

# Bibliometric Analysis of Models for Temperate Forest Management: A Global Perspective on Sustainable Forest Management Tools

## Análisis bibliométrico de la modelación de bosques templados manejados: una perspectiva global en las herramientas de manejo forestal sustentable

María-Cristina Ordoñez\* & Leopoldo Galicia

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria. C. P. 04510. Ciudad de México, México.

\*Corresponding author: [macriso11@gmail.com](mailto:macriso11@gmail.com); tel.: +52 55 56224240 ext. 4505.

### Abstract

**Introduction:** Bibliometric analysis is a quantitative tool for recognizing trends and research gaps in topics of scientific interest.

**Objective:** To identify progress in scientific production, collaborative networks, research issues and application of models of temperate forest management (MTFM), on a global scale, in relation to management, productivity, carbon storage and nutrient cycling.

**Materials and methods:** The review focused on the collection of data from the Web of Science Core Collection platform in the period 2005-2019.

**Results and discussion:** The bibliometric analysis made possible to collect 960 specialized scientific articles on the topic, from journals indexed in Journal Citation Reports (JCR). The institutions with the greatest academic authority in forest management studies were Natural Resources of Canada (NRCan), Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) and US Forest Service. MTFM topics focused on forest plantation growth, effects of forest practices on structure, productivity, carbon sequestration and, to a lesser extent, nutrient availability. Mexico showed low collaboration with other institutions and a forest approach in the application of models.

**Conclusions:** The analysis helped to guide research on MTFM in Mexico. The implementation of models is recommended to achieve forest harvesting based on an integrated understanding of the system and thus provide sustainability.

**Keywords:** scientific production; collaborative networks; forest management; forestry; carbon sequestration.

### Resumen

**Introducción:** El análisis bibliométrico es una herramienta cuantitativa para reconocer las tendencias y brechas de investigación en temáticas de interés científico.

**Objetivo:** Identificar los avances en la producción científica, las redes de colaboración, temáticas de investigación y aplicación de modelación de bosques templados manejados (MBTM), a nivel global, en relación con el manejo, productividad, almacenamiento de carbono y ciclado de nutrientes.

**Materiales y métodos:** La revisión se centró en la recopilación de datos de la plataforma Web of Science Core Collection en el periodo 2005-2019.

**Resultados y discusión:** El análisis bibliométrico permitió recolectar 960 artículos científicos especializados en el tema, provenientes de revistas indexadas en Journal Citation Reports (JCR). Las instituciones con mayor autoridad académica en estudios sobre manejo forestal fueron Natural Resources of Canada (NRCan), Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) y US Forest Service. Las temáticas de MBTM se enfocaron en el crecimiento de plantaciones forestales, efectos de las prácticas silvícolas en la estructura, productividad, secuestro de carbono y, en menor medida, en la disponibilidad de nutrientes. México presentó baja colaboración con otras instituciones y un enfoque netamente silvícola en la aplicación de modelación.

**Conclusiones:** El análisis permitió orientar la investigación en MBTM para México. Se recomienda la implementación de modelación para lograr un aprovechamiento forestal basado en la comprensión integral del sistema y así garantizar su sostenibilidad.

**Palabras clave:** producción científica; redes de colaboración; manejo forestal; silvicultura; secuestro de carbono.

## Introduction

Bibliometric analysis is a quantitative observation tool to recognize research gaps in topics of scientific interest such as climate change (Wang, Zhao, & Wang, 2018), development and sustainable livelihoods (Caiado, Dias, Mattos, Quelhas, & Filho, 2017; Zhang, Fang, Chen, & Congshan, 2019), deforestation (Aleixandre-Benavent, Aleixandre-Tudó, Castelló-Cogollos, & Aleixandre, 2018) or analysis methodologies (Chen, Liu, Luo, Webber, & Chen, 2016). The bibliometric analysis allows us to explain the current situation of research topics, development trends and convergence points, providing guidance for future research. In this sense, the bibliometric analysis of models for temperate forest management (MTFM) in the world will provide guidance for potentially valuable research for Mexico.

At the global level, bibliometric analyses related to MTFM have been scarcely addressed. MTFM has been used primarily for estimating timber production, carbon sequestration and prevention of disturbance effects (Law et al., 2018; Soriano-Luna et al., 2018; Urbano & Keeton, 2017), impacts of forest management intensity (Barefoot, Willson, Hart, Schweitzer, & Dey, 2019), effects of fire and wind (Riggs et al., 2015; Wiedinmyer, & Hurteau, 2010), pests (Camacho & Chong, 2015) and climate (Creutzburg et al., 2016; Lundmark et al., 2014). In contrast, the application of models of ecological responses, nutrient dynamics and carbon sequestration, in the long term, has been poorly evaluated due to the difficulty of making observations in different time series and at large geographical scales (Hume, Chen, & Taylor, 2018; Thiffault et al., 2011). However, the need for mitigation, adaptation and management of forests in the face of global change has generated the implementation of technological tools such as forest models to test complex hypotheses related to the understanding of forest management and decision making for sustainable forestry (Kimmins, 2004).

In the case of Mexico, the comprehensive understanding of forest management in relation to primary productivity dependent on the availability of nutrients, organic matter and effects of climate change, is still poorly addressed; in addition, soil and vegetation analyses are made on the basis of single measurements or a single rotation cycle. Consequently, it has not been possible to observe progressive changes and future impacts of management on nutrient availability and biomass production; this is insufficient to establish general conclusions on the effects of forest harvesting in the long term. On the other hand, the use of forest models would facilitate the comprehensive understanding of temperate forests, allowing the simulation of impact or management scenarios, in order to increase wood production without

## Introducción

El análisis bibliométrico es una herramienta de observación cuantitativa para reconocer las brechas de investigación en las temáticas de interés científico como el cambio climático (Wang, Zhao, & Wang, 2018), el desarrollo y los medios de vida sostenibles (Caiado, Dias, Mattos, Quelhas, & Filho, 2017; Zhang, Fang, Chen, & Congshan, 2019), la deforestación (Aleixandre-Benavent, Aleixandre-Tudó, Castelló-Cogollos, & Aleixandre, 2018) o metodologías de análisis (Chen, Liu, Luo, Webber, & Chen, 2016). El análisis bibliométrico permite explicar la situación actual de los temas de investigación, sus tendencias de desarrollo y los puntos de encuentro, proporcionando orientación para futuras investigaciones. En este sentido, el análisis bibliométrico de la modelación de bosques templados manejados (MBTM) en el mundo permitirá orientar investigaciones potencialmente valiosas para México.

A nivel global, los análisis bibliométricos relacionados con la MBTM han sido escasamente abordados. La MBTM se ha empleado principalmente en la estimación de la producción de madera, secuestro de carbono y prevención de efectos de las perturbaciones (Law et al., 2018; Soriano-Luna et al., 2018; Urbano & Keeton, 2017); los impactos de la intensidad del manejo forestal (Barefoot, Willson, Hart, Schweitzer, & Dey, 2019), los efectos del fuego y el viento (Riggs et al., 2015; Wiedinmyer & Hurteau, 2010), las plagas (Camacho & Chong, 2015) y el clima (Creutzburg et al., 2016; Lundmark et al., 2014). Por el contrario, la aplicación de modelación de las respuestas ecológicas, la dinámica de nutrientes y secuestro de carbono en el largo plazo han sido escasamente evaluados, debido a la dificultad para realizar observaciones en diferentes series de tiempo y en escalas geográficas extensas (Hume, Chen, & Taylor, 2018; Thiffault et al., 2011). No obstante, la necesidad de mitigación, adaptación y manejo de los bosques, ante el cambio global, ha generado la implementación de herramientas tecnológicas como la modelación forestal para probar hipótesis complejas relacionadas con la comprensión del funcionamiento de los bosques y toma de decisiones para lograr una silvicultura sostenible (Kimmins, 2004).

En el caso de México, la comprensión integral del manejo forestal con relación a la productividad primaria dependiente de la disponibilidad de nutrientes, materia orgánica y efectos del cambio climático aún es poco abordada; además, los análisis de suelos y vegetación se realizan a partir de mediciones únicas o de un solo ciclo de rotación. En consecuencia, no ha sido posible observar los cambios progresivos e impactos futuros del manejo sobre la disponibilidad de nutrientes y la producción de biomasa, siendo insuficientes para establecer conclusiones generales de los efectos de la

compromising the sustainability of forest (Wang et al., 2014; Zhang, Meng, Bhatti, Trofymow, & Arp, 2008).

Since the MTFM panorama in Mexico is not yet fully understood, it is important to know the emerging trends in research on this topic at a global level, in order to direct the development of relevant research for the improvement of forest management in Mexico. The objective of this review was to recognize scientific advances on the global modeling of MTFM in relation to productivity, carbon storage and nutrient cycling, from the bibliometric analysis of the main thematic areas, emerging research trends and critical points, as well as to focus research of MTFM in Mexico.

## Materials and methods

### Data collection and processing

The bibliometric analysis was performed by collecting data from the Web of Science Core Collection platform, a documentary database where all contributions (articles, editorials, letters, reviews and discussions) published in science and technology journals indexed by Thomson Reuters are collected. The access to full texts of publications was made by means of a search based on keywords. Keywords were identified according to the most important components of the study objective, in the English language. Search equations were created by mixing keywords (Table 1) and variants (with “\*”) with operators (AND, OR, NOT) and reserved symbols (quotes, wildcard character [\*,?] and parenthesis). Search included publications from the period 2005-2019. This consultation generated records of titles, keywords, abstracts, institutions, authors and references cited in \*.txt format, which were exported to CiteSpace and VOSviewer, for bibliometric analysis.

### Bibliometric analysis

CiteSpace (Chen, 2006) and VOSviewer (Wong, 2018) are scientific visualization software packages to identify major thematic areas, emerging research trends and

cosecha forestal en el largo plazo. Por otra parte, el uso de la modelación forestal facilitaría la comprensión integral de los bosques templados, permitiendo simular escenarios de impacto o manejo, con la finalidad de incrementar la producción de madera sin comprometer la sostenibilidad de los bosques (Wang et al., 2014; Zhang, Meng, Bhatti, Trofymow, & Arp, 2008).

En vista de que el panorama de la MBTM en México aún no es del todo comprendido, es relevante conocer las tendencias emergentes de la investigación en esta temática a nivel global, con la finalidad de dirigir el desarrollo de investigaciones trascendentes para el mejoramiento del manejo de los bosques de México. El objetivo de esta revisión fue conocer los avances científicos sobre la modelación global de MBTM en relación con la productividad, almacenamiento de carbono y ciclado de nutrientes, a partir del análisis bibliométrico de las principales áreas temáticas, tendencias emergentes de investigación y puntos críticos, así como focalizar la investigación de la MBTM en México.

## Materiales y métodos

### Recopilación y procesamiento de datos

El análisis bibliométrico se realizó mediante la recopilación de datos desde la plataforma Web of Science Core Collection, una base de datos documental donde se recogen todas las contribuciones (artículos, editoriales, cartas, revisiones y discusiones) publicadas en las revistas de ciencia y tecnología indizadas por Thomson Reuters. El acceso a los textos completos de las publicaciones se realizó mediante la búsqueda basada en palabras clave. Estas se identificaron según los componentes más importantes del objetivo de estudio en el idioma inglés. Las combinaciones de búsqueda se construyeron mezclando las palabras clave (Cuadro 1) y sus variantes (con “\*”) con operadores (AND, OR, NOT) y símbolos reservados (comillas, carácter comodín [\*, ?] y paréntesis). La búsqueda comprendió publicaciones del periodo 2005-2019. Esta consulta generó registros

**Table 1. Keywords by component related to models for temperate forest management (plant-soil relationship).**

**Cuadro 1. Palabras clave por componente relacionado con modelación de bosques templados manejados (relación planta-suelo).**

Component 1/ Componente 1	Component 2/ Componente 2	Component 3/ Componente 3	Component 4/ Componente 4	Component 5/ Componente 5
Temperate forest	Management	Model	Soil	Production
Conifers	Silviculture	Modeling	Carbon soil	Biomass
<i>Pinus</i>	Practices	Simulation	Nutrients	Productivity
Plantation	Wood	Scenarios	Nitrogen	
Spruce		Dynamic	Carbon sequestration	

critical point problems. Records previously acquired in \*.txt format were linked to VOSviewer and CiteSpace to be analyzed according to “country”, “institution” and “keyword” nodes. The identification of the countries providing a topic can help visualize the main factors contributing to the evolution of the knowledge map. Current research topics and frontiers research in the field are identified by the frequency of keywords used in journal articles and the form of collaboration between institutions. Based on the bibliometric analysis, MTFM approaches were considered with the aim of complementing the analysis of research gaps and directing future research. As a result, we obtained recording tables with frequencies and centrality, representative images of nodes and connection networks, where a node represents an element and a pivot point with a high interrelationship centrality.

## Results and discussion

### Scientific productivity of countries

In the bibliometric review, 960 records were obtained from JCR indexed journals in the MTFM field during the period 2005-2019. The United States was the country with the highest scientific production with 257 articles published, followed by Canada with 102, Germany with 92, China with 88 and France with 60 articles; these five countries accounted for 62 percent of the scientific publications, hosting a large number of authors and academic institutions (Figure 1). Publications and collaborations have increased since 2012, indicating that MTFM is becoming increasingly relevant worldwide, due to the need for mitigation and adaptation of forests to global change. Adaptation of forests to climate change requires innovative methods to integrate a wide range of biophysical and social elements of the system and scenarios of important variables for any management decision (Rastetter, 2017). In this context, the United States, Germany, France, and Sweden have world-renowned research institutes in agricultural sciences characterized by development and application of various models with different objectives and concepts. Modeling has been directed at integrating ecological, economic, and social functions of forests to achieve a multipurpose objective (Pretzsch, Grote, Reineking, Rötzer, & Seifert, 2008). In contrast, Mexico is below the average for global publications; however, from 2015, Mexican publications in indexed journals tripled. This is a result of the role played by forest policies in the country, which have prioritized forest management as a development objective. The forest sector contributes approximately 0.19 % of the national gross domestic product, creating around 177 622 permanent jobs (period 2009-2012), generating economic income and social welfare (Bray, Merino-

de títulos, palabras clave, resúmenes, instituciones, autores y referencias citadas en formato \*.txt, los cuales fueron exportados a los *softwares* CiteSpace y VOSviewer, para su análisis bibliométrico posterior.

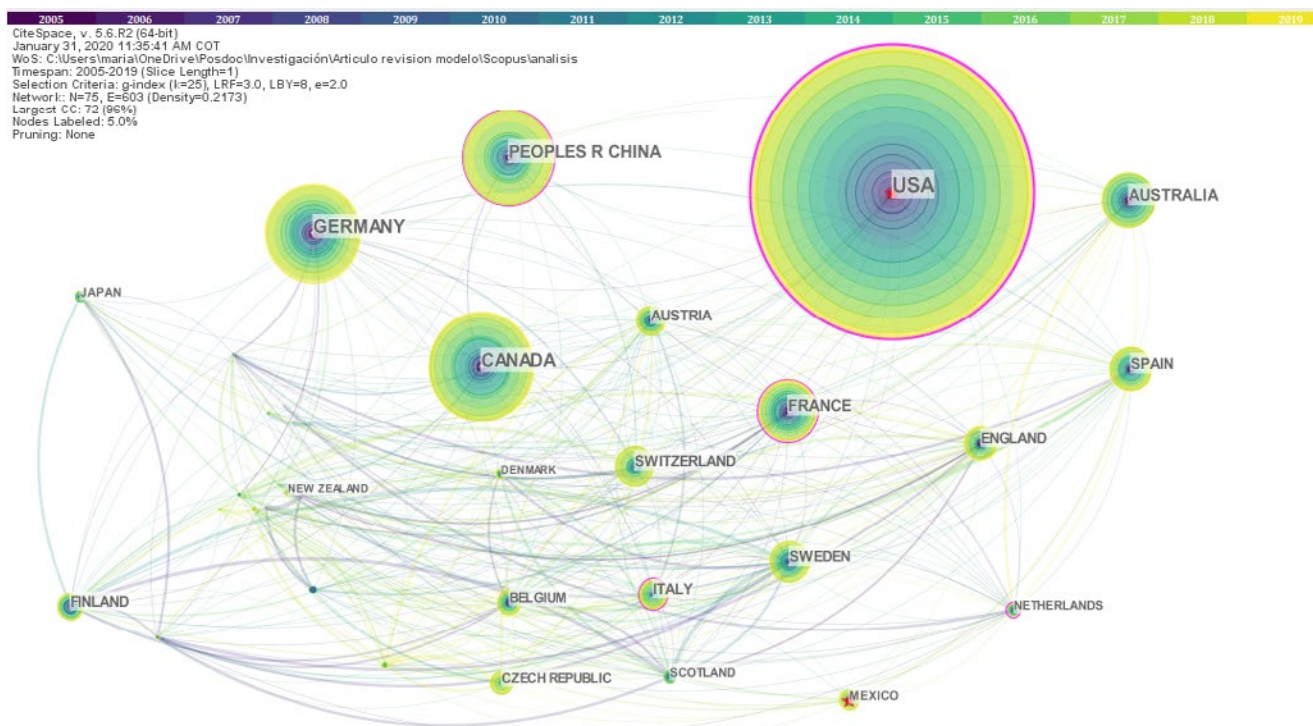
### Análisis bibliométrico

CiteSpace (Chen, 2006) y VOSviewer (Wong, 2018) son paquetes de *software* de visualización científica para identificar las principales áreas temáticas, tendencias emergentes de investigación y problemas de puntos críticos. Los registros previamente adquiridos en formato \*.txt fueron vinculados a VOSviewer y CiteSpace para ser analizados de acuerdo con los nodos “país”, “institución” y “palabra clave”. La identificación de los países contribuyentes a una temática puede ayudar a visualizar los principales factores que contribuyen a la evolución del mapa de conocimiento. Los temas de investigación actuales y la investigación de primera línea en el campo se identifican con la frecuencia de las palabras clave utilizadas en artículos de revistas y la forma de colaboración entre las instituciones. Sobre la base del análisis bibliométrico se consideraron los enfoques de la MBTM con el objetivo de complementar el análisis sobre las brechas de investigación y dirigir futuras investigaciones. Como resultado se obtienen tablas de registro con frecuencias y centralidad, imágenes representativas de los nodos y sus redes de conexión, donde un nodo representa un elemento y un punto pivote con una centralidad de alta interrelación.

## Resultados y discusión

### Productividad científica de países

En la revisión bibliométrica se obtuvieron 960 registros de revistas indizadas en JCR en el campo de la MBTM durante el periodo 2005-2019. Estados Unidos fue el país con mayor producción científica con 257 artículos publicados, seguido por Canadá con 102, Alemania con 92, China con 88 y Francia con 60 artículos; estos cinco países concentraron 62 % de las publicaciones científicas, albergando un gran número de autores e instituciones académicas (Figura 1). Las publicaciones y colaboraciones han incrementado a partir de 2012 indicando que la MBTM está tomando cada vez mayor relevancia a nivel mundial, debido a la necesidad de mitigación y adaptación de los bosques al cambio global. La adaptación de los bosques al cambio climático requiere de métodos innovadores que permitan integrar una gama amplia de elementos biofísicos y sociales del sistema y escenarios de variables importantes para cualquier toma de decisiones de gestión (Rastetter, 2017). En este contexto, Estados Unidos, Alemania, Francia y Suecia cuentan con institutos de investigación reconocidos a nivel mundial en ciencias agrícolas que



**Figure 1. Network of countries with scientific productivity in modeling managed forests, nutrients and carbon (CiteSpace) from Web of Science Core Collection.**

**Figura 1. Red de países con productividad científica en modelación de bosques manejados, nutrientes y carbono (CiteSpace) de Web of Science Core Collection.**

Pérez, & Barry, 2007; Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2020).

Information and communication technologies have facilitated the dissolution of institutional, spatial and disciplinary boundaries; in this way, forest researchers, experts or technicians have been able to link up and work with peers at different latitudes. In this sense, the production of grey literature, limited mainly to institutional production, continues to give way to production in scientific journals with greater potential for dissemination and outreach (Aguado-López et al., 2009).

#### Global network for scientific-institutional collaboration

About 988 institutions have contributed to MTFM research. Among the most active we found The Chinese Academy of Science (CAS), which produced 49 articles with a total of 485 citations; followed by US Forest Service (USFS) with 38 articles and 926 citations; Natural Resources of Canada (NRCan) with 22 articles and 1 076 citations; Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) with 20 publications and 1 412 citations; and University of British Columbia (UBC) with 15 articles and 602 citations. This indicates the development and specialization of these research institutes and academies in the field, since 10 % of the GDP of these regions comes

se caracterizan por desarrollar y aplicar varios modelos con diversos objetivos y concepciones. La modelación se ha dirigido a integrar funciones ecológicas, económicas y sociales de los bosques para lograr un objetivo multipropósito (Pretzsch, Grote, Reineking, Rötzer, & Seifert, 2008). En contraste, México se encuentra por debajo del promedio de las publicaciones globales; sin embargo, a partir del 2015, las publicaciones mexicanas en revistas indizadas se triplicaron. Esto como resultado del papel que juegan las políticas forestales en el país, las cuales han priorizado el manejo forestal como objetivo de desarrollo. Al respecto, el sector forestal contribuye con aproximadamente 0.19 % del producto interno bruto nacional, creando alrededor de 177 622 empleos permanentes (periodo 2009-2012), generando ingresos económicos y bienestar social (Bray, Merino-Pérez, & Barry, 2007; Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2020).

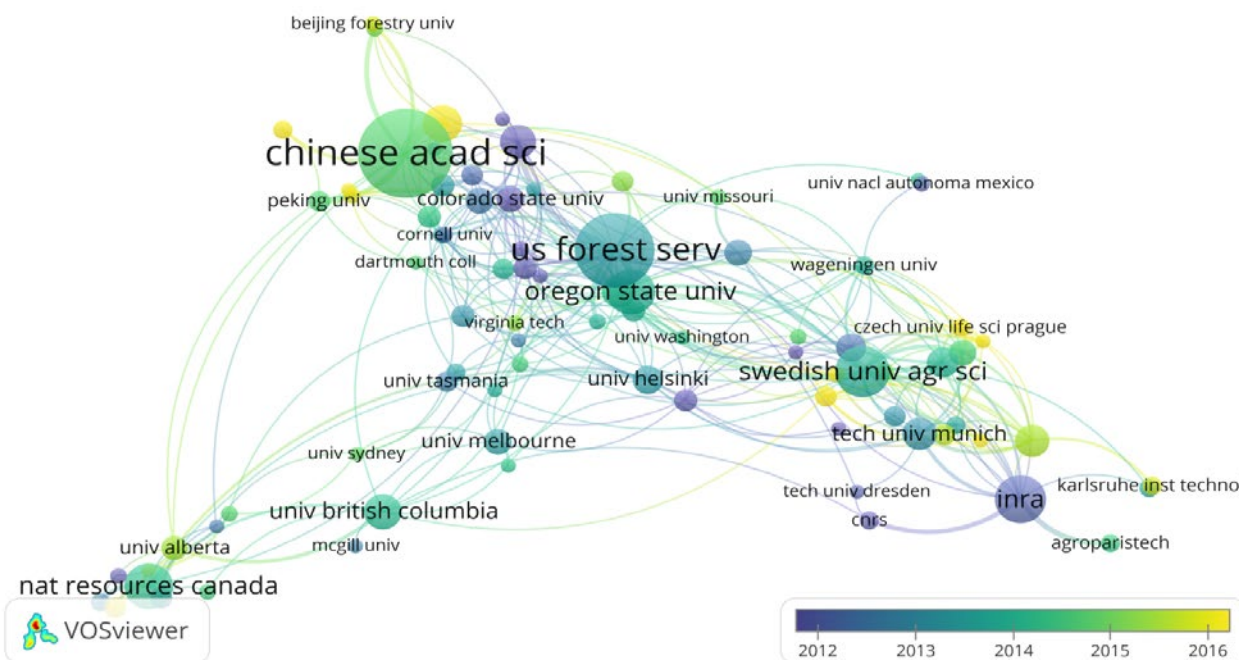
Las tecnologías de la información y comunicación han facilitado la disolución de fronteras institucionales, espaciales y disciplinares; de esta forma, los investigadores, expertos o técnicos forestales han logrado la vinculación y trabajo colegiado con pares en diferentes latitudes. En este sentido, la producción de literatura gris, limitada principalmente a la producción institucional, continúa cediendo espacio a la producción en revistas científicas con mayor potencial de difusión y alcance (Aguado-López et al., 2009).



from forestry and agricultural production; several of them are governmental organizations. However, the greater number of publications does not necessarily mean the greater influence in the academic field; for example, NRCan, INRA and USFS report greater academic authority in forest management studies, because their articles are cited by a greater number of researchers in the world. Academic production focuses on understanding management practices to sustain forest resources, understanding the effect of disturbances such as climate change, the relationship of forests and human systems, and approaches to forest bioeconomics, bioenergy and bioproducts. In addition, there are institutions that promote innovation and technological advances based on the development of models for management and decision-making in forestry and agriculture. In this sense, the greater collaboration between institutions at the global level is reflected by the greater centrality of collaborative networks (Figure 2): USFS, UBC and CAS were the most influential during the period under review, while Tech Univ Munich showed the most collaboration in 2019, and Swedish University of Agriculture and Science and INRA had the most influence during 2005 and 2007, respectively. The most influenced institutions (centrality) have a higher frequency of publications and citations.

### Red global de colaboración científica institucional

Alrededor de 988 instituciones han contribuido a la investigación de la MBTM. Entre las más activas se encuentran The Chinese Academy of Science (CAS), quien produjo 49 artículos con un total de 485 citas; le siguen US Forest Service (USFS) con 38 artículos y 926 citas; Natural Resources of Canada (NRCan) con 22 artículos y 1 076 citaciones; Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) con 20 publicaciones y 1 412 citaciones; y University of British Columbia (UBC) con 15 artículos y 602 citaciones. Lo anterior indica el desarrollo y especialización de estos institutos y academias de investigación en la temática, debido a que 10 % del PIB de estas regiones proviene de la producción forestal y agrícola; además, varias de ellas son organizaciones gubernamentales. No obstante, el mayor número de publicaciones no necesariamente significa la mayor influencia en el ámbito académico; por ejemplo, NRCan, INRA y USFS reportan mayor autoridad académica en estudios sobre manejo forestal, debido a que sus artículos son citados por un mayor número de investigadores en el mundo. La producción académica se dirige a entender las prácticas de gestión para sostener recursos forestales, conocer el efecto de perturbaciones como el cambio climático, la relación de los bosques y los



**Figure 2. Institutional collaboration network on modeling of managed forests, nutrients and carbon (VOSviewer) during the period 2012-2016, interacting 85 institutions in 10 groups, mainly.**

**Figure 2. Red de colaboración institucional en modelación de bosques manejados, nutrientes y carbono (VOSviewer) durante el periodo 2012-2016, donde interactúan 85 instituciones en 10 agrupaciones, principalmente.**

Mexico's scientific production, disseminated internationally, is led by the Universidad Nacional Autónoma de México and the Colegio de Posgraduados. The low centrality at a global level shows the limited collaboration with other institutions in the world, most of which is at a national level; internationally, there is interaction with the University of Wageningen (The Netherlands) and USFS. However, national research institutes stand out in the country; for example, the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), which leads forestry research and has its own journal "Revista Mexicana de Ciencias Forestales", which publishes much of the work and research on the topic. Therefore, this literature, as well as reports, theses and "grey literature", continues to be relevant for the country, due to the scarce scientific production published in internationally indexed journals. In this regard, there are opportunities and some national strength that could be exploited, such as inter-institutional collaborations that would increase if academic, institutional and international exchange programs were promoted to broaden discussion and facilitate the learning of technologies in the forestry sector, improving indicators of centrality. At the same time, foreign investment and joint projects would be accessed to research Mexico's temperate forests, enabling technology and innovation-based decision-making to be guided. Finally, it is necessary to strengthen the research system in Mexico and the publication in journals that meet quality standards, visibility and impact at the international level. This would be an effective way to increase dissemination and international circulation of the country's research, reflecting science, institutions, researchers and society (Ramírez, Martínez, & Castellanos, 2012).

### Research topics on models for temperate forest management

The analysis of the frequency of keywords that summarize the article's topic, areas or methods, allows us to explore research trends effectively and identify "convergence points" in a given topic (Wang et al., 2018). The most frequently keyword in relation to MTFM (Table 2) was "management", because forest management is based on different forest practices and productive management according to the species and areas where they are employed; furthermore, because management is evaluated or managed to improve aspects of timber production. The word "climate change" was the most common in the global ranking, because it is the main disturbance addressed in modeling due to effects on wood production, biodiversity and incidence on other disturbances (pests, fire and wind), and the need to generate mitigation strategies (sustainable forest management). The

sistemas humanos, y los enfoques en la bioeconomía forestal, bioenergía y bioproductos. Asimismo, hay instituciones que promueven la innovación y avances tecnológicos a partir del desarrollo de modelos para gestión y toma de decisiones a nivel forestal y agrícola. En este sentido, la mayor colaboración entre instituciones a nivel mundial se ve reflejada por la mayor centralidad en las redes de colaboración (Figura 2): USFS, UBC y CAS fueron las más influyentes durante el periodo analizado, mientras Tech Univ Munich exhibió la mayor colaboración en el año 2019, y Swedish University of Agricultural Sciences e INRA tuvieron la mayor influencia durante los años 2005 y 2007, respectivamente. En general, las instituciones que tienen mayor influencia (centralidad) cuentan con mayor frecuencia de publicaciones y citaciones.

La producción científica de México, difundida a nivel internacional, está encabezada por la Universidad Nacional Autónoma de México y el Colegio de Posgraduados. La baja centralidad a nivel global evidencia la colaboración limitada con otras instituciones del mundo. La colaboración, en su mayoría, es a nivel nacional; internacionalmente, hay interacción con la Universidad de Wageningen (Países Bajos) y USFS. No obstante, en el país destacan institutos nacionales de investigación; por ejemplo, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), que lidera la investigación forestal y cuenta con su propia revista de divulgación "Revista Mexicana de Ciencias Forestales", publica gran parte de los trabajos e investigaciones en la temática. Por lo tanto, esta literatura, al igual que informes, tesis y "literatura gris", continúa siendo relevante para el país, debido a la escasa producción científica publicada en revistas indizadas a nivel internacional. Al respecto, existen oportunidades y algunas fortalezas nacionales que pudieran aprovecharse, como las colaboraciones interinstitucionales que aumentarían si se fomentaran programas de intercambio académico, institucional e internacional, para ampliar la discusión y facilitar el aprendizaje de tecnologías en el sector forestal, mejorando indicadores de centralidad. Al mismo tiempo, se accedería a inversión extranjera y proyectos conjuntos para investigar los bosques templados de México, permitiendo dirigir la toma de decisiones con base en la tecnología e innovación. Finalmente, es necesario que en México se fortalezca el sistema de investigación y la publicación en revistas que cumplan con estándares de calidad, visibilidad e impacto a nivel internacional. Esta sería una manera eficaz de aumentar la difusión y circulación internacional de la investigación del país, reflejando el funcionamiento general de la ciencia, instituciones, investigadores y sociedad (Ramírez, Martínez, & Castellanos, 2012).

**Table 2. Frequency and centrality of keywords based on bibliometric analysis (960 articles) for modeling research in managed temperate forests.**

**Cuadro 2. Frecuencia y centralidad de las palabras clave, a partir del análisis bibliométrico (960 artículos) para la investigación de modelación de bosques templados manejados.**

Ranking	Frecuency/Frecuencia	Centrality/Centralidad	Keywords/Palabra clave
1	123	0.03	management
2	111	0.01	temperate forest
3	111	0.03	Climate change
4	101	0.04	nitrogen
5	88	0.03	ecosystem
6	76	0.02	carbon
7	74	0.02	forest
8	73	0.04	growth
9	71	0.07	carbon sequestration
10	66	0.05	dynamics
11	62	0.06	modeling

words “nitrogen”, “ecosystem” and “carbon” can be considered as main topics guiding modeling research in managed temperate forests based on soil-plant-atmosphere relationship; highlighting the availability of nitrogen for production, storage and sequestration of carbon as the main focus of research. The word “growth” is directly related to wood production, the main objective of forestry production, and “dynamics” is the topic that is understood by models to maintain wood production. Finally, the word “modeling” was used in most of the publications from 2010; it is transversal to all the previous topics, because the aim of modeling is to simulate the influence of disturbances on dynamics of processes and functions to increase wood production or carbon sequestration in managed temperate forests.

#### Modeling application topics for managed temperate forests

Managed temperate forest modeling has focused on understanding the role of these forests in carbon sequestration and increasing wood production in relation to disturbances (Sharma, Bohn, Jose, & Cropper, 2014; Wang, Bauerle, & Reynolds, 2008). Research applying modeling to estimate or improve wood production uses tree growth models focused on allometric relationships (Bryars et al., 2013; Soriano-Luna et al., 2018; Urbano & Keeton, 2017; Zhang et al., 2008) and relationships with disturbances that negatively impact timber production and cause significant global economic losses (Locatelli et al., 2016); some of them are pests (Camacho & Chong, 2015), fire and wind effect (Riggs et al., 2015; Wiedinmyer &

#### Temáticas de investigación de la modelación de bosques templados manejados

El análisis de la frecuencia de las palabras clave que resumen la temática del artículo, las áreas o métodos, permite explorar las tendencias de investigación de forma efectiva e identificar “puntos de encuentro” en una temática dada (Wang et al., 2018). La palabra clave utilizada con mayor frecuencia en relación con la MBTM (Cuadro 2) fue *management*, debido a que el manejo forestal se basa en diferentes prácticas silvícolas y manejos productivos según las especies y zonas donde se emplean; además, porque se evalúa o gestiona el manejo para mejorar los aspectos de producción de madera. La palabra *climate change* fue la más común en el *ranking* global, ya que es la principal perturbación abordada en modelación, debido a sus efectos sobre la producción de madera, biodiversidad e incidencia sobre otras perturbaciones (plagas, fuego y viento), y a la necesidad de generar estrategias de mitigación (manejo forestal sustentable). Las palabras *nitrogen*, *ecosystem* y *carbon* pueden considerarse las principales temáticas que están dirigiendo la investigación de modelación en los bosques templados manejados basados en la relación suelo-planta-atmósfera; destacando la disponibilidad de nitrógeno para la producción, el almacenamiento y secuestro de carbono como principales focos de investigación. Luego está *growth* relacionado directamente con la producción de madera, principal objetivo de la producción silvícola, y *dynamic* que es el tópico que se trata de entender mediante modelos para mantener la producción de madera. Finalmente, la palabra *modeling* se usó en la mayoría de las publicaciones a partir del 2010; es



Hurteau, 2010) and climate change (Creutzburg et al., 2016; Dangal, Felzer, & Hurteau, 2014; Harper et al., 2016; Klesse et al., 2018; Lundmark et al., 2014; Wang et al., 2014). In the context of climate change, models have focused on the design and implementation of mitigation and adaptation policies (Wang et al., 2013).

Scientific production in forest modeling focuses primarily on the relationship between carbon sequestration and storage capacity (Ricker, Gutierrez-Garcia, & Daly, 2007; Thom, Rammer, Garstenauer, & Seidl, 2018; Woodbury, Smith, & Heath, 2007). For example, C emissions from forest conversion to managed stands, and type of disturbance and intensity determine C losses to the atmosphere (Chen et al., 2013). Disturbance and nutrient cycling are also analyzed by flows models and interactions between forest processes, in order to develop more realistic predictions of forest response to management practices and global change (Karam, Weisberg, Scheller, Johnson, & Miller, 2013). In addition, estimates of spatial and temporal changes in the loss of temperate forest cover allow us to estimate vulnerability to global climate change (Potapov, Hansen, Stehman, Loveland, & Pittman, 2008). The role that these forests play in the carbon cycle at stand and landscape scale has tried to be understood (Gonzalez-Benecke, Martin, Cropper, & Bracho, 2010; Law et al., 2018; Manzoni & Porporato, 2009; Thompson et al., 2016), complementing with assessments on carbon management strategies based on forest harvesting life cycles (Peckham & Gower, 2013; Winford & Gaither, 2012). Modeling has been used in smaller-scale studies to understand how limiting resources influence forest production, such as water deficit and nutrient availability (Griffiths et al., 2019; Liu et al., 2018; Seidl, Rammer, Jäger, Currie, & Lexer, 2007; Tian, Youssef, Skaggs, Amatya, & Chescheir, 2012), and processes related to harvesting and soil carbon and nitrogen, such as organic matter stabilization, decomposition processes and microbial response to root exudates (Abdelnour, McKane, Stieglitz, Pan, & Cheng, 2013; Bhowmik et al., 2017; Parolari & Porporato, 2016; Robertson et al., 2018; Smethurst et al., 2015; Wallace, Laughlin, Clarkson, & Schipper, 2018; Wang et al., 2014).

Modeling provides biological and analytical realism for understanding the structure and function of forests; however, the complexity of some models adds uncertainty to the underlying causes of final predictions, weakening their heuristic value or providing useful theoretical information but omitting critical details (Kimmins, 2004). The bibliometric analysis identified the main research gaps that need to be addressed to improve ecosystem management; for example, how the use of soil-plant-disturbance relationship models can integrate independent

transversal a todas las temáticas anteriores, pues a partir de la modelación se trata de simular la influencia de las perturbaciones sobre la dinámica de procesos y funciones para incrementar la producción de madera o secuestro de carbono en bosques templados manejados.

### **Temáticas de aplicación de modelación para bosques templados manejados**

La modelación de bosques templados manejados se ha orientado en comprender el papel de estos bosques en el secuestro de carbono y en lograr el incremento de la producción de madera con relación a las perturbaciones (Sharma, Bohn, Jose, & Cropper, 2014; Wang, Bauerle, & Reynolds, 2008). Las investigaciones que aplican modelación para estimar o mejorar la producción de madera utilizan modelos de crecimiento enfocados en relaciones alométricas (Bryars et al., 2013; Soriano-Luna et al., 2018; Urbano & Keeton, 2017; Zhang et al., 2008) y relaciones con perturbaciones que impactan negativamente la producción de madera y ocasionan pérdidas económicas notables a nivel global (Locatelli et al., 2016); algunas de ellas son las plagas (Camacho & Chong, 2015), el efecto del fuego y el viento (Riggs et al., 2015; Wiedinmyer & Hurteau, 2010) y el cambio climático (Creutzburg et al., 2016; Dangal, Felzer, & Hurteau, 2014; Harper et al., 2016; Klesse et al., 2018; Lundmark et al., 2014; Wang et al., 2014). En el contexto del cambio climático, los modelos se han dirigido al diseño e implementación de políticas de mitigación y adaptación (Wang et al., 2013).

La producción científica en la temática de modelación forestal se enfoca principalmente en la relación de capacidad del secuestro y almacenamiento de carbono (Ricker, Gutiérrez-García, & Daly, 2007; Thom, Rammer, Garstenauer, & Seidl, 2018; Woodbury, Smith, & Heath, 2007). Por ejemplo, las emisiones de C por conversión del bosque a rodales manejados, y el tipo de perturbación y la intensidad determinan las pérdidas de C a la atmósfera (Chen et al., 2013). También la perturbación y el ciclo de nutrientes se analizan mediante la modelación de flujos e interacciones entre procesos forestales, con el fin de desarrollar predicciones más realistas de la respuesta forestal a las prácticas de manejo y el cambio global (Karam, Weisberg, Scheller, Johnson, & Miller, 2013). Además, las estimaciones de los cambios espaciales y temporales de la pérdida de cobertura de bosques templados permiten estimar su vulnerabilidad al cambio climático global (Potapov, Hansen, Stehman, Loveland, & Pittman, 2008). También se ha buscado entender el papel de estos bosques en el ciclo del carbono a escala de rodal y de paisaje (Gonzalez-Benecke, Martin, Cropper, & Bracho, 2010; Law et al., 2018; Manzoni & Porporato, 2009; Thompson et al., 2016), complementando con evaluaciones sobre estrategias de gestión de carbono, basadas en los ciclos de vida del aprovechamiento

biodiversity factors, drivers of change and ecosystem responses to help improve assessments of managed forests and their sustainability.

### Modeling Research Guidance for Managed Temperate Forests in Mexico

In Mexico, most of the research that has used MTFM is related to aerial biomass allometric estimates (Chávez-Pascual, Rodríguez-Ortiz, Enríquez-Del Valle, Velasco-Velasco, & Gómez-Cárdenas, 2017; Corral-Rivas et al., 2017; Douterlungne, Herrera-Gorocica, Ferguson, Siddique, & Soto-Pinto, 2013), carbon expansion equations of several plant species (Silva-Arredondo & Návar-Cháidez, 2009) and spatial equations to determine impacts of land cover change in relation to management and carbon sequestration (Flamenco-Sandoval, Ramos, & Masera, 2007; Prieto-Amparán et al., 2019; Ricker et al., 2007; Soriano-Luna et al., 2018). However, there are gaps in the comprehensive understanding of forest management in relation to primary productivity dependent on availability of nutrients, organic matter and climatic factors, and forest management.

Currently, forest management impacts positively on ecosystem services of timber production (raw material), carbon sequestration and storage, and affects in a negative way the services of conservation of plant diversity and regulation of water flows (Monárrez-González, Pérez-Verdín, López-González, Márquez-Linares, & González, 2018). In this sense, the transition from a purely silvicultural vision to a systemic vision would allow the management of forests from the understanding of the compensations, synergies and relations of ecosystem services (Galicia & Zarco-Arista, 2014). Research based on modeling would allow the integration of elements and simulate diverse disturbance scenarios to generate forest management that is indeed on the way to sustainability. For example, it is necessary to model the impacts of biomass harvesting on vegetation responses (richness, composition and diversity of plant species); furthermore, soil disturbance generates other less visible consequences in ecosystems such as the modification of microbial communities and, consequently, of soil functions, such as the interdependence of C and N cycles (Nasi & Frost, 2009) which have been little explored. On the other hand, modeling would allow identification, quantification and valuation of multiple ecosystem goods and services in sites under forest exploitation, for the application of social, economic and environmental policies on long-term ecosystem management strategies (Galicia et al., 2016); for example, the multifunctionality of mixed plantations depends greatly on the arrangement and appropriate combination of species for the achievement

forestal (Peckham & Gower, 2013; Winford & Gaither, 2012). La modelación se ha empleado en estudios de menor escala para entender la forma en que los recursos limitantes influyen en la producción forestal, tales como el déficit de agua y la disponibilidad de nutrientes (Griffiths et al., 2019; Liu et al., 2018; Seidl, Rammer, Jäger, Currie, & Lexer, 2007; Tian, Youssef, Skaggs, Amatya, & Chescheir, 2012), y los procesos relacionados con la cosecha y el carbono y nitrógeno del suelo, como la estabilización de materia orgánica, procesos de descomposición y respuesta microbiana a los exudados de la raíz (Abdelnour, McKane, Stieglitz, Pan, & Cheng, 2013; Bhowmik et al., 2017; Parolari & Porporato, 2016; Robertson et al., 2018; Smethurst et al., 2015; Wallace, Laughlin, Clarkson, & Schipper, 2018; Wang et al., 2014).

La modelación proporciona realismo biológico y analítico para la comprensión de la estructura y funcionamiento de los bosques; sin embargo, la complejidad de algunos modelos agrega incertidumbre a las causas subyacentes de sus predicciones finales, debilitando su valor heurístico o proporcionando información teórica útil, pero omitiendo detalles críticos (Kimmins, 2004). El análisis bibliométrico permitió identificar las principales brechas de investigación que deben abordarse para mejorar el manejo de los ecosistemas; por ejemplo, la forma en que el empleo de modelos de relación suelo-planta-perturbaciones permite integrar factores independientes de biodiversidad, impulsores del cambio y respuestas de los ecosistemas para contribuir a mejorar las evaluaciones de los bosques manejados y su sostenibilidad.

### Orientación de la investigación en modelación para bosques templados manejados de México

En México, la mayoría de las investigaciones que han empleado MBTM se refieren a estimaciones alométricas de biomasa aérea (Chávez-Pascual, Rodríguez-Ortiz, Enríquez-Del Valle, Velasco-Velasco, & Gómez-Cárdenas, 2017; Corral-Rivas et al., 2017; Douterlungne, Herrera-Gorocica, Ferguson, Siddique, & Soto-Pinto, 2013), ecuaciones de expansión de carbono de varias especies vegetales (Silva-Arredondo & Návar-Cháidez, 2009) y ecuaciones espaciales para determinar impactos de la transformación de coberturas en relación con los manejos y el secuestro de carbono (Flamenco-Sandoval, Ramos, & Masera, 2007; Prieto-Amparán et al., 2019; Ricker et al., 2007; Soriano-Luna et al., 2018). No obstante, existen brechas en la comprensión integral del manejo forestal con relación a la productividad primaria dependiente de la disponibilidad de nutrientes, materia orgánica y factores climáticos.

Actualmente, el manejo forestal impacta de forma positiva a los servicios ecosistémicos de producción de madera (materia prima), secuestro y almacenamiento

of objectives. In this sense, emphasis has been placed on stimulating productivity and growth of forests through mixtures of species (evergreen-broadleaf) and it has been determined that these mixtures provide the greatest ecological benefits (i. e. maintenance of fertility) for conservation, protection and restoration, in comparison with monospecific pine forests, although these have a higher commercial value (Nunes, Lopes, Castro, & Gower, 2013). Therefore, simulations of ecological processes allow proposals to be made for mixed plantations to increase biomass production, C storage in the soil and availability of nutrients in relation to monospecific plantations (Forrester, 2014). In addition, modeling is a key to the successful implementation of mitigation practices, as it requires knowledge of the role of species identity and diversity in the long-term accumulation of C in plantations.

The use of models in the context of forestry in Mexico could help us understand the consequences of management in the Mexican method of irregular forest management and the method of forestry development, integrating aspects such as regeneration and maintenance of soil characteristics and biodiversity. In other words, the use of models would answer the following questions: How do forest management systems affect structure and composition of plant communities? How has the type of forest management affected nutrient stores and dynamics? What are the temporal dynamics of emissions of major greenhouse gases under different management? and How does forest management affect the ability to maintain biodiversity, carbon sequestration and forest soil fertility? The use of models opens the possibility of solving the above-mentioned problems, given that in our country the scientific information that supports forest management decisions, both operationally and normatively, is limited.

The application of MTFM in the country would require improved data collection through standardized protocols for sampling, sample analysis and management of these ecosystems as a starting point for simulating disturbance effects in conditions and contexts of the regions of Mexico. Moreover, since the number of forest cycles employed in the country varies between 10 and 50 years, it is important that research focus on developing design criteria to improve the configuration of tree species and density of plantations and benefits, in the long term. In this context, agroforestry statistics should be collected and updated at the institutional level, so that existing models can be calibrated and validated by various researchers in the country; for example, plant-soil relationship and forest management intensity models could be used such as EFIMOD (Mikhailov et al., 2003), which models carbon and nitrogen; CENTURY simulates, in addition

de carbono e impactan negativamente en los servicios de conservación de la diversidad vegetal y regulación de flujos de agua (Monárrez-González, Pérez-Verdín, López-González, Márquez-Linares, & González, 2018). En este sentido, el tránsito de una visión netamente silvícola a una sistémica permitiría gestionar los bosques desde la comprensión de las compensaciones, sinergias y relaciones de servicios ecosistémicos (Galicia & Zarco-Arista, 2014). La investigación basada en modelación permitiría integrar elementos y simular diversos escenarios de perturbación, para generar manejos forestales que realmente se encaminen hacia la sustentabilidad. Por ejemplo, es necesario modelar los impactos de la cosecha de biomasa sobre las respuestas de la vegetación (la riqueza, la composición y diversidad de las especies vegetales); asimismo, la perturbación del suelo genera otras consecuencias menos visibles en los ecosistemas como la modificación de las comunidades microbianas y, en consecuencia, de las funciones del suelo, como la interdependencia de los ciclos de C y N (Nasi & Frost, 2009) que han sido poco exploradas. Por otra parte, la modelación permitiría la identificación, cuantificación y valoración de múltiples bienes y servicios ecosistémicos en los sitios bajo aprovechamiento forestal, para la aplicación de políticas sociales, económicas y ambientales sobre estrategias de manejo de los ecosistemas a largo plazo (Galicia et al., 2016); por ejemplo, la multifuncionalidad de las plantaciones mixtas depende mucho del arreglo y la combinación apropiada de especies para el cumplimiento de los objetivos. En este sentido, se ha enfatizado en estimular la productividad y el crecimiento de los bosques mediante mezclas de especies (aciculares-latifoliadas) y se ha determinado que estas mezclas proveen los mayores beneficios ecológicos (i. e. mantenimiento de la fertilidad) para la conservación, protección y restauración, en comparación con los bosques monoespecíficos de pinos, aunque estos tengan una mayor valuación comercial (Nunes, Lopes, Castro, & Gower, 2013). Por lo tanto, las simulaciones de los procesos ecológicos permiten plantear propuestas de plantaciones mixtas para el incremento de la producción de biomasa, el almacenamiento de C en el suelo y la disponibilidad de los nutrientes con relación a las plantaciones monoespecíficas (Forrester, 2014). Asimismo, la modelación es clave para la implementación exitosa de prácticas de mitigación, ya que requiere el conocimiento del papel de la identidad y diversidad de especies en la acumulación de C de las plantaciones en el largo plazo.

La utilización de modelos en el contexto de la silvicultura en México podría ayudarnos a entender las consecuencias del manejo en el método mexicano de ordenación de bosques irregulares y el método de desarrollo silvícola, integrando aspectos como la regeneración y el mantenimiento de las características del suelo y de la biodiversidad. En otras palabras, el uso de modelos daría respuesta a las preguntas siguientes:

to the above mentioned elements, phosphorus and sulfur (Parton, McKeown, Kirchner, & Ojima, 1992); Forest DNDC (Li, 2000), Biome-BGC and Forest-BGC (Aber & Driscoll, 1997) simulate carbon, nitrogen and water; CBM-CFS3 (Kull et al., 2011) models carbon emissions and life cycle of wood products; PnET-BGC, PnET-CN (Svensson, Jansson, & Kleja, 2008) simulates energy, water and major element flows; and COUP MODEL is a coupled heat and mass transfer model of the forest ecosystem. All of these models allow for testing management or climate change scenarios in relation to their main analysis. In this way, MBTM makes it possible to identify the effects of disturbances or management on carbon sequestration, nutrient availability, primary productivity and water availability, which in turn could reduce disturbances in wood production due to natural and human-induced hazards.

### Conclusions

The bibliometric analysis suggests that the United States is the leader in research on models for managed temperate forests (MTFM). The US Forest Service, Natural Resources of Canada (NRCAN) and the Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) report the greatest academic authority, because their articles are the most cited in the world. Publications and collaborations have increased since 2012 indicating that MTFM is becoming more relevant, because of the need for mitigation and adaptation of forests to global change. Mexico and other Latin American countries have less centrality in publications and collaboration at a global level in this topic because the Web platform of Science Core Collection only collects contributions from indexed science and technology journals. Therefore, it is important to promote interpersonal and inter-institutional collaboration to improve the appropriation of technologies, foreign investment and increase the number of indexed publications. Finally, it is necessary for MTFM in Mexico to move towards an integral analysis for sustainable management.

### Acknowledgements

The authors thank the Instituto de Geografía and the Programa de Becas Posdoctorales DGAPA of the Universidad Nacional Autónoma de México for funding and support to the first author. The authors also thank the project “Aprovechamiento y protección de ecosistemas y de la biodiversidad” (code 314), funded by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

¿Cómo afectan los sistemas de manejo forestal a la estructura y composición de las comunidades vegetales?, ¿cómo ha afectado el tipo de manejo forestal a los almacenes y dinámica de nutrientes?, ¿cómo es la dinámica temporal de las emisiones de los principales gases de efecto invernadero bajo diferentes manejos? y ¿en qué medida afectan los manejos forestales a la capacidad para mantener la biodiversidad, la captura de carbono y la fertilidad del suelo forestal? El uso de modelos abre la posibilidad de resolver las problemáticas antes planteadas, dado que en nuestro país la información científica que sustenta las decisiones del manejo forestal, tanto operativa como normativamente, es limitada.

La aplicación de MBTM en el país requeriría que se mejore la toma de datos mediante protocolos estandarizados para muestreo, análisis de muestras y manejo de estos ecosistemas como punto de partida para simular efectos de perturbaciones en condiciones y contextos particulares de las regiones de México. Además, debido a que los ciclos silvícolas empleados en el país varían entre 10 y 50 años es importante que la investigación se enfoque en desarrollar criterios de diseño, para mejorar la configuración de especies de árboles y la densidad de plantaciones y sus beneficios en el largo plazo. En este contexto, se deben recopilar y actualizar estadísticas agroforestales a nivel institucional, para que los modelos existentes puedan ser calibrados y validados por varios investigadores del país; por ejemplo, se podrían utilizar modelos de relación planta-suelo e intensidad de manejo forestal como el EFIMOD (Mikhailov et al., 2003) que modela carbono y nitrógeno; CENTURY simula, además de los elementos anteriores, el fósforo y el azufre (Parton, McKeown, Kirchner, & Ojima, 1992); Forest DNDC (Li, 2000), Biome-BGC y Forest-BGC (Aber & Driscoll, 1997) simulan carbono, nitrógeno y agua; CBM-CFS3 (Kull et al., 2011) modela emisiones de carbono y ciclo de vida de productos de la madera; PnET-BGC, PnET-CN (Svensson, Jansson, & Kleja, 2008) simulan flujos de energía, agua y elementos mayores; y COUP MODEL es un modelo acoplado de transferencia de calor y masa del ecosistema forestal. Todos estos modelos permiten probar escenarios de manejo o cambio climático en relación con su análisis principal. De esta forma, la MBTM permite identificar los efectos de las perturbaciones o del manejo sobre el secuestro de carbono, disponibilidad de nutrientes, productividad primaria y disponibilidad de agua; a su vez, se podrían disminuir las alteraciones en la producción de madera debidas a amenazas naturales y antrópicas.

### Conclusiones

El análisis bibliométrico sugiere que Estados Unidos es el líder en la investigación sobre modelación de bosques templados manejados (MBTM). US Forest

*End of English version*

## References / Referencias

- Abdelnour, A., McKane, R. B., Stieglitz, M., Pan, F., & Cheng, Y. (2013). Effects of harvest on carbon and nitrogen dynamics in a Pacific Northwest forest catchment. *Water Resources Research*, 49(3), 1292–1313. doi: 10.1029/2012WR012994
- Aber, J. D., & Driscoll, C. T. (1997). Effects of land use, climate variation, and N deposition on N cycling and C storage in northern hardwood forests. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(4), 639–648. doi: 10.1029/97GB01366
- Agudo-López, E., Rogel-Salazar, R., Garduño-Oropeza, G., Becerril-García, A., Zúñiga-Roca, M. F., & Velázquez-Álvarez, A. (2009). Patrones de colaboración científica a partir de redes de coautoría. *Convergencia. Revista de Ciencias Sociales*, 16, 225–258. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10512244010>
- Alexandre-Benavent, R., Alexandre-Tudó, J. L., Castelló-Cogollos, L., & Alexandre, J. L. (2018). Trends in global research in deforestation. A bibliometric analysis. *Land Use Policy*, 72, 293–302. doi: 10.1016/j.landusepol.2017.12.060
- Barefoot, C. R., Willson, K. G., Hart, J. L., Schweitzer, C. J., & Dey, D. C. (2019). Effects of thinning and prescribed fire frequency on ground flora in mixed *Pinus*-hardwood stands. *Forest Ecology and Management*, 432, 729–740. doi: 10.1016/j.foreco.2018.09.055
- Bhowmik, A., Fortuna, A.-M., Cihacek, L. J., Bary, A. I., Carr, P. M., & Cogger, C. G. (2017). Potential carbon sequestration and nitrogen cycling in long-term organic management systems. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 32(06), 498–510. doi: 10.1017/s1742170516000429
- Bray, D. B., Merino-Pérez, L., & Barry, D. (2007). El manejo comunitario en sentido estricto: las empresas forestales comunitarias de México. In D. B. Bray, L. Merino, & D. Barry (Eds.), *Los bosques comunitarios de México: manejo sustentable de paisajes forestales* (pp. 21–50). México: CCMSS, SEMARNAT, INE. Retrieved from <https://www.ccmss.org.mx/acervo/los-bosques-comunitarios-de-mexico-manejo-sustentable-de-paisajes-forestales/>
- Bryars, C., Maier, C., Zhao, D., Kane, M., Borders, B., Will, R., & Teskey, R. (2013). Fixed physiological parameters in the 3-PG model produced accurate estimates of loblolly pine growth on sites in different geographic regions. *Forest Ecology and Management*, 289, 501–514. doi: 10.1016/j.foreco.2012.09.031
- Caiado, R. G. G., Dias, R. F., Mattos, L. V., Quelhas, O. L. G., & Filho, W. L. (2017). Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency - A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 165, 890–904. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.166
- Camacho, E. R., & Chong, J. H. (2015). General biology and current management approaches of soft scale pests (Hemiptera: Coccidae). *Journal of Integrated Pest Management*, 6(1). doi: 10.1093/jipm/pmv016
- Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-Del Valle, J. R., Velasco-Velasco, V. A., & Gómez-Cárdenas, M. (2017). Compartimentos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas. *Madera y Bosques*, 23(3), 147–161. doi: 10.21829/myb.2017.2331627
- Service, Natural Resources of Canada (NRCan) e Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) reportan mayor autoridad académica, ya que sus artículos son los más citados en el mundo. Las publicaciones y colaboraciones han incrementado a partir del 2012 indicando que la MBTM está tomando mayor relevancia, a causa de la necesidad de mitigación y adaptación de los bosques al cambio global. México y otros países de Latinoamérica presentan menor centralidad en publicaciones y colaboración a nivel global en la temática, debido a que la plataforma Web of Science Core Collection solo recoge las contribuciones de revistas de ciencia y tecnología indizadas. Por ello, es importante fomentar la colaboración interpersonal e interinstitucional para mejorar la apropiación de tecnologías, inversión extranjera e incremento de publicaciones indizadas. Finalmente, es necesario que la MBTM en México transite a un análisis integral para el manejo sustentable.

## Agradecimientos

Al Instituto de Geografía y Programa de Becas Posdoctorales DGAPA de la Universidad Nacional Autónoma de México por el financiamiento y apoyo al primer autor. Asimismo, agradecemos al proyecto “Aprovechamiento y protección de ecosistemas y de la biodiversidad” (clave 314), financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

## Fin de la versión en español

- Chen, C. (2006). CiteSpace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 57(3), 359–377. doi: 10.1002/asi.20317
- Chen, B., Arain, M. A., Khomik, M., Trofymow, J. A., Grant, R. F., Kurz, W. A., ... Wang, Z. (2013). Evaluating the impacts of climate variability and disturbance regimes on the historic carbon budget of a forest landscape. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180, 265–280. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.06.002
- Chen, D., Liu, Z., Luo, Z., Webber, M., & Chen, J. (2016). Bibliometric and visualized analysis of energy research. *Ecological Engineering*, 90, 285–293. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.026
- Comision Nacional Forestal (CONAFOR). (2020). El sector forestal mexicano en cifras 2019. Retrieved from <https://www.gob.mx/conafor/documentos/el-sector-forestal-mexicano-en-cifras-2019>
- Corral-Rivas, J. J., Vega-Nieva, D. J., Rodríguez-Soalleiro, R., López-Sánchez, C. A., Wehenkel, C., Vargas-Larreta, B., ... Ruiz-González, A. D. (2017). Compatible system for predicting total and merchantable stem volume over and under

- bark, branch volume and whole-tree volume of pine species. *Forests*, 8(11), 417. doi: 10.3390/f8110417
- Creutzburg, M. K., Scheller, R. M., Lucash, M. S., Evers, L. B., Leduc, S. D., & Johnson, M. G. (2016). Bioenergy harvest, climate change, and forest carbon in the Oregon Coast Range. *GCB Bioenergy*, 8(2), 357–370. doi: 10.1111/gcbb.12255
- Dangal, S. R. S., Felzer, B. S., & Hurteau, M. D. (2014). Effects of agriculture and timber harvest on carbon sequestration in the eastern US forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119(1), 35–54. doi: 10.1002/2013JG002409
- Douterlungne, D., Herrera-Gorocica, A. M., Ferguson, B. G., Siddique, I., & Soto-Pinto, L. (2013). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de cuatro especies leñosas neotropicales con potencial para la restauración. *Agrociencia*, 47(4), 385–397. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v47n4/v47n4a7.pdf>
- Flamenco-Sandoval, A., Ramos, M. M., & Masera, O. R. (2007). Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest. *Biological Conservation*, 138(1–2), 131–145. doi: 10.1016/j.biocon.2007.04.022
- Forrester, D. I. (2014). The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: From pattern to process. *Forest Ecology and Management*, 312, 282–292. doi: 10.1016/j.foreco.2013.10.003
- Galicia, L., Gamboa, A., Cram, S., Chávez, B., Peña, V., Saynes, V., & Christina, S. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 1–29. Retrieved from <http://www.revistas-conacyt.unam.mx/terra/index.php/terra/article/viewFile/73/79>
- Galicia, L., & Zarco-Arista, A. E. (2014). Multiple ecosystem services, possible trade-offs and synergies in a temperate forest ecosystem in Mexico: A review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, 10(4), 275–288. doi: 10.1080/21513732.2014.973907
- Gonzalez-Benecke, C. A., Martin, T. A., Cropper, W. P., & Bracho, R. (2010). Forest management effects on *in situ* and *ex situ* slash pine forest carbon balance. *Forest Ecology and Management*, 260(5), 795–805. doi: 10.1016/j.foreco.2010.05.038
- Griffiths, N. A., Rau, B. M., Vaché, K. B., Starr, G., Bitew, M. M., Aubrey, D. P., ... Jackson, C. R. (2019). Environmental effects of short-rotation woody crops for bioenergy: What is and isn't known. *GCB Bioenergy*, 11(4), 554–572. doi: 10.1111/gcbb.12536
- Harper, A. B., Cox, P. M., Friedlingstein, P., Wiltshire, A. J., Jones, C. D., Sitch, S., ... Van Bodegom, P. (2016). Improved representation of plant functional types and physiology in the Joint UK Land Environment Simulator (JULES v4.2) using plant trait information. *Geoscientific Model Development*, 9(7), 2415–2440. doi: 10.5194/gmd-9-2415-2016
- Hume, A. M., Chen, H. Y. H., & Taylor, A. R. (2018). Intensive forest harvesting increases susceptibility of northern forest soils to carbon, nitrogen and phosphorus loss. *Journal of Applied Ecology*, 55(1), 246–255. doi: 10.1111/1365-2664.12942
- Karam, S. L., Weisberg, P. J., Scheller, R. M., Johnson, D. W., & Miller, W. W. (2013). Development and evaluation of a nutrient cycling extension for the LANDIS-II landscape simulation model. *Ecological Modelling*, 250, 45–57. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2012.10.016
- Kimmins, J. P. (2004). Emulating natural forest disturbance: What does this mean? In A. H. Perera, L. J. Buse, & M. G. Weber (Eds.), *Emulating natural forest landscape disturbances, concepts and applications*. New York, USA: Columbia University Press.
- Klesse, S., Babst, F., Lienert, S., Spahni, R., Joos, F., Bouriaud, O., ... Frank, D. C. (2018). A combined tree ring and vegetation model assessment of European forest growth sensitivity to interannual climate variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(8), 1226–1240. doi: 10.1029/2017GB005856
- Kull, S., Kurz, W. A., Rampley, G. J., Banfield, G., Schivatcheva, R., & Apps, M. (2011). *Operational-scale Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector (CBM-CFS3): Version 1.0, User's Guide*. Canada: Northern Forestry Centre.
- Law, B. E., Hudiburg, T. W., Berner, L. T., Kent, J. J., Buotte, P. C., & Harmon, M. E. (2018). Land use strategies to mitigate climate change in carbon dense temperate forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(14), 3663–3668. doi: 10.1073/pnas.1720064115
- Li, C. S. (2000). Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 58(1–3), 259–273. doi: 10.1023/A:1009859006242
- Liu, K., Liang, Y., He, H. S., Wang, W. J., Huang, C., Zong, S., ... Du, H. (2018). Long-term impacts of China's new commercial harvest exclusion policy on ecosystem services and biodiversity in the temperate forests of Northeast China. *Sustainability (Switzerland)*, 10(4), 1071. doi: 10.3390/su10041071
- Locatelli, T., Gardiner, B., Tarantola, S., Nicoll, B., Bonnefond, J. M., Garrigou, D., ... Patenaude, G. (2016). Modelling wind risk to *Eucalyptus globulus* (Labill.) stands. *Forest Ecology and Management*, 365, 159–173. doi: 10.1016/j.foreco.2015.12.035
- Lundmark, T., Bergh, J., Hofer, P., Lundström, A., Nordin, A., Poudel, B. C., ... Werner, F. (2014). Potential roles of Swedish forestry in the context of climate change mitigation. *Forests*, 5(4), 557–578. doi: 10.3390/f5040557
- Manzoni, S., & Porporato, A. (2009). Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(7), 1355–1379. doi: 10.1016/j.soilbio.2009.02.031
- Mikhailov, A., Bykhovets, S., Nadporozhskaya, M., Zoubkova, E., Chertov, O., Zudin, S., ... Komarov, A. (2003). EFIMOD 2—a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems. *Ecological Modelling*, 170(2–3), 373–392. doi: 10.1016/s0304-3800(03)00240-0
- Monárrez-González, J. C., Pérez-Verdín, G., López-González, C., Márquez-Linares, M. A., & González, E. M. D. S. (2018). Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, 24(2). doi: 10.21829/myb.2018.2421569
- Nasi, R., & Frost, P. G. H. (2009). Sustainable forest management in the tropics: Is everything in order but the patient still dying? *Ecology and Society*, 14(2), 40. doi: 10.5751/ES-03283-140240



- Nunes, L., Lopes, D., Castro, R. F., & Gower, S. T. (2013). Aboveground biomass and net primary production of pine, oak and mixed pine-oak forests on the Vila Real district, Portugal. *Forest Ecology and Management*, 305, 38–47. doi: 10.1016/j.foreco.2013.05.034
- Parolari, A. J., & Porporato, A. (2016). Forest soil carbon and nitrogen cycles under biomass harvest: Stability, transient response, and feedback. *Ecological Modelling*, 329, 64–76. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.03.003
- Parton, W., McKeown, B., Kirchner, V., & Ojima, D. (1992). *CENTURY users manual*. Colorado, USA: NREL Publication, Colorado State University.
- Peckham, S. D., & Gower, S. T. (2013). Simulating the effects of harvest and biofuel production on the forest system carbon balance of the Midwest, USA. *GCB Bioenergy*, 5(4), 431–444. doi: 10.1111/gcbb.12033
- Potapov, P., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Loveland, T. R., & Pittman, K. (2008). Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss. *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3708–3719. doi: 10.1016/j.rse.2008.05.006
- Pretzsch, H., Grote, R., Reineking, B., Rötzer, T., & Seifert, S. (2008). Models for forest ecosystem management: A European perspective. *Annals of Botany*, 101(8), 1065–1087. doi: 10.1093/aob/mcm246
- Prieto-Amparán, J., Villarreal-Guerrero, F., Martínez-Salvador, M., Manjarrez-Domínguez, C., Vázquez-Quintero, G., & Pinedo-Alvarez, A. (2019). Spatial near future modeling of land use and land cover changes in the temperate forests of Mexico. *PeerJ*, 7:e6617. Retrieved from <https://peerj.com/articles/6617/>
- Ramírez, M. D. C., Martínez, R. L. C., & Castellanos, D. O. F. (2012). *Divulgación y difusión del conocimiento: las revistas científicas* (2.ª ed.). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Rastetter, E. B. (2017). Modeling for understanding v. modeling for numbers. *Ecosystems*, 20, 215–221. doi: 10.1007/s10021-016-0067-y
- Ricker, M., Gutiérrez-García, G., & Daly, D. C. (2007). Modeling long-term tree growth curves in response to warming climate: test cases from a subtropical mountain forest and a tropical rainforest in Mexico. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(5), 977–989. doi: 10.1139/x06-304
- Riggs, R. A., Keane, R. E., Cimon, N., Cook, R., Holsinger, L., Cook, J., ... Naylor, B. (2015). Biomass and fire dynamics in a temperate forest-grassland mosaic: Integrating multi-species herbivory, climate, and fire with the FireBGCv2/GrazeBGC system. *Ecological Modelling*, 296, 57–78. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2014.10.013
- Robertson, A. D., Paustian, K., Ogle, S., Wallenstein, M. D., Lugato, E., & Cotrufo, M. F. (2018). Unifying soil organic matter formation and persistence frameworks: the MEMS model. *Biogeosciences Discussions*, 16, 1225–1248. doi: 10.5194/bg-16-1225-2019
- Seidl, R., Rammer, W., Jäger, D., Currie, W. S., & Lexer, M. J. (2007). Assessing trade-offs between carbon sequestration and timber production within a framework of multi-purpose forestry in Austria. *Forest Ecology and Management*, 248(1-2), 64–79. doi: 10.1016/j.foreco.2007.02.035
- Sharma, A., Bohn, K., Jose, S., & Cropper, W. P. (2014). Converting even-aged plantations to uneven-aged stand conditions: A simulation analysis of silvicultural regimes with slash pine (*Pinus elliottii* Engelm.). *Forest Science*, 60(5), 893–906. doi: 10.5849/forsci.13-097
- Silva-Arredondo, F. M., & Nívar-Cháidez, J. J. (2009). Estimación de factores de expansión de carbono en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(2), 155–163. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v15n2/v15n2a10.pdf>
- Smethurst, P. J., Gonçalves, J. L. de M., Pulito, A. P., Gomes, S., Paul, K., Alvares, C. A., & Arthur, J. J. C. (2015). Appraisal of the SNAP model for predicting nitrogen mineralization in tropical soils under eucalyptus. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 39(2), 523–532. doi: 10.1590/01000683rbc20140379
- Soriano-Luna, M. de los Á., Ángeles-Pérez, G., Guevara, M., Birdsey, R., Pan, Y., Vaquera-Huerta, H., ... Vargas, R. (2018). Determinants of above-ground biomass and its spatial variability in a temperate forest managed for timber production. *Forests*, 9(8), 490–510. doi: 10.3390/f9080490
- Svensson, M., Jansson, P.-E., & Kleja, B. D. (2008). Modelling soil C sequestration in spruce forest ecosystems along a Swedish transect based on current conditions. *Biogeochemistry*, 89(1), 95–119. doi: 10.1007/s10533-007-9134-y
- Thiffault, E., Hannam, K. D., Paré, D., Titus, B. D., Hazlett, P. W., Maynard, D. G., & Brais, S. (2011). Effects of forest biomass harvesting on soil productivity in boreal and temperate forests – A review. *Environmental Reviews*, 19, 278–309. doi: 10.1139/a11-009
- Thom, D., Rammer, W., Garstenauer, R., & Seidl, R. (2018). Legacies of past land use have a stronger effect on forest carbon exchange than future climate change in a temperate forest landscape. *Biogeosciences*, 15(18), 5699–5713. doi: 10.5194/bg-15-5699-2018
- Thompson, J. R., Lambert, K. F., Foster, D. R., Broadbent, E. N., Blumstein, M., Zambrano, A. M., & Fan, Y. (2016). The consequences of four land-use scenarios for forest ecosystems and the services they provide. *Ecosphere*, 7(10), e01469. doi: 10.1002/ecs2.1469
- Tian, S., Youssef, M. A., Skaggs, R. W., Amatya, D. M., & Chescheir, G. M. (2012). DRAINMOD-Forest: Integrated modeling of hydrology, soil carbon and nitrogen dynamics, and plant growth for drained forests. *Journal of Environment Quality*, 41(3), 764–782. doi: 10.2134/jeq2011.0388
- Urbano, A. R., & Keeton, W. S. (2017). Carbon dynamics and structural development in recovering secondary forests of the northeastern U.S. *Forest Ecology and Management*, 392, 21–35. doi: 10.1016/j.foreco.2017.02.037
- Wallace, K. J., Laughlin, D. C., Clarkson, B. D., & Schipper, L. A. (2018). Forest canopy restoration has indirect effects on litter decomposition and no effect on denitrification. *Ecosphere*, 9(12), e02534. doi: 10.1002/ecs2.2534

- Wang, F., Mladenoff, D. J., Forrester, J. A., Blanco, J. A., Scheller, R. M., Peckham, S. D., ... Gower, S. T. (2014). Multimodel simulations of forest harvesting effects on long-term productivity and CN cycling in aspen forests. *Ecological Applications*, 24(6), 1374–1389. doi: 10.1890/12-0888.1
- Wang, W., Xiao, J., Ollinger, S. V., Desai, A. R., Chen, J., & Noormets, A. (2014). Quantifying the effects of harvesting on carbon fluxes and stocks in northern temperate forests. *Biogeosciences*, 11, 6667–6682. doi: 10.5194/bg-11-6667-2014
- Wang, W., Wei, X., Liao, W., Blanco, J. A., Liu, Y., Liu, S., ... Guo, S. (2013). Evaluation of the effects of forest management strategies on carbon sequestration in evergreen broad-leaved (*Phoebe bournei*) plantation forests using FORECAST ecosystem model. *Forest Ecology and Management*, 300, 21–32. doi: 10.1016/j.foreco.2012.06.044
- Wang, Y., Bauerle, W. L., & Reynolds, R. F. (2008). Predicting the growth of deciduous tree species in response to water stress: FVS-BGC model parameterization, application, and evaluation. *Ecological Modelling*, 217(1), 139–147. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.06.007
- Wang, Z., Zhao, Y., & Wang, B. (2018). A bibliometric analysis of climate change adaptation based on massive research literature data. *Journal of Cleaner Production*, 199, 1072–1082. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.183
- Wiedinmyer, C., & Hurteau, M. D. (2010). Prescribed fire as a means of reducing forest carbon emissions in the western United States. *Environmental Science and Technology*, 15(44), 1926–1932. doi: 10.1021/es902455e
- Winford, E. M., & Gaither, J. C. (2012). Carbon outcomes from fuels treatment and bioenergy production in a Sierra Nevada forest. *Forest Ecology and Management*, 282, 1–9. doi: 10.1016/j.foreco.2012.06.025
- Wong, D. (2018). VOSviewer. *Technical Services Quarterly*, 35(2), 219–220. doi: 10.1080/07317131.2018.1425352
- Woodbury, P. B., Smith, J. E., & Heath, L. S. (2007). Carbon sequestration in the U.S. forest sector from 1990 to 2010. *Forest Ecology and Management*, 241, 14–27. doi: 10.1016/j.foreco.2006.12.008
- Zhang, C. F., Meng, F. R., Bhatti, J. S., Trofymow, J. A., & Arp, P. A. (2008). Modeling forest leaf-litter decomposition and N mineralization in litterbags, placed across Canada: A 5-model comparison. *Ecological Modelling*, 219(3–4), 342–360. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.07.014
- Zhang, C., Fang, Y., Chen, X., & Congshan, T. (2019). Bibliometric analysis of trends in global sustainable livelihood research. *Sustainability (Switzerland)*, 11(4), 1150. doi: 10.3390/su11041150
- Zhang, J., Chu, Z., Ge, Y., Zhou, X., Jiang, H., Chang, J., ... Yu, S. (2008). TRIPLEX model testing and application for predicting forest growth and biomass production in the subtropical forest zone of China's Zhejiang Province. *Ecological Modelling*, 219(3–4), 264–275. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.07.016