

ESTRATEGIAS DE GESTIÓN FORESTAL Y CAMBIO CLIMÁTICO: UNA REVISIÓN

FOREST MANAGEMENT STRATEGIES AND CLIMATE CHANGE: A REVIEW

Julio Nemorio Martínez-Sánchez¹, Wibke Himmelsbach², María Inés Yáñez Díaz³, Marco González-Tagle⁴, §Homero Gárate-Escamilla⁵

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Campus Linares, Carretera Nacional # 85, km. 145, C.P. 67700, Linares, Nuevo León, México. §Autor de correspondencia: (hgaratesc@uanl.edu.mx).

RESUMEN

El cambio climático (CC) es un fenómeno global que tiene diversas repercusiones en la distribución, biodiversidad y productividad de los ecosistemas forestales. Los bosques son una parte fundamental del sistema climático y un componente clave en las estrategias de adaptación y mitigación. El objetivo de la revisión es conocer las diferentes estrategias de gestión forestal para la adaptación frente al CC. Los impactos del CC en los bosques han dado lugar al manejo forestal adaptativo (MFA) con el fin de integrar los cambios en la variabilidad climática actual y futura como uno de los componentes más importantes de la gestión forestal. El MFA puede dividirse en estrategias de resistencia, resiliencia y transición. El MFA debe seguir evolucionando a medida que los impactos del CC en los bosques aumentan en intensidad y frecuencia para hacer frente a los requisitos medioambientales, sociales y económicos de las generaciones futuras. El éxito de la aplicación de la gestión forestal en el contexto del CC, incluida la migración asistida, dependerá en gran medida de su aprobación a nivel científico, social, político y económico. A medida que el cambio climático se intensifique, se espera que este conjunto de estrategias acelere los cambios en la distribución y composición de los bosques necesarios para el desarrollo de individuos, especies y ecosistemas con mayor capacidad de adaptación.

Palabras clave: ecosistemas forestales, gestión forestal sostenible, gestión forestal adaptativa, migración asistida.

ABSTRACT

Climate change (CC) is a global phenomenon that has diverse impacts on the distribution, biodiversity, and productivity of forest ecosystems. Forests are a fundamental part of the climate system and a key component in adaptation and mitigation strategies. The objective of the review is to know the different forest management strategies for adaptation to CC. The impacts of CC on forests have given rise to adaptive forest management (AFM) in order to integrate changes in current and future climate variability as one of the most important components of forest management. AFM can be divided into resistance, resilience, and transition strategies. AFM should continue to evolve as CC impacts on forests increase in intensity and frequency to address the environmental, social, and economic requirements of future generations. The successful implementation of forest management in the context of CC, including assisted migration, will depend to a large extent on its scientific, social, political and economic approval. As climate change intensifies, this set of strategies is expected to accelerate the changes in forest distribution and composition necessary for the development of more resilient individuals, species and ecosystems.

Index words: forest ecosystems, sustainable forest management, adaptive forest management, assisted migration.

INTRODUCCIÓN

Los bosques cubren aproximadamente el 30 % del planeta tierra (Morin et al., 2018) y concentran el 80 % de la biodiversidad (FAO, 2020). Los bosques ejercen una labor clave tanto en la regulación del sistema climático (Shukla et al., 2022) como en el cuidado de la biodiversidad (Wolfslehner et al., 2019). Además, proporcionan una amplia variedad de bienes y servicios ecosistémicos (BSE), incluidos servicios de abastecimiento, regulación, apoyo y culturales (Phillips et al., 2020; Pohjanmies et al., 2017). Del total de la cubierta forestal, el 42 % corresponde a bosques tropicales, el 27 % a bosques boreales, el 16 % a bosques templados y el 11 % a bosques situados en regiones subtropicales (Nunes et al., 2022).

Los bosques son sensibles a los cambios en la temperatura y la precipitación, y pueden ser afectados por un gran número de disturbios bióticos y abióticos, incluyendo incendios forestales, sequías, ondas de calor, tormentas, heladas, nevadas, plagas y enfermedades (Seidl et al., 2017). Estas pueden provocar impactos negativos en factores como la dinámica, la biodiversidad, la distribución y la composición de los bosques (Hoffman et al., 2018), provocando una mayor vulnerabilidad en estos (Patacca et al., 2023). Un bosque se considera vulnerable si es susceptible de sufrir una reducción de su salud y productividad, así como en la fluctuación de la composición, estructura y diversidad de especies causados por alteraciones en el clima (Brandt et al., 2017).

En algunas regiones de bosques templados la temperatura ha aumentado más rápido que el promedio global (Testolin et al., 2022), favoreciendo incendios forestales, sequías, ondas de calor más intensas y un mayor estrés hídrico (Cholet et al., 2022). Los ecosistemas tropicales son particularmente vulnerables a cambios en el sistema climático debido a que concentran una mayor cantidad de población y biodiversidad (Artaxo et al., 2022). Los bosques subtropicales en

regiones montañosas son particularmente vulnerables debido a su poca resistencia a temperaturas extremas (Nunes et al., 2022; Albrich et al., 2020). A diferencia de los bosques tropicales y templados, los bosques boreales en su conjunto han permanecido relativamente estables en cuanto a cambios en su distribución en los últimos años (Pohjanmies et al., 2017; D'Orangeville et al., 2016). En el caso de las plagas forestales, un aumento en la temperatura promedio favorece un ciclo reproductivo más acelerado y una mejor adaptación a condiciones climáticas adversas (Pureswaran et al., 2018; Agne et al., 2018). En general, condiciones más calurosas y secas facilitan las sequías, incendios y las perturbaciones provocadas por insectos, mientras que condiciones más cálidas y húmedas aumentan las alteraciones provocadas por las fuertes corrientes de aire y otros agentes dañinos (Seidl et al., 2017). Por lo tanto, el objetivo de esta revisión de literatura es realizar un compendio de los resultados de diversas acciones de gestión forestal relacionadas con el CC, e identificar las principales acciones para la mitigación efectiva del CC que garanticen la provisión de BSE también para las generaciones futuras.

DESARROLLO

En las últimas décadas, el cambio climático (CC) causado por el aumento de la utilización de combustibles fósiles y la degradación de la cubierta forestal ha modificado los patrones de precipitación y temperatura, dando lugar a veranos más secos e inviernos más cálidos en algunas regiones (Shukla et al., 2022). Estos cambios han intensificado los impactos negativos del CC (Weiskopf et al., 2020) acelerando la pérdida de especies (Román-Palacios & Wiens, 2020). De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), el CC se refiere a variaciones significativas en el estado del clima que persisten durante varias décadas debido a causas naturales o actividades antropogénicas (Shukla et al., 2022; Colorado-Ruiz et al., 2018). El CC se ha clasificado según su nivel de peligro y destructividad en incremental, peligroso o

catastrófico (Castro-Pereira & Viola, 2018). El primero se produce cuando hay un aumento de la temperatura promedio mundial a un ritmo de 0.1 °C por década y está presente desde 1950. El segundo se asocia a un aumento superior a 1.5 – 2.0 °C y existe consenso en que podría ocurrir en las próximas dos décadas. Por último, el CC catastrófico se produce cuando se alcanzan varios puntos de inflexión en el clima con un aumento de más de 3.0 °C en la temperatura media global. El Sexto Informe de Evaluación del IPCC indica que la temperatura promedio global aumentará entre 1.2 y 2.0 °C para el año 2050. Varios escenarios también sugieren que aumentará hasta 2.0 – 4.0 °C a finales de este siglo (Shukla et al., 2022), favoreciendo un incremento en la intensidad y frecuencia de disturbios forestales (Kirchmeyer-Young et al., 2019; Seidl et al., 2017).

Debido a las interacciones entre el clima y los bosques, el CC ha sido uno de los retos más trascendentales para la gestión forestal en los últimos años (Hörl et al., 2020; Jandl et al., 2019; Yousefpour et al., 2017b). Por ejemplo, los impactos del CC pueden reducir significativamente la resiliencia, mitigación y capacidad de adaptación de los bosques (Hisano et al., 2018) y pueden amenazar la provisión de BSE (Hernández-Morcillo et al., 2022; Hof et al., 2017). Por otro lado, la demanda de BSE ha aumentado (Nocentini et al., 2022). Por lo tanto, es importante saber con qué rapidez y de qué manera responderán los bosques al CC. Por esta razón, científicos de diferentes campos, como ecólogos, biólogos, científicos forestales y científicos agrícolas, han centrado sus investigaciones en los efectos del CC en los bosques y otros ecosistemas durante las últimas treinta décadas (D'Amato et al., 2023; McGann et al., 2023; Artaxo et al., 2022; Weiskopf et al., 2020; FAO, 2020; Hisano et al., 2018).

La cuestión ahora es cómo aplicar mejor esta información a la gestión forestal para contrarrestar los efectos negativos del CC. Así, recientemente se han incorporado estrategias de gestión forestal que incorporan los bosques como un componente

crítico en la mitigación del CC (Ontl et al., 2020) y consideran los impactos del CC en la provisión de BSE (McGann et al., 2023; Albrich et al., 2020).

Definición y desarrollo de la gestión forestal

Aguirre-Calderón (2015) define la gestión forestal como las decisiones y actividades necesarias para utilizar los recursos forestales de forma ordenada para cumplir las necesidades de las generaciones actuales sin poner en riesgo a las generaciones posteriores. Además, la gestión forestal debe considerar la conservación de la biodiversidad, la productividad y la capacidad de regeneración de los bosques (Weiskopf et al., 2020). En sus primeras etapas, la gestión forestal se centraba en la ordenación de las zonas arboladas para la obtención de madera (Guerra-De-la-Cruz et al., 2021). A medida que las necesidades de la sociedad han cambiado y los BSE han aumentado, las estrategias de gestión forestal han evolucionado (Weiskopf et al., 2020). Si bien se ha reconocido que el sector forestal tiene un rol fundamental en el desarrollo de medidas de adaptación y mitigación al CC, éste ha obligado a darle un mayor papel a los bosques dentro de las políticas de gestión forestal ya existentes (St-Laurent et al., 2021). Para hacer frente a los impactos del CC se han desarrollado estrategias de manejo forestal orientadas a la mitigación y adaptación (Jandl et al., 2019; Iverson et al., 2019). La mitigación se refiere a los esfuerzos para disminuir los impactos negativos del CC, mientras que la adaptación se refiere a los ajustes de los ecosistemas en respuesta a los impactos potenciales de los cambios en el clima actual y futuro, y para aumentar la resiliencia y reducir la vulnerabilidad (Villamor et al., 2023; Mackey et al., 2020; Ontl et al., 2020).

Las estrategias de adaptación se proponen ayudar a los ecosistemas a hacer frente a los efectos del CC. Esto implica desarrollar técnicas para reducir la vulnerabilidad de las personas y el entorno natural a los impactos del CC, se centran en ajustarse a los cambios que ya se están produciendo (Yousefpour et al., 2017a). Mientras que las estrategias de mitigación, por su parte,

pretenden reducir las causas del *CC* disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero (*GEI*), ya sea disminuyendo la tasa de deforestación o el uso de tierras agrícolas, incremento en la capacidad de captura y almacenamiento de carbono, restauración y el manejo forestal sostenible (*MFS*) basado en prácticas silvícolas que reduzcan las emisiones (Mackey et al., 2020).

Manejo forestal sostenible

El *MFS* se encuentra dentro de los objetivos de desarrollo sostenible (*ODS*) de la Agenda 2030 (Shukla et al., 2022) y ha sido reconocido como uno de los instrumentos principales para mitigar los efectos del *CC* (Zhou et al., 2015). El *MFS* se define como “la administración de las tierras forestales de una manera y a una armonía que conserven su biodiversidad, vitalidad, capacidad de reproducción, productividad y su capacidad para desempeñar, actualmente y en el futuro, las funciones ecológicas, económicas y sociales relevantes, sin causar daños a otros ecosistemas” (Mackey et al., 2015). Aguirre-Calderón (2015) define al *MFS* como la aplicación de un amplio rango de principios científicos, económicos y sociales para el aprovechamiento y gestión de los recursos de forma ordenada, incluyendo aspectos de silvicultura, protección y regulación, con el objetivo de satisfacer las necesidades que la sociedad necesita actualmente sin comprometer su provisión para las futuras generaciones.

De acuerdo con el Proceso de Montreal, elaborado en 1987, entre los criterios e indicadores del *MFS* se encuentran los siguientes: conservación de la biodiversidad, mantenimiento de la capacidad productiva, mantenimiento de la salud y vitalidad, conservación y mantenimiento de los recursos del suelo y agua, mantenimiento de la contribución de los bosques al ciclo de carbono, mantenimiento y mejora de múltiples BSE a largo plazo y la creación de marcos legales, institucionales y económicos para la conservación y el *MFS* (Aguirre-Calderón, 2015).

Según Keenan (2015), la implementación del *MFS* depende de factores como entender el

sistema climático, evaluar las posibles respuestas de los ecosistemas y las sociedades, así como de compartir conocimientos entre la comunidad científica y quienes toman las decisiones con el fin de realizar análisis de diferentes opciones de manejo. Dentro de los beneficios del *MFS* se encuentran una producción continua de la madera y de mejor calidad, mejoras en las reservas de carbono en los árboles y prevención del impacto de los disturbios forestales (Shukla et al., 2022). En concreto, el *MFS* es crucial para incrementar la magnitud de mitigación de los bosques al *CC*, reduciendo el riesgo de daños ecosistémicos y medioambientales (Verkerk et al., 2020).

Manejo forestal adaptativo

Las estrategias de adaptación se enfocan en reconocer y reducir los posibles impactos del *CC* en los bosques (Keenan, 2015). Dentro de las estrategias de adaptación se encuentra el manejo forestal adaptativo o *MFA* (Spathelf et al., 2018). El *MFA* se enfoca en fortalecer la capacidad de adaptación de los bosques frente a los posibles impactos del *CC* y es imprescindible para el suministro de múltiples BSE (Fouqueray et al., 2020).

El *MFA* se basa en el supuesto de que un bosque más resistente contendrá varias especies más especializadas por lo que probablemente habrá especies con una mayor capacidad de adaptación en cualquier escenario de *CC* (Hof et al., 2017). El *MFA* surge como una estrategia orientada a hacer frente a diversos retos que presenta el *CC* en los bosques, principalmente aquellos asociados a la incertidumbre en sus posibles impactos y la velocidad a la que ocurren (Lindner et al., 2014).

Se han propuesto varios marcos diferentes para el perfeccionamiento y la ejecución de estrategias de *MFA*. Según D'Aprile y Gentilucci (2022), un marco para la *MFA* debe tener en cuenta la capacidad de las distintas instituciones para poner en práctica acciones de planificación y gestión.

También debe incluir la financiación para el uso de recursos científicos y técnicos, la revisión de los posibles efectos del CC sobre los recursos forestales y el seguimiento de los resultados y avances obtenidos. Yousefpour et al. (2017a) propusieron un marco basado en: a) la consideración del conocimiento experto del sector forestal, b) la generación de diferentes opciones de gestión forestal, y c) el elegir las mejores opciones de MFA. Halofsky et al. (2018) sugieren un marco similar en el que los componentes clave son: a) incluir a los responsables de la toma de decisiones, b) comunicar y reforzar los objetivos, c) desarrollar objetivos realistas, d) cooperación interinstitucional, y e) centrarse en la administración sustentable de los recursos

forestales. Las estrategias de adaptación al CC requieren la identificación de los impactos en cada zona, la evaluación de la fragilidad de los bosques a los posibles impactos, el desarrollo de estrategias de adaptación y su incorporación a la gestión forestal (Brandt et al., 2017). En cualquier caso, es fundamental definir los objetivos a alcanzar e identificar las mejores estrategias de gestión para conseguirlos (Temperli et al., 2012). Sin embargo, hay que considerar que no siempre es posible proyectar los efectos de dichas estrategias, especialmente a medio y largo plazo, ya que la dinámica forestal depende también de otros factores como los cambios en la utilización del suelo (Reyer et al., 2015).

Tabla I. Estrategias de gestión forestal adaptativa.

Tipo	Definición	Objetivos	Útilice	Uso de MA
Resistencia	Acciones que mejoran las defensas de los bosques frente a los cambios previstos o que protegen directamente a los bosques de las perturbaciones para mantener unas condiciones relativamente inalteradas.	Mantener sin cambios la estructura y las funciones de los bosques Proteger los refugios Reducir los factores de estrés ambiental	A corto plazo Regiones poco sensibles al CC	Sin migración asistida (MA)
Resiliencia	Acciones que permiten un ligero cambio, pero fomentan el retorno a las condiciones anteriores tras la perturbación.	Mejorar las especies estructurales y la diversidad genética Restauración de alteraciones naturales	A corto plazo Regiones con gran capacidad de adaptación	Puede incorporar la expansión asistida de la población
Transición (Respuesta)	Acciones que se adaptan intencionadamente al cambio y permiten a los ecosistemas responder de forma adaptativa a las condiciones cambiantes.	Facilitar nuevas funciones y composiciones de los ecosistemas Facilitar activamente el cambio para fomentar respuestas adaptativas	A largo plazo Regiones de alta vulnerabilidad	Incorpora la expansión de la población asistida

La **Tabla 1** muestra las diferentes estrategias de MFA (Halofsky et al., 2018; Nagel et al., 2017; Millar et al., 2007). La resistencia puede definirse como las acciones conjuntas que mejoran las defensas de los bosques frente a los cambios ambientales para mantener unas condiciones relativamente inalteradas. Las acciones de resiliencia son aquellas orientadas a acomodar ligeras fluctuaciones, pero fomentando el regreso a las condiciones previas tras la perturbación. Por último, la transición se define en términos de acciones que intencionadamente se acomodan a los cambios y permiten a los ecosistemas responder a las condiciones ambientales cambiantes. Las primeras están orientadas a aumentar la resiliencia de los bosques a corto plazo reduciendo el impacto de las perturbaciones climáticas y a mantener relativamente inalteradas las características de los bosques (Millar et al., 2007). Las estrategias de resiliencia pretenden desarrollar una elevada capacidad de adaptación de los bosques ante fenómenos climáticos o meteorológicos adversos. Por último, las estrategias de transición pretenden facilitar el cambio de las condiciones forestales teniendo en cuenta que los bosques no permanecen dentro del rango histórico, por lo general, son útiles en regiones con alta vulnerabilidad (McGann et al., 2023; Hörl et al., 2020). Mientras que las dos primeras buscan soluciones a corto y medio plazo, la transición ofrece una alternativa de adaptación a largo plazo para las especies con mayor riesgo de extinción (Hörl et al., 2020). Minkova y Arnold (2020) indican que las principales dificultades en la aplicación de estrategias de MFA son: la resistencia a reconocer la incertidumbre, la falta de implicación institucional en la toma de decisiones, el excesivo énfasis en la organización, la falta de precisión en cuanto al nivel de certidumbre para la acción y la insuficiente participación de las partes interesada.

Migración asistida

Las poblaciones e individuos forestales responden al CC de tres formas: 1) migran a áreas de distribución con condiciones ambientales más adecuadas, 2) se adaptan a nuevos patrones climáticos dentro de su distribución actual, y 3) se

extinguen a nivel local o de especie (Klisz et al., 2023). La migración es un proceso natural que se produce gradualmente a lo largo de varias generaciones (Klisz et al., 2023). En cambio, el CC es un fenómeno rápido, por lo que las poblaciones forestales deben adaptarse más rápidamente a sus posibles impactos.

Una de las estrategias de adaptación es la migración asistida (*MA*), que surge como respuesta a los cambios en la relación bosque-clima debidos al CC (Gustafson et al., 2023). La *MA* facilita la colonización de especies forestales en nuevos hábitats con un clima más adecuado (Klisz et al., 2023). Estas estrategias implican cambios en la composición y en la diversidad estructural de los bosques. Esto puede hacerse mediante la reforestación de especies más adaptadas a los cambios climáticos para aumentar la salud de los individuos y las poblaciones (D'Amato et al., 2023; Palik et al., 2022; Sáenz-Romero et al., 2020). La *MA* puede clasificarse en tres categorías: a) migración dentro de los límites geográficos actuales, b) migración a zonas externas de la ocurrencia actual de la especie, y c) migración fuera del área de distribución actual a regiones donde no se espera que la migración se produzca de forma natural (Klisz et al., 2023; Sáenz-Romero et al., 2020).

Algunas ventajas significativas de la *MA* incluyen el aumento de la diversidad de especies, poblaciones mejor adaptadas, distribución de riesgos y mayor disponibilidad de servicios ecosistémicos (Gustafson et al., 2023; Hof et al., 2017). Por otro lado, las estrategias de *MA* pueden verse limitadas por la disponibilidad de regiones adecuadas (Blanco-Cano et al., 2022). Las plantas de mayor altitud desaparecerían, mientras que las de menor altitud migrarían hacia altitudes más altas. Por otro lado, también puede aumentar el riesgo de que nuevas especies y poblaciones introduzcan nuevos patógenos, aumente la competitividad o se desplacen algunas especies (Kracke et al., 2021). Además, algunas prácticas de *MA* pueden limitar la prestación de servicios ecosistémicos (Winkler et al., 2021).

Manejo forestal en México

En el país se pueden identificar tres periodos con distintos enfoques de manejo forestal (Guerra-De-la-Cruz, et al., 2021). El primero caracterizado por una política forestal que promovía el aprovechamiento de los recursos maderables. El segundo periodo (2001-2010) inicia con el establecimiento de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en el año 2001 donde se impulsó a la investigación. En el tercer periodo (2010-2020), la predisposición hacia un *MFS* se acentuó por la aceptación del rol de los bosques en la mitigación del CC (Guerra-De-la-Cruz et al., 2021).

Casos de estudio

Se han realizado varios estudios de MA con especies del género *Pinus* en México, incluyendo poblaciones de *P. devoniana*, *P. leiophylla* y *P. pseudostrobus* en el ecosistema de pino-encino de la región occidental de México (Castellanos-Acuña et al., 2015). En estos estudios se demostró que algunas especies de pino se adaptan mejor a los cambios en las condiciones ambientales. En el caso de las poblaciones de *P. devoniana*, éstas disminuyeron su crecimiento cuando fueron desplazadas más de 650 m a mayores altitudes. Mientras que las poblaciones de *P. leiophylla* revelaron una tasa de crecimiento similar cuando fueron desplazadas a distintas altitudes. Otras poblaciones de especies de bosques nublados tropicales y subtropicales como *Quercus insignis* han mostrado una alta tolerancia a una gran diversidad de condiciones climáticas (Toledo-Aceves et al., 2023) a pesar de ser una especie de distribución limitada. Las poblaciones del género *Abies*, incluida *A. religiosa*, pueden adaptarse con relativa rapidez a condiciones climáticas más frías (Carbajal-Navarro et al., 2019).

En los bosques boreales, se ha demostrado que es posible que algunas poblaciones migren a regiones de mayor latitud donde la temperatura media se acerca a los 4 °C (Ding y Brouard, 2022). Estos estudios concluyen que las estrategias de MA son factibles siempre que se tengan en cuenta diferentes umbrales de tolerancia en las condiciones ambientales para las distintas especies.

El crecimiento de la población mundial, así como el aumento y diversificación de las actividades industriales han incrementado la demanda de los servicios ecosistémicos a nivel global (Shukla et al., 2022). La industrialización del sector agrícola ha favorecido el aumento de la pérdida de vegetación y de la degradación de los suelos con vocación forestal, así como la reducción de la cubierta forestal y la disponibilidad de servicios ecosistémicos (Vadell et al., 2022). Además, la aceleración del CC ha modificado los esquemas de precipitación y temperatura con cambios en la intensidad y frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos (Seidl et al., 2017). En el caso de los incendios forestales, se han duplicado en todo el mundo desde la década de 1980 (Mansoor et al., 2022). En varias regiones, los episodios de sequía y las olas de calor son más severos, ya que los fenómenos de El Niño y La Niña son más extensos y frecuentes (Pacheco et al., 2022).

El CC ha provocado un cambio de paradigma en las estrategias mundiales de gestión forestal. En un principio, la gestión forestal estaba orientada al aprovechamiento de los recursos madereros. Hoy, se basa en el desarrollo de habilidades de gestión sostenible que contemplen acciones de adaptación y mitigación ante los posibles impactos del CC (Shukla et al., 2022; Palik et al., 2022; Hof et al., 2017).

Por otro lado, los avances en el desarrollo de modelos y proyecciones del CC han permitido diseñar estrategias de gestión forestal basadas en diversos escenarios (Iverson et al., 2019). La mayor disponibilidad de información climática actual y futura es crucial para el diseño de estrategias de gestión forestal (Yousefpour et al., 2017a; Prasad et al., 2020). Estos escenarios permiten analizar los impactos potenciales del CC en los bosques. El éxito de las estrategias de adaptación y mitigación están en manos de su capacidad para integrar dicha información para una amplia variedad de especies y poblaciones en un marco con objetivos concretos (D'Aprile y Gentilucci, 2022).

La migración y la adaptación de los bosques son procesos generacionales que se producen de forma natural y gradual (McGann et al., 2023). Por el contrario, el CC es un fenómeno que se ha acelerado en los últimos años y se espera que sus impactos sobre la dinámica de los ecosistemas forestales aumenten en las próximas décadas. Por tanto, es necesario integrar medidas de adaptación en las estrategias de gestión forestal existentes. La MA surge como una opción que ayuda a los bosques a adaptarse más rápidamente a las condiciones climáticas adversas a corto, medio y largo plazo (Sáenz-Romero et al., 2020; Iverson et al., 2019).

En algunos casos, la MA se considera la última opción para rescatar especies amenazadas o en peligro o poblaciones marginales debido a sus costes y a los riesgos potenciales asociados al aumento de la competitividad entre especies, al incremento del número de especies invasoras y al desplazamiento de especies autóctonas (Messier et al., 2019). Sáenz-Romero et al. (2021) mencionan que, aunque la proporción de especies invasoras sea baja, los impactos negativos sobre la dinámica forestal pueden ser considerables. Sin embargo, varios estudios han demostrado que la MA es eficaz, especialmente en zonas con fuertes gradientes climáticos y altitudinales (Backus et al., 2022). Algunos casos de MA de especies de bosques templados en México y Canadá han tenido éxito (Casmey et al., 2022; Sáenz-Romero et al., 2020; Gómez-Pineda et al., 2019), donde la MA ha logrado compensar un calentamiento de hasta 2 °C. Sin estas acciones, algunas especies de coníferas podrían disminuir más del 70 % de su hábitat natural (Gómez-Pineda et al., 2019).

Es importante reconocer que la MA sigue presentando retos en su aplicación. A diferencia de las estrategias de resistencia y resiliencia, las comunidades forestales perciben la MA y otras acciones de translocación como menos familiares y con un mayor riesgo económico (McGann et al., 2023). Aunque algunas estrategias de MFA proporcionan beneficios a corto y medio plazo, se recomienda incluir estrategias que proporcionen

un mayor número de beneficios a largo plazo. Tales estrategias tendrán incremento en la dinámica forestal y en la capacidad de los bosques para mitigar el CC y adaptarse a él.

COMENTARIOS FINALES

En los últimos años, la aceleración del CC ha aparecido como uno de los retos más relevantes en el desarrollo de estrategias de gestión forestal. En la mayoría de los ecosistemas forestales, la conjunción del aumento de la temperatura y la reducción de la precipitación han dado lugar a sequías más intensas y de mayor duración, incendios forestales más severos y cambios en la distribución y frecuencia de plagas forestales.

Por lo tanto, se han desarrollado estrategias de gestión forestal para mitigar las consecuencias del CC en los ecosistemas forestales y reforzar su capacidad de adaptación a fenómenos extremos de precipitación y temperatura. Los bosques son un componente clave en la regulación del clima a nivel mundial, por lo que es crucial desarrollar, promover y aplicar las estrategias de gestión más eficaces a escala local, nacional y regional. Esto requiere el desarrollo de marcos flexibles que impliquen activamente a las comunidades locales, la comunidad científica, el sector privado y las instituciones intergubernamentales. El éxito de la ejecución de la gestión forestal en el contexto del CC, incluida la migración asistida, dependerá en gran medida de su aprobación a nivel científico, social, político y económico. A medida que el CC se intensifique, se espera que este conjunto de estrategias acelere los cambios en la distribución y composición de los bosques, promoviendo el desarrollo de individuos, especies y ecosistemas con una mayor capacidad de adaptación.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo a la beca de manutención del primer autor.

REFERENCIAS

- Agne, M. C., Beedlow, P. A., Shaw, D. C., Woodruff, D. R., Lee, E.H., Cline, S. P., & Comeleo, R. (2018). Interactions of predominant insects and diseases with climate change in Douglas-fir forests of western Oregon and Washington, U.S.A. *Forest Ecology and Management*, 409, 317-332. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.004>
- Aguirre-Calderón, O. A. (2015). Manejo forestal en el siglo XXI. *Madera y Bosques*, 21, 17-28. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210423>
- Albrich, K., Rammer, W., & Seidl, R. (2020). Climate change causes critical transitions and irreversible alterations of mountain forests. *Global Change Biology*, 26, 4013-4027. <https://doi.org/10.1111/gcb.15118>
- Artaxo, P., Hansson, H. C., Machado, L. A. T., & Rizzo, L. V. (2022). Tropical forests are crucial in regulating the climate on Earth. *PLoS Climate*, 1(8), e0000054. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000054>
- Backus, G. A., Huang, Y., & Baskett, M. L. (2022). Comparing management strategies for conserving communities of climate-threatened species with a stochastic metacommunity model. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 377(1857), 20210380. <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0380>
- Blanco-Cano, L., Navarro-Cerrillo, R. M., & González-Moreno, P. (2022). Biotic and abiotic effects determining the resilience of conifer mountain forests: The case study of the endangered Spanish fir. *Forest Ecology and Management*, 520, 120356. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120356>
- Brandt, L. A., Butler, P. R., Handler, S. D., Janowiak, M. K., Shannon, P. D., & Swanston, C. W. (2017). Integrating Science and Management to Assess Forest Ecosystem Vulnerability to Climate Chang. *Journal of Forestry*, 115, 212-221. <https://doi.org/10.5849/jof.15-147>
- Carbajal-Navarro, A., Navarro-Miranda, E., Blanco, A., Cruzado-Vargas, A., Gómez-Pineda, E., Zamora-Sánchez, C., Pineda-García, F., O'Neill, G., Gómez-Romero, M., Cisneros, R., Johnsen, K., Lobit, P., López-Toledo, L., Herrerías-Diego, Y., & Sáenz-Romero, C. (2019). Ecological Restoration of Abies religiosa Forests Using Nurse Plants and Assisted Migration in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 421. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00421>
- Casmey, M., Hamann, A., & Hacke, U. G. (2022). Adaptation of white spruce to climatic risk environments in spring: Implications for assisted migration. *Forest Ecology and Management*, 521, 120555. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120555>
- Castellanos-Acuña, D., Cisneros, R., & Sáenz-Romero, C. (2015). Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere*, 6, 1-16. <https://doi.org/10.1890/ES14-00375.1>
- Castro-Pereira, J., & Viola, E. (2018). Catastrophic Climate Change and Forest Tipping Points: Blind Spots in International Politics and Policy. *Global Policy*, 9, 513-524. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.12578>
- Cholet, C., Houle, D., Sylvain, J. D., Doyon, F., & Maheu, A. (2022). Climate Change Increases the Severity and Duration of Soil Water Stress in the Temperate Forest of Eastern North America. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 879382. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.879382>
- Colorado-Ruiz, G., Cavazos, T., Salinas, J. A., De Grau, P., & Ayala, R. (2018). Climate change projections from Coupled Model Intercomparison Project phase 5 multi-model weighted ensembles for Mexico, the North American monsoon, and the mid-summer drought region. *International Journal of Climatology*, 38(15), 5699-5716. <https://doi.org/10.1002/joc.5773>

- D'Amato, A. W., Palik, B. J., Raymond, P., Puettmann, K. J., & Girona, M. M. (2023). Building a Framework for Adaptive Silviculture Under Global Change. In *Boreal Forests in the Face of Climate Change: Sustainable Management* (pp. 359-381). Cham: Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_13
- D'Aprile, F., & Gentilucci, M. (2022). Adaptive Forest Management under Climate Change: Some Adaption Criteria for Practical Purposes. Preprints.org, 2022070392.
<https://doi.org/10.20944/preprints202207.0392.v2>
- D'Orangeville, L., Houle, D., Duchesne, L., & Côté, B. (2016). Can the Canadian drought code predict low soil moisture anomalies in the mineral soil? An analysis of 15 years of soil moisture data from three forest ecosystems in Eastern Canada. *Ecohydrology*, 9(2), 238-247.
<https://doi.org/10.1002/eco.1627>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas*. Roma.
<https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- Ding, C., & Brouard, J. S. (2022). Assisted migration is plausible for a boreal tree species under climate change: A quantitative and population genetics study of trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.) in western Canada. *Ecology and Evolution*, 12(10), e9384.
<https://doi.org/10.1002/ece3.9384>
- Fouqueray, T., Charpentier, A., Trommetter, M., & Frascaria-Lacoste, N. (2020). The calm before the storm: How climate change drives forestry evolutions. *Forest Ecology and Management*, 460, 117880.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117880>
- Gómez-Pineda, E., Sáenz-Romero, C., Ortega-Rodríguez, J., Blanco, A., Madrigal-Sánchez, X., Cisneros, R., López-Toledo, L., Pedraza-Santos, M., & Rehfeldt, G. E. (2019). Suitable climatic habitat changes for Mexican conifers along altitudinal gradients under climatic change scenarios. *Ecological Applications*, 30(2), e02041.
<https://doi.org/10.1002/eap.2041>
- Guerra-De-la-Cruz, V., Buendía-Rodríguez, E., Cerano-Paredes, J., Islas-Gutiérrez, F., Monárrez-González, J. C., Flores-Ayala, E., Pineda-Ojeda, T., & Acosta-Mireles, M. (2021). Investigaciones del INIFAP en manejo forestal y servicios ambientales de bosques templados mexicanos: evolución, logros y perspectivas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12, 4-30.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-I.1020>
- Gustafson, E. J., Kern, C. C., & Kabrick, J. M. (2023). Can assisted tree migration today sustain forest ecosystem goods and services for the future?. *Forest Ecology and Management*, 529, 120723.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120723>
- Hörl, J., Keller, K., & Yousefpour, R. (2020). Reviewing the performance of adaptive forest management strategies with robustness analysis. *Forest Policy and Economics*, 119, 102289.
<https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102289>
- Halofsky, J., Edwards, J., Schmitt, K., Andrews-Key, S., Williamson, T., Johnston, M., Swanston, C., Peterson, D., & Nelson, H. (2018). Adapting forest management to climate change: The state of science and applications in Canada and the United States. *Forest Ecology and Management*, 421, 84-97.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.037>
- Hernández-Morcillo, M., Torralba, M., Baiges, T., Bernasconi, A., Bottaro, G., Brogaard, S., Bussola, F., Díaz-Varela, E., Geneletti, D., Grossmann, C. M., Kister, J., Klingler, M., Loft, L., Lovric, M., Mann, C., Pipart, N., Roces-Díaz, J. V., Sorge, S., Tiebel, M., Tyräinen, L., Varela, E., Winkel, G. & Plieninger, T. (2022). Scanning the solutions for the sustainable supply of forest ecosystem services in Europe. *Sustainability Science*, 17(5), 2013-2029.

- <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01111-4>
- Hisano, M., Searle, E. B., & Chen, H. Y. (2018). Biodiversity as a solution to mitigate climate change impacts on the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*, 93(1), 439-456. <https://doi.org/10.1111/brv.12351>
- Hof, A. R., Dymond, C.C., & Mladenoff, D. J. (2017). Climate change mitigation through adaptation: the effectiveness of forest diversification by novel tree planting regimes. *Ecosphere*, 8(11), e01981. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1981>
- Hoffmann, A., Rymer, P., Byrne, M., Ruthrof, K., Whinam, J., McGeoch, M., Bergstrom, D., Guerin, G., Sparrow, B., Joseph, L., Hill, S., Andrew, N., Camac, J., Bell, N., Riegler, M., Gardner, J., & Williams, S. (2018). Impacts of recent climate change on terrestrial flora and fauna: Some emerging Australian examples. *Austral Ecology*, 44(1), 3-27. <https://doi.org/10.1111/aec.12674>
- Iverson, L. R., Prasad, A. M., Peters, M. P., & Matthews, S. N. (2019). Facilitating adaptive forest management under climate change: A spatially specific synthesis of 125 species for habitat changes and assisted migration over the eastern United States. *Forests*, 10(11), 989. <https://doi.org/10.3390/f10110989>
- Jandl, R., Spathelf, P., Bolte, A., & Prescott, C. E. (2019). Forest adaptation to climate change— is non-management an option?. *Annals of Forest Science*, 76(2), 1-1. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0827-x>
- Keenan, R. J. (2015). Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. *Annals of Forest Science*, 72, 145-167. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0446-5>
- Kirchmeyer-Young, M. C., Gillett, N. P., Zwiers, F. W., Cannon, A. J., & Anslow, F. S. (2019). Attribution of the influence of human-induced climate change on an extreme fire season. *Earth's Future*, 7(1), 2-10. <https://doi.org/10.1029/2018EF001050>
- Klisz, M., Chakraborty, D., Cyjetkovic, B., Grabner, M., Lintunen, A., Mayer, K., George, J., & Rossi, S. (2023). Functional Traits of Boreal Species and Adaptation to Local Conditions. In *Boreal Forests in the Face of Climate Change: Sustainable Management* (pp. 323-355). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_12
- Kracke, I., Essl, F., Zulka, K. P., & Schindler, S. (2021). Risks and opportunities of assisted colonization: the perspectives of experts. *Nature Conservation*, 45, 63-84. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.45.72554>
- Lindner, M., Fitzgerald, J. B., Zimmermann, N., Reyer, C., Delzon, S., van der Maaten, E., Schelhaas, M. J., Lasch, P., Eggers, J., van der Maaten-Theunissen, M., Suckow, F., Psomas, A., Poulter, B., & Hanewinkel, M. (2014). Climate change and European forests: what do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management?. *Journal of Environmental Management*, 146, 69-83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.030>
- Mackey, B., Della Sala, D. A., Kormos, C., Lindenmayer, D., Kumpel, N., Zimmerman, B., Hugh, S., Young, V., Foley, S., Arsenis, K., & Watson, J. E. M. (2015). Policy options for the world's primary forests in multilateral environmental agreements. *Conservation Letters*, 8(2), 139-147. <https://doi.org/10.1111/conl.12120>
- Mackey, B., Kormos, C., Keith, H., Moomaw, W., Houghton, R., Mittermeier, R., Hole, D., & Hugh, S. (2020). Understanding the importance of primary tropical forest protection as a mitigation strategy. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25(5), 763-787. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09891-4>
- Mansoor, S., Farooq, I., Kachroo, M. M., Mahmoud, A. E. D., Fawzy, M., Popescu, S. M., Alyemeni, M. N., Sonne, C., Rinklebe, J.,

- & Ahmad, P. (2022). Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change. *Journal of Environmental Management*, 301, 113769.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113769>
- McGann, T. C., Schattman, R. E., D'Amato, A. W., & Ontl, T. A. (2023). Climate Adaptive Management in the Northeastern United States: Common Strategies and Motivations of Rural and Urban Foresters. *Journal of Forestry*, 121(2), 182-192.
<https://doi.org/10.1093/jofore/fvac039>
- Messier, C., Bauhus, J., Doyon, F., Maure, F., Sousa-Silva, R., Nolet, P., Mina, M., Aquilué, N., Fortin, M. J., & Puettman, K. (2019). The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes. *Forest Ecosystems*, 6(1), 1-16.
<https://doi.org/10.1186/s40663-019-0166-2>
- Millar, C. I., Stephenson, N. L., & Stephens, S. L. (2007). Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecological Applications*, 17(8), 2145-2151.
<https://doi.org/10.1890/06-1715.1>
- Minkova, T. V., & Arnold, J. S. (2020). A structured framework for adaptive management: bridging theory and practice in the Olympic Experimental State Forest. *Forest Science*, 66(4), 478-489.
<https://doi.org/10.1093/forsci/fxz011>
- Morin, X., Fahse, L., Jactel, H., Scherer-Lorenzen, M., García-Valdés, R., & Bugman, H. (2018). Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. *Scientific Reports*, 8(1), 5627.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-23763-y>
- Nagel, L. M., Palik, B. J., Battaglia, M. A., D'Amato, A. W., Guldin, J. M., Swanston, C. W., Janowiak M. K., Powers M. P., Joyce L. A., Millar C. I., Peterson D. L., Ganio L. M., Kirschbaum C., & Roske, M. R. (2017). Adaptive silviculture for climate change: a national experiment in manager-scientist partnerships to apply an adaptation framework. *Journal of Forestry*, 115(3), 167-178.
<https://doi.org/10.5849/jof.16-039>
- Nocentini, S., Travaglini, D., & Muys, B. (2022). Managing Mediterranean forests for multiple ecosystem services: research progress and knowledge gaps. *Current Forestry Reports*, 8(2), 229-256.
<https://doi.org/10.1007/s40725-022-00167-w>
- Nunes, L. J. R., Meireles, C. I. R., Gomes, C. J. P., & Ribeiro, N. M. C. A. (2022). The impact of climate change on forest development: a sustainable approach to management models applied to Mediterranean-type climate regions. *Plants*, 11(1), 69.
<https://doi.org/10.3390/plants11010069>
- Ontl, T. A., Janowiak, M. K., Swanston, C. W., Daley, J., Handler, S., Cornett, M., Hagenbuch, S., Handrick, C., McCarthy, L., & Patch, N. (2020). Forest management for carbon sequestration and climate adaptation. *Journal of Forestry*, 118(1), 86-101.
<https://doi.org/10.1093/jofore/fvz062>
- Pacheco, J., Solera, A., Avilés, A., & Tonón, M. D. (2022). Influence of ENSO on droughts and vegetation in a high mountain equatorial climate basin. *Atmosphere*, 13(12), 2123.
<https://doi.org/10.3390/atmos13122123>
- Palik, B., Clark, P., D'Amato, A., Swanston, C., & Nagel, L. (2022). Operationalizing forest-assisted migration in the context of climate change adaptation: Examples from the eastern USA. *Ecosphere*, 13(10), e4260.
<https://doi.org/10.1002/ecs2.4260>
- Patacca, M., Lindner, M., Lucas-Borja, M. E., Cordonnier, T., Fidej, G., Gardiner, B., Hauf, Y., Jasinevičius, G., Labonne, S., Linkevičius, E., Mahnken, M., Milanovic, S., Nabuurs, G. J., Nagel, T. A., Nikinmaa, L., Panyatov, M., Bercak, R., Seidl, R., Ostrogovič Sever, M. Z., Socha, J., Thom, D., Vuletic, D., Zudin, S., & Schelhaas, M. J. (2023). Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Global Change Biology*, 29(5), 1359-1376.
<https://doi.org/10.1111/gcb.16531>

- St-Laurent P., Locatelli, B., Hoberg, G., Gukova V. & Hagerman, S. (2021). Models for integrating climate objectives in forest policy: Towards adaptation-first?. *Land Use Policy*, 104, 105357. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105357>
- Phillips, R. P., Brandt, L., Polly, P. D., Zollner, P., Saunders, M. R., Clay, K., Iverson, L., & Fe, S. (2020). An integrated assessment of the potential impacts of climate change on Indiana forests. *Climatic Change*, 163, 1917-1931. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2326-8>
- Pohjanmies, T., Triviño, M., Le Tortorec, E., Mazziotto, A., Snäll, T., & Mönkkönen, M. (2017). Impacts of forestry on boreal forests: An ecosystem services perspective. *Ambio*, 46, 743-755. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0919-5>
- Prasad, A., Pedlar, J., Peters, M., McKenney, D., Iverson, L., Matthews, S., & Adams, B. (2020). Combining US and Canadian forest inventories to assess habitat suitability and migration potential of 25 tree species under climate change. *Diversity and Distributions*, 26(9), 1142-1159. <https://doi.org/10.1111/ddi.13078>
- Pureswaran, D. S., Roques, A., & Battisti, A. (2018). Forest insects and climate change. *Current Forestry Reports*, 4, 35-50. <https://doi.org/10.1007/s40725-018-0075-6>
- Reyer, C. P. O., Bugmann, H., Nabuurs, G. J., & Hanewinkel, M. (2015). Models for adaptive forest management. *Regional Environmental Change*, 15, 1483-1487. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0861-7>
- Román-Palacios, C., & Wiens, J. J. (2020). Recent responses to climate change reveal the drivers of species extinction and survival. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(8), 4211-4217. <https://doi.org/10.1073/pnas.1913007117>
- Sáenz-Romero, C., Mendoza-Maya, E., Gómez-Pineda, E., Blanco, A., Agramont, A., Cisneros, R., Upton, J., Trejo-Ramírez, O., Wehenkel, C., Cibrián-Tovar, D., Plascencia-González, A., Flores López, C., & Vargas-Hernández, J. (2020). Recent evidence of Mexican temperate forest decline and the need for ex situ conservation, assisted migration, and translocation of species ensembles as adaptive management to face projected climatic change impacts in a megadiverse country. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(9), 843-854. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0329>
- Sáenz-Romero, C., O'Neill, G., Aitken, S. N., & Lindig-Cisneros, R. (2021). Pruebas de campo de migración asistida en Canadá y México: Lecciones, limitaciones y retos. *Bosques*, 12(1):9. <https://doi.org/10.3390/f12010009>
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martín-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T., & Reyer, C. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7(6), 395-402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
- Shukla, P. R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., Van Diemen, R., McCollum, D., & Malley, J. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. *Contribution of working group III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 10, 9781009157926. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
- Spathelf, P., Stanturf, J., Kleine, M., Jandl, R., Chiantante, D., & Bolte, A. (2018). Adaptive measures: integrating adaptive forest management and forest landscape restoration. *Annals of Forest Science*, 75, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0736-4>
- Temperli, C., Bugmann, H., & Elkin, C. (2012). Adaptive management for competing forest goods and services under climate change. *Ecological Applications*, 22(8), 2065-2077. <https://doi.org/10.1890/12-0210.1>

- Testolin, R., Dalmonech, D., Marano, G., Bagnara, M., D'Andrea, E., Matteucci, G., Noce, S., & Collalti, A. (2022). Simulating alternative forest management in a changing climate on a *Pinus nigra* subsp. *laricio* plantation in Southern Italy. *bioRxiv*, Pre Print, 1-39. <https://doi.org/10.1101/2022.05.12.491636>
- Toledo-Aceves, T., Sáenz-Romero, C., Cruzado-Vargas, A. L., & Vásquez-Reyes, V. (2023). *Quercus insignis* seedling response to climatic transfer distance in the face of climate change. *Forest Ecology and Management*, 533, 120855. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120855>
- Vadell, E., Pemán, J., Verkerk, P. J., Erdozain, M., & de-Miguel, S. (2022). Forest management practices in Spain: Understanding past trends to better face future challenges. *Forest Ecology and Management*, 524, 120526. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120526>
- Verkerk, P. J., Costanza, R., Hemetäki, L., Kubiszewski, L., Leskinen, P., Nabuurs, G. J., Potočník, J., & Palahí, M. (2020). Climate-smart forestry: the missing link. *Forest Policy and Economics*, 115, 102164. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102164>
- Villamor, G. B., Wakelin, S. J., Dunningham, A., & Clinton, P. W. (2023). Climate change adaptation behaviour of forest growers in New Zealand: an application of protection motivation theory. *Climatic Change*, 176(2), 3. <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03469-x>
- Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J. E., Hyde, K. J. W., Morelli, T. L., Morissette, J. T., Muñoz, R. C., Pershing, A. J., Peterson, D. L., Poudel, R., Staudinger, M. D., Sutton-Grier, A. E., Thompson, L., Vose, J., Weltzin, J. F., & Whyte, K. P. (2020). Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of the Total Environment*, 733, 137782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>
- Winkler, K. J., Dade, M. C., & Rieb, J. T. (2021). Mismatches in the ecosystem services literature—a review of spatial, temporal, and functional-conceptual mismatches. *Current Landscape Ecology Reports*, 6, 23-34. <https://doi.org/10.1007/s40823-021-00063-2>
- Wolfslehner, B., Prokofieva, I., & Mavsar, R. (2019). *Non-wood forest products in Europe: Seeing the forest around the trees*. What Science Can Tell Us 10. European Forest Institute. From Science to Policy, 10.
- Yousefpour, R., Augustynczyk, A. L. D., & Hanewinkel, M. (2017a). Pertinence of reactive, active, and robust adaptation strategies in forest management under climate change. *Annals of Forest Science*, 74, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0640-3>
- Yousefpour, R., Temperli, C., Jacobsen, J. B., Thorsen, B. J., Meilby, H., Lexer, M. J., Lindner, M., Bugmann, H., Borges, J. G., Palma, J. H. N., Ray, D., Zimmermann, N. E., Delzon, S., Kremer, A., Kramer, K., Reyer, C. P. O., Lasch-Born, P., Garcia-Gonzalo, J., & Hanewinkel, M. (2017b). A framework for modeling adaptive forest management and decision making under climate change. *Ecology and Society*, 22(4). <https://doi.org/10.5751/ES-09614-220440>
- Zhou, M. (2015). Adapting sustainable forest management to climate policy uncertainty: A conceptual framework. *Forest Policy and Economics*, 59, 66-74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2015.05.013>