

Impacts of forest management on soil properties: a fundamental research topic for Mexico

Impactos del manejo forestal sobre las propiedades de los suelos: un tema de investigación fundamental para México

Karla Valladares-Samperio & Leopoldo Galicia-Sarmiento*

Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía. Circuito exterior s/n. C. P. 04510. Ciudad de México, México.

*Corresponding author: lgalicia@igg.unam.mx; tel.: +52 55 56 22 43 35.

Abstract

Introduction: The increase in the intensity of wood harvesting has a negative influence on ecosystem functions of soils in temperate and boreal forests.

Objective: To understand the impacts of intensive and extensive forest management methods on the physical, chemical and biological properties of soils, and consequences on nutrient availability and stabilization processes in temperate and boreal forests.

Results and discussion: Intensive forest management methods can generate greater imbalance in the processes of availability and stabilization of nutrients, compared to selective methods. The impact is reflected in the deterioration of soil structure and the decrease of nutrient reserves and microbial communities. These damages affect fertility and functionality of soil, decreasing long-term productivity. Affectations depend on the intensity of biomass extracted, environmental conditions and site preparation. This makes evident the need to monitor forest management and its impact on soil ecology in temperate forests, which maintains long-term productivity and ensures the availability of wood volumes.

Conclusion: In Mexico, the impact of forest management has been scarcely analyzed and it is indispensable to understand the functional changes in the processes that determine soil fertility and forest productivity.

Keywords: Carbon; nutrient availability; fertilization; temperate forests; microbial communities.

Resumen

Introducción: El incremento en la intensidad de cosecha de madera influye negativamente en las funciones ecosistémicas de los suelos en los bosques templados y boreales.

Objetivo: Conocer los impactos de los métodos de manejo forestal intensivos y extensivos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, y sus consecuencias en los procesos de disponibilidad y estabilización de nutrientes en los bosques templados y boreales.

Resultados y discusión: Los métodos de manejo forestal intensivo pueden generar mayor desequilibrio en los procesos de disponibilidad y estabilización de nutrientes, comparados con los métodos selectivos. El impacto se refleja en el deterioro de la estructura del suelo y en la disminución de reservas de nutrientes y comunidades microbianas. Estos daños afectan la fertilidad y el funcionamiento del suelo, disminuyendo la productividad a largo plazo. Las afectaciones dependen de la intensidad de biomasa extraída, condiciones ambientales y preparación del sitio. Lo anterior hace evidente la necesidad del monitoreo del manejo forestal y su impacto en la ecología del suelo en los bosques templados, que mantenga la productividad a largo plazo y garantice la disponibilidad de los volúmenes de madera.

Conclusión: En México, el impacto del manejo forestal ha sido escasamente analizado y es indispensable comprender los cambios funcionales de los procesos que determinan la fertilidad del suelo y la productividad de los bosques.

Palabras clave: Carbono; disponibilidad de nutrientes; fertilización; bosques templados; comunidades microbianas.

Introduction

Boreal and temperate forests are the main suppliers of timber resources. Globally, the rate of extraction has increased in response to increased demand (Galicia, Saynes, & Campo, 2015; Wallace et al., 2015), which has considerably modified the structure, composition and functioning of these ecosystems (Hernández-Salas et al., 2013; Návar-Cháidez & González-Elizondo, 2009). Research on the impact of biomass harvesting has focused on understanding vegetation responses (species richness, composition, and diversity) and changes in micro-environmental conditions (light and soil moisture); that is, it has considered canopy disturbance as the only factor of change (Boiffin & Munson, 2013; Harvey & Holzman, 2014; Seidl, Rammer, & Spies, 2014). In contrast, few studies consider the impacts of disturbance on soil properties (Wardle & Jonsson, 2014); in fact, timber extraction causes more disturbance compared to natural disturbance (Cambi, Certini, Neri, & Marchi, 2015; Wardle & Jonsson, 2014).

Soil disturbance modifies microbial communities and alters the interdependence of the carbon (C) and nitrogen (N) cycles (Guerra-De la Cruz & Galicia, 2017; Nave, Vance, Swanston, & Curtis, 2010; Ryan et al., 2010). Biomass harvesting can generate higher organic matter mineralization, which favors emissions of carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere and reduces the capacity to sequester soil carbon (Noormets et al., 2014; Powers & Marín-Spiotta, 2017); however, the magnitude of the effects depends on soil type and biomass removal intensity (Foote, Boutton, & Scott, 2015; Nave et al., 2010). Finally, fertilization can significantly reduce fungal growth and modify the functional role in capturing limiting elements such as N and phosphorus (P) (Clark & St. Clair, 2011). However, despite its importance, global ecological studies of the impact of forest management on ecological functions in the temperate forests of Mexico are scarce.

In Mexico, the traditional approach to forest production processes has been limited to ensuring the yield of timber volumes by means of silvicultural practices, with minimal attention to maintaining soil characteristics, biodiversity, and future regeneration. Increased demand for wood, overharvesting, illegal logging, and the low proportion of forests managed with environmental criteria have led to the degradation of forest vegetation and soils (Galicia et al., 2018). For example, the modification of the original plant community structure by species of commercial interest can deteriorate the diversity of wood resources, primary productivity, soil properties (moisture, pH, porosity, and microbial activity), and

Introducción

Los bosques boreales y templados son los principales proveedores de recursos forestales maderables. A nivel mundial, la tasa de extracción ha incrementado en respuesta a la mayor demanda (Galicia, Saynes, & Campo, 2015; Wallace et al., 2015), lo cual ha modificado considerablemente la estructura, composición y funcionamiento de dichos ecosistemas (Hernández-Salas et al., 2013; Návar-Cháidez & González-Elizondo, 2009). Las investigaciones del impacto de la cosecha de biomasa se han centrado en entender las respuestas de la vegetación (riqueza, composición y diversidad de especies) y los cambios en las condiciones microambientales (luz y humedad del suelo); es decir, han considerado la perturbación del dosel como único factor de cambio (Boiffin & Munson, 2013; Harvey & Holzman, 2014; Seidl, Rammer, & Spies, 2014). En contraste, pocos estudios consideran los impactos de la perturbación sobre las propiedades del suelo (Wardle & Jonsson, 2014); de hecho, la extracción de madera causa más alteración que las perturbaciones naturales (Cambi, Certini, Neri, & Marchi, 2015; Wardle & Jonsson, 2014).

La perturbación del suelo modifica las comunidades microbianas y altera la interdependencia de los ciclos de carbono (C) y nitrógeno (N) (Guerra-De la Cruz & Galicia, 2017; Nave, Vance, Swanston, & Curtis, 2010; Ryan et al., 2010). La cosecha de biomasa puede generar mayor mineralización de la materia orgánica, lo que favorece las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera y reduce la capacidad de secuestro de C edáfico (Noormets et al., 2014; Powers & Marín-Spiotta, 2017); sin embargo, la magnitud de los efectos depende del tipo de suelo y la intensidad de remoción de biomasa (Foote, Boutton, & Scott, 2015; Nave et al., 2010). Finalmente, la fertilización puede disminuir considerablemente el crecimiento de los hongos y modificar su papel funcional para la captura de elementos limitantes como el N y fósforo (P) (Clark & St. Clair, 2011). No obstante, a pesar de su importancia, los estudios ecológicos integrales del impacto del manejo forestal sobre las funciones ecológicas, en los bosques templados de México, son escasos.

En México, el enfoque tradicional de los procesos productivos forestales se ha limitado a garantizar el rendimiento de los volúmenes maderables mediante prácticas silvícolas, con mínima atención en el mantenimiento de las características del suelo, la biodiversidad y la regeneración futura. El aumento en la demanda de madera, la sobrexplotación, la tala ilegal y la baja proporción de bosques manejados con criterios ambientales han propiciado la degradación de la vegetación y suelos de los bosques (Galicia et al., 2018); por ejemplo, la modificación de la estructura

nutrient availability (Colombo, Macdonald, Jeffries, Powell, & Singh, 2016). Therefore, the objective of this study was to review studies developed in forests under forest management, in which the effect on the physical, chemical, and biological properties, and processes that control the availability and stabilization of nutrients in the soil have been evaluated, as well as the most used strategies to increase soil fertility and forest productivity at a global level. In this context, the present review is significant in the present day in which Mexico lacks sufficient information in this framework and in which the possible repercussions of the increase in timber production to satisfy the country's demands are discussed.

Materials and methods

The literature related to forest management and the effects on physical and chemical properties (porosity, moisture, carbon, nutrient concentration, organic matter, and pH), biological properties (fauna, microbiological and enzymatic activities) and processes related to nutrient availability (decomposition and mineralization) were reviewed. The review was limited to intensive and extensive methods, due to their importance and implementation at a global level. The scientific information was obtained from the Web of Science, Elsevier (Scopus and Science Direct), Springer (SpringerLink), Wiley (Wiley Online Library), SciELO, Redalyc and Google Scholar databases. The collection covers the year 2008 to 2019. The keywords in the search filters were forest management, impact, nutrient availability, microbial activity, decomposition, mineralization and fertility. The review was organized in three parts: the first gives a general context of the effect of forest management; the second describes and discusses the impacts of the main forest management methods; and the last describes the main strategies to increase soil fertility.

Results and discussion

The review compiled 87 publications divided into impacts on physical, chemical, biological properties, and processes (decomposition and mineralization). The best studied properties (61 % of the studies) were chemical properties; studies focused mainly on the evaluation of the effect of forest management on C and N concentrations, and changes in C reserves in temperate and boreal forests. Soil processes were the least evaluated (8 % of the total); most studies focused on the impact of forest management on C and N mineralization and soil respiration rates. Of the total publications, only 11 studies were conducted in Mexico; therefore, the discussion of this review focuses on the international literature.

de la comunidad vegetal original por especies de interés comercial puede deteriorar la diversidad de los recursos maderables, la productividad primaria, las propiedades del suelo (humedad, pH, porosidad y actividad microbiana) y la disponibilidad de nutrientes (Colombo, Macdonald, Jeffries, Powell, & Singh, 2016). Por lo anterior, el objetivo del presente documento fue la revisión de trabajos desarrollados en bosques bajo manejo forestal, en los cuales se ha evaluado el efecto en las propiedades físicas, químicas y biológicas, y los procesos que controlan la disponibilidad y estabilización de nutrientes en el suelo, así como las estrategias más utilizadas para el incremento de la fertilidad de los suelos y la productividad de los bosques a nivel global. En este contexto, la presente revisión es relevante en los momentos actuales en los que México carece de información suficiente en este marco y en el que se discuten las posibles repercusiones del incremento de la producción maderable para satisfacer las demandas del país.

Materiales y métodos

Se revisó la literatura relacionada con el manejo forestal y sus efectos en las propiedades físicas y químicas (porosidad, humedad, carbono, concentración de nutrientes, materia orgánica y pH), biológicas (fauna, actividades microbiológicas y enzimáticas) y en los procesos relacionados con la disponibilidad de nutrientes (descomposición y mineralización). La revisión se limitó a métodos intensivos y extensivos, debido a su importancia e implementación a nivel global. La información científica se obtuvo de las bases de datos Web of Science, Elsevier (Scopus y Science Direct), Springer (SpringerLink), Wiley (Wiley Online Library), SciELO, Redalyc y Google Scholar. La recopilación abarca del año 2008 a 2019. Las palabras clave en los filtros de búsqueda fueron: manejo forestal, impacto, disponibilidad de nutrientes, actividad microbiana, descomposición, mineralización y fertilidad. La revisión se organizó en tres partes: la primera da un contexto general del efecto del manejo forestal; la segunda describe y discute los impactos de los principales métodos de manejo forestal, y la última describe las principales estrategias para incrementar la fertilidad del suelo.

Resultados y discusión

En la revisión se recopilaron 87 publicaciones divididas en impactos en las propiedades físicas, químicas, biológicas y procesos (descomposición y mineralización). Las propiedades mejor estudiadas (61 % de las investigaciones) fueron las químicas; las investigaciones se enfocaron principalmente en la evaluación del efecto del manejo forestal en las

Impact of forest harvesting on soil properties

Physical and chemical properties

During the harvest of biomass, up to 50 % of litter is removed from the forest floor, regardless of the type of management. This contributes between 3.6 and 11.5 Mg·ha⁻¹ of biomass and includes branches, foliage and woody residues that may contain large amounts of nutrients (Galicia et al., 2015; Goetz et al., 2012). Forestry operations (log skid, machinery use, and waste removal) can produce deep and prolonged changes in the first 10 cm of the soil profile, although damage has been reported in layers more than 80 cm deep (Toivio et al., 2017). These procedures compact the soil and reduce porosity, aeration, gas exchange and water infiltration (Cambi et al., 2015; Karami, Homae, Afzalnia, Ruhipour, & Basirat, 2012; Labelle & Jaeger, 2011). Soil compaction can also result in reduced root biomass and reduced N uptake, which increases the potential for N loss from the ecosystem through leaching and denitrification. Furthermore, operations affect some mechanisms of physical stabilization of nutrients in the aggregates because they expose the soil organic matter (SOM) occluded to microbial attack and increase the loss of nutrients caused by the processes of decomposition and mineralization (Jia et al., 2015; Wu et al., 2017). Restricted gas exchange and pore space in the soil can limit the access of decomposers to SOM, leading to increases in soil organic carbon (SOOC) and N due to limited air supply (Cambi et al., 2015; Guerra-De la Cruz & Galicia, 2017; Nave et al., 2010). In this sense, it is essential to protect the forest floor to help maintain adequate levels of SOM to keep aggregation and also improve site quality and tree growth (Karami et al., 2012; Pulido-Moncada, Lobo-Luján, & Lozano-Pérez, 2009).

Biological properties

The decline in C and nutrient stores, and the quality and quantity of SOM following biomass harvest events can have adverse effects on the structure, size, and function of microbial communities (Colombo et al., 2016; Foote et al., 2015; Frey et al., 2009). Microbial communities are considered regulators of nutrient cycles because of the intervention in the decomposition process and because they control the availability of nutrients to vegetation through immobilization or mineralization (Falkowski, Fenchel, & DeLong, 2008). Therefore, these communities represent the level of biological activity of the labile component of the SOM and integrate environmental factors and their influence on nutrient cycles (Achat, Augusto, Bakker, Gallet-Budynek, & Morel, 2012); however, the functional consequences of the loss of communities in the soils, due to forest management practices, are still largely unknown (Bardgett & Van Der Putten, 2014).

concentraciones de C y N, y los cambios en las reservas de C en bosques de zonas templadas y boreales. Por su parte, los procesos en el suelo fueron los menos evaluados (8 % del total); la mayor parte de los estudios se enfocaron en el impacto del manejo forestal sobre la mineralización del C y N y las tasas de respiración del suelo. Del total de las publicaciones, solo 11 estudios se realizaron en México; por tanto, la discusión de esta revisión se centra en la literatura internacional.

Impacto del aprovechamiento forestal en las propiedades de los suelos

Propiedades físicas y químicas

Durante la cosecha de biomasa se remueve hasta 50 % de mantillo del piso forestal, independientemente del tipo de manejo. Ese almacén contribuye entre 3.6 y 11.5 Mg·ha⁻¹ de la biomasa e incluye ramas, follaje y residuos leñosos que pueden contener cantidades grandes de nutrientes (Galicia et al., 2015; Goetz et al., 2012). Las operaciones forestales (arrastre de fustes, uso de maquinaria y retiro de residuos) pueden producir cambios profundos y prolongados en los primeros 10 cm del perfil de suelo, aunque se han reportado daños en capas a más de 80 cm de profundidad (Toivio et al., 2017). Estos procedimientos compactan el suelo y reducen la porosidad, aireación, intercambio de gases e infiltración de agua (Cambi et al., 2015; Karami, Homae, Afzalnia, Ruhipour, & Basirat, 2012; Labelle & Jaeger, 2011). La compactación del suelo puede ocasionar también reducción de la biomasa de raíces y menor absorción de N, lo cual aumenta el potencial de pérdidas de N del ecosistema, a través de la lixiviación y desnitrificación. Asimismo, las operaciones afectan algunos mecanismos de estabilización física de nutrientes en los agregados, porque dejan expuesta la materia orgánica del suelo (MOS) ocluida al ataque microbiano e incrementan la pérdida de nutrientes provocada por los procesos de descomposición y mineralización (Jia et al., 2015; Wu et al., 2017). La restricción del intercambio de gases y el espacio poroso del suelo pueden limitar el acceso de los descomponedores a la MOS, propiciando aumentos en el carbono orgánico del suelo (COS) y el N, debido al suministro limitado de aire (Cambi et al., 2015; Guerra-De la Cruz & Galicia, 2017; Nave et al., 2010). En este sentido, resulta esencial la protección del piso forestal que ayude a la conservación de niveles adecuados de MOS para mantener la agregación y que además mejore la calidad del sitio y el crecimiento de los árboles (Karami et al., 2012; Pulido-Moncada, Lobo-Luján, & Lozano-Pérez, 2009).

Propiedades biológicas

La disminución en las reservas de C y nutrientes, y la calidad y cantidad de MOS posterior a los eventos de cosecha de biomasa pueden tener efectos adversos en

Removal or alteration of SOM inputs, due to forest harvesting, decreases the proportion of microbial biomass and enzymatic activity, as indicated by positive relationships between microbial biomass, enzymatic activity and total C and N content present in the soil (Adamczyk, Adamczyk, Kukkola, Tamminen, & Smolander, 2015; Mummey et al., 2010). Another important factor is soil compaction, which decreases microbial biomass through reduced aeration and water conductivity preventing development and proliferation (Colombo et al., 2016; Frey et al., 2009). Forest disturbances also differentially affect the composition and resilience of soil microbial communities due to their physiological ability to maintain functionality under conditions of decreased nutrients (Ball, MacKenzie, DeLuca, & Montana, 2010; Hynes & Germida, 2012; Rasche et al., 2011). Nordén, Penttilä, Siitonen, Tomppo, and Ovaskainen (2013) report a reduction in fungi (35 %) when harvest intensity is low.

Shabaga, Basiliko, Caspersen, and Jones (2015) suggest that microbial biodiversity loss limits general functions such as decomposition and respiration. On the other hand, Singh et al. (2014) suggest that moderate diversity loss (~5 %) only impacts specific functions, but not general functions such as microbial respiration; furthermore, Mummey et al. (2010) mention that reduced microbial diversity does not affect decomposition and respiration, but reduces rates of more specific functions such as methane oxidation, nitrification, and denitrification. In this regard, Colombo et al. (2016) observed positive linear correlations between microbial richness and processes involved in nutrient cycling, suggesting that they are not performed exclusively by specific groups of microorganisms. However, the effects of harvesting methods vary considerably and insufficient information has been obtained to draw general conclusions on their impact on long-term nutrient cycling; effects are species, soil, method, and climate specific (Clarke et al., 2015). Based on the above, levels of management intensity that maintain specific attributes and functions of the microbial communities must be defined to improve long-term performance (Yesilonis, Szlavecz, Pouyat, Whigham, & Xia, 2016). Therefore, an experimental perspective on changes in soil biota composition and functioning after harvesting is required to identify mechanisms that protect their existence, even with intensified use, including conditions along gradients that identify relevant factors such as temperature and moisture (Thiffault et al., 2011).

Modification of processes of availability and stabilization of nutrients

The influence of the plant community on the availability of nutrients is controlled by three factors: 1) physical environment, mainly temperature and humidity

la estructura, tamaño y función de las comunidades microbianas (Colombo et al., 2016; Foote et al., 2015; Frey et al., 2009). Las comunidades microbianas son consideradas reguladoras de los ciclos de nutrientes por su intervención en el proceso de descomposición y porque controlan la disponibilidad de estos para la vegetación, mediante la inmovilización o mineralización (Falkowski, Fenchel, & Delong, 2008). Por ello, dichas comunidades representan el nivel de actividad biológica del componente lábil de la MOS e integra los factores del medio ambiente y su influencia sobre los ciclos de nutrientes (Achat, Augusto, Bakker, Gallet-Budynek, & Morel, 2012); sin embargo, las consecuencias funcionales de la pérdida de comunidades en los suelos, a causa de las prácticas de manejo forestal, son aún en gran parte desconocidas (Bardgett & Van Der Putten, 2014).

La eliminación o alteración de las entradas de MOS, debido a la cosecha forestal, disminuye la proporción de biomasa microbiana y la actividad enzimática, como lo indican las relaciones positivas entre biomasa microbiana, actividad enzimática y contenido de C y N total presente en el suelo (Adamczyk, Adamczyk, Kukkola, Tamminen, & Smolander, 2015; Mummey et al., 2010). Otro factor importante es la compactación del suelo, que decrece la biomasa microbiana a través de la reducción de la aireación y conductividad del agua que evitan el desarrollo y proliferación (Colombo et al., 2016; Frey et al., 2009). Los disturbios forestales también afectan diferencialmente la composición y resistencia de las comunidades microbianas del suelo, debido a su capacidad fisiológica para mantener la funcionalidad en condiciones de disminución de nutrientes (Ball, MacKenzie, DeLuca, & Montana, 2010; Hynes & Germida, 2012; Rasche et al., 2011). Nordén, Penttilä, Siitonen, Tomppo, y Ovaskainen (2013) reportan reducción de hongos (35 %) cuando la intensidad de cosecha es baja.

Shabaga, Basiliko, Caspersen, y Jones (2015) sugieren que la pérdida de biodiversidad microbiana restringe funciones generales como la descomposición y respiración. Por otra parte, Singh et al. (2014) sugieren que la pérdida moderada de la diversidad (~ 5 %) solo tiene impacto en las funciones específicas, pero no en las generales como la respiración microbiana; asimismo, Mummey et al. (2010) mencionan que la reducción de la diversidad microbiana no afecta la descomposición y respiración, pero reduce las tasas de funciones más específicas como oxidación de metano, nitrificación y desnitrificación. Al respecto, Colombo et al. (2016) observaron correlaciones lineales positivas entre la riqueza microbiana y los procesos involucrados en el ciclo de los nutrientes, sugiriendo que no son realizados exclusivamente por grupos específicos de microorganismos. No obstante, los efectos de los métodos de cosecha varían considerablemente y no

of soil; 2) quantity and quality of organic residues available to decomposers; and 3) characteristics and activity of microbial community. These factors are modified by forest harvesting practices and their impact has a differential effect on management (Clarke et al., 2015; Colombo et al., 2016; Noormets et al., 2014). Forest management, specially, the removal of biomass, produces greater soil disturbance compared to the effects on vegetation and species composition. This practice generates large amounts of plant residues derived from harvesting, changes in soil stoichiometry, alterations in microclimate, modification of biogeochemical processes, as well as negative effects on nutrient availability (LeBauer & Treseder, 2008; Noormets et al., 2014). Proportional allocation to organs, temporal dynamics of growth, chemical composition of synthesized biomass and, through various feedback loops, the operation of much of the ecosystem are modified according to the nutrients (Hasselquist, Metcalfe, & Högberg, 2012; Vicca et al., 2012). The extraction of biomass generates nutrient losses that are not compensated by added nutrient inputs through the incorporation of plant residues from harvesting or fertilization, which negatively influences growth of trees, maintenance of soil properties and conservation of soil nutrient reserves (Huang et al., 2013; Laclau et al., 2010; Versini et al., 2013). In managed coniferous forests, increased N mineralization and COS destabilization are a consequence of forest floor loss and accelerated mineralization of recalcitrant material, resulting from increased nutrient mobilization (Diochon & Kellman, 2008; Kellman, Kumar, & Diochon, 2014). Forest management has a significant influence on nutrient availability due to the modification of feedback systems between plants and soil; for example, leaf litter production is the main route of organic residue flow to the soil, but a change in production and quality can alter respiration, availability and reserves of nutrients (Augusto et al., 2015; Vesterdal, Clarke, Sigurdsson, & Gundersen, 2013).


Intensive methods

Intensive methods such as the Silvicultural Development Method (Figure 1), where 100 % of the forest mass is extracted at the end of the silvicultural cycle, can provide the soil with an additional supply of SOM through harvest residues (branches, needles, woody residues, and dead roots left on the soil). This increase in SOM explains the temporary increase in C and N content, observed over a period of up to two decades after harvesting (Foote et al., 2015). Also, these methods leave the soil more exposed to light and fluctuations in humidity and temperature, promoting increased rates of decomposition and mineralization (Galicia et al., 2016; Jonsson & Sigurdsson, 2010), and increased soil respiration, linked to a higher CO₂

se ha obtenido información suficiente para extraer conclusiones generales sobre su impacto en el ciclo de nutrientes a largo plazo; los efectos son específicos de la especie, el suelo, el método y el clima (Clarke et al., 2015). Con base en lo anterior, es preciso definir los niveles de intensidad de manejo que mantengan atributos y funciones específicas de las comunidades microbianas para mejorar su desempeño a largo plazo (Yesilonis, Szlavecz, Pouyat, Whigham, & Xia, 2016). Por tanto, se requiere una perspectiva experimental de los cambios en la composición y funcionamiento de la biota del suelo, después de la cosecha, para identificar mecanismos que protejan su existencia, incluso con un uso intensificado, incluyendo condiciones a lo largo de gradientes que identifiquen factores relevantes como temperatura y humedad (Thiffault et al., 2011).

Modificación de los procesos de disponibilidad y estabilización de nutrientes

La influencia de la comunidad vegetal sobre la disponibilidad de nutrientes está controlada por tres factores: 1) el ambiente físico, fundamentalmente la temperatura y humedad del suelo; 2) la cantidad y calidad de los residuos orgánicos disponibles para los descomponedores y 3) las características y actividad de la comunidad microbiana. Estos factores son modificados por las prácticas de aprovechamiento forestal y su impacto tiene efecto diferencial en función del manejo (Clarke et al., 2015; Colombo et al., 2016; Noormets et al., 2014). El manejo forestal y, en particular, la remoción de biomasa, producen mayor alteración en el suelo en comparación con los efectos sobre la vegetación y la composición de especies. Esta práctica genera gran cantidad de residuos vegetales derivados de la cosecha, cambios en la estequiometría del suelo, alteraciones en el microclima, modificación de los procesos biogeoquímicos, así como efectos negativos en la disponibilidad de nutrientes (LeBauer & Treseder, 2008; Noormets et al., 2014). Con respecto a los nutrientes, se modifican su asignación proporcional a los órganos, la dinámica temporal del crecimiento, la composición química de la biomasa sintetizada y, a través de varios circuitos de retroalimentación, el funcionamiento de gran parte del ecosistema (Hasselquist, Metcalfe, & Högberg, 2012; Vicca et al., 2012). La extracción de biomasa genera pérdidas de nutrientes que no son compensadas por los insumos de nutrientes adicionados mediante la incorporación de residuos vegetales de la cosecha o la fertilización, lo que influye negativamente en el crecimiento de los árboles, el mantenimiento de las propiedades del suelo y la conservación de reservas de nutrientes en el suelo (Huang et al., 2013; Laclau et al., 2010; Versini et al., 2013). En bosques de coníferas con manejo forestal, el incremento en la mineralización del N y la desestabilización del COS son consecuencia de la pérdida del piso forestal y la mineralización



	Intensive method (MDS) / Método intensivo (MDS)	Selective method (MMOBI) / Método selectivo (MMOBI)
<i>Physical properties / Propiedades físicas</i>		
• Compaction / Compactación	+	-
• Aggregation / Agregación	-	+
• Structure / Estructura	-	+
<i>Chemical properties / Propiedades químicas</i>		
• Organic matter / Materia orgánica	-	+
• pH	-	+
• Nutrients / Nutrientes	-	+
<i>Biological properties / Propiedades biológicas</i>		
• Microbial diversity / Diversidad microbiana	-	+
• Enzymatic activity / Actividad enzimática	-	+
<i>Processes / Procesos</i>		
• Decomposition / Descomposición	+	-
• Mineralization / Mineralización	+	-
• Lixiviation and nitrification / Lixiviación y nitrificación	+	-

Figure 1. Effect of intensive and extensive forest management methods on the main properties and processes of nutrient availability in soil. Modified from Guerra-De la Cruz and Galicia (2017). MDS: Method of Silvicultural Development, MMOBI: Mexican Method of Management of Irregular Forests.

Figura 1. Efecto de los métodos de manejo forestal intensivo y extensivo sobre las principales propiedades y procesos de disponibilidad de nutrientes en el suelo. Modificado de Guerra-De la Cruz y Galicia (2017). MDS: Método de Desarrollo Silvícola, MMOBI: Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares.

release pulse. If decomposition is rapid and exceeds the capture of nutrients by vegetation, there will be losses in soil fertility in the long term; in contrast, if decomposition is very slow there may be accumulation of nutrients in the mulch (Augusto et al., 2015). It is well documented that tree felling at extreme latitudes (above 55° LN) accelerates the decomposition process, while the proportion is reversed at latitudes below 46° LN, with decomposition more commonly being slowed down after felling. This pattern seems to indicate that decomposition at higher latitudes is mainly influenced by temperature and the activity of microbial communities (Vesterdal et al., 2013).

Altering the rate of decomposition due to intensive harvesting could have a long-term differential effect, as it could facilitate the development of new trees by

acelerada de material recalcitrante, resultado de mayor movilización de nutrientes (Diochon & Kellman, 2008; Kellman, Kumar, & Diochon, 2014). El manejo forestal tiene influencia notable en la disponibilidad de estos, debido a la modificación de los sistemas de retroalimentación entre las plantas y el suelo; por ejemplo, la producción de hojarasca constituye la vía principal del flujo de residuos orgánicos hacia el suelo, pero un cambio en la producción y calidad puede alterar la respiración, la disponibilidad y reservas de nutrientes (Augusto et al., 2015; Vesterdal, Clarke, Sigurdsson, & Gundersen, 2013).

Métodos intensivos

Los métodos intensivos como el Método de Desarrollo Silvícola (Figura 1), donde se realiza la extracción del

increasing the availability of nutrients or increasing the nutrient outputs of the ecosystem (Noormets et al., 2014). Thiffault et al. (2011) mention that biomass harvesting does not have an overall impact on COS and total N, but they noted that there were significant differences between extraction methods, as they were greater in plots with selection cutting and less with intensive wood harvesting. Mushinski, Gentry, Dorosky, and Boutton (2017) also reported that intensive harvesting reduces COS and total N concentrations in the first meter of the soil profile; moreover, ammonium and nitrate amounts were negatively altered by increasing harvest intensity, due to high rates of N mineralization and leaching. In contrast, Jerabkova, Prescott, Titus, Hope, and Walters (2011) noted that after one year of intensive biomass removal, the concentration of nitrate in soil can increase up to eight times. In forests dominated by *Picea abies* (L.) Karsten, biomass removal led to increased exports of dissolved organic C due to increased water flows because of the intensive harvesting method (Sørensen, Meili, Lambertsson, von Brömssen, & Bishop, 2009). Nave et al. (2010) reported that C in the soil organic horizon decreased by 30 ± 6 % after harvesting at the end of the silvicultural cycle, while the mineral horizon showed no significant change. Foote et al. (2015) found that intensive logging practices reduced total soil N and microbial biomass in pine forests. Information derived from the impact of forest management on dynamics and availability of nutrients suggests that forest harvest intensity can cause losses (Jones, Beets, Kimberley, & Garrett, 2011; Kellman et al., 2014), earnings (Grand & Lavkulich, 2012; Vanguelova, Pitman, Luro, & Helmisaari, 2010) or no changes in COS and total N (Jerabkova et al., 2011; Scott et al., 2014; Wall & Hytönen, 2011). In Sweden, a 16.5 % reduction in COS was found during the first 32 to 50 years after harvesting in forests extracted by intensive methods (Nave et al., 2010; Noormets et al., 2014). This reduction is attributed to a lower return of nutrients to the soil through tree leaf litter and increased SOM decomposition due to high temperatures when surface is exposed to the sun after harvesting (Clarke et al., 2015). In Norway, the decrease in total C in soil varied between 17 and 22 %, after 15 years of wood harvesting, mainly in the organic horizon, while in the mineral horizon it increased. This increase is attributed to the decomposition of roots remaining in the soil after harvesting (Dar & Sundarapandian, 2015). In contrast, other research reported significant losses of COS in the organic horizon and concluded that the mechanical mixing of the organic horizon with mineral soil during harvesting may explain the apparent reduction in COS reserves (Tamminen, Saarsalmi, Smolander, Kukkola, & Helmisaari, 2012). The variation of the effect of wood harvesting on COS depends on the type of soil; no significant changes of C on the mineral horizon

100 % de la masa forestal al término del ciclo silvícola, pueden proporcionar al suelo un aporte adicional de MOS a través de los residuos de cosecha (ramas, agujas, residuos leñosos y raíces muertas que quedan sobre el suelo). Este incremento de MOS explica el aumento temporal del contenido de C y N, observado en un periodo de hasta dos décadas después de la cosecha (Foote et al., 2015). Asimismo, estos métodos dejan al suelo más expuesto a la luz y a las fluctuaciones de humedad y temperatura, promoviendo el aumento en las tasas de descomposición y mineralización (Galicia et al., 2016; Jonsson & Sigurdsson, 2010), y el incremento en la respiración del suelo, vinculada a un pulso de mayor liberación de CO_2 . Si la descomposición es rápida y excede la captura de nutrientes por la vegetación, existirán pérdidas en la fertilidad del suelo a largo plazo; en contraste, si la descomposición es muy lenta puede haber acumulación de nutrientes en el mantillo (Augusto et al., 2015). Está bien documentado que las cortas de árboles en latitudes extremas (más de 55° LN) aceleran el proceso de descomposición, mientras que la proporción se invierte en latitudes menores de 46° LN, siendo más común que la descomposición resulte frenada tras las cortas. Este patrón parece indicar que la descomposición a latitudes mayores está influenciada principalmente por la temperatura y la actividad de las comunidades microbianas (Vesterdal et al., 2013).

La alteración de la velocidad en la tasa de descomposición, a causa de la cosecha intensiva, podría generar efecto diferencial a largo plazo, puesto que podría facilitar el desarrollo de nuevos árboles al incrementar la disponibilidad de nutrientes o bien aumentar las salidas de nutrientes del ecosistema (Noormets et al., 2014). Thiffault et al. (2011) mencionan que la cosecha de biomasa no tiene impacto general sobre el COS y el N total, pero notaron que existían diferencias significativas entre los métodos de extracción, ya que fueron mayores en parcelas con cortas de selección y menores con cosecha intensiva de madera. Mushinski, Gentry, Dorosky, y Boutton (2017) también reportaron que la cosecha intensiva reduce las concentraciones de COS y N total en el primer metro del perfil del suelo; asimismo, las cantidades de amonio y nitrato se alteraron de forma negativa al aumentar la intensidad de la cosecha, debido a las tasas altas de mineralización y lixiviación de N. En contraste, Jerabkova, Prescott, Titus, Hope, y Walters (2011) señalaron que, después de un año de haber realizado la remoción intensiva de biomasa, la concentración de nitrato en el suelo puede aumentar hasta ocho veces. En bosques dominados por *Picea abies* (L.) Karsten, la extracción de biomasa propició mayor exportación de C orgánico disuelto, debido al incremento en los flujos de agua, como consecuencia del método intensivo de cosecha (Sørensen, Meili, Lambertsson, von Brömssen, & Bishop, 2009). Nave et al. (2010) reportaron que el C en el horizonte orgánico

have been found in Alfisols and Spodosols, but it has decreased in Inceptisols and Ultisols. This suggests that sandy soils are more sensitive to the effects of harvesting because the SOM is poorly protected (Clarke et al., 2015). This supports the importance of soil type in the impacts of harvesting methods on nutrient availability.

Changes in precipitation intensity favor N loss by increasing mobility and increasing leaching and denitrification rates (Marchman et al., 2015). Some harvesting methods remove root biomass, altering soil nutrient transformation rates and reserves. A reduction of ~50 % of root biomass has been reported in comparison with unharvested forests or forests where roots are not removed (Bardgett & Van Der Putten, 2014). Such a situation may result in decreased C and increased N loss through leaching or decreased ground C allocation and heterotopic respiration in soil (Nave, Vance, Swanston, & Curtis, 2009). Variation in nutrients from harvest effects may be explained by differences in SOM longevity and stability, physical accessibility, and stabilizing interactions with more recalcitrant minerals and compounds that prevent decomposition and mineralization (Schmidt et al., 2011). Also, variation may be related to site-specific factors such as moisture differences; at sites with growing season precipitation deficits, harvesting increases soil moisture content and reduces the number of periods when decomposition may be limited by drought. Harvesting may lead to moisture saturation and inhibit soil decomposition (Smyth et al., 2016). In oak forests, it has been documented that surface leaf litter decomposition is low, possibly due to lower soil moisture after harvesting, while other studies have reported faster decomposition due to increased soil moisture in the top layers in the summer (Clarke et al., 2015). Another study reported that post-harvest decomposition rates were similar to those found in unharvested forests; these differences depended on the site's moisture level and a higher SOM loss in a wet site compared to a dry site (Symonds, Morris, & Kwiaton, 2013).

The effects of forest management on nutrient availability have been analyzed through modeling, and the results are similar to those obtained in the field. Ziche et al. (2019) used the Finnish Yasso model and indicated that the soil reaches a minimum level of COS in the first 16 to 22 years after harvesting, with an average value of 9 % below the pre-harvest value. Models have suggested that intensive methods could cause long-term negative effects on nutrient stocks after harvesting, mainly with reduction of COS and N amounting to 14 % after two rotations of 100 years (Clarke et al., 2015). Regardless of laboratory, field or modeling determinations, it has been concluded that intensive biomass removal could cause nutrient reduction, mainly of C, as a result of

del suelo disminuyó 30 ± 6 % después de la cosecha al final del ciclo silvícola, mientras que el horizonte mineral no mostró cambios significativos. Foote et al. (2015) encontraron que las prácticas de corta intensiva redujeron el N total del suelo y la biomasa microbiana en bosques de pino. La información derivada del impacto del manejo forestal sobre la dinámica y disponibilidad de nutrientes sugiere que la intensidad de la cosecha forestal puede causar pérdidas (Jones, Beets, Kimberley, & Garrett, 2011; Kellman et al., 2014), ganancias (Grand & Lavkulich, 2012; Vanguelova, Pitman, Luro, & Helmisaari, 2010) o no generar cambios en COS y N total (Jerabkova et al., 2011; Scott et al., 2014; Wall & Hytönen, 2011). En Suecia se encontró 16.5 % de reducción de COS durante los primeros 32 a 50 años después de la cosecha, en bosques extraídos mediante métodos intensivos (Nave et al., 2010; Noormets et al., 2014). Esta reducción se atribuye a un retorno menor de nutrientes al suelo a través de la hojarasca de los árboles, y a mayor descomposición de la MOS por las temperaturas altas, cuando la superficie queda expuesta al sol después de la cosecha (Clarke et al., 2015). En Noruega, la disminución del C total en el suelo varió entre 17 y 22 %, después de 15 años de la cosecha de madera, principalmente en el horizonte orgánico, mientras que en el horizonte mineral aumentó. Este incremento se atribuye a la descomposición de las raíces que permanecen en el suelo después de la cosecha (Dar & Sundarapandian, 2015). En contraste, otras investigaciones reportaron pérdidas significativas de COS en el horizonte orgánico y se concluyó que la mezcla mecánica del horizonte orgánico con el suelo mineral, durante la recolección, puede explicar la reducción aparente en las reservas de COS (Tamminen, Saarsalmi, Smolander, Kukkola, & Helmisaari, 2012). La variación del efecto de la cosecha de madera en el COS depende del tipo de suelo; en los Alfisoles y Spodosoles no se han encontrado cambios significativos del C en el horizonte mineral, pero sí en Inceptisoles y Ultisoles donde ha disminuido. Lo anterior sugiere que los suelos arenosos son más sensibles a los efectos de la cosecha porque la MOS está escasamente protegida (Clarke et al., 2015). Esto respalda la importancia del tipo de suelo en los impactos de los métodos de cosecha sobre la disponibilidad de nutrientes.

Los cambios en la intensidad de la precipitación favorecen la pérdida de N al incrementar su movilidad y aumentar las tasas de lixiviación y desnitrificación (Marchman et al., 2015). Algunos métodos de cosecha remueven la biomasa subterránea (raíces), alterando las reservas y tasas de transformación de nutrientes en el suelo. Se ha reportado la reducción de ~50 % de la biomasa subterránea en comparación con bosques sin aprovechamiento o bosques donde las raíces no son retiradas (Bardgett & Van Der Putten, 2014). Tal situación puede generar disminución del C e incrementar la pérdida de N mediante lixiviación o bien

lower biomass production, and generate a negative feedback mechanism, through reduced net primary productivity (Kreutzweiser, Hazlett, & Gunn, 2008; Vesterdal et al., 2013).

Extensive methods

Methods that use selection cutting, such as the Mexican Method of Irregular Forest Management (MMOBI in Spanish), minimize the loss of nutrients in soil after harvesting (Figure 1), because they generate less waste, making its disposal less necessary due to the low probability of fire risk. As a result, soil is never left bare and the risk of erosion, compaction and nutrient loss decreases (Clarke et al., 2015). Taylor, Wang, and Kurz (2008) demonstrated that selective cutting increased COS reserves due to the lower rate of nutrient mineralization. In Norway, Nilsen and Strand (2013) reported that COS stocks in organic and mineral horizons, in a selectively harvested forest, were higher than in forests with intensive method, because more plant residues and roots are stored which increase the supply of nutrients. A modeling study showed that a harvest management regime between 10 and 20 % of the biomass provides better combination of high wood yield and nutrient storage, mainly of C, compared to uniformly aged plantations with a rotation period of 60 years (Ågren, Hyvönen, & Nilsson, 2008). In contrast, other studies have not reported differences in COS values in forests with selective versus intensive harvesting management (Wäldchen, Schulze, Schöning, Schrupf, & Sierra, 2013). These discrepancies may be associated with the amount of biomass extracted during harvesting. In *P. abies* forests, the amount of C in the organic layer was negatively correlated with the amount of biomass extracted during selection cutting compared to the control without cutting (Vesterdal et al., 2013). Similarly, in *Picea glauca* (Moench) Voss forests, the amount of C on the organic horizon increased one to two years after 61 % of the biomass was removed but did not increase when only 33 % of the forest mass was removed, due to the lower input of organic residues that reduces the input of C after harvesting (Smith, Harvey, Koubaa, Brais, & Mazerolle, 2016). In contrast, other studies on selective method in *Pinus resinosa* Aiton forests showed that soil C stocks did not change with the removal of 10, 25, 35, and 50 % of the biomass (Jurgensen, Tarpey, Pickens, Kolka, & Palik, 2012). Jonsson and Sigurdsson (2010), due to the intensity of biomass removed, point out significant differences in SOM two or three years after the removal of 25, 45 and 65 % of the forest mass in *P. abies* forests, suggesting that selective cutting has long-term effects on soil nutrients. Selective cutting can temporarily reduce aerial biomass and thus annual C inputs through canopy leaf litter; however, there are large C inputs related to residues left at the cutting site

decrecer la asignación subterránea de C y la respiración heterotrófica en el suelo (Nave, Vance, Swanston, & Curtis, 2009). La variación en los nutrientes derivados de los efectos de la cosecha puede explicarse por las diferencias en la longevidad y estabilidad de la MOS, accesibilidad física e interacciones estabilizadoras con minerales y compuestos más recalcitrantes que impiden la descomposición y mineralización (Schmidt et al., 2011). Asimismo, la variación puede estar relacionada con factores específicos del sitio como diferencias de humedad; en sitios con déficit de precipitación en la temporada de crecimiento, la cosecha aumenta el contenido de humedad del suelo y reduce el número de periodos en que la descomposición puede verse limitada por la sequía. La cosecha puede conducir a la saturación de la humedad e inhibir la descomposición en el suelo (Smyth et al., 2016). En bosques de roble, se ha documentado que la descomposición de la hojarasca superficial es baja debido posiblemente a la menor humedad del suelo después de la corta; mientras que otros estudios han declarado descomposición más rápida, debido al incremento en la humedad del suelo de las capas superficiales en el verano (Clarke et al., 2015). Otro estudio reportó que las tasas de descomposición después de la cosecha eran similares a las encontradas en bosques sin aprovechamiento forestal; estas diferencias dependían del nivel de humedad del sitio y de una mayor pérdida de MOS en un sitio húmedo comparado con un seco (Symonds, Morris, & Kwiaton, 2013).

Los efectos del manejo forestal sobre la disponibilidad de nutrientes se han analizado a través de modelación, y los resultados son similares a los obtenidos en campo. Ziche et al. (2019) utilizaron el modelo finlandés Yasso e indicaron que el suelo alcanza un nivel mínimo de COS en los primeros 16 a 22 años después de la cosecha, con un valor medio del 9 % por debajo del valor previo a la cosecha. Los modelos han sugerido que los métodos intensivos podrían ocasionar efectos negativos a largo plazo en las reservas de nutrientes después de la cosecha, principalmente con reducción del COS y N que asciende al 14 % después de dos rotaciones de 100 años (Clarke et al., 2015). Independientemente de las determinaciones de laboratorio, campo o modelado, se ha concluido que la remoción intensiva de biomasa podría causar reducción de nutrientes, principalmente del C, como resultado de menor producción de biomasa, y generar un mecanismo de retroalimentación negativa, a través de la productividad primaria neta reducida (Kreutzweiser, Hazlett, & Gunn, 2008; Vesterdal et al., 2013).

Métodos extensivos

Los métodos que emplean cortas de selección, como el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI), minimizan la pérdida de nutrientes en el

that integrate into the soil as the root systems of the removed trees decompose (Clarke et al., 2015).

The effect of selective management depends on the percentage of forest removal, as well as differences in the period between harvesting and the time of sampling for studies (Jonsson & Sigurdsson, 2010). In cases where selective cutting has little effect on COS content, it is due to the percentage of forest mass removed that controls the entry of C into the soil, which in turn causes micro-environmental changes in soil temperature and moisture (Clarke et al., 2015). Field studies and modeling are inconclusive with low intensity cutting, so it is necessary to improve the development of models that adequately address the factors affecting post-harvest soil nutrient stocks (Thiffault et al., 2011; Vesterdal et al., 2013; Walmsley, Jones, Reynolds, Price, & Healey, 2009). On the other hand, most studies that have evaluated the effect of the harvesting method on soil nutrient stocks indicate reductions after intensive harvesting compared to selective cutting, at least when compensatory fertilization was not applied; however, these studies did not report effects on soil productivity and tree growth (Fleming et al., 2018; Hazlett, Morris, & Fleming, 2014; Vesterdal et al., 2013).

Strategies to increase soil fertility due to forest harvesting

Forest management aims to achieve a balance in nutrient inputs and outputs to ensure long-term growth and productivity. Experimental studies report decreased tree growth after intensive biomass harvesting at the end of the silvicultural cycle (Helmisaari et al., 2011; Thiffault et al., 2011). Therefore, fertilization has been suggested as a strategy to counteract the decrease in nutrient availability and contribute to improving forest plantation productivity (Ingerslev, Hansen, Pedersen, & Skov, 2014; Jones et al., 2011).

Some fertilization methods that enhance nutrient recirculation are the addition of N and the spreading of ashes and crop residues (Karlton et al., 2008). Ash consists mainly of oxides, hydroxides and metal carbonates, and soil salts and minerals (Karlton et al., 2008); its application has been seen as a means to counteract soil acidification caused by forest management and deposition of air pollution compounds (Brais, Bélanger, & Guillemette, 2015; Ingerslev et al., 2014). The ashes' neutralization capacity is due to the dissolution of carbonates and calcium and magnesium hydroxides increasing the pH, mainly in the organic horizon (Reid & Watmough, 2014). Moreover, Ingerslev et al. (2014) mention that regardless of the shape, preparation or quantity, the application of ash increases the pH and availability of nutrients, since the presence of base cations favors the decomposition of organic matter and

suelo después de la cosecha (Figura 1), ya que generan menor cantidad de residuos, por lo que su eliminación es menos necesaria debido a la baja probabilidad de riesgo de incendios. En consecuencia, el suelo nunca queda desnudo y el riesgo de erosión, compactación y pérdida de nutrientes disminuye (Clarke et al., 2015). Taylor, Wang, y Kurz (2008) demostraron que la tala selectiva aumentó las reservas de COS, debido a la menor tasa de mineralización de los nutrientes. En Noruega, Nilsen y Strand (2013) reportaron que las existencias de COS en horizontes orgánicos y minerales, en un bosque cosechado selectivamente, fueron mayores que en bosques con extracción intensiva, porque se logra almacenar mayor cantidad de residuos vegetales y raíces que incrementan el suministro de nutrientes. Un estudio de modelado mostró que un régimen de manejo de cosecha entre 10 y 20 % de la biomasa proporciona mejor combinación de alto rendimiento de madera y almacenamiento de nutrientes, principalmente de C, en comparación con plantaciones de edad uniforme con un periodo de rotación de 60 años (Ågren, Hyvönen, & Nilsson, 2008). En contraste, otros estudios no han reportado diferencias en los valores de COS en bosques con manejo de corte selectivo contra corte intensivo (Wäldchen, Schulze, Schöning, Schrupf, & Sierra, 2013). Estas discrepancias pueden estar asociadas a la cantidad de biomasa extraída durante las cortas. En bosques de *P. abies*, la cantidad de C en la capa orgánica se correlacionó negativamente con la cantidad de biomasa extraída durante las cortas de selección en comparación con el control sin corta (Vesterdal et al., 2013). Asimismo, en bosques de *Picea glauca* (Moench) Voss, la cantidad de C en el horizonte orgánico aumentó uno o dos años después de la eliminación de 61 % de la biomasa, pero no aumentó cuando solo se eliminó 33 % de la masa forestal, debido al menor aporte de residuos orgánicos que reduce la entrada de C después de la cosecha (Smith, Harvey, Koubaa, Brais, & Mazerolle, 2016). En contraste, otras investigaciones en bosques de *Pinus resinosa* Aiton, cosechados selectivamente, mostraron que las existencias de C en suelo no cambiaron con la eliminación de 10, 25, 35 y 50 % de la biomasa (Jurgensen, Tarpey, Pickens, Kolka, & Palik, 2012). Jonsson y Sigurdsson (2010), debido a la intensidad de biomasa extraída, señalan diferencias significativas en la MOS dos o tres años después de la eliminación del 25, 45 y 65 % de la masa forestal en bosques de *P. abies*, sugiriendo que las cortas selectivas tienen efectos en los nutrientes del suelo a largo plazo. La corta selectiva de los bosques puede reducir temporalmente la biomasa aérea y, por lo tanto, la entrada anual de C a través de la hojarasca del dosel; sin embargo, existen grandes entradas de C relacionadas con los residuos que quedan en el sitio de la corta y que se integran al suelo a medida que se incorporan también los sistemas de raíces de los árboles removidos que se descomponen (Clarke et al., 2015).

the release of nutrients into the soil solution (Brais et al., 2015). Ash application is considered an alternative in managed forests, because it can have positive effects on productivity and at the same time solves the problem of harvest residue disposal (Ingerslev et al., 2014; Saarsalmi, Smolander, Kukkola, Moilanen, & Saramäki, 2012).

The addition of inorganic N stimulates photosynthesis and net primary productivity; for example, the increase in total leaf area reduces the allocation of photosynthates to produce fine roots and exudates to root symbionts (Janssens & Luysaert, 2009). The proportional increase in thick roots is considered a potential mechanism to increase long-term soil C sequestration in response to improved N availability (Crow et al., 2009); furthermore, differences in the nutrients available to plants as a result of N fertilization can change the C:N ratio in soil, which can trigger changes in the microbial community and the competitive status of species (Nave et al., 2009; Vanguelova et al., 2010). The increase in N causes direct effects on microbial physiology and enzyme activity, which would potentially explain the decrease in mineralization (Noormets et al., 2014). Fertilization generates changes in production, photosynthesis assignment to root formation, C:N ratio, and microbial activity; increased N availability is likely to promote C accumulations in surface soil layers and higher biomass production efficiency with lower SOM decomposition rates (Chen, Yang, & Robinson, 2013; Janssens & Luysaert, 2009; Vicca et al., 2012). These effects are similar when N-fixing species are introduced into forest plantations (Epron, Mouanda, Mareschal, & Koutika, 2015; Forrester, Pares, O'Hara, Khanna, & Bauhus, 2013; Koutika, Epron, Bouillet, & Mareschal, 2014) and particularly when large amounts of harvest residues are left on site providing substrate for the microbial community (Kumaraswamy et al., 2014; Walmsley et al., 2009). In experiments with pines and spruces, seedling growth was positively correlated with net N mineralization as well as with the mineralized N/N ratio in the microbial biomass. This suggests the importance of N availability for seedling growth, although nutrient demand is relatively low.

Crop residues establish a small proportion of the total SOM and total nutrients in the surface soil (Tamminen et al., 2012); that is, fresh organic material for decomposition and nutrient release (Smolander, Saarsalmi, & Tamminen, 2015). In an experiment conducted by Brais et al. (2015), the retention and management of harvest residues increased the forest floor biomass in successive rotations by up to 100 % compared to management practices that remove them. In a study conducted in Argentinean forests, the practice of harvest residue conservation was associated with higher concentrations of N, P, K, Ca and Mg, compared

El efecto del manejo selectivo depende del porcentaje de remoción de masa forestal, así como de las diferencias en el periodo entre la corta y el momento del muestreo para la realización de las investigaciones (Jonsson & Sigurdsson, 2010). Los casos en que la corta selectiva tiene poco efecto sobre el contenido de COS, es debido al porcentaje de masa forestal extraída que controla la entrada de C al suelo, lo que a su vez causa cambios microambientales en la temperatura y humedad del suelo (Clarke et al., 2015). Los estudios de campo y modelado no son concluyentes con cortas de baja intensidad, por ello, es necesario mejorar el desarrollo de modelos que aborden, adecuadamente, los factores que afectan las existencias de nutrientes en el suelo después de la cosecha (Thiffault et al., 2011; Vesterdal et al., 2013; Walmsley, Jones, Reynolds, Price, & Healey, 2009). Por otra parte, la mayoría de los estudios que han evaluado el efecto del método de cosecha en las reservas de nutrientes en el suelo, señalan reducciones después de la cosecha intensiva en comparación con la selectiva, al menos cuando no se aplicó la fertilización compensatoria; sin embargo, estos estudios no informaron los efectos en la productividad del suelo y el crecimiento de los árboles (Fleming et al., 2018; Hazlett, Morris, & Fleming, 2014; Vesterdal et al., 2013).

Estrategias para incrementar la fertilidad de suelos con aprovechamiento forestal

El manejo forestal tiene como objetivo lograr el equilibrio en las entradas y salidas de nutrientes, para asegurar el crecimiento y la productividad en el largo plazo. Los estudios experimentales reportan disminución del crecimiento de los árboles después de una cosecha intensiva de biomasa al final del ciclo silvícola (Helmisaari et al., 2011; Thiffault et al., 2011). Por tanto, la fertilización se ha sugerido como estrategia para contrarrestar la disminución en la disponibilidad de nutrientes y contribuir a la mejora de la productividad de las plantaciones forestales (Ingerslev, Hansen, Pedersen, & Skov, 2014; Jones et al., 2011).

Algunos métodos de fertilización que promueven la recirculación de nutrientes son la adición de N y el esparcimiento de cenizas y residuos de cosecha (Karlton et al., 2008). Las cenizas consisten principalmente en óxidos, hidróxidos y carbonatos metálicos, y sales y minerales del suelo (Karlton et al., 2008); su aplicación se ha visto como un medio para contrarrestar la acidificación del suelo, causada por el manejo forestal por la deposición de compuestos de contaminación del aire (Brais, Bélanger, & Guillemette, 2015; Ingerslev et al., 2014). La capacidad de neutralización de las cenizas se debe a la disolución de carbonatos e hidróxidos de calcio y magnesio que aumentan el pH, principalmente en el horizonte orgánico (Reid & Watmough, 2014). Asimismo, Ingerslev et al. (2014) mencionan que independientemente de la forma, preparación o

to the treatments in which they were eliminated (Reid & Watmough, 2014). However, the annual amounts of nutrients released through harvest residues are low and some of them may be temporarily immobilized by the microbial community, especially N, due to slow decomposition and release of nutrients (Jones et al., 2011; Tamminen et al., 2012). In experiments with spruce and pine, harvest residues had no effect on the amounts of cations, microbial biomass, ammonium, nitrate and C:N ratio (Smolander et al., 2015), while in other experiments, C:N ratio decreased and base cations, ammonium, C and N of the microbial biomass increased (Merilä et al., 2014); however, in the long term, the increase in nutrients released by the decomposition of harvest residues may favor the growth of trees when their nutritional requirements increase (Egnell, 2011). Other experiments report that harvest residues increase survival and growth of spruce seedlings, due to inhibition of competing vegetation during the first years after planting (Tamminen & Saarsalmi, 2013). Moreover, research on spruce revealed inhibition of competing vegetation due to the spread of harvest residues, which contributed to the growth of trees with higher stem volume and biomass (Smolander et al., 2015). In general, there is insufficient data to predict the specific effects of harvest residues on forest soils; however, where significant effects have been detected, these appear to be positive on soil nutrients and linear to the number of residues added (Adamczyk et al., 2015; Kaarakka et al., 2014; Smolander et al., 2015; Tamminen et al., 2012). Numerous studies have been conducted on how the application of fertilization methods increases soil fertility and forest productivity, particularly in boreal areas; however, knowledge is still lacking on how these methods influence the productivity of Mexico's temperate forests.

Perspectives in Mexico

Although the review focuses on research results from different parts of the world, information is useful for the Mexican forest context which has a similar approach to that used in these countries. This review can serve as the basis for a conceptual reorientation of traditional forest use systems in Mexico. These systems should not only cover the growing national demand for wood, but also promote conservation of functions, regarding environmental risk factors, costs and benefits of wood production and services provided, because the well-being of societies depends directly or indirectly on them (Guerra-De la Cruz & Galicia, 2017). In Mexico, relevant efforts have been made to constantly improve the scientific-technological approach and the evaluation of forest management practices. However, the knowledge of the consequences of wood extraction on the factors that regulate soil functions and fertility, such as the maintenance of physicochemical properties, diversity and activity of key functional

cantidad, la aplicación de ceniza incrementa el pH y la disponibilidad de nutrientes, ya que la presencia de cationes base favorece la descomposición de la materia orgánica y la liberación de nutrientes en la solución del suelo (Brais et al., 2015). La aplicación de cenizas es considerada una alternativa en bosques manejados, ya que puede tener efectos positivos en la productividad y al mismo tiempo resuelve el problema de la eliminación de residuos de cosecha (Ingerslev et al., 2014; Saarsalmi, Smolander, Kukkola, Moilanen, & Saramäki, 2012).

La adición de N inorgánico estimula la fotosíntesis y productividad primaria neta; por ejemplo, el aumento del área foliar total reduce la asignación de fotosintatos para la producción de raíces finas y exudados a simbiontes de raíz (Janssens & Luysaert, 2009). El aumento proporcional de raíces gruesas se considera un mecanismo potencial para aumentar el secuestro de C en el suelo a largo plazo, en respuesta a la disponibilidad mejorada de N (Crow et al., 2009); además, las diferencias en los nutrientes disponibles para las plantas, como consecuencia de la fertilización con N, pueden cambiar la relación C: N en el suelo, lo cual puede desencadenar cambios en la comunidad microbiana y en el estado competitivo de las especies (Nave et al., 2009; Vanguelova et al., 2010). La elevación del N causa efectos directos sobre la fisiología microbiana y la actividad enzimática, que potencialmente explicarían la disminución en la mineralización (Noormets et al., 2014). La fertilización genera cambios en la producción, asignación de fotosintatos a la formación de raíces, relación C:N y actividad microbiana; es probable que la mayor disponibilidad de N promueva acumulaciones de C en las capas superficiales del suelo y mayor eficiencia de producción de biomasa con tasas menores de descomposición de la MOS (Chen, Yang, & Robinson, 2013; Janssens & Luysaert, 2009; Vicca et al., 2012). Estos efectos son similares cuando se introducen especies fijadoras de N en las plantaciones forestales (Epron, Mouanda, Mareschal, & Koutika, 2015; Forrester, Pares, O'Hara, Khanna, & Bauhus, 2013; Koutika, Epron, Bouillet, & Mareschal, 2014) y, particularmente, cuando se dejan cantidades grandes de residuos de cosecha en el sitio que proporcionan sustrato para la comunidad microbiana (Kumaraswamy et al., 2014; Walmsley et al., 2009). En experimentos con pinos y piceas, el crecimiento de las plántulas se correlacionó positivamente con la mineralización neta de N, así como con la relación N mineralizado/N en la biomasa microbiana. Esto sugiere la importancia de la disponibilidad de N para el crecimiento de las plántulas, aunque la demanda de nutrientes sea relativamente baja.

Los residuos de la cosecha constituyen una pequeña proporción del conjunto total de MOS y nutrientes totales en el suelo superficial (Tamminen et al.,

groups, have been scarcely studied and documented (Galicia et al., 2018; Monárrez-González, Pérez-Verdín, López-González, Márquez-Linares, & González, 2018). This is despite the existence of the National Forestry Commission (CONAFOR) and the effort to carry out diagnostic studies of the impact, to issue planning proposals. The lack of information on the processes of nutrient dynamics after wood harvesting complicates the understanding of their impacts and improvement actions (Mendoza-Ponce & Galicia, 2010). This is because forest management methods used are mainly oriented towards guaranteeing the yield of timber volumes, thus leaving the multiple ecological processes that are affected, based on forest management practices, in second place. In addition to the theoretical knowledge, it is urgent to carry out experiments on a complete gradient of biomass removal, to know its effects on the dynamic processes in the soil, particularly those related to the availability and stabilization of nutrients. This happens despite the existence of the Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) and the effort to carry out diagnostic studies of the impact, to issue planning proposals. The lack of information on the processes of nutrient dynamics after wood harvesting complicates the understanding of their impacts and improvement actions (Mendoza-Ponce & Galicia, 2010). This is because the forest management methods used are mainly oriented towards assuring the yield of timber volumes, leaving the multiple ecological processes that are affected, based on forest management practices, in second place. In addition to the theoretical knowledge, it is urgent to carry out experiments on a complete gradient of biomass removal, to know the effects on the dynamic processes in soil, particularly those related to the availability and stabilization of nutrients. Finally, the growing demand for wood in Mexico needs greater productivity of forests, so it is essential to design fertilization alternatives that increase tree growth and productivity, to improve the economic income of forest communities that depend on these systems (Galicia et al., 2018). The generation of scientific knowledge will allow the development of solid management options to improve and define intensity levels that maintain ecological functions, decrease negative environmental impacts, and guarantee long-term timber production.

Conclusions

Research on forest management suggests that its impact is complex and dynamic, due to the interaction with environmental conditions, forest composition and structure, microbial activity, and intrinsic soil properties. Intensive forest management practices are successful in recovering biomass, but they deplete nutrient reservoirs and soil fertility. The decrease in organic matter input modifies microbial communities associated with nutrient availability processes and increases soil erosion and compaction,

2012); es decir, material orgánico fresco para la descomposición y liberación de nutrientes (Smolander, Saarsalmi, & Tamminen, 2015). En un experimento conducido por Brais et al. (2015), la retención y manejo de residuos de cosecha aumentó, hasta 100 %, la biomasa en el piso forestal en rotaciones sucesivas, en comparación con prácticas de manejo que los eliminan. En un estudio realizado en bosques argentinos, la práctica de conservación de residuos de cosecha se asoció con mayores concentraciones de N, P, K, Ca y Mg, respecto a los tratamientos en los cuales sí se eliminaron (Reid & Watmough, 2014). No obstante, las cantidades anuales de nutrientes liberados, a través de los residuos de la cosecha, son bajas y algunos de ellos pueden ser inmovilizados temporalmente por la comunidad microbiana, especialmente N, debido a la lenta descomposición y liberación de nutrientes (Jones et al., 2011; Tamminen et al., 2012). En experimentos con picea y pinos, los residuos de cosecha no tuvieron efecto sobre las cantidades de cationes, biomasa microbiana, amonio, nitrato y la relación C:N (Smolander et al., 2015), mientras que en otros experimentos, la relación C:N disminuyó y los cationes base, amonio, C y N de la biomasa microbiana incrementaron (Merilä et al., 2014); sin embargo, en el largo plazo, el incremento de nutrientes liberados por la descomposición de los residuos de cosecha puede favorecer el crecimiento de los árboles cuando sus requerimientos nutricionales aumentan (Egnell, 2011). Por su parte, otros experimentos reportan que los residuos de cosecha incrementan la supervivencia y crecimiento de plántulas de piceas, debido a la inhibición de la vegetación competidora durante los primeros años después de la siembra (Tamminen & Saarsalmi, 2013). Asimismo, investigaciones en abetos revelaron inhibición de la vegetación competidora a causa del esparcimiento de los residuos de cosecha, que contribuyó al crecimiento de los árboles con un volumen mayor del tallo y biomasa (Smolander et al., 2015). En general, no hay datos suficientes para predecir los efectos específicos de los residuos de cosecha en los suelos forestales; sin embargo, cuando se han detectado efectos significativos, estos parecen ser positivos sobre los nutrientes del suelo y lineales a la cantidad de residuos adicionados (Adamczyk et al., 2015; Kaarakka et al., 2014; Smolander et al., 2015; Tamminen et al., 2012). Numerosos estudios se han realizado sobre cómo la aplicación de los métodos de fertilización incrementa la fertilidad de los suelos y la productividad de los bosques, sobre todo en zonas boreales; sin embargo, aún falta conocimiento sobre cómo estos métodos influyen en la productividad de los bosques templados de México.

Perspectivas en México

A pesar de que la revisión se centra en resultados de investigaciones realizadas en diversas partes del

affecting ecosystem multifunctionality and long-term productivity. Therefore, research in Mexico requires the monitoring of multiple variables of the soil and its ecological functions to ensure sustainable timber productivity and increased income for the communities.

Acknowledgements

The first author would like to thank the Graduate Program in Biological Sciences of the Universidad Autónoma de México and the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for funding her studies (scholarship number 270120). We also thank the project “Integral Evaluation of the Impact of Forest Management on Biodiversity and Ecosystem Services in Mexican Temperate Forests,” funded by CONACYT through the call National Problems (key 314).

End of English version

References / Referencias

- Achat, D. L., Augusto, L., Bakker, M. R., Gallet-Budynek, A., & Morel, C. (2012). Microbial processes controlling P availability in forest spodosols as affected by soil depth and soil properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 44(1), 39–48. doi: 10.1016/j.soilbio.2011.09.007
- Adamczyk, B., Adamczyk, S., Kukkola, M., Tamminen, P., & Smolander, A. (2015). Logging residue harvest may decrease enzymatic activity of boreal forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 82, 74–80. doi: 10.1016/j.soilbio.2014.12.017
- Ågren, G. I., Hyvönen, R., & Nilsson, T. (2008). Are Swedish forest soils sinks or sources for CO₂ - Model analyses based on forest inventory data. *Biogeochemistry*, 44(1), 39–48. doi: 10.1007/s10533-007-9151-x
- Laurent, A., De Schrijver, A., Vesterdal, L., Smolander, A., Prescott, C., & Ranger, J. (2015). Influences of evergreen gymnosperm and deciduous angiosperm tree species on the functioning of temperate and boreal forests. *Biological Reviews*, 90(2), 444–466. doi: 10.1111/brv.12119
- Ball, P. N., MacKenzie, M. D., DeLuca, T. H., & Montana, W. E. H. (2010). Wildfire and charcoal enhance nitrification and ammonium-oxidizing bacterial abundance in dry montane forest soils. *Journal of Environmental Quality*, 39(4), 1243–1253. doi: 10.2134/jeq2009.0082
- Bardgett, R. D., & Van Der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515, 505–511. doi: 10.1038/nature13855
- Boiffin, J., & Munson, A. D. (2013). Three large fire years threaten resilience of closed crown black spruce forests in eastern Canada. *Ecosphere*, 4(5), 1–20. doi: 10.1890/ES13-00038.1
- mundo, la información resulta útil para el contexto forestal mexicano que tiene un enfoque similar al utilizado en estos países. Esta revisión puede servir de base para reorientar, de manera conceptual, los sistemas de aprovechamiento forestal tradicionales en México. Estos sistemas no solo deben cubrir la creciente demanda nacional de madera, sino que también deben promover la conservación de funciones, contemplando factores de riesgo ambientales, costos y beneficios de la producción maderable y los servicios que suministran, ya que de ellos depende directa o indirectamente el bienestar de las sociedades (Guerra-De la Cruz & Galicia, 2017). En México se han desarrollado esfuerzos relevantes en una mejora constante del enfoque científico-tecnológico y la evaluación de prácticas de manejo forestal. No obstante, el conocimiento de las consecuencias de la extracción de madera sobre los factores que regulan las funciones y fertilidad del suelo, tales como el mantenimiento de las propiedades físicoquímicas, la diversidad y actividad de grupos funcionales clave, han sido escasamente estudiados y documentados (Galicia et al., 2018; Monárrez-González, Pérez-Verdín, López-González, Márquez-Linares, & González, 2018). Esto sucede a pesar de la existencia de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y del esfuerzo por realizar estudios de diagnóstico del impacto, para emitir propuestas de planeación. El déficit de información sobre los procesos de la dinámica de nutrientes, después de la cosecha de madera, complica el entendimiento de sus impactos y las acciones de mejora (Mendoza-Ponce & Galicia, 2010). Lo anterior debido a que los métodos de manejo forestal utilizados se orientan principalmente en garantizar el rendimiento de los volúmenes maderables, dejando así los múltiples procesos ecológicos que se ven afectados, a partir de las prácticas de manejo forestal, en segundo nivel de importancia. Además del conocimiento teórico, es urgente la realización de experimentos en un gradiente completo de remoción de biomasa, para conocer sus efectos sobre los procesos dinámicos en el suelo, particularmente los relacionados con la disponibilidad y estabilización de nutrientes. Finalmente, la demanda creciente de madera en México requiere mayor productividad de los bosques, por lo que es imperativo diseñar alternativas de fertilización que incrementen el crecimiento de los árboles y la productividad, para mejorar los ingresos económicos de las comunidades forestales que dependen de estos sistemas (Galicia et al., 2018). La generación de conocimiento científico permitirá desarrollar opciones de manejo sólidas para mejorar y definir los niveles de intensidad que mantengan las funciones ecológicas, disminuyan los impactos ambientales negativos, y garanticen la producción maderable a largo plazo.

- Brais, S., Bélanger, N., & Guillemette, T. (2015). Wood ash and N fertilization in the Canadian boreal forest: Soil properties and response of jack pine and black spruce. *Forest Ecology and Management*, 348, 1–14. doi: 10.1016/j.foreco.2015.03.021
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, 338, 124–138. doi: 10.1016/j.foreco.2014.11.022
- Chen, G., Yang, Y., & Robinson, D. (2013). Allocation of gross primary production in forest ecosystems: Allometric constraints and environmental responses. *New Phytologist*, 200(4), 1176–1186. doi: 10.1111/nph.12426
- Clark, A. L., & St. Clair, S. B. (2011). Mycorrhizas and secondary succession in aspen-conifer forests: Light limitation differentially affects a dominant early and late successional species. *Forest Ecology and Management*, 262(2), 203–207. doi: 10.1016/j.foreco.2011.03.024
- Clarke, N., Gundersen, P., Jönsson-Belyazid, U., Kjønaas, O. J., Persson, T., Sigurdsson, B. D., ... Vesterdal, L. (2015). Influence of different tree-harvesting intensities on forest soil carbon stocks in boreal and northern temperate forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 351, 9–19. doi: 10.1016/j.foreco.2015.04.034
- Colombo, F., Macdonald, C. A., Jeffries, T. C., Powell, J. R., & Singh, B. K. (2016). Impact of forest management practices on soil bacterial diversity and consequences for soil processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 94, 200–210. doi: 10.1016/j.soilbio.2015.11.029
- Crow, S. E., Lajtha, K., Bowden, R. D., Yano, Y., Brant, J. B., Caldwell, B. A., & Sulzman, E. W. (2009). Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil carbon in an old-growth forest. *Forest Ecology and Management*, 258(10), 2224–2232. doi: 10.1016/j.foreco.2009.01.014
- Dar, J. A., & Sundarapandian, S. (2015). Variation of biomass and carbon pools with forest type in temperate forests of Kashmir Himalaya, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(2), 55. doi: 10.1007/s10661-015-4299-7
- Diochon, A., & Kellman, L. (2008). Natural abundance measurements of ^{13}C indicate increased deep soil carbon mineralization after forest disturbance. *Geophysical Research Letters*, 35(14). doi: 10.1029/2008GL034795
- Egnell, G. (2011). Is the productivity decline in Norway spruce following whole-tree harvesting in the final felling in boreal Sweden permanent or temporary? *Forest Ecology and Management*, 261(1), 148–153. doi: 10.1016/j.foreco.2010.09.045
- Epron, D., Mouanda, C., Mareschal, L., & Koutika, L. S. (2015). Impacts of organic residue management on the soil C dynamics in a tropical eucalypt plantation on a nutrient-poor sandy soil after three rotations. *Soil Biology and Biochemistry*, 85, 183–189. doi: 10.1016/j.soilbio.2015.03.010

Conclusiones

Las investigaciones sobre el manejo forestal sugieren que su impacto es complejo y dinámico, debido a la interacción con las condiciones ambientales, composición y estructura del bosque, actividad microbiana y propiedades intrínsecas del suelo. Las prácticas de manejo forestal intensivas son exitosas en la recuperación de biomasa, pero abaten los reservorios de nutrientes y la fertilidad del suelo. La disminución en la entrada de materia orgánica modifica las comunidades microbianas asociadas a procesos de disponibilidad de nutrientes y aumenta la erosión y compactación del suelo, lo que afecta la multifuncionalidad del ecosistema y la productividad a largo plazo. Por lo tanto, la investigación en México requiere el monitoreo de múltiples variables del suelo y sus funciones ecológicas que garanticen la productividad maderable sostenible e ingresos mayores para las comunidades.

Agradecimientos

La primera autora agradece al Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento de sus estudios (número de becario 270120). Asimismo, agradecemos al proyecto “Evaluación integral del impacto del manejo forestal sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en los bosques templados mexicanos”, financiado por CONACYT a través de la convocatoria Problemas Nacionales (clave 314).

Fin de la versión en español

- Falkowski, P. G., Fenchel, T., & DeLong, E. F. (2008). The microbial engines that drive earth's biogeochemical cycles. *Science*, 320(5879), 1034–1039. doi: 10.1126/science.1153213
- Fleming, R. L., Leblanc, J. D., Weldon, T., Hazlett, P. W., Mossa, D. S., Irwin, R., ... Wilson, S. A. (2018). Effect of vegetation control, harvest intensity, and soil disturbance on 20-year jack pine stand development. *Canadian Journal of Forest Research*, 48(4), 371–387. doi: 10.1139/cjfr-2017-0331
- Foote, J. A., Boutton, T. W., & Scott, D. A. (2015). Soil C and N storage and microbial biomass in US southern pine forests: Influence of forest management. *Forest Ecology and Management*, 355, 48–57. doi: 10.1016/j.foreco.2015.03.036
- Forrester, D. I., Pares, A., O'Hara, C., Khanna, P. K., & Bauhus, J. (2013). Soil organic carbon is increased in mixed-species plantations of eucalyptus and nitrogen-fixing acacia. *Ecosystems*, 16(1), 123–132. doi: 10.1007/s10021-012-9600-9

- Frey, B., Kremer, J., Rüdte, A., Sciacca, S., Matthies, D., & Lüscher, P. (2009). Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*, 45(4), 312–320. doi: 10.1016/j.ejsobi.2009.05.006
- Galicia, L., Chávez-Vergara, B. M., Kolb, M., Jasso-Flores, R. I., Rodríguez-Bustos, L. A., Solís, L. E., ... Villanueva, A. (2018). Perspectivas del enfoque socioecológico en la conservación, el aprovechamiento y pago de servicios ambientales de los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, 24(2). doi: 10.21829/myb.2018.2421443
- Galicia, L., Gamboa, C. A. M., Cram, S., Vergara, B. C., Peña, R., V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1–29. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n1/2395-8030-tl-34-01-00001.pdf>
- Galicia, L., Saynes, V., & Campo, J. (2015). Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Botanical Sciences*, 90(3), 473–484. doi: 10.17129/botsoci.66
- Goetz, S. J., Bond-Lamberty, B., Law, B. E., Hicke, J. A., Huang, C., Houghton, R. A., ... Kasischke, E. S. (2012). Observations and assessment of forest carbon dynamics following disturbance in North America. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 117(G2). doi: 10.1029/2011JG001733
- Grand, S., & Lavkulich, L. M. (2012). Effects of forest harvest on soil carbon and related variables in Canadian spodosols. *Soil Science Society of America Journal*, 76(5), 1816–1827. doi: 10.2136/sssaj2012.0103
- Guerra-De la Cruz, V., & Galicia, L. (2017). Tropical and highland temperate forest plantations in Mexico: Pathways for climate change mitigation and ecosystem services delivery. *Forests*, 8(12), 489. doi: 10.3390/f8120489
- Harvey, B. J., & Holzman, B. A. (2014). Divergent successional pathways of stand development following fire in a California closed-cone pine forest. *Journal of Vegetation Science*, 25(1), 89–99. doi: 10.1111/jvs.12073
- Hasselquist, N. J., Metcalfe, D. B., & Högborg, P. (2012). Contrasting effects of low and high nitrogen additions on soil CO₂ flux components and ectomycorrhizal fungal sporocarp production in a boreal forest. *Global Change Biology*, 18(12), 3596–3605. doi: 10.1111/gcb.12001
- Hazlett, P. W., Morris, D. M., & Fleming, R. L. (2014). Effects of biomass removals on site carbon and nutrients and jack pine growth in boreal forests. *Soil Science Society of America Journal*, 78(S1), S183–S195. doi: 10.2136/sssaj2013.08.0372nafsc
- Helmisaari, H. S., Hanssen, K. H., Jacobson, S., Kukkola, M., Lairo, J., Saarsalmi, A., ... Tveite, B. (2011). Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: Long-term impact on tree growth. *Forest Ecology and Management*, 261(11), 1919–1927. doi: 10.1016/j.foreco.2011.02.015
- Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., ... Domínguez-Pereda, L. A. (2013). Forest management effect in diversity and tree composition of a temperate forest in northwestern Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(2), 189–200. doi: 10.5154/rchscfa.2012.08.052
- Huang, Z., He, Z., Wan, X., Hu, Z., Fan, S., & Yang, Y. (2013). Harvest residue management effects on tree growth and ecosystem carbon in a Chinese fir plantation in subtropical China. *Plant and Soil*, 362(1–2), 303–314. doi: 10.1007/s11104-012-1341-1
- Hynes, H. M., & Germida, J. J. (2012). Relationship between ammonia oxidizing bacteria and bioavailable nitrogen in harvested forest soils of central Alberta. *Soil Biology and Biochemistry*, 46, 18–25. doi: 10.1016/j.soilbio.2011.10.018
- Ingerslev, M., Hansen, M., Pedersen, L. B., & Skov, S. (2014). Effects of wood chip ash fertilization on soil chemistry in a Norway spruce plantation on a nutrient-poor soil. *Forest Ecology and Management*, 334, 10–17. doi: 10.1016/j.foreco.2014.08.034
- Janssens, I. A., & Luysaert, S. (2009). Nitrogen's carbon bonus. *Nature Geoscience*, 2(5), 318–319. doi: 10.1038/ngeo505
- Jerabkova, L., Prescott, C. E., Titus, B. D., Hope, G. D., & Walters, M. B. (2011). A meta-analysis of the effects of Clearcut and variable-retention harvesting on soil nitrogen fluxes in boreal and temperate forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(9), 1852–1870. doi: 10.1139/x11-087
- Jia, J., Yu, D., Zhou, W., Zhou, L., Bao, Y., Meng, Y., & Dai, L. (2015). Variations of soil aggregates and soil organic carbon mineralization across forest types on the northern slope of Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 35(2), 1–7. doi: 10.1016/j.chnaes.2014.03.008
- Jones, H. S., Beets, P. N., Kimberley, M. O., & Garrett, L. G. (2011). Harvest residue management and fertilisation effects on soil carbon and nitrogen in a 15-year-old *Pinus radiata* plantation forest. *Forest Ecology and Management*, 262(3), 339–347. doi: 10.1016/j.foreco.2011.03.040
- Jonsson, J. A., & Sigurdsson, B. D. (2010). Effects of early thinning and fertilization on soil temperature and soil respiration in a poplar plantation. *Icelandic Agricultural Sciences*, 23, 97–109. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/228638760_Effects_of_early_thinning_and_fertilization_on_soil_temperature_and_soil_respiration_in_a_poplar_plantation
- Jurgensen, M., Tarpey, R., Pickens, J., Kolka, R., & Palik, B. (2012). Long-term effect of silvicultural thinnings on soil carbon and nitrogen pools. *Soil Science Society of America Journal*, 76(4), 1418–1425. doi: 10.2136/sssaj2011.0257

- Kaarakka, L., Tamminen, P., Saarsalmi, A., Kukkola, M., Helmisaari, H. S., & Burton, A. J. (2014). Effects of repeated whole-tree harvesting on soil properties and tree growth in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand. *Forest Ecology and Management*, 313, 180–187. doi: 10.1016/j.foreco.2013.11.009
- Karami, A., Homae, M., Afzalnia, S., Ruhipour, H., & Basirat, S. (2012). Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 148, 22–28. doi: 10.1016/j.agee.2011.10.021
- Karltun, E., Saarsalmi, A., Ingerslev, M., Mandre, M., Andersson, S., Gaitnieks, T., ... Varnagiryte-Kabasinskiene, I. (2008). Wood ash recycling – possibilities and risks. In D. Röser, A. Asikainen, K. Raulund-Rasmussen, & I. Stupak (Eds.), *Sustainable use of forest biomass for energy: A synthesis with focus on the Baltic and Nordic region* (pp. 79–108). Springer. doi: 10.1007/978-1-4020-5054-1_4
- Kellman, L., Kumar, S., & Diochon, A. (2014). Soil nitrogen dynamics within profiles of a managed moist temperate forest chronosequence consistent with long-term harvesting-induced losses. *Journal of Geophysical Research G: Biogeosciences*, 119(7), 1309–1321. doi: 10.1002/2013JG002469
- Koutika, L. S., Epron, D., Bouillet, J. P., & Mareschal, L. (2014). Changes in N and C concentrations, soil acidity and P availability in tropical mixed acacia and eucalypt plantations on a nutrient-poor sandy soil. *Plant and Soil*, 379(1–2), 205–216. doi: 10.1007/s11104-014-2047-3
- Kreutzweiser, D. P., Hazlett, P. W., & Gunn, J. M. (2008). Logging impacts on the biogeochemistry of boreal forest soils and nutrient export to aquatic systems: A review. *Environmental Reviews*, 16, 157–179. doi: 10.1139/A08-006
- Kumaraswamy, S., Mendham, D. S., Grove, T. S., O'Connell, A. M., Sankaran, K. V., & Rance, S. J. (2014). Harvest residue effects on soil organic matter, nutrients and microbial biomass in eucalypt plantations in Kerala, India. *Forest Ecology and Management*, 328, 140–149. doi: 10.1016/j.foreco.2014.05.021
- Labelle, E. R., & Jaeger, D. (2011). Soil compaction caused by cut-to-length forest operations and possible short-term natural rehabilitation of soil density. *Soil Science Society of America Journal*, 75(6), 2314–2329. doi: 10.2136/sssaj2011.0109
- Laclau, J. P., Levillain, J., Deleporte, P., Nzila, J. de D., Bouillet, J. P., Saint André, L., ... Ranger, J. (2010). Organic residue mass at planting is an excellent predictor of tree growth in *Eucalyptus* plantations established on a sandy tropical soil. *Forest Ecology and Management*, 260(12), 2148–2159. doi: 10.1016/j.foreco.2010.09.007
- LeBauer, D. S., & Treseder, K. K. (2008). Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, 89(2), 371–379. doi: 10.1890/06-2057.1
- Marchman, S. C., Miwa, M., Summer, W. B., Terrell, S., Jones, D. G., Scarbrough, S. L., & Jackson, C. R. (2015). Clearcutting and pine planting effects on nutrient concentrations and export in two mixed use headwater streams: Upper Coastal Plain, Southeastern USA. *Hydrological Processes*, 29(1), 13–28. doi: 10.1002/hyp.10121
- Mendoza-Ponce, A., & Galicia, L. (2010). Aboveground and belowground biomass and carbon pools in highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry*, 83(5), 497–506. doi: 10.1093/forestry/cpq032
- Merilä, P., Mustajärvi, K., Helmisaari, H. S., Hilli, S., Lindroos, A. J., Nieminen, T. M., ... Ukonmaanaho, L. (2014). Above- and below-ground N stocks in coniferous boreal forests in Finland: Implications for sustainability of more intensive biomass utilization. *Forest Ecology and Management*, 311, 17–28. doi: 10.1016/j.foreco.2013.06.029
- Monárrez-González, J. C., Pérez-Verdín, G., López-González, C., Márquez-Linares, M. A., & González, E. M. del 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
- Mummey, D. L., Clarke, J. T., Cole, C. A., O'Connor, B. G., Gannon, J. E., & Ramsey, P. W. (2010). Spatial analysis reveals differences in soil microbial community interactions between adjacent coniferous forest and clearcut ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(7), 1138–1147. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.03.020
- Mushinski, R. M., Gentry, T. J., Dorosky, R. J., & Boutton, T. W. (2017). Forest harvest intensity and soil depth alter inorganic nitrogen pool sizes and ammonia oxidizer community composition. *Soil Biology and Biochemistry*, 112, 216–227. doi: 10.1016/j.soilbio.2017.05.015
- Návar-Cháidez, J., & González-Elizondo, M. (2009). Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. *Polibotánica*, 27, 71–87. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/polib/n27/n27a5.pdf>
- Nave, L. E., Vance, E. D., Swanston, C. W., & Curtis, P. S. (2009). Impacts of elevated N inputs on north temperate forest soil C storage, C/N, and net N-mineralization. *Geoderma*, 153(1–2), 231–240. doi: 10.1016/j.geoderma.2009.08.012
- Nave, L. E., Vance, E. D., Swanston, C. W., & Curtis, P. S. (2010). Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 259(5), 857–866. doi: 10.1016/j.foreco.2009.12.009
- Nilsen, P., & Strand, L. T. (2013). Carbon stores and fluxes in even- and uneven-aged Norway spruce stands. *Silva Fennica*, 47(4), 1–15. doi: 10.14214/sf.1024
- Noormets, A., Epron, D., Domec, J. C., McNulty, S. G., Fox, T., Sun, G., & King, J. S. (2014). Effects of forest management on productivity and carbon sequestration: A review and hypothesis. *Forest Ecology and Management*, 355, 124–140. doi: 10.1016/j.foreco.2015.05.019
- Nordén, J., Penttilä, R., Siitonen, J., Tomppo, E., & Ovaskainen,

- O. (2013). Specialist species of wood-inhabiting fungi struggle while generalists thrive in fragmented boreal forests. *Journal of Ecology*, 101(3), 701–712. doi: 10.1111/1365-2745.12085
- Powers, J. S., & Marín-Spiotta, E. (2017). Ecosystem processes and biogeochemical cycles in secondary tropical forest succession. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, 497–519. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-110316-022944
- Pulido-Moncada, M. A., Lobo-Luján, D., & Lozano-Pérez, Z. (2009). Asociación entre indicadores de estabilidad estructural y la materia orgánica en suelos agrícolas de Venezuela. *Agrociencia*, 43(3), 221–230. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v43n3/v43n3a1.pdf>
- Rasche, F., Knapp, D., Kaiser, C., Koranda, M., Kitzler, B., Zechmeister-Boltenstern, S., ... Sessitsch, A. (2011). Seasonality and resource availability control bacterial and archaeal communities in soils of a temperate beech forest. *ISME Journal*, 5(3), 389–402. doi: 10.1038/ismej.2010.138
- Reid, C., & Watmough, S. A. (2014). Evaluating the effects of liming and wood-ash treatment on forest ecosystems through systematic meta-analysis. *Canadian Journal of Forest Research*, 44(8), 867–885. doi: 10.1139/cjfr-2013-0488
- Ryan, M. G., Harmon, M. E., Birdsey, R. A., Giardina, C. P., Heath, L. S., Houghton, R. A., ... Skog, K. E. (2010). A synthesis of the science on forests and carbon for U.S. Forests. *Ecological Society of America: Issues In Ecology*, 13, 1–16. Retrieved from <https://nicholasinstitute.duke.edu/sites/default/files/publications/publication-science-forest-carbon-united-states-2010.pdf>
- Saarsalmi, A., Smolander, A., Kukkola, M., Moilanen, M., & Saramäki, J. (2012). 30-Year effects of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes and stand growth in a Scots pine stand. *Forest Ecology and Management*, 278, 63–70. doi: 10.1016/j.foreco.2012.05.006
- Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., ... Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478, 49–56. doi: 10.1038/nature10386
- Scott, D. A., Eaton, R. J., Foote, J. A., Vierra, B., Boutton, T. W., Blank, G. B., & Johnsen, K. (2014). Soil ecosystem services in loblolly pine plantations 15 years after harvest, compaction, and vegetation control. *Soil Science Society of America Journal*, 78(6), 2032–2040. doi: 10.2136/sssaj2014.02.0086
- Seidl, R., Rammer, W., & Spies, T. A. (2014). Disturbance legacies increase the resilience of forest ecosystem structure, composition, and functioning. *Ecological Applications*, 24(8), 2063–2077. doi: 10.1890/14-0255.1
- Shabaga, J. A., Basiliko, N., Caspersen, J. P., & Jones, T. A. (2015). Seasonal controls on patterns of soil respiration and temperature sensitivity in a northern mixed deciduous forest following partial-harvesting. *Forest Ecology and Management*, 348, 208–219. doi: 10.1016/j.foreco.2015.03.022
- Singh, B. K., Quince, C., Macdonald, C. A., Khachane, A., Thomas, N., Al-Soud, W. A., ... Campbell, C. D. (2014). Loss of microbial diversity in soils is coincident with reductions in some specialized functions. *Environmental Microbiology*, 16(8), 2408–2420. doi: 10.1111/1462-2920.12353
- Smith, J., Harvey, B. D., Koubaa, A., Brais, S., & Mazerolle, M. J. (2016). Sprucing up the mixedwoods: Growth response of white spruce (*Picea glauca*) to partial cutting in the eastern Canadian boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 46(10), 1205–1215. doi: 10.1139/cjfr-2015-0489
- Smolander, A., Saarsalmi, A., & Tamminen, P. (2015). Response of soil nutrient content, organic matter characteristics and growth of pine and spruce seedlings to logging residues. *Forest Ecology and Management*, 357, 117–125. doi: 10.1016/j.foreco.2015.07.019
- Smyth, C. E., Titus, B., Trofymow, J. A., Moore, T. R., Preston, C. M., Prescott, C. E., & the CIDET Working Group. (2016). Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in decomposing wood blocks in Canadian forests. *Plant and Soil*, 409(1–2), 459–477. doi: 10.1007/s11104-016-2972-4
- Sørensen, R., Meili, M., Lambertsson, L., von Brömssen, C., & Bishop, K. (2009). The effects of forest harvest operations on mercury and methylmercury in two boreal streams: relatively small changes in the first two years prior to site preparation. *Ambio*, 38(7), 364–372. doi: 10.1579/0044-7447-38.7.364
- Symonds, J., Morris, D. M., & Kwiaton, M. M. (2013). Effect of harvest intensity and soil moisture regime on the decomposition and release of nutrients from needle and twig litter in northwestern Ontario. *Boreal Environment Research*, 18(5), 401–413. doi: 10.1016/j.foreco.2015.04.034
- Tamminen, P., & Saarsalmi, A. (2013). Effects of whole-tree harvesting on growth of pine and spruce seedlings in southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 26(6), 559–565. doi: 10.1080/02827581.2013.786124
- Tamminen, P., Saarsalmi, A., Smolander, A., Kukkola, M., & Helmisaari, H. S. (2012). Effects of logging residue harvest in thinnings on amounts of soil carbon and nutrients in Scots pine and Norway spruce stands. *Forest Ecology and Management*, 263, 31–38. doi: 10.1016/j.foreco.2011.09.015
- Taylor, A. R., Wang, J. R., & Kurz, W. A. (2008). Effects of harvesting intensity on carbon stocks in eastern Canadian red spruce (*Picea rubens*) forests: An exploratory analysis using the CBM-CFS3 simulation model. *Forest Ecology and Management*, 255(10), 3632–3641. doi: 10.1016/j.foreco.2008.02.052
- 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
- Toivio, J., Helmisaari, H. S., Palviainen, M., Lindeman, H., Ala-Ilomäki, J., Sirén, M., & Uusitalo, J. (2017). Impacts of timber forwarding on physical properties of forest soils in southern Finland. *Forest Ecology and Management*, 405, 22–30. doi: 10.1016/j.foreco.2017.09.022
- Vanguelova, E., Pitman, R., Luro, J., & Helmisaari, H. S. (2010). Long term effects of whole tree harvesting on soil carbon and nutrient sustainability in the UK. *Biogeochemistry*, 101(1–3), 43–59. doi: 10.1007/s10533-010-9511-9
- Versini, A., Nouvellon, Y., Laclau, J. P., Kinana, A., Mareschal, L., Zeller, B., ... Epron, D. (2013). The manipulation of organic residues affects tree growth and heterotrophic CO₂ efflux in a tropical *Eucalyptus* plantation. *Forest Ecology and Management*, 301, 79–88. doi: 10.1016/j.foreco.2012.07.045
- Vesterdal, L., Clarke, N., Sigurdsson, B. D., & Gundersen, P. (2013). Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? *Forest Ecology and Management*, 309, 4–18. doi: 10.1016/j.foreco.2013.01.017
- Vicca, S., Luyssaert, S., Peñuelas, J., Campioli, M., Chapin, F. S., Ciais, P., ... Janssens, I. A. (2012). Fertile forests produce biomass more efficiently. *Ecology Letters*, 15(6), 520–526. doi: 10.1111/j.1461-0248.2012.01775.x
- Waldchen, J., Schulze, E. D., Schöning, I., Schrumpp, M., & Sierra, C. (2013). The influence of changes in forest management over the past 200 years on present soil organic carbon stocks. *Forest Ecology and Management*, 289, 243–254. doi: 10.1016/j.foreco.2012.10.014
- Wall, A., & Hytönen, J. (2011). The long-term effects of logging residue removal on forest floor nutrient capital, foliar chemistry and growth of a Norway spruce stand. *Biomass and Bioenergy*, 35(8), 3328–3334. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.08.063
- Wallace, J., Aquilue, N., Archambault, C., Carpentier, S., Francoeur, X., Greffard, M. H., ... Messier, C. (2015). Present forest management structures and policies in temperate forests of Mexico: Challenges and prospects for unique tree species assemblages. *Forestry Chronicle*, 91(3), 306–317. doi: 10.5558/tfc2015-052
- Walmsley, J. D., Jones, D. L., Reynolds, B., Price, M. H., & Healey, J. R. (2009). Whole tree harvesting can reduce second rotation forest productivity. *Forest Ecology and Management*, 257(3), 1104–1111. doi: 10.1016/j.foreco.2008.11.015
- Wardle, D. A., & Jonsson, M. (2014). Long-term resilience of above- and belowground ecosystem components among contrasting ecosystems. *Ecology*, 95(7), 1836–1849. doi: 10.1890/13-1666.1
- Wu, X., Wei, Y., Wang, J., Wang, D., She, L., Wang, J., & Cai, C. (2017). Effects of soil physicochemical properties on aggregate stability along a weathering gradient. *CATENA*, 156, 205–215. doi: 10.1016/j.catena.2017.04.017
- Yesilonis, I., Szlavecz, K., Pouyat, R., Whigham, D., & Xia, L. (2016). Historical land use and stand age effects on forest soil properties in the Mid-Atlantic US. *Forest Ecology and Management*, 370, 83–92. doi: 10.1016/j.foreco.2016.03.046
- Ziche, D., Grüneberg, E., Hilbrig, L., Höhle, J., Kompa, T., Liski, J., ... Wellbrock, N. (2019). Comparing soil inventory with modelling: Carbon balance in central European forest soils varies among forest types. *Science of the Total Environment*, 647, 1573–1585. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.327