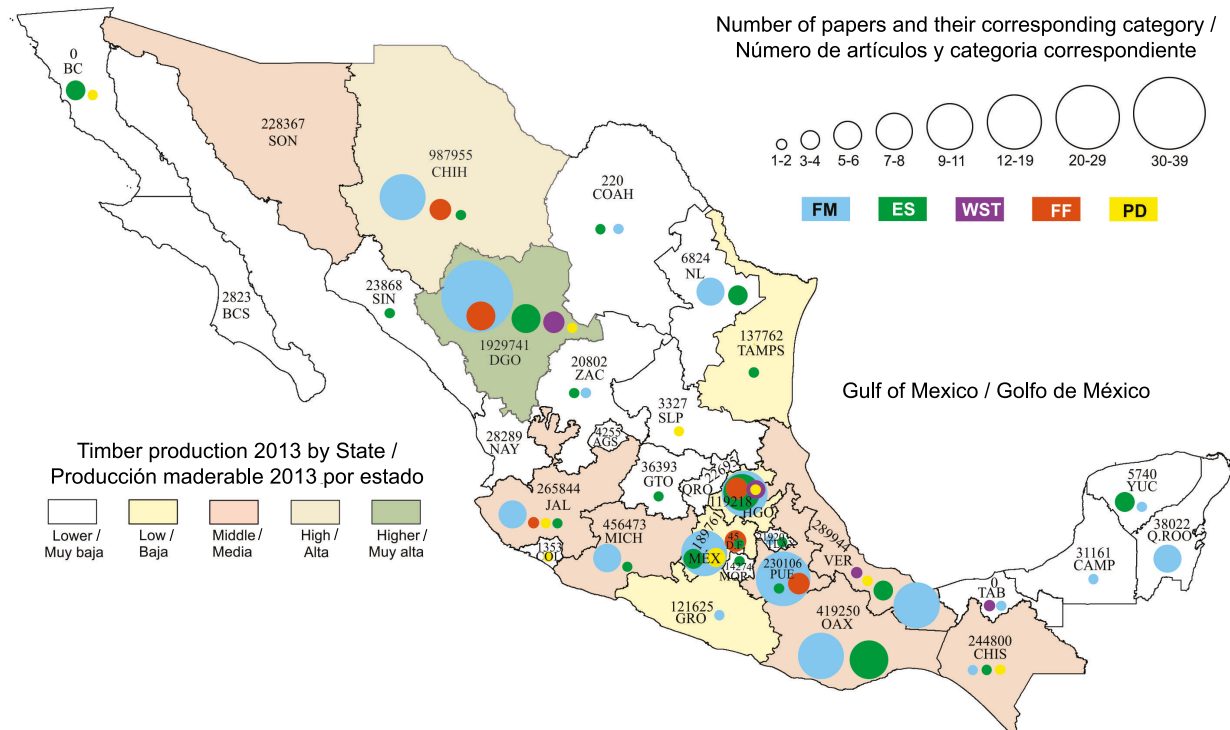


Figure 3. Spatial distribution of scientific production nationwide. The classification of states based on their roundwood timber production (m^3) is indicated by the color scale and the number written on the abbreviation of the corresponding state. The magnitude of the bubbles indicates the number of scientific papers produced, and the colors the category to which they belong. FM: Forest management, ES: Environmental services, PD: Potential distribution, FF: Forest fires, WST: Wood supply and technology.

Figura 3. Distribución espacial de la producción científica a nivel nacional. La clasificación de los estados con base en su producción maderable en rollo (m^3) se indica con la escala de colores y el número escrito sobre la abreviatura del estado correspondiente. La magnitud de las burbujas indica la cantidad de artículos científicos producidos, y los colores, la categoría a la que pertenecen. FM: Manejo forestal, ES: Servicios ambientales, PD: Distribución potencial, FF: Incendios forestales, WST: Abastecimiento y tecnología de la madera.

distribution. Although there are a wide variety of environmental services, those that have the greatest potential are: carbon sequestration, water capture, biodiversity and bioprospecting (FAO, 2005b). In Mexico, most studies related to environmental services are focused on the issue of carbon sequestration and, to a lesser extent, hydrological services and soil protection (e. g. Acosta, Carrillo, & Gómez, 2011; Gómez-Díaz et al., 2011; Návar, 2009). On the other hand, the scientific production reported in each state can be associated with the domestic demand for the professionalization of technical forest services, as well as the training of skilled personnel, which has been brought about by the creation of educational institutions. Specifically, more than 15 undergraduate, nine masters and nine doctoral programs have been created in a total of 23 institutions. Although some programs have been implemented in areas with forest production, most are located in the center of the country (State of Mexico and Mexico City), which coincides with the fact that 32 % of the SNI researchers in area VI of Biotechnology and Agricultural Sciences are concentrated in that region alone (Atlas de la Ciencia Mexicana, 2012; FCCTAC, 2014b). On the other hand, 70 % of the scientific production was generated in educational institutions and 30 % in research institutions. More than 60 % of the papers were generated in five national institutions (Figure 4), of the 89 that have scientific production. Three institutions accounted for 46 % of the production, all three of which also have their own journal: INIFAP (Revista Mexicana de Ciencias Forestales), the Colegio de Postgraduados (ColPos, Agrociencia) and the Universidad Autónoma Chapingo (UACH, Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente). These three institutions publish a percentage of papers authored by their members in their own journals: INIFAP 70 %, ColPos 46 % and UACH 32 %. The journals that published the highest number of papers are presented in Table 1; 78 % of the papers are published in Spanish and 22 % in English. It is important to mention that Mexican journals began publishing in the two languages in 2000, in order to attract a greater international audience.

Authorship by networks

A total of 454 authors were counted in the period analyzed (1980-2015), distributed in almost 90 institutions, of which 169 are corresponding authors and 173 main authors, with a co-authorship index of 1.8 (collaboration among authors). Based on information from the Science Citation Index, international collaborations rose from 19 to 34 % from 1980 to 1990 (Russell, Ainsworth, & Narváez-Berthelemot, 2006). This contrasts with the behavior observed in Mexico, as there is a higher percentage of individual participation (Aguado-López et al., 2009). In the present study, the

de los artículos, 55 % pertenecen a manejo forestal, 25 % a servicios ambientales, 9 % a distribución potencial, 7 % a incendios forestales y 4 % a abastecimiento y tecnología de la madera.

Sólo hay dos estados donde se han realizado estudios de todas las categorías: Durango e Hidalgo. En el primero, la categoría de manejo forestal representa 75 % de su producción científica, lo que es congruente con el hecho de ser el estado con mayor producción maderable. En Hidalgo, los porcentajes entre categorías están distribuidos más equitativamente, observándose una importancia relativa mayor de los servicios ambientales respecto a Durango, debido a que hay un mayor incentivo a esta alternativa por el hecho de ser un estado de baja producción maderable. Nayarit, Querétaro, Aguascalientes y Baja California Sur tienen muy baja producción maderable y no cuentan con algún tipo de trabajo (Figura 3); sin embargo, representan opciones de oportunidad para investigación en servicios ambientales y distribución potencial. A pesar de que existe una variedad amplia de servicios ambientales, los que tienen el mayor potencial son: captura de carbono, desempeño hidráulico, biodiversidad y bioprospección (FAO, 2005b). En México, la mayoría de los estudios relacionados con los servicios ambientales están enfocados a la temática de captura de carbono y, en menor medida, a los servicios hidrológicos y protección del suelo (v. g. Acosta, Carrillo, & Gómez, 2011; Gómez-Díaz et al., 2011; Návar, 2009). Por otro lado, la producción científica reportada en cada estado se puede asociar a la demanda nacional por la profesionalización de los servicios técnicos forestales, así como la formación de personal capacitado, que se materializa con la creación de instituciones educativas. Concretamente se han establecido más de 15 programas de licenciatura, nueve de maestría y nueve de doctorado en 23 instituciones. Aunque algunos programas se han implementado en zonas con producción forestal, la mayoría se ubican en el centro del país (Estado de México y Ciudad de México) lo que coincide con la concentración del 32 % de los investigadores del SNI en el área VI de Biología y Ciencias Agropecuarias, tan sólo en dicha región (Atlas de la Ciencia Mexicana, 2012; FCCTAC, 2014b). Por otra parte, 70 % de la producción científica se generó en instituciones educativas y 30 % en instituciones de investigación. Más de 60 % de los artículos se generaron en cinco instituciones nacionales (Figura 4) de las 89 que tienen producción científica. Tres instituciones concentran 46 % de la producción, mismas que también cuentan con su propia revista: el INIFAP (Revista Mexicana de Ciencias Forestales), el Colegio de Postgraduados (ColPos, Agrociencia) y la Universidad Autónoma Chapingo (UACH, Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente). Estas tres instituciones publican un porcentaje de trabajos de sus

tendency to have papers with one and two authors has been maintained, while collaborations with more than three authors increased from 2005. Forest modeling studies from 1980 to 1995 showed a similar situation of low collaboration with 36 authors involved; individual authorship accounted for 29 % and small group collaboration schemes (six subnets), 71 %. In the next study period (1996-2005), a medium-sized network was established and developed; collaborations (two or more members) increased to 85 % and the number of subnets doubled. In the following 10 years (2006-2015), almost 30 small groups (2-20 authors), representing 28 % of the network, and a main group of more than 300 authors, representing 70 %, were identified; in this period, individual authorships fell to 2 %. Considering the publications of the 454 authors, 22 published papers are of individual authorship, 51 double, 33 triple and 153 with more than four authors. The network of forest modelers, belonging to area VI of Biotechnology and Agricultural Sciences (formerly Agrosiences), accumulated more than 200 researchers from 1942 to 1979, while the medicine network in just three years, from 1976 to 1979, grew by more than five times (Atlas de la Ciencia Mexicana, 2012). In other words, the area VI network has had very slow growth compared to that in other areas such as medicine area III.

On the other hand, the six national institutions with the most collaborations are: INIFAP, ColPos, UACH, Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) and the Instituto Tecnológico de El Salto (ITES). These institutions have also collaborated with some foreign ones, with the Universidad de Compostela and the United States Forest Service being the two most important.

Regarding the international collaborations of the authors, 12 % are with groups in the United States, Germany and France, because they are market, science and technology leaders (Altbach, Reisberg, & Rumbley, 2009 technology; UNESCO, 2015), and with Spain, possibly because of language compatibility. This percentage of contributions is equal to a third of those recorded on average globally (Aguado-López et al., 2009; Russell et al., 2006). The increase in collaborations can be attributed to the ease of establishing them beginning with the rise of information and communications technologies (ICTs) in the 1990s, when a significant increase in researchers, scientific production and mobility was also generated (UNESCO, 2015). This has resulted in the strengthening of multidisciplinary and collaborations among researchers.

Interrelationships among the members of the collaborative network of Mexican forest modelers in 2015 was still very low, which is reflected in the very low density value (0.003), leaving a universe of

miembros en sus propias revistas: 70 % el INIFAP, 46 % el ColPos y 32 % la UACH. Las revistas que publicaron el mayor número de artículos se presentan en el Cuadro 1; 78 % de los artículos son publicados en español y 22 % en inglés. Es importante mencionar que las revistas mexicanas empezaron a publicar en los dos idiomas a partir del año 2000, para conseguir mayor audiencia internacional.

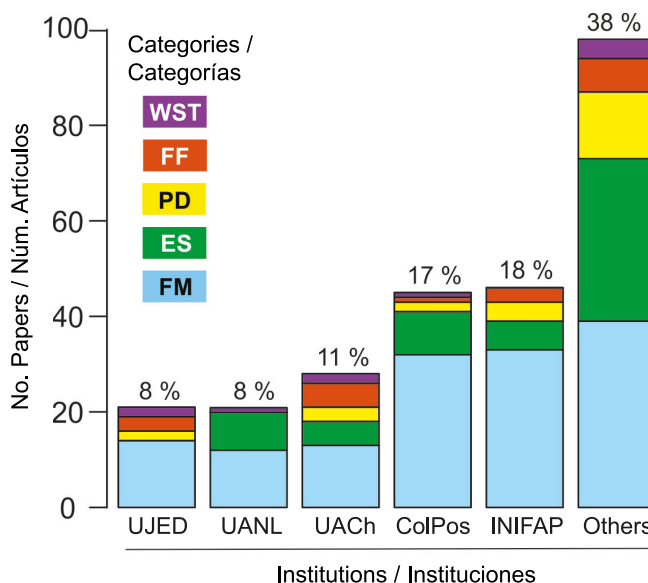


Figure 4. Institutions of corresponding authors and types of research that they conduct. Categories: FM = Forest management, ES = Environmental services, WST = Wood supply and technology, FF = Forest fires, PD = Potential distribution. Institutions: Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Colegio de Postgraduados (ColPos), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Figura 4. Instituciones de autorías de correspondencia y tipos de investigación que abordan. Categorías: FM = Manejo forestal, ES = Servicios ambientales, WST = Abastecimiento y tecnología, FF = Incendios forestales, PD = Distribución potencial. Instituciones: Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Colegio de Postgraduados (ColPos), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Table 1. Journals analyzed for spatio-temporal analysis of forest modeling in Mexico.**Cuadro 1. Revistas analizadas para el análisis espacio-temporal de la modelación forestal en México.**

Journal/Revista	Country/País	Institution/Organization Institución/Organización	JCR impact factor (2015)/ Factor de impacto JCR (2015)	No. papers published/ Núm. artículos publicados
Revista Mexicana de Ciencias Forestales	Mexico	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)	Does not have/ No tiene	81
Agrociencia	Mexico	Colegio de Postgraduados	0.305	46
Madera y Bosques	Mexico	Instituto de Ecología (INECOL)	0.434	35
Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente	Mexico	Universidad Autónoma Chapingo (UACH)	0.243	31
Forest Ecology and Management	Netherlands/ Holanda	Elsevier Science Publisher B. V.	2.826	9
Revista Fitotecnia Mexicana	Mexico	Sociedad Mexicana de Fitogenética	0.318	8
Annals of Forest Science	France/ Francia	Institut National de la Recherche Agronomique	2.086	5
Botanical Sciences	Mexico	Sociedad Botánica de México	0.624	5
Journal of Forestry Research	China	Northeast Forestry University and Ecological Society of China	0.658	4
Canadian Journal of Forest Research	Canada	NRC Research Press	1.682	3
Forestry	United Kingdom/ Reino Unido	Oxford University Press	1.921	2
Investigaciones Geográficas	Mexico	Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)	Does not have/ No tiene	2
Journal of Arid Environments	United States/ Estados Unidos	Academic Press Inc	1.623	2
Revista Mexicana de Biodiversidad	Mexico	Universidad Nacional Autónoma de México	0.493	2
Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas	Mexico	INIFAP	Does not have/ No tiene	2
Other journals	Various/ Varios	-	0.17 to 3.709	22

JCR: Journal Citation Reports. Other journals: Agriculture, Ecosystems & Environment, Agronomía Mesoamericana, Atmósfera, Biomass and Bioenergy, Chinese Geographical Science, Dendrochronologia, Ecological Modelling, Forest Ecosystems, Forest Systems, Interciencia, International Journal of Biometeorology, Journal of Latin American Geography, Journal of Tropical Ecology, Journal of Vegetation Science, Política y Cultura, Plant Ecology, Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, Tropical and Subtropical Agroecosystems, Water, Air, & Soil Pollution, Forestra Veracruzana y Agrofaz.

JCR: Journal Citation Reports. Otras revistas: Agriculture, Ecosystems & Environment, Agronomía Mesoamericana, Atmósfera, Biomass and Bioenergy, Chinese Geographical Science, Dendrochronologia, Ecological Modelling, Forest Ecosystems, Forest Systems, Interciencia, International Journal of Biometeorology, Journal of Latin American Geography, Journal of Tropical Ecology, Journal of Vegetation Science, Política y Cultura, Plant Ecology, Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, Tropical and Subtropical Agroecosystems, Water, Air, & Soil Pollution, Forestra Veracruzana y Agrofaz.

possibilities to establish collaborations among them and increase their scientific production (Reagans & Zuckerman, 2001). Some Latin American countries (Argentina, Brazil, Chile and Uruguay) have increased investment in strategic sectors such as agriculture, energy, ICTs, biotechnologies and nanotechnologies to encourage scientific production and collaborations (Altbach et al., 2009; UNESCO, 2015). These investments in strategic sectors seek an improvement in higher education and greater scientific production and international collaboration. In the current network of Mexican forest modelers, the 16 most productive and interrelated authors were identified (Figure 5), according to the degree centrality of the nodes in each of the article categories (García, 2012; Hou, Kretschmer, & Liu, 2008; Leij & Goyal, 2011). These authors, due to having an advantageous position, are more likely to secure resources for projects, because they have more alternatives for collaboration with other researchers who also have significant networks (Hanneman & Riddle, 2005; Newman, 2004). Comparatively, in the physical science networks, there are more than 20 subnets with visibility, of which only three have a few leading authors (Atlas de la Ciencia Mexicana, 2012), which means that, in this case, productivity does not depend on a small group of researchers.

Autoría por redes

Se contabilizaron 454 autores en el periodo analizado (1980-2015), distribuidos en casi 90 instituciones, de los cuales 169 son autores para correspondencia y 173 son autores principales, con un índice de coautoría de 1.8 (colaboración entre autores). Con base en información del *Science Citation Index*, las colaboraciones internacionales pasaron de 19 a 34 % de 1980 a 1990 (Russell, Ainsworth, & Narváez-Berthelemot, 2006). Esto contrasta con el comportamiento observado en México, donde hay un mayor porcentaje de participación individual (Aguado-López et al., 2009). En el presente estudio, la tendencia de los artículos con uno y dos autores se ha mantenido, mientras que las colaboraciones de más de tres autores incrementaron a partir del año 2005. Los estudios de modelación forestal de 1980 a 1995 mostraron una situación similar de colaboración escasa con 36 autores involucrados; las autorías individuales representaron 29 % y los esquemas de colaboración de grupos pequeños (seis subredes), 71 %. En el siguiente periodo estudiado (1996 a 2005) se estableció y desarrolló una red de tamaño medio; las colaboraciones (dos o más integrantes) se incrementaron hasta 85 % y el número de subredes se duplicó. En los siguientes 10 años (2006-2015) se

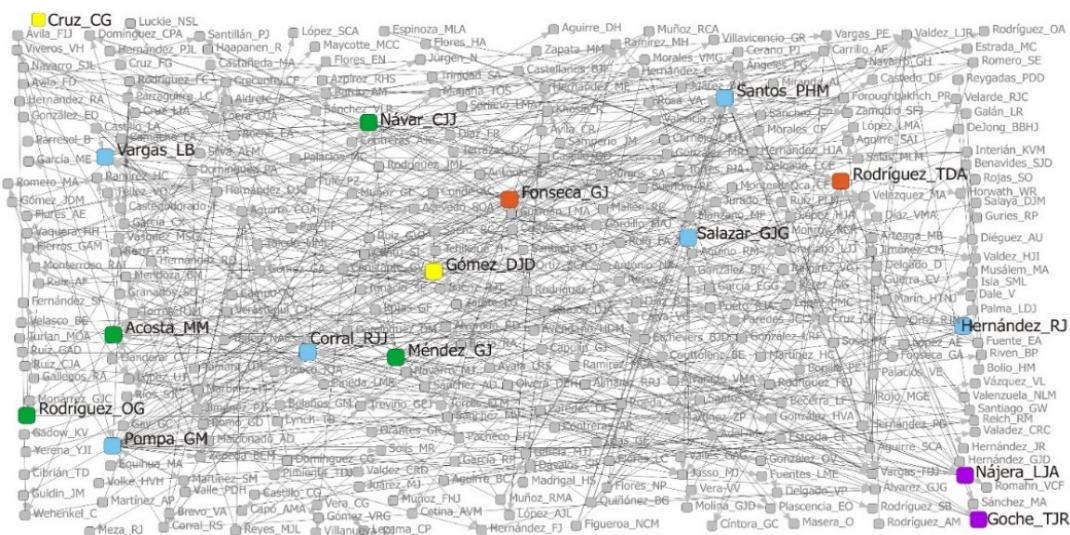


Figure 5. Collaborative network in forest modeling. In this medium-sized network with over 450 members, the 16 authors with the greatest degree centrality in the different categories are highlighted: forest management (blue), environmental services (green), potential distribution (yellow), forest fires (orange) and wood supply and technology (purple).

Figura 5. Red de colaboración en modelación forestal. En esta red de tamaño medio, con más de 450 integrantes, se resaltan los 16 autores con mayor grado de centralidad en las diferentes categorías: manejo forestal (azul), servicios ambientales (verde), distribución potencial (amarillo), incendios forestales (naranja) y abastecimiento y tecnología de la madera (morado).

Of the forest modeling categories analyzed, the forest management's network, accounts for 50 % of the authors, whereas, at the other extreme, the supply and technology grouping accounts for only 7 %. In forest management, of 227 authors, 3 % individual authorships, as well as the largest group with 181 collaborators, are reported. The categories of environmental services and potential distribution have the highest number of collaborative groups of more than four members, without reaching one hundred and have no individual authorships. Finally, the supply and technology category has 6 % individual authorships and five groups of two to 10 members. Previous studies have found that the productivity of a group is influenced by the number of its collaborators and that the most productive researchers, who have many interactions in their categories, are identified as experts in their area; this allows establishing new collaborations and an increase in their productivity (García, 2012; Hill, 2008; Hou et al., 2008; Leij & Goyal, 2011; Oh, Labianca, & Chung, 2006). This coincides with the results, since the forest management network, which is the largest, had more leaders and scientific production.

Conclusions

In Mexico, scientific production in forest modeling has grown steadily since 1980, but with greater force from 2005. The creation of the National System of Researchers and the evolution of the regulatory framework governing natural resource management and conservation are probably the main factors behind this growth. The three most productive institutions are INIFAP, ColPos and UACH, each of which also has its own journal. Scientific production in environmental services and potential distribution is beginning to surge, possibly due to increased global demand for ecosystem functions and to habitat diversity in Mexico. Thus, all states, regardless of their timber production, are candidates for work in environmental services. With regard to the networks, there is a potential for growth of more than 98 % in collaborations between researchers and institutions and, therefore, for greater scientific production. The 16 leading authors identified in the five forest modeling categories are the most interrelated and most influential. The results of this study can serve as a basis for planning forest modeling and to promote effective collaborations among research groups.

identificaron casi 30 grupos pequeños (2 a 20 autores) que representan 28 % de la red y un grupo principal de más de 300 autores que representa 70 %; en este periodo, las autorías individuales se redujeron a 2 %. Considerando las publicaciones de los 454 autores, 22 artículos publicados son de autoría individual, 51 doble, 33 triple y 153 con más de cuatro autores. La red de modeladores forestales, que pertenece al área VI de Biotecnología y Ciencias Agropecuarias (antes llamada Agrociencias), acumuló más de 200 investigadores de 1942 a 1979, mientras que la red de medicina en tan solo tres años, de 1976 a 1979, creció más de cinco veces (Atlas de la Ciencia Mexicana, 2012). En otras palabras, la red del área VI ha tenido un crecimiento muy lento comparado con el crecimiento de otras áreas, como el área III de medicina.

Por otro lado, las seis instituciones nacionales con más colaboraciones son: INIFAP, ColPos, UACH, Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y el Instituto Tecnológico de El Salto (ITES). Estas instituciones han colaborado también con algunas extranjeras, siendo la Universidad de Compostela y el Servicio Forestal de los Estados Unidos, las dos más importantes.

Respecto a las colaboraciones internacionales de los autores, 12 % se relaciona con grupos de Estados Unidos de América, Alemania y Francia, debido a que son líderes del mercado, de la ciencia y la tecnología (Altbach, Reisberg, & Rumbley, 2009; UNESCO, 2015), y con España, posiblemente por la compatibilidad del idioma. Este porcentaje de colaboraciones equivale a un tercio de las que se registran en promedio a nivel global (Aguado-López et al., 2009; Russell et al., 2006). El aumento de las colaboraciones se puede atribuir a la facilidad de establecerlas a partir del auge de las tecnologías de la información y de la comunicación (TIC) desde la década de 1990, cuando también se genera un incremento significativo de investigadores, producción científica y movilidad (UNESCO, 2015). Lo anterior ha tenido como consecuencia el fortalecimiento de la multidisciplinariedad y las colaboraciones entre investigadores.

La interrelación de los integrantes de la red de colaboración de los modeladores forestales mexicanos en 2015 es aún muy escasa, lo que se refleja en un valor de densidad muy bajo (0.003), dejando un universo de posibilidades para establecer colaboraciones entre ellos e incrementar su producción científica (Reagans & Zuckerman, 2001). Algunos países latinoamericanos (Argentina, Brasil, Chile y Uruguay) han incrementado la inversión en sectores estratégicos como la agricultura, energía, TIC's, biotecnologías y nanotecnologías para incentivar la producción científica y las colaboraciones (Altbach et al., 2009; UNESCO, 2015). Estas inversiones

End of English version

Referencias / Referencias

- Acosta, M. M., Carrillo, A. F., & Gómez, V. R. G. (2011). Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(4), 529–543. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000400005&lng=es&tlng=es
- Aguado-López, E., Rogel-Salazar, R., Garduño-Oropeza, G., Becerril-García, A., Zúñiga-Roca, M., & Velázquez-Álvarez, A. (2009). Patrones de colaboración científica a partir de redes de coautoría. *Convergencia, Revista de Ciencias Sociales*, 16(1), 225-258. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/105/10512244010.pdf>
- Altbach, P. G., Reisberg, L., & Rumbley, L. E. (2009). *Tras la pista de una revolución académica: Informe sobre las tendencias actuales*. Paris, Francia: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Retrieved from: [de http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001831/183168s.pdf](http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001831/183168s.pdf)
- Atlas de la Ciencia Mexicana. (2012). *Atlas de la Ciencia mexicana 2012* (Vol. 1). México: Autor. Retrieved from http://atlasdelacienciamexicana.org/atlas_version_impresa_2012-voll/pdf/atlas2012-vol1.pdf
- Barnsley, M. J. (2007). *Environmental modeling: A practical introduction*. Florida, USA: CRC Press.
- Borgatti, S. P. (2002). NetDraw software for network visualization. Lexington, KY, USA: Analytic Technologies Retrieved from <http://www.analytictech.com/netdraw/netdraw.htm>
- Borgatti, S. P., Everett, M. G., & Freeman, L. C. (2002). UCINET for Windows: Software for Social Network Analysis. Harvard, MA, USA: Analytic Technologies. Retrieved from <http://www.analytictech.com/ucinet/>
- Bullock, R., & Lawler, J. (2015). Community forestry research in Canada: A bibliometric perspective. *Forest Policy and Economics*, 59, 47–55. doi: 10.1016/j.forpol.2015.05.009
- Calderón, M. M. G., & Flores, P. J. (2012). Redes de conocimiento en empresas de la industria electrónica en México: Una propuesta metodológica. *Economía: teoría y práctica*, 37, 121–143. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-33802012000200006&lng=es&tlng=es
- Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos. (1986). *Ley Forestal*. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4795460&fecha=30/05/1986
- Congreso de la Unión de los Estados Unidos Mexicanos. (1988). *Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente*. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_130516.pdf
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). (2006). Reglamento del Sistema Nacional de Investigadores. México: Diario Oficial de la Federación (DOF). Retrieved 08/09/16 from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4932567&fecha=26/09/2006
- en sectores estratégicos buscan un mejoramiento en la enseñanza superior y una mayor producción científica y colaboración internacional. En la red actual de modeladores forestales mexicanos se identificaron a los 16 autores más productivos e interrelacionados (Figura 5), según el grado de centralidad de los nodos en cada una de las categorías de artículos (García, 2012; Hou, Kretschmer, & Liu, 2008; Leij & Goyal, 2011). Estos autores, con una posición ventajosa, tienen mayores posibilidades de conseguir recursos para proyectos, porque tienen más alternativas de colaboración con otros investigadores que también tienen redes significativas (Hanneman & Riddle, 2005; Newman, 2004). Comparativamente, en las redes de ciencias físicas hay más de 20 subredes con visibilidad, de las cuales sólo tres presentan a pocos autores líderes (Atlas de la Ciencia Mexicana, 2012), lo que significa que, en este caso, la productividad no depende de un grupo pequeño de investigadores.
- De las categorías de modelación forestal analizadas, la red de manejo forestal concentra 50 % de los autores y, en el otro extremo, la de abastecimiento y tecnología, sólo 7 %. En manejo forestal, de 227 autores, se reporta 3 % de autorías individuales, así como el grupo de mayor tamaño con 181 colaboradores. Las categorías de servicios ambientales y de distribución potencial presentan el mayor número de grupos de colaboración de más de cuatro integrantes, sin alcanzar la centena y no tienen autorías individuales. Finalmente, la categoría de abastecimiento y tecnología tiene 6 % de autorías individuales y cinco grupos de dos a 10 integrantes. En trabajos previos se ha observado que la productividad de un grupo está influenciada por la cantidad de sus colaboradores y que los investigadores más productivos, que tienen muchas interacciones en sus categorías, son identificados como expertos en su área; lo anterior permite establecer nuevas colaboraciones y aumento de su productividad (García, 2012; Hill, 2008; Hou et al., 2008; Leij & Goyal, 2011; Oh, Labianca, & Chung, 2006). Esto coincide con los resultados, ya que la red de manejo forestal, que es la más grande, presentó mayor número de líderes y producción científica.

Conclusiones

En México, la producción científica en modelación forestal ha crecido constantemente desde 1980, pero con mayor fuerza a partir de 2005. La creación del Sistema Nacional de Investigadores, así como la evolución de las políticas públicas normativas en manejo y conservación de los recursos naturales, probablemente son los principales factores de dicho crecimiento. Las tres instituciones más productivas son el INIFAP, el ColPos y la UACH que también tienen su propia revista. La producción científica en servicios ambientales y distribución potencial comienza a tomar auge, debido posiblemente a la tendencia mundial

- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). (2013). Programa especial de ciencia, tecnología e innovación 2014-2018. Retrieved from http://www.conacyt.mx/images/conacyt/PECiTI_2014-2018.pdf
- Crane, D. (1972). *Invisible colleges. Diffusion of knowledge in scientific communities*. USA: The University of Chicago Press.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2015). ArcGIS (Versión 10.3) Software de procesamiento digital de imágenes satelitales. Redlands, CA, USA. Retrieved from <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop>
- Foro Consultivo Científico y Tecnológico AC (FCCTAC). (2014a). *Sistema Nacional de Investigadores*. Retrieved from http://www.foroconsultivo.org.mx/asuntos/academicos/sni2014/resultados_comisiones_dictaminadoras_2014.pdf
- Foro Consultivo Científico y Tecnológico AC [FCCTAC]. (2014b). *Sistema Nacional de Investigadores*. Retrieved from http://www.foroconsultivo.org.mx/documentos/acertadistico/conacyt/sistema_nacional_de_investigadores.pdf
- Galeano, M. E., Amarilla, A., & Parra, G. (2007). Productividad científica del Paraguay en el área de biomedicina: Un análisis bibliométrico. *Memorias del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Salud*, 5(1), 26–30. Retrieved from <http://scielo.iics.una.py/pdf/iics/v5n1/v5n1a06.pdf>
- García, H. A. (2012). Las redes de colaboración científica y su efecto en la productividad. Un análisis bibliométrico. *Investigación Bibliotecológica*, 27(59), 159–175. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-358X2013000100008
- Gaughan, M., & Pnomariov, B. (2008). Faculty publication productivity, collaboration, and grants velocity: Using curricula vitae to compare center-affiliated and unaffiliated scientists. *Research Evaluation*, 17(2), 103–110. doi: 10.3152/095820208X287180
- Gómez-Díaz, J. D., Monterroso-Rivas, A. I., Tinoco-Rueda, J. A., Toledo-Medrano, M. L., Conde-Álvarez, C., & Gay-García, C. (2011). Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera*, 24(1), 31–52. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362011000100004&lng=es&tln g=en
- Hanneman, R. A., & Riddle, M. (2005). *Introduction to social network methods*. Riverside, CA, USA: University of California. Retrieved from <http://faculty.ucr.edu/~hanneman/nettext/>
- Hill, V. A. (2008). Collaboration in an academic setting: Does the network structure matter? Retrieved from <http://www.casos.cs.cmu.edu/publications/papers/CMU-ISR-08-128.pdf>
- Hou, H., Kretschmer, H., & Liu, Z. (2008). The structure of scientific collaboration networks in Scientometrics. *Scientometrics*, 75(2), 189–202. doi: 10.1007%2Fs11192-007-1771-3
- de un incremento en la demanda por funciones ecosistémicas y a la diversidad de hábitats en México. Así, todos los estados, independientemente de su producción maderable, son candidatos para realizar trabajos en servicios ambientales. Respecto a las redes, existe un potencial de crecimiento de más de 98 % en las colaboraciones entre investigadores e instituciones y, por lo tanto, de una mayor producción científica. Los 16 autores líderes identificados en las cinco categorías de la modelación forestal son los más relacionados y con mayor influencia. Los resultados de este trabajo pueden servir de base para la planeación de la modelación forestal y para fomentar colaboraciones efectivas entre grupos de investigación.

Fin de la versión en español

- Huamaní, C., & Mayta-Tristán, P. (2010). Producción científica peruana en medicina y redes de colaboración, análisis del Science Citation Index 2000-2009. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 27(3), 315–325. Retrieved from <http://www.scielo.org.pe/pdf/rins/v27n3/a03v27n3.pdf>
- Hynynen, J. (2011). Conceptos básicos para la modelación del crecimiento forestal. *Recursos Naturales y Ambiente*, 64, 22–27. Retrieved from <http://bco.catie.ac.cr/portal-revistas/index.php/rna/article/view/3/12>
- Instituto Nacional de Ecología (INE) & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2003). *Memorias del primer encuentro internacional de derecho ambiental*. México: Autor. Retrieved from http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=398
- Leij, M., & Goyal, S. (2011). Strong ties in a small world. *Review of Network Economics*, 10(2). doi: 10.2202/1446-9022.1278
- Leipold, S. (2014). Creating forests with words—A review of forest-related discourse studies. *Forest Policy Economics*, 40, 12–20. doi: 10.1016/j.forpol.2013.12.005
- Li, Y. Q., Deng, X. W., Huang, Z. H., Xiang, W. H., Yan, W., Lei, P. F., ... Peng, C. H. (2015). Development and evaluation of models for the relationship between tree height and diameter at breast height for Chinese-Fir plantations in subtropical China. *PLoS ONE*, 10(4), e0125118. doi: 10.1371/journal.pone.0125118
- Luzar, B., Levnajić, Z., Povh, J., & Perc, M. (2014). Community structure and the evolution of interdisciplinarity in Slovenia's Scientific Collaboration Network. *PLoS ONE*, 9(4), e94429. doi: 10.1371/journal.pone.0094429
- Martínez, N., Brenner, L., & Espejel, I. (2015). Red de participación institucional en las áreas naturales protegidas de la península de Baja California. *Región y sociedad*, 27(62), 27–62. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252015000100002&lng=es&tln g=es

- Molina, J. L., Muñoz, J. M., & Domènech, M. (2002). Redes de publicaciones científicas: un análisis de la estructura de coautorías. *Redes*, 1(3), 1–16. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93100103>
- Návar, J. (2009). Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 257(2), 427–434. doi: 10.1016/j.foreco.2008.09.028
- Návar, J., Nájera, J., & Jurado, E. (2001). Preliminary estimates of biomass growth in the Tamaulipan thornscrub in north-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments*, 47(3), 281–290. doi:10.1006/jjare.2000.0708
- Newman, M. E. J. (2004). Coauthorship networks and patterns of scientific collaboration. *The National Academy of Sciences*, 101, 5200–5205. doi: 10.1073/pnas.0307545100
- Newman, M. (2010). *Networks: An introduction*. New York, USA: Oxford University Press.
- Núñez-Espinoza, J. F., Figueroa, R. O. L., & Jiménez-Sánchez, L. (2014). Elementos para analizar redes sociales para el desarrollo rural en México: El caso RENDRUS. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 11(1), 1–24. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722014000100001&lng=en&tlng=es
- Oh, H., Labianca, G., & Chung, M. H. (2006). A multilevel model of group social capital. *Academy of Management Review*, 31(3), 569–582. doi: 10.5465/AMR.2006.21318918
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2005a). Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina. Informe subregional Centroamérica y México. Retrieved from <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/j7354s/j7354s00.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2005b). Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. Retrieved October 13, 2015 from <http://www.fao.org/docrep/006/j2215s/j2215s00.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2006). Los desafíos del desarrollo y el sector forestal en América Latina y el Caribe. Retrieved from <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0470s/a0470s00.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2015). Informe de la UNESCO sobre la ciencia. Hacia 2030. Retrieved from <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002354/235407s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2015). *Global Forest Resources Assessment 2015*. Retrieved September, 12, 2015 from <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/current-assessment/en/>
- Peng, C. (2000). Understanding the role of forest simulation models in sustainable forest management. *Environmental Impact Assessment Review*, 20(4), 481–501. doi: 10.1016/S0195-9255(99)00044-X
- Prat, A. M. (2001). Evaluación de la producción científica como instrumento para el desarrollo de la ciencia y la tecnología. *ACIMED*, 9(4), 111–114. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1024-94352001000400016&lng=es
- Reagans, R., & Zuckerman, E. W. (2001). Networks, diversity, and productivity: The social capital of corporate R&D teams. *Organization Science*, 12(4), 502–517. doi: 10.1287/orsc.12.4.502.10637 12(4): 502
- Reich, R. M., Aguirre-Bravo, C., & Bravo, V. A. (2008). New approach for modeling climatic data with applications in modeling tree species distributions in the states of Jalisco and Colima, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 72(7), 1343–1357. doi: 10.1016/j.jaridenv.2008.02.004
- Ríos, G. C., & Herrero, S. V. (2005). La producción científica latinoamericana y la ciencia mundial: una revisión bibliográfica (1989-2003). *Revista Interamericana de Bibliotecología*, 28(1), 43–61. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-09762005000100003&lng=en&tlng=es
- Rojas-García, F., De Jong, H. J., Martínez-Zurimendi, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72(6), 835–864. doi: 10.1007/s13595-015-0456-y
- Ruis, M. G. S. B. (2001). Convenios mundiales sobre los bosques. A falta de un convenio forestal, diez tratados sobre árboles. *Unasylva: Revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, 206. Retrieved 30-10-2015 from http://www.fao.org/docrep/003/y1237s/y1237s02.htm#P0_0
- Russell, J. M., Ainsworth, S., & Narváez-Berthelemot, N. (2006). Colaboración científica de la Universidad Nacional Autónoma de México y su política institucional. *Revista Española de Documentación Científica*, 29(1). doi: 10.3989/redc.2006.v29.i1.287
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1993). *Tratado de Libre Comercio de América del Norte*. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from http://www.imcine.gob.mx/sites/536bfc0fa137610966000002/content_entry537f86d693e05abc55000284/53d2770d9d72796e24000089/files/1.pdf
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2013). *Anuario Estadístico de la Producción Forestal*. Retrieved from <http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/economica/anuarios-estadisticos-de-la-produccion-forestal>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2014). Áreas Naturales Protegidas. Retrieved November 19, 2015 from <http://www.conanp.gob.mx/regionales/>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2015). Anuarios forestales. Retrieved October 7, 2015 from <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/forestal-y-suelos/anuarios-forestales>

- Sheridan, R., Popescu, S., Gatzolis, D., & Morgan, C. L. (2014). Modeling forest aboveground biomass and volume using airborne LiDAR metrics and forest inventory and analysis data in the Pacific Northwest. *Remote Sensing*, 7(1), 229–255. doi: 10.3390/rs70100229
- Tichy, N. M., Tushman, M. L., & Fombrun, C. (1979). Social network analysis for organizations. *The Academy of Management Review*, 4(4), 507–519. Retrieved from <https://www.sfu.ca/cmns/courses/marontate/2009/801/ClassFolders/jmckinnon/Alternatives/Social%20Network%20Analysis%20for%20Organizations.pdf>
- United Nations Framework Convention on Climate Change (2014). Historia de la CMNUCC. Retrieved November 15, 2015 from http://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/la_convencion/historia/items/6197.php
- Velázquez, O. A., & Aguilar, G. (2005). *Manual introductorio al análisis de redes sociales. Medidas de centralidad. Ejemplos prácticos con UCINET 6.85 y NetDraw 1.48*. Retrieved from http://revista-redes.rediris.es/webredes/talleres/Manual_ARS.pdf
- Wasserman, S., & Faust, K. (1994). *Social network analysis, methods and applications*. UK: Cambridge University Press.