

LAS PLANTACIONES DE PINO PARA PROMOVER LA MIGRACIÓN ASISTIDA: EL BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA COMO ESTUDIO DE CASO

LÁZARO RAFAEL SÁNCHEZ-VELÁSQUEZ^{1*}, MA. DEL ROSARIO PINEDA-LÓPEZ², GUADALUPE HERNÁNDEZ VARGAS¹,
 MARCO ANTONIO ESPINOZA GUZMÁN³, OMAR A. HERNÁNDEZ-DÁVILA¹, CANDELARIA GARCÍAS-MORALES¹

¹ Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada, Universidad Veracruzana, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.

² Centro de Ecoalfabetización y Diálogo de Saberes, Universidad Veracruzana, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.

³ Facultad de Biología, Universidad Veracruzana, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.

*Autor para correspondencia: lasanchez@uv.mx

Resumen

El cambio climático global produce cambios repentinos en la distribución de las especies, poblaciones y comunidades, lo que genera una importante pérdida de biodiversidad, la cual también está estrechamente vinculado con la deforestación. En México, la deforestación se ha querido subsanar a través del uso de plantaciones de pinos. En el caso particular del bosque mesófilo de montaña, se ha estimado que el 90 % del bosque original se ha perdido en pocas décadas. Estudios de sucesión forestal han mostrado que algunos bosques mesófilos de montaña pueden reemplazar a los bosques de pino; es decir, los pinos pueden facilitar la repoblación natural de especies del bosque mesófilo de montaña. Así mismo, se ha reportado que las plantaciones de pino pueden ser facilitadoras para la reintroducción de especies en peligro de extinción de estados sucesionales intermedios y avanzados del bosque mesófilo de montaña. Para mitigar el efecto del cambio climático global sobre el bosque mesófilo de montaña, proponemos un modelo para llevar a cabo la migración asistida de plantas nativas del bosque mesófilo de montaña, usando las múltiples plantaciones de pinos que hay en México.

Palabras clave: Cambio climático, especies en peligro, Faja Volcánica Transmexicana, México, migración asistida, modelo, plantaciones de pinos, regeneración natural, restauración, sucesión forestal.

Abstract

Global climate change produces sudden changes in the distribution of species, populations and communities, generating a significant loss of biodiversity, which is also closely linked to deforestation. In Mexico, one of the plant formations most severely affected by deforestation is the tropical montane cloud forest, which is estimated to have lost 90 % of its original distribution. In response, efforts have been made to counteract deforestation by planting pine trees. Succession studies have shown that tropical montane cloud forests replace pine forests, which means that the latter can be used as natural facilitators in the reintroduction of tropical montane cloud forest species. Assisted migration can mitigate the effects of global climate change, and pine plantations have been reported to help reintroduce endangered species in tropical montane cloud forests at the intermediate and advanced successional stages. This article proposes a model of assisted migration of native tropical montane cloud forest plants using the many pine-tree plantations found in Mexico.

Keywords: Assisted migration, climatic change, endangered species, forest succession, Mexico, model, natural regeneration, pine plantations, restoration, Trans Mexican Volcanic Belt.

En las tres últimas décadas, la mitigación del cambio climático y la deforestación han sido un tema ampliamente discutido por la sociedad y la academia. Parte de las respuestas para mitigar el cambio climático global y la deforestación incluye la conservación de los bosques, la restauración ecológica, la reforestación y las plantaciones (IPCC 2023). Para la conservación de los bosques se han establecido áreas naturales protegidas federales, estatales, municipales, comunales, ejidales y particulares (CONANP 2024); en ellas se mantienen carbono almacenado, los procesos ecológicos esenciales y la biodiversidad (Rodríguez *et al.* 2004, Juffe-Bignoli *et al.* 2014). El enfoque de la restauración ecológica es ayudar a la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido y aspira a llevar al ecosistema degradado a una trayectoria de recuperación que permita la adaptación a los cambios locales y globales, así como la persistencia y evolución de las especies que lo componen (Gann *et al.* 2019). Por otro lado, las plantaciones pueden tener diferentes fines, por ejemplo, las plantaciones de reforestación (recuperación de la funcionalidad del ecosistema o su estructura; Ventura-Ríos *et al.* 2017), y plantaciones comerciales para la producción de madera (Puc-Kauil *et al.* 2024) y productos no maderables (Tapia-Tapia & Reyes-Chilpa 2008), entre otros. Además, todas estas plantaciones contribuyen a la captura y almacenamiento de carbono (Fernández *et al.* 2019, Avendaño-Yáñez *et al.* 2019, Zhao *et al.* 2023) y pueden ser usadas para el enriquecimiento con especies nativas (Lugo 1997). En esta propuesta nos referimos al uso de las plantaciones de pinos ya existentes en México, no necesariamente es una propuesta para continuar con la plantación indiscriminada de pinos (Ramírez-Soto *et al.* 2018). En este sentido nos enfocaremos a las plantaciones de pino que tienen como objetivo la reforestación, es decir un caso particular de las plantaciones. Daremos elementos teóricos y prácticos (de literatura clásica y actual) para la justificación del uso de las plantaciones de pino para la migración asistida, incluyendo aquellas con una categoría de riesgo (González-Espinosa *et al.* 2012). Tomamos como ejemplo al bosque mesófilo de montaña (BMM) de la Faja Volcánica Transmexicana. Asimismo, hacemos una propuesta de modelo para el uso de las plantaciones de pinos para la migración asistida de especies del BMM con la finalidad de mitigar los efectos del cambio climático. La propuesta que planteamos se puede extrapolar a cualquier otro tipo de vegetación y país, particularmente donde haya plantaciones de pinos con fines de reforestación o zonas con problemas de invasión de pinos no nativos (*e.g.*, América del Sur) que pudieran ser útiles para la migración asistida. No se excluye el uso de algunas plantaciones comerciales (asignando pequeñas superficies) que pudieran servir para la migración asistida.

Los pinos de México y su uso para plantaciones con diferentes objetivos

México ocupa el primer lugar global de especies de pinos, es un centro secundario de la diversificación del género y el 55 % de las especies mexicanas son endémicas (Styles 1998, Sánchez-González 2008). Los pinos se distribuyen ampliamente en México, están presentes en precipitaciones anuales que van de 100 a 2,500 mm, y en altitudes entre 100 y 4,000 m (Eguiluz-Piedra 1988). Los pinos son especies pioneras de rápido crecimiento e intolerantes a la sombra; necesitan de luz directa para su establecimiento y desarrollo (White 1979, Rodríguez-Trejo & Fulé 2003, Sánchez-Velásquez *et al.* 2009).

Los pinos mexicanos se han plantado en muchos países y han tenido éxito sobresaliente; por ejemplo, en Sudáfrica, Argentina, Chile, Nueva Zelanda y Australia, entre otros (Sánchez Mejorada & Huguet 1959, Rogers *et al.* 2003). Los pinos de México se han usado hasta en un 73 % en las plantaciones a nivel mundial (FAO 2000). Esta cifra varía entre regiones, por ejemplo, las plantaciones de pinos en Argentina ocupan 1.2 millones de hectáreas, 62 % del área plantada; en Brasil 1.7 millones de hectáreas que representan el 17.8 % de la superficie plantada; en Chile ocupan el 56.5 % de la superficie plantada (Villacide *et al.* 2023, Schaaf *et al.* 2024). En México, una de las especies de pino más utilizadas en plantaciones con fines comerciales, de conservación de suelos y servicios ecosistémicos es *Pinus patula* Schltdl. & Cham. (Sáenz-Romero *et al.* 2011).

La deforestación y su respuesta en México: plantando pinos

De 1993 a 2000, México perdió cerca del 95 % de su bosque tropical original, más del 90 % del bosque mesófilo de montaña y más de la mitad de los bosques templados (OCDE 2003, Challenger & Soberón 2008). México ha tenido

una tasa anual de deforestación de las más altas a nivel global (OCDE 2003). La deforestación en México en los años 2000-2020, ha variado entre 80,000 y 300,000 ha al año (0.41 - 1.55 %) (CONAFOR 2020, SEMARNAT 2024). Como respuesta a la deforestación, se plantaron plantas jóvenes, del 2000 al 2020, en 2,222,852 ha (SEMARNAT 2021), con fines de producción, reforestación o mixto, pero no hay información precisa sobre el porcentaje que corresponda para cada tipo de plantación en las dos décadas. Se sabe que del 2020 al 2024 se atendieron 170,659.96 ha con acciones de reforestación y 375,127.17 ha con objetivos de plantaciones comerciales (SEMARNAT 2024). Los pinos han sido el grupo de especies preferidas en estos programas de plantaciones debido a sus atributos de adaptación y rápido crecimiento (Trujillo-Miranda *et al.* 2021, Pérez-Luna *et al.* 2024). Las plantaciones de pino tienen como objetivos la reforestación y principalmente la producción de madera (CONAFOR 2010, 2021, 2022). Una parte de estos programas de plantaciones con fines de reforestación se localizan en la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) (CONAFOR 2024) ([Figura 1](#), Material suplementario [Figura S1](#), [Tabla S1](#)). Por lo tanto, estas plantaciones de pino podrían ser usadas para programas de reintroducción de especies y la migración asistida del bosque mesófilo de montaña u otro tipo de vegetación, que para ello más adelante explicamos.

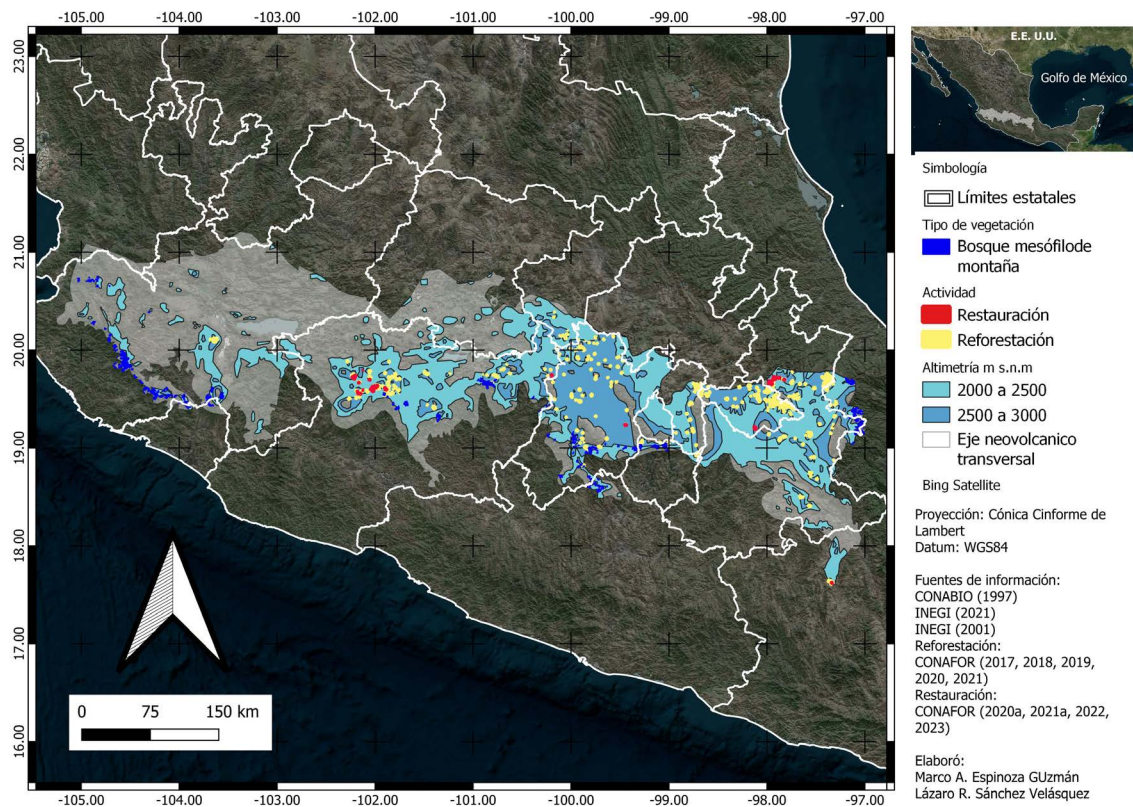


Figura 1. Superficie apoyada por la Comisión Nacional Forestal y localización para el establecimiento las plantaciones con fines de reforestación, y ubicación del bosque mesófilo de montaña (BMM) en el Faja Volcánica Transmexicana. Contiene curvas altitudinales donde se encuentran las plantaciones de restauración y reforestación que pueden ser usadas para la migración asistida de especies del BMM y mitigar los efectos del cambio climático.

Sucesión forestal y su aplicación en las plantaciones de pinos

La sucesión es la secuencia observada de asociaciones vegetales y/o grupos de animales en el espacio o en el tiempo (Drury & Nisbett 1973). Es relevante, para el manejo y conservación de los bosques, entender los procesos y mecanismos de la sucesión forestal (Hawley & Smith 1958), comprenderlos nos permitirá elaborar programas exitosos de rehabilitación, restauración y reintroducción de especies (Walker & del Moral 2003). En este sentido, entender la

función sucesional de las plantaciones de pinos puede facilitar la introducción de especies nativas en un gradiente ambiental (e.g., temperatura) y ser usadas para la migración asistida de una especie o grupos de especies.

La facilitación es uno de los modelos que explica el reemplazo de especies a través de la sucesión (Zedler & Goff 1973, Connell & Slatyer 1977, Sánchez-Velásquez 2003). La facilitación es una interacción positiva y se explica de la siguiente manera; después de un disturbio (e.g., fuego), se liberan espacio y recursos (e.g., nutrientes), y cambian las condiciones (e.g., entrada de luz directa, incremento de la temperatura). Estos cambios son favorables para un grupo de especies pioneras (heliófilas) las cuales crecen y modifican nuevamente el ambiente (recursos y condiciones), de tal manera que ellas mismas ya no pueden incorporar nuevos, permitiendo la regeneración de especies de estado sucesional intermedio, y así sucesivamente hasta que llegan al grupo de especies completamente tolerantes a la sombra (estado sucesional avanzado), las cuales pueden regenerarse bajo este esquema de sombra, humedad y una relativa estabilidad del ecosistema (Connell & Slatyer 1977). Por sus aplicaciones, entre ellas la restauración y rehabilitación, los estudios de facilitación se han incrementado con relación a los estudios de competencia (de 0 % en 1983 a 23 % en 2015) (Michalet & Pugnaire 2016). Lo anterior muestra el creciente interés de la academia en indagar cada vez más sobre el proceso de facilitación.

Bajo condiciones naturales y experimentales se ha demostrado que el bosque mesófilo de montaña y el bosque de *Pinus* son comunidades antagónicas, es decir que bajo condiciones de disturbio (e.g., incendios) el bosque de *Pinus* permanece, y si estos ocurren en BMM este puede ser reemplazado por el bosque de *Pinus*. Mientras que por falta de incendios el bosque de *Pinus* es reemplazado por el BMM (e.g., en Jalisco y Oaxaca) (Sánchez-Velásquez 1986, Sánchez-Velásquez & García-Moya 1993, Cuevas & Jardel 2004, Jardel 2008, del Castillo-Batista *et al.* 2016, Guerrero-Hernández *et al.* 2019).

La facilitación en bosques y plantaciones: el caso del bosque mesófilo de montaña en México

A nivel global, se ha evidenciado que muchas de las plantaciones de pino pueden facilitar la regeneración natural de especies nativas (Gómez-Aparicio *et al.* 2009, Manhas *et al.* 2011, Estados & Escobar 2005, Ventura-Ríos *et al.* 2017, Aguirre *et al.* 2019), incluyendo plantas en peligro de extinción (Ashton *et al.* 1997, Arrieta & Suárez 2006, Gómez-Aparicio *et al.* 2009), favoreciendo la presencia de aves nativas y migratorias, así como la presencia de artrópodos (Estados & Escobar 2005).

Entre más maduras sean las plantaciones de pino, la regeneración natural de especies nativas puede ser similar a la regeneración de bosques nativos (Senbeta *et al.* 2002, Acevedo 2008, Onaindia *et al.* 2013). Por otro lado, las plantaciones de pino también pueden servir como facilitadoras para reintroducir, bajo su dosel, especies nativas tolerantes a la sombra (Kremer *et al.* 2021). En algunos casos puede no ser necesario la introducción manual de plántulas (plantaciones de enriquecimiento) debido al éxito de la regeneración natural bajo el dosel de las plantaciones de pinos (Omeja *et al.* 2009). Para el caso particular de la relación de pinos (bosques naturales y plantaciones) con el BMM, en México se ha evidenciado que la regeneración natural de especies arbóreas del BMM puede ocurrir bajo el dosel de bosques naturales de pino (González-Espinosa *et al.* 1991, Ortiz-Arrona 1999, Ramírez-Marcial *et al.* 2005) o la regeneración natural o artificial de especies arbóreas del BMM bajo el dosel de plantaciones de pino (Cavelier & Tobler 1998, Camacho-Cruz *et al.* 2000, Ramírez-Bamonde *et al.* 2005, Avendaño-Yáñez *et al.* 2016, Aguirre *et al.* 2019).

El BMM y el cambio climático

A nivel global, el BMM se ha calificado como un ecosistema relictivo, frágil, en peligro de extinción y con prioridad de conservación, por la continua perturbación que ha tenido (Mulligan 2010). El BMM de México es un ecosistema complejo de transición entre las selvas húmedas y los bosques templados, adopta diferentes fisonomías (estructura y composición) dependiendo de la altitud, latitud, pendiente y clima (Villaseñor 2010, González-Espinosa *et al.* 2011, 2012). Al BMM se le ha caracterizado como un ecosistema donde se presentan periodos largos de neblina o nubosidad, característica que ha motivado a llamarlo también como bosque de niebla o “tropical montane cloud

forest”. El BMM de México ocupa una superficie aproximada de 800,000 ha (menos del 1 % del territorio nacional, y se distribuye principalmente en los estados de Chiapas, Jalisco, Guerrero, Oaxaca, Veracruz y México (Rzedowski 1978). El BMM contiene una gran diversidad biológica y de endemismos, es el bosque de México con mayor número de especies arbóreas por unidad de superficie, se distingue por tener una amplia diversidad alfa y beta (Gual-Díaz & Rendón-Correa 2017, Williams-Linera 2012). Además, el BMM es importante por los servicios ambientales y la fuente de recursos naturales que provee (Challenger 1998, Villaseñor 2010, Williams-Linera *et al.* 2012).

El cambio climático ejerce una presión de selección natural para diferentes formas de vida y sus interacciones. Éstas tienen tres caminos, extinguirse, adaptarse o migrar hacia ambientes más favorables (Feeley *et al.* 2012). Las evidencias del cambio climático global son muchas (IPCC 2023) y sus efectos se ven en los cambios fenológicos de las plantas (Aitken *et al.* 2008), interacciones (Chen *et al.* 2024), migración desfasada de aves, mayor frecuencia e intensidad de huracanes (Crausbay & Martin 2016) y cambios de atributos funcionales por las temperaturas máximas y mínimas (IPCC 2007, Ahrens *et al.* 2020, Sánchez-Velásquez *et al.* 2023), entre otras condiciones ambientales.

Se prevé que el BMM será afectado del 46 al 58 % de su actual distribución (Villers-Ruiz & Trejo-Vázquez 1997, Foster 2001, Ponce-Reyes *et al.* 2012). Las áreas de los BMMs de México serán más secas y cálidas (Villers-Ruiz & Trejo-Vázquez 1997), y si sumamos el continuo disturbio causado por agentes naturales y antropogénicos (Challenger & Soberon 2008), entonces esperamos que las especies del BMM mejor adaptadas a las condiciones de disturbio, y de áreas desmontadas, sean las especies de estados sucesionales tempranos o pioneras.

Las especies vegetales de estados sucesionales tempranos o pioneras tienen características morfológicas y fisiológicas que les permiten tener mayores posibilidades de persistir a las condiciones relativamente extremas del ambiente (*e.g.*, *Conostegia xalapensis* (Bonpl.) D. Don, *Liquidambar styraciflua* L., y *Trema micranthum* (L.) Blume, entre otras), mientras que las especies más vulnerables serían las de estados sucesionales intermedios y avanzados (*e.g.* *Fagus mexicana* Martínez, *Magnolia schiedeana* Schltdl., *Oreopanax xalapensis* (Kunth) Decne. & Planch., *Persea schiedeana* Nees, *Podocarpus matudae* Lundell y *Magnolia mexicana* DC., *Meliosma alba* (Schltdl.) Walp., entre otras) (Pedraza & Williams-Linera 2003, Ramírez-Bamonde *et al.* 2005, Sánchez-Velásquez *et al.* 2008, García-Hernández *et al.* 2019, Flores-Cano *et al.* 2023).

La aplicación del conocimiento de los procesos de sucesión para la transformación de las plantaciones de pino: la migración asistida

Si se conoce que las plantaciones de pino y los bosques naturales facilitan la regeneración natural, y que las primeras pueden ser usadas para la reintroducción de plantas de estados sucesionales intermedios y avanzados, incluyendo las que están en peligro de extinción, entonces podemos inferir que las plantaciones de pino tienen el potencial para proyectos de migración asistida del BMM.

La migración asistida describe el movimiento deliberado por humanos de propágulos de una especie o población, que se asume es perjudicada por el cambio climático (Hällfors *et al.* 2014). Esta migración de propágulos se lleva a cabo a un área fuera del área de distribución original donde se predice que se moverá a medida que cambie el clima, de esta manera se superan las barreras de dispersión o la falta de tiempo (Hällfors *et al.* 2014). Se habla de transferir la vegetación de un lugar a otro (Richardson *et al.* 2024), partiendo de su vulnerabilidad al cambio climático en su área de distribución y migración, especialmente para la fase de establecimiento de plántulas (Sáenz-Romero *et al.* 2016, Sáenz-Romero *et al.* 2020, Wang *et al.* 2019). En este sentido, tanto las actuales plantaciones de pino (CONAFOR 2024), como algunas plantaciones comerciales, distribuidas a lo largo del gradiente altitudinal, pueden facilitar la migración asistida de especies de estados sucesionales intermedios y avanzados del BMM (Galindo-Jaimés *et al.* 2002, Sánchez-Velásquez & Pineda-López 2009, Avendaño-Yáñez *et al.* 2016, Alfaro-Reyna *et al.* 2019).

La migración asistida del BMM, incluido dentro del bosque de latifoliadas, se recomienda en aquellas zonas ubicadas entre los 2,000-2,500 y 2,500-3,000 m snm debido al cambio climático que se prevé (Trejo & Sánchez Colón 2016). Este modelo de migración asistida que proponemos también se puede llevar a cabo en cualquier otro tipo de vegetación, usando las plantaciones de pinos existentes con fines de reforestación, que por su vulnerabilidad local o

regional lo requiera. Las plantaciones de pino junto con la migración asistida servirán posteriormente como islas de regeneración y fuente de propágulos para la dispersión natural de las especies migradas en los sitios aledaños, principalmente en pastizales abandonados y vegetación secundaria. Es decir, las plantaciones de pino con las especies migradas podrían ser análogas, en una escala de mayor tamaño, a los núcleos de restauración (Holl *et al.* 2011, 2020, Bechara *et al.* 2016), en este caso como núcleos de migración asistida.

Bases del modelo para la migración asistida del bosque mesófilo de montaña: el Faja Volcánica Transmexicana como ejemplo

Por el efecto del cambio climático se reconoce la necesidad de generar modelos que nos permitan evaluar los posibles impactos en los sistemas biofísicos (vegetación, caudales y plantas cultivadas), y generar estrategias para su mitigación. El grado de afectación depende de las especies que conforman la comunidad y sus interacciones (Arriaga & Gómez 2004, Villers & Trejo 2004, William *et al.* 2023).

Como se mencionó anteriormente, el BMM es uno de los tipos de vegetación más sensibles al cambio climático global en México, especialmente al aumento en la temperatura (Villers-Ruiz & Trejo-Vázquez 1997). Este escenario para el BMM se prevé que provocaría cambios dramáticos en su estructura, composición y distribución. En este sentido, proponemos el uso de las plantaciones de pinos como núcleos de migración asistida para generar islas de regeneración y fuentes de propágulos para la dispersión natural (anemócora y zoocoria) de especies arbustivas y arbóreas nativas en los sitios aledaños. Usaremos como ejemplo la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) (Material suplementario [Figura S1](#)) donde se podrían establecer núcleos de migración asistida en las plantaciones de reforestación de pino que se localizan entre los 2,000-2,500 y 2,500-3,000 m snm (altitud en la que se prevé que migraría el BMM), y que estén relativamente aledaños al BMM de menor altitud ([Figura 1](#), Material suplementario [Figuras S2-S4](#)).

En la Faja Volcánica Transmexicana se encuentran las montañas más jóvenes de México y han servido como refugio del bosque mesófilo de montaña durante los pasados cambios climáticos (Luna-Vega 2008) en el Período Cálido Medieval (1000-1300 d. C.), y en la Pequeña Edad de Hielo (1350-1850 d. C.) (Rzedowski 1978, Castillo-Batista *et al.* 2016). El FVT ha presentado cambios en el clima durante los últimos 60 años (Cuervo-Robayo *et al.* 2020, Sánchez-Velásquez *et al.* 2023); es donde convergen las zonas Holártica y Neotropical (Rzedowski 1978). La altitud de los fragmentos del BMM en el FVT van de $1,849.4 \pm 229$, $1,722.1 \pm 389$ y $2,400.2 \pm 189$ m, en las regiones ubicadas en el Golfo (Este), Pacífico (Oeste) y Centro, respectivamente, y cubren una superficie aprox. de 119,855 ha (Sánchez-Velásquez *et al.* *et al.* 2023); por lo tanto, la migración asistida debe ser diferencial de acuerdo con las regiones y sus altitudes.

La migración natural del BMM se espera que ocurra en las cuotas altitudinales de 2,000-2,500 y 2,500-3,000 m (Trejo & Sánchez Colón 2016). Del 2017 al 2020, se establecieron 38,318 ha de plantaciones de pinos con fines de reforestación y restauración, de éstas se establecieron 22,085.19 ha a una altitud de entre 2,000 y 2,500 m en 694 predios ([Figura 1](#), Material suplementario [Figuras S3-S4](#), [Tablas S5-S8](#).) y 16,233 ha dentro la cuota altitudinal de 2,500 y 3,000 m en 677 predios ([Figura 1](#), Material suplementario [Tablas S3-S4](#)) (CONAFOR 2024). Tan solo esta superficie puede representar un área potencial para la migración natural o asistida del BMM.

Los grupos con diferentes atributos vitales y las plantaciones de pino para generar núcleos de migración asistida

Grupos funcionales. La información de los grupos funcionales del bosque mesófilo de montaña se puede construir a través del conocimiento de los atributos vitales de las plantas (Noble & Slatyer 1980). Para nuestro caso usamos la información del comportamiento de las especies del BMM de diferentes fuentes de información (Pedraza & Williams-Linera 2003, Ramírez-Marcial *et al.* 2008, Sánchez-Velásquez *et al.* 2008, 2009, Terán-Valdez *et al.* 2018, Flores-Cano *et al.* 2023). Con esa información se reconocieron cuatro grupos funcionales. Reconociendo estos grupos podemos construir nuestra propuesta para crear núcleos de migración asistida con las plantaciones de pinos.

Grupo 1 Pioneras.- Incluye plantas que se desarrollan en claros grandes, áreas abiertas y potreros abandonados (*e.g.* *Liquidambar*, *Hedyosmum*, *Heliocarpus*,). En general crecen en zonas secas, áreas altas y expuestas, toleran condiciones de poca humedad, son favorecidas por la perturbación como el fuego y la ganadería. En general son especies que no se establecen bajo su propio dosel o del bosque en general (Ramírez-Bamonde *et al.* 2005, Gómez-Romero *et al.* 2012, Flores-Cano *et al.* 2023).

Grupo 2 Pioneras Avanzadas.- Son plantas que se establecen bajo el dosel del grupo de las pioneras y en los sistemas de cultivo como cafetales con sombra, cultivados y abandonados (*e.g.* *Carpinus tropicalis* (Donn.Sm.) Lundell y *Trema micranthum* (L.) Blume) (Sánchez-Velásquez & García-Moya 1993, Pedraza & Williams-Linera 2003, Sánchez-Velásquez *et al.* 2008).

Grupo 3 Intermedias.- Especies de estados sucesionales intermedios (de 40 - 45 años) o vegetación secundaria > 40 años. Pueden permanecer a través de la generación de claros relativamente pequeños (< 500 m²) originados por la caída de árboles o por aprovechamiento forestal selectivo (*e.g.* *Miconia glaberrima* (Schltdl.) Naudin y *Urera caracasana* (Jacq.) Gaudich. ex Griseb.) (Terán-Valdez *et al.* 2018).

Grupo 4 Avanzadas.- Especies de estados sucesionales avanzados de bosques (> 80 años). Se localizan en ambientes no perturbados, pueden regenerarse bajo su propio dosel o el interior del bosque, en sitios con humedad intermedia o alta. Este grupo contiene las especies del BMM más vulnerables al cambio climático, debido a que éstas requieren de condiciones ambientales relativamente estables para completar su ciclo de vida; son tolerantes a la sombra, de ambientes húmedos y con relativo lento crecimiento (*e.g.*, *Magnolia dealbata* Zucc., *M. mexicana* DC., *M. schiedeana* Schltdl., *Podocarpus matudae* Lundell, *Ternstroemia lineata* DC.). A este grupo pertenecen muchas de las especies que se encuentran bajo protección dentro la Norma Mexicana NOM-059-2000 y la lista roja de los árboles del bosque de niebla mexicano que establece que el 37.9 % de los árboles están en peligro de extinción (González-Espinosa *et al.* 2011).

Es claro que no todos los grupos funcionales del BMM serán igualmente afectados, dependerá, además del cambio climático que se prevé (secos y cálidos), de los continuos disturbios antropogénicos y naturales. Por ejemplo, si prevalecen los disturbios en los lugares donde migrarán especies del BMM, las especies que tienen mayores posibilidades de sobrevivir serían aquellas pertenecientes a los grupos funcionales 1 y 2 (pioneras y pioneras avanzadas), como *Liquidambar macrophylla* Oerst., *Vachellia pennatula* (Schltdl. & Cham.) Seigler & Ebinger y *Cordia spinescens* L. Por otro lado, las especies intermedias y avanzadas necesitarán de especies que faciliten su incorporación (*i.e.*, bajo la cobertura de especies pioneras e intermedias). En este caso, se pueden usar las actuales plantaciones de pino que, al llevar a cabo ahí la migración asistida, se podrán generar islas de regeneración y fuente de propágulos para provocar, más adelante, una expansión de la migración para favorecer la regeneración natural (o espontánea) (Figura 2). Después de llevar a cabo la migración asistida con éxito, llamaremos expansión de la migración natural cuando se genere el inicio de la propagación y establecimiento natural de las especies del BMM sin la intervención humana.

La migración asistida de especies del BMM en plantaciones de pino en el Faja Volcánica Transmexicana

Se reconoce que el BMM tendrá que migrar a lugares más húmedos y menos cálidos (Figura 1, Figura 2 altitud III) por causa del efecto del cambio climático. En el intervalo de gradiente de altitud III (2,000-3,000 m) se prevé un ambiente benigno para el crecimiento y desarrollo de las especies del BMM (Trejo & Sánchez Colón 2016) (Figura 2). Por ejemplo, en la FVT, si las plantaciones de pino se encuentran en un gradiente altitudinal entre 2,000 y 3,000 m (Tabla 1, Figura 1), estas generan un ambiente propicio para introducir (migración asistida) las especies tolerantes a la sombra del BMM que pertenecen al estado sucesional intermedio (IBMM) y avanzados (ABMM) (Figura 2, altitud III). Seguramente una vez establecidas y desarrolladas, estas especies reemplazarán a las especies pioneras (*i.e.*, los pinos, que no se podrán regenerar bajo su propio dosel de sombra), mientras que las especies avanzadas del

BMM y algunas intermedias del BMM podrán regenerarse de manera natural bajo su propio dosel. En este sentido, una vez que dominen y reemplacen las especies migradas a los pinos, se formarían núcleos de migración asistida que se convertirán en una expansión de migración natural o espontánea hacia las áreas aledañas a estos núcleos, que generalmente son potreros abandonados y vegetación secundaria (conformada por especies pioneras) del BMM, por ejemplo, en la región de la FVT del centro de Veracruz (Tabla 1, Figura 1). Si el 37 % de los árboles del BMM están en peligro de extinción y muchos de ellos son de estados sucesionales intermedios y avanzados, proponemos que estas especies sean las prioritarias para hacer una migración asistida en las actuales áreas reforestadas con pino en la región. Por otro lado, si se prevé que las zonas del BMM serán más secas y cálidas (Villers-Ruiz & Trejo-Vázquez 1997), entonces se espera que el BMM sea substituido por el bosque tropical caducifolio (Figura 2, Altitud II).

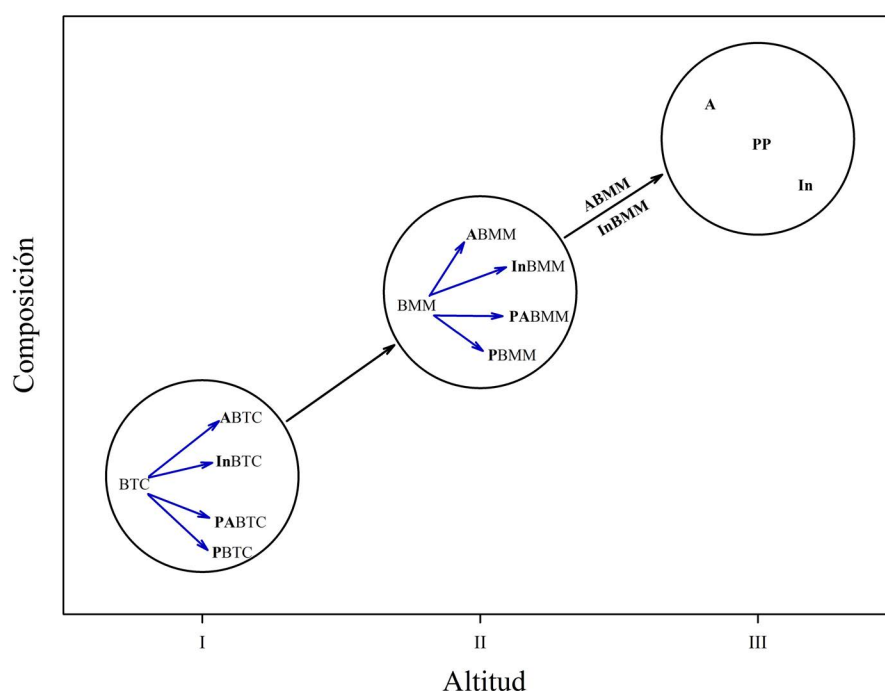


Figura 2. Modelo hipotético sobre la dirección de los cambios del bosque mesófilo de montaña (BMM) y del bosque tropical caducifolio (BTC), y el uso de las plantaciones de pinos (PP) para la migración asistida de especies del BMM y del BTC. Los círculos señalan la ubicación actual de las PP dentro del gradiente de altitud (I, II y III). Los grupos funcionales de especies pioneras (P), pioneras avanzadas (PA), intermedias (In) y avanzadas (A). Sugerimos hacer la migración asistida de los grupos In y A del BMM a la posición III bajo las plantaciones de pinos debido a que tendrán condiciones más favorables.

Limitaciones y perspectivas

Debido a la falta de información precisa de la cantidad existente, localización y el estado actual de las plantaciones de pino con fines de reforestación (CONAFOR 2024), es necesario hacer verificaciones de campo para proponer programas de migración asistida locales, regionales o a nivel de cuenca. Describimos la superficie, por estado y altitud, de las plantaciones de restauración y reforestación apoyadas por CONAFOR en los estados de la región de la FVT (Tabla 1, Figura 1), y suponemos que éstas son de pino debido a la altitud en la que se localizan (> 2,000 m); en esta altitud no se plantan especies tropicales (e.g., caoba y cedro) ni exóticas (eucalipto). De las plantaciones ubicadas en Veracruz, tenemos la certeza de que son de pino (datos no publicados), pero habrá que evaluar cuantas de ellas se mantienen como tales, así como su condición actual. Recomendamos que las plantaciones de pinos se mantengan libres de disturbio, principalmente del fuego, el cual es un limitante del establecimiento de la regeneración del bosque mesófilo de montaña.

Tabla 1. Apoyos de la Comisión Nacional Forestal (años 2017-2024) para plantaciones de restauración y reforestación en la Faja Volcánica Transmexicana por entidad federativa, número de parcelas y superficie total que fueron beneficiadas con el programa de reforestación, cuota altitudinal 2,000-2,500* y 2,500-3,000** m.

Entidad federativa	Plantación	No. de parcelas	Superficie total (ha)
Mich., Oax., Pue., Tlax.	Restauración*	62	3,429.69
Edo. Mex., Jal., Mich., Oax., Pue., Qro., Tlax., Ver.	Reforestación*	632	18,655.5
Edo. Mex., Mich., Oax., Pue., Tlax.	Restauración**	41	1,673.7
Edo. Mex., Jal., Mich., Mor., Oax., Pue., Qro., Tlax., Ver.	Reforestación**	636	14,559.5

Fuente: CONAFOR. 2024.

En la Faja Volcánica Transmexicana la migración asistida deberá ser diferencial debido a la altitud en la que se localizan los fragmentos del BMM (Figura 1). Por ejemplo, en el Este y Oeste de la FVT, la migración asistida deberá hacerse entre los 2,000 y 2,500 m snm y para el Centro entre los 2,500 y 3,000 m snm (Figura 1). Se espera que estos núcleos de migración asistida se conviertan en una expansión de migración natural hacia las áreas aledañas a estos núcleos que generalmente son potreros abandonados y vegetación secundaria (por ejemplo, en el Este de la FVT, Veracruz). Además, los proyectos de migración asistida permitirían hacer estudios y evaluaciones a mediano y largo plazo, debido a que están asignadas con fines de reforestación de acuerdo con la CONAFOR (2024). Por otro lado, en mutuo acuerdo con algunos productores, se puede sugerir que parte de alguna plantación de pino comercial, que se localicen en zonas estratégicas, se use para la migración asistida del bosque mesófilo de montaña. Por la amplia distribución altitudinal de las plantaciones de pino, éstas pueden servir también para la migración asistida de especies de otros tipos de vegetación de acuerdo con los cambios de clima que se prevén; notemos que las plantaciones de pinos se encuentran desde los 300 hasta poco más de 3,000 m snm (Tabla 1, Figura S2). La expansión de la migración natural, a través de los núcleos de migración asistida, es un camino viable; se necesitarán políticas institucionales y la academia para generar más información y aterrizar esta propuesta en el campo.

Material suplementario

El material suplementario de este trabajo puede ser consultado aquí: <https://doi.org/10.17129/botsci.3602>

Agradecimientos

Los autores agradecemos a cuatro revisores anónimos quienes por sus observación, comentarios y críticas hicieron que mejorara significativamente la versión final del manuscrito. El primer autor agradece a Javier Laborde por la invitación que le hizo para participar con una ponencia relacionada con plantaciones de pino, la migración asistida del bosque mesófilo de montaña. Dicha ponencia se llevó a cabo en un simposio celebrado en la ciudad de Oaxaca y culminó con este artículo de opinión.

Literatura citada

- Acevedo B. 2008. *Regeneración natural y enriquecimiento con árboles de especies nativas en bosques protectores de las áreas de conservación de Lipsia S.A.* XIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNAM - EEA Montecarlo, INTA. Eldorado, Misiones, Argentina. <https://www.fcf.unam.edu.ar/modules/uploads/2017/03/Trabajos-Voluntarios-JOTEFA-2008.pdf> (accessed November 29, 2024)
- Aguirre Z, Díez E, Muñoz J, Muñoz L. 2019. Sucesión natural bajo plantaciones de *Pinus radiata* D. Don (Pinaceae) y *Eucalyptus globulus* Labill. (Myrtaceae), en el sur del Ecuador. *Arnaldoa* **26**: 943-964. DOI: <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26306>

- Ahrens CW, Andrew ME, Mazanec RA, Ruthrof KX, Challis A, Hardy G, Byrne M, Tissue DT, Rymer PD. 2020. Plant functional traits differ in adaptability and are predicted to be differentially affected by climate change. *Ecology and Evolution* **10**: 232-248. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.5890>
- Aitken SN, Yeaman S, Holliday JA, Wang T, Curtis-McLane S. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications* **1**: 95-111. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>
- Alfaro-Reyna T, Martínez-Vilalta J, Retana J. 2019. Regeneration patterns in Mexican pine-oak forests. *Forest Ecology and Management* **438**: 112-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.019>
- Arriaga L, Gómez L. 2004. Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. In: Martínez J, Fernández-Bremauntz A, eds, *Cambio Climático: una Visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales: DF, México, pp. 255-265. ISBN: 9688177040
- Arrieta S, Suárez F. 2006. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations contribute to the regeneration of holly (*Ilex aquifolium* L.) in Mediterranean central Spain. *European Journal of Forest Research* **125**: 271-279. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-006-0121-y>
- Ashton PMS, Gamage S, Gunatilleke IAUN, Gunatilleke CVS. 1997. Restoration of a Sri Lankan rainforest: using Caribbean pine *Pinus caribaea* as nurse for establishing late-successional tree species. *Journal of Applied Ecology* **34**: 915-925. DOI: <https://doi.org/10.2307/2405282>
- Avendaño-Yáñez ML, Sánchez-Velásquez LR, Martínez-Ramírez D, Perroni Y, Ibarra-Zavaleta SP, Alarcón E, Pineda-López MR. 2019. Stored carbon in aboveground biomass of experimental plantations with species of early successional cloud forest *Botanical Sciences* **97**: 82-88. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.2031>
- Avendaño-Yáñez ML, Sánchez-Velásquez LR, Meave JA, Pineda-López MR. 2016. Can *Pinus* plantations facilitate reintroduction of endangered cloud forest species? *Landscape and Ecological Engineering* **12**: 99-104. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11355-015-0277-z>
- Bechara FC, Dickens SJ, Farrer EC, Larios L, Spotswood EN, Mariotte P, Suding KN. 2016. Neotropical rainforest restoration: comparing passive, plantation and nucleation approaches. *Biodiversity Conservation* **25**: 2021-2034. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1186-7>
- Camacho-Cruz A, González-Espinosa M, Wolf JHD, De Jong BHJ. 2000. Germination and survival of tree species in disturbed forest of the highlands of Chiapas, Mexico. *Canadian Journal of Botany* **78**: 1309-1318. DOI: <https://doi.org/10.1139/b00-103>
- Castillo-Batista AP, Figueroa-Rangel BL, Lozano-García S, Olvera-Vargas M, Cuevas-Guzmán R. 2016. Historia florística y ambiental del bosque mesófilo de montaña en el centro-occidente de México durante la pequeña edad de hielo. *Revista Mexicana de Biodiversidad* **87**: 216-229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.01.021>
- Cavelier J, Tobler A. 1998. The effect of abandoned plantations of *Pinus patula* and *Cupressus lusitanica* on soil and regeneration of a tropical montane rain forest in Colombia. *Biodiversity and Conservation* **7**: 335-347. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008829728564>
- Challenger A. 1998. *Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México: Presente, Pasado y Futuro*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Sierra Madre. ISBN: 978-970-9000-02-3
- Challenger A, Soberón J. 2008. Los ecosistemas terrestres. In: Soberón J, Halffter G, Llorente-Bousquets J, eds, *Capital Natural de México*, Vol. I: *Conocimiento Actual de la Biodiversidad*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, pp. 87-108. ISBN: 9786077607038
- Chen DV, Slowinski SP, Kido AK, Bruns EL. 2024. High temperatures reduce growth, infection, and transmission of a naturally occurring fungal plant pathogen. *Ecology* **105**: e4373. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecy.4373>
- CONAFOR [Comisión Nacional Forestal]. 2010. *Programas y acciones en reforestación, conservación y restauración de suelos, incendios forestales y sanidad forestal en ecosistemas forestales*. Zapopán, México. Gobierno Federal, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional Forestal. <http://www.conafor.org.mx>

- gob.mx:8080/documentos/docs/7/1359Programas%20y%20Acciones%20en%20Reforestaci%C3%B3n,%20Conservaci%C3%B3n%20y%20Restauraci%C3%B3n%20de%20Suelos,%20Incendios%20Forestales%20y.pdf (accessed December 2, 2024)
- CONAFOR [Comisión Nacional Forestal]. 2020. *Estimación de la tasa de deforestación en México para el periodo 2001-2018 mediante el método de muestreo*. Jalisco, México. Documento Técnico. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/7767Resumen%20Ejecutivo%20Deforestaci%C3%B3n%202001-2018%20M%C3%A9xico.pdf> (accessed November 25, 2024)
- CONAFOR [Comisión Nacional Forestal]. 2021. *Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales Comerciales en México*. <https://sma.gob.mx/wp-content/uploads/2021/06/SRNSEFLibro-Situacion-Actual-y-Perspectivas-de-las-Plantacionaes-Forestales-Comerciales-en-Mexico.pdf> (accessed June 14, 2024)
- CONAFOR [Comisión Nacional Forestal]. 2022. *Estado que guarda el sector forestal en México 2021. Bosques para el bienestar social y ambiental*. México. Comisión Nacional Forestal. 459 p. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/778473/Libro_completo_EGSFM_DIGITAL_INOV_1_compressed.pdf (accessed November 28, 2024)
- CONAFOR [Comisión Nacional Forestal]. 2024. Restauración forestal. (accessed December 4, 2024). [https://snif.cnf.gob.mx/restauracion/#:~:text=Reforestación,\(Ramos%2C%202007\)3](https://snif.cnf.gob.mx/restauracion/#:~:text=Reforestación,(Ramos%2C%202007)3)
- CONANP [Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas]. 2024. *Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2020-2024*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/718572/PNANP2020-2024.pdf> (accessed September 3, 2024)
- Connell JH, Slatyer RO. 1977. Mechanisms of succession in natural communities and their role un community stability and organization. *The American Naturalist* **111**: 1119-1144.
- Crausbay SD, Martin PH. 2016. Natural disturbance, vegetation patterns and ecological dynamics in tropical montane forests. *Journal of Tropical Ecology* **32**: 384-403. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0266467416000328>
- Cuervo-Robayo AP, Ureta C, Gómez-Albores MA, Meneses-Mosquera AK, Téllez-Valdés O, Martínez-Meyer E. 2020. One hundred years of climate change in Mexico. *Plos One* **15**: e0209808. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209808>
- Cuevas GR, Jardel E. 2004. *Flora y Vegetación de la Estación Científica Las Joyas*. México: Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa Sur. ISBN: 970-27-0639-4
- del Castillo-Batista AP, Figueroa-Rangel BL, Lozano-García S, Olvera-Vargas M, Guzmán RC. 2016. Historia florística y ambiental del bosque mesófilo de montaña en el centro-occidente de México durante la pequeña edad de hielo. *Revista Mexicana de Biodiversidad* **87**: 216-229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.01.021>
- Drury WH, Nisbet I. 1973. Succession. *Journal of the Arnold Arboretum* **54**: 331-368. DOI: <https://www.jstor.org/stable/43781773>
- Eguiluz-Piedra T. 1988. Distribución Natural de los Pinos en México. Nota Técnica No 1. México: Centro de Genética Forestal. Chapingo.
- Estades CF, Escobar MAH. 2005. Los ecosistemas de las plantaciones de pino de la Cordillera de la Costa. In: Smith-Ramírez C, Armesto JJ, Valdovinos C, eds, *Historia, Biodiversidad y Ecología de los Bosques Costeros de Chile*. Editorial Universitaria, pp. 600-616. ISBN: 9561117770
- FAO [Food and Agriculture Organization]. 2000. Tendencias y situación actual de las plantaciones forestales. <https://www.fao.org/4/X8423S/X8423S07.htm> (accessed June 16, 2024)
- Feeley KJ, Rehm EM, Machovina B. 2012. Perspective: The responses of tropical forest species to global climate change: acclimate, adapt, migrate, or go extinct? *Frontiers of Biogeography* **4**: 69-83. DOI: <http://dx.doi.org/10.21425/F5FBG12621>
- Fernández PJC, Cely RGE, Serrano PA. 2019. Cuantificación de la captura de carbono y análisis de las propiedades del suelo en coberturas naturales y una plantación de pino en el páramo de Rabanal, Colombia. *Revista Colombiana de Geografía* **28**: 121-133. DOI: <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.66152>
- Flores-Cano JA, Gelviz-Gelvez SM, Douterlungne D, Badano EI. 2023. Are nurse plants useful for facilitating the

- reintroduction of mid- and late successional tree species in tropical montane cloud forests? *Botanical Sciences* **101**: 685-698. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.3236>
- Foster P. 2001. The potential negative impacts of global climate change on tropical montane cloud forests. *Earth-Science Reviews* **55**: 73-106. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00056-3)
- Galindo-Jaimes L, González-Espinosa M, Quintana-Ascencio P, García-Barrios L. 2002. Tree composition and structure in disturbed stands with varying dominance by *Pinus* spp. in the highlands of Chiapas, México. *Plant Ecology* **162**: 259-272. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020309004233>
- Gann GD, McDonald T, Walder B, Aronson J, Nelson CR, Jonson J, Hallett JG, Eisenberg C, Guariguata MR, Liu J, Hua F, Echeverría C, Gonzales E, Shaw N, Decler K, Dixon KW. 2019. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology* S1-S46.
- García-Hernández MA, Toledo-Aceves T, López-Barrera F, Sosa VJ, Paz H. 2019. Effects of environmental filters on early establishment of cloud forest trees along elevation gradients: Implications for assisted migration. *Forest Ecology and Management* **432**: 427-435. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.042>
- Gómez-Aparicio L, Zavala MA, Bonet FJ, Zamora R. 2009. Are pine plantations valid tools for restoring Mediterranean forests? An assessment along abiotic and biotic gradients. *Ecological Applications* **19**: 2124-2141. DOI: <https://doi.org/10.1890/08-1656.1>
- Gómez-Romero M, Soto-Correa JC, Sáenz-Romero C, Villegas J, Lindig-Cisneros R. 2012. Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia* **46**: 795-807.
- González-Espinosa M, Meave JA, Lorea-Hernández FG, Ibarra-Manríquez G, Newton AC. 2011. *The Red List Mexican Cloud Forest Trees*. Cambridge, United Kingdom: Fauna and Flora International. ISBN: 9781903703281
- González-Espinosa M, Meave JA, Ramírez-Marcial N, Toledo-Aceves T, Lorea-Hernández FG, Ibarra-Manríquez G. 2012. Los bosques de niebla de México: conservación y restauración de su componente arbóreo. *Ecosistemas* **21**: 36-52.
- González-Espinosa M, Quintana-Ascencio PF, Ramírez-Marcial N, Gaytán-Guzmán P. 1991. Secondary succession in disturbed *Pinus-Quercus* forests in the highlands of Chiapas, Mexico. *Journal of Vegetation Science* **2**: 351-360. DOI: <https://doi.org/10.2307/3235927>
- Gual-Díaz M, Rendón-Correa A. 2017. Los bosques mesófilos de montaña de México. *Agroproductividad* **10**: 3-9.
- Guerrero-Hernández R, Muñoz-Castro MA, Vázquez-García JA, Ruiz-Corral JA, Hernández-Vera G. 2019. Vegetation structure, classification and climatic characteristics in temperate-like mountain forests dominated by *Abies jaliscana* in western Mexico. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty* **19**: 235-258. DOI: <https://doi.org/10.17475/kastorman.626375>
- Hawley RC, Smith DN. 1958. *The Practice of Silviculture*. John Wiley and Sons, NY.
- Hällfors MH, Vaara EM, Hyvärinen M, Oksanen M, Schulman LE, Siipi H, Lehvävirta S. 2014. Coming to terms with the concept of moving species threatened by climate change - A systematic review of the terminology and definitions. *Plos One* **9**: e102979. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102979>
- Holl KD, Reid JL, Cole RJ, Oviedo-Brenes F, Rosales JA, Zahawi RA. 2020. Applied nucleation facilitates tropical forest recovery: Lessons learned from a 15-year study. *Journal Applied Ecology* **57**: 2316-2328. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13684>
- Holl KD, Zahawi RA, Cole RJ, Ostertag R, Cordell S. 2011. Planting seedlings in tree islands versus plantations as a large-scale tropical forest restoration strategy. *Restoration Ecology* **19**: 470-479. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00674.x>
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. 2007. *Climate Change. 2007: The Physical Science Basis*. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL, eds. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK; NY, USA: IPCC. ISBN: 978-0-521-88009
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. 2023. Sections. Climate Change 2023: Synthesis report. In: Lee H, Romero J, eds, *Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovern-*

- mental Panel on Climate Change IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jardel E. 2008. Sucesión ecológica y restauración de bosques subtropicales de montaña en la Estación Científica Las Joyas. In: González-Espinosa M, Rey-Benayas JM, Ramírez-Marcial N. Restauración de bosques, eds, *Restauración de Bosques en América Latina*. México: Mundi Prensa, Fundación Fire, pp. 77-97. ISBN: 9789687462493
- Juffe-Bignoli D, Burgess ND, Bingham H, Belle EMS, de Lima MG, Deguignet M, Bertzky B, Milam AN, Martinez-Lopez J, Lewis E, Eassom A, Wicander S, Geldmann J, van Soesbergen A, Arnell AP, O'Connor B, Park S, Shi YN, Danks F S, Lehvavirta S. 2014. *Protected Planet Report 2014*. Cambridge, UK: United Nations Environment Programme-World Commission on Protected Areas. ISBN: 978-92-807-3416-4
- Kremer K, Bannister JR, Bauhus J. 2021. Restoring native forests from *Pinus radiata* plantations: Effects of different harvesting treatments on the performance of planted seedlings of temperate tree species in central Chile. *Forest Ecology and Management* **479**: 118585. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118585>
- Lugo AE. 1997. The apparent paradox of reestablishing species richness on degraded lands with tree monocultures. *Forest Ecology and Management* **99**: 9-19. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00191-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00191-6)
- Luna-Vega I. 2008. Aplicaciones de la biogeografía histórica a la distribución de las plantas mexicanas. *Revista Mexicana de Biodiversidad* **79**: 217-241. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/ib.20078706e.2008.001.523>
- Manhas RK, Chauhan PS, Mukesh, Singh L, Negi JDS. 2011. Structure and diversity of 80-yr old plantations after successional colonization of the natives. *Current Science* **100**: 7114-725.
- Michalet R, Pugnaire FI. 2016. Facilitation in communities: underlying mechanisms, community and ecosystem implications. *Functional Ecology* **30**: 3-9. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12602>
- Mulligan M. 2010. Modeling the tropics-wide extent and distribution of cloud forest and cloud forest loss, with implications for conservation priority. In: Bruijnzeel LA, Scatena FN, Hamilton LS, eds, *Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management*. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511778384.004>
- Noble IR, Slatyer RO. 1980. The use of vital attributes to predict successional changes in plant communities subject to recurrent disturbances. *Vegetatio* **43**: 5-21. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00121013>
- OCDE [Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico]. 2003. *Evaluación del desempeño ambiental: México*. México: OCDE. ISBN: 9688175331
- Omeja PA, Chapman CA, Pua J. 2009. Enrichment planting does not improve tree restoration when compared with natural regeneration in a former pine plantation in Kibale National Park, Uganda. *African Journal Ecology* **47**: 650-657. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2028.2008.01016.x>
- Onaindia M, Metzaga-Arregi I, San Sebastian M, Mitxelena A, Rodríguez-Loinaz G, Peña L, Alday JG. 2013. Can understory native woodland plant species regenerate under exotic pine plantations using natural succession? *Forest Ecology and Management* **308**: 136-144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.046>
- Ortiz-Arrona C. 1999. *Environmental effects on cloud forest tree seedling establishment under a Pinus canopy in Mexico*. MSc Thesis. University of Aberdeen. RU.
- Pedraza RA, Williams-Linera G. 2003. Evaluation of native tree species for the rehabilitation of deforested areas in a Mexican cloud forest. *New Forests* **26**: 83-99. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1024423511760>
- Pérez-Luna A, López-Upton J, Prieto-Ruiz JA, Madrid-Aispuro RE. 2024. Supervivencia y control genético sobre características fenotípicas de un ensayo de progenies de *Pinus patula*. *Revista Fitotécnica Mexicana* **47**: 301-309. DOI: <https://doi.org/10.35196/rfm.2024.3.301>
- Ponce-Reyes R, Reynoso-Rosales VH, Watson JEM, Vanderwal J, Fuller RA, Pressey RL, Possingham HP. 2012. Vulnerability of cloud forest reserves in Mexico to climate change. *Nature Climate Change* **2**: 448-452. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate1453>
- Puc-Kauil R, Nava-Nava A, Paredes-Díaz E, Ruiz-Aquino F, Gerónimo-Torres JC, Ortiz J. 2024. Funciones alomé-

- tricas de altura total para pinos tropicales en Puebla, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* **11**: e4118. DOI: <https://doi.org/10.19136/era.a11n2.4118>
- Ramírez-Bamonde E, Sánchez-Velásquez LR, Andrade-Torres A. 2005. Seedling survival and growth of three species of mountain cloud forest in Mexico, under different canopy treatments. *New Forests* **30**: 95-101. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-004-5397-5>
- Ramírez-Marcial N, Camacho-Cruz A, González-Espinosa M. 2005. Potencial florístico para la restauración de bosques en Los Altos de Chiapas y montañas del norte de Chiapas. In: González-Espinosa M, Ramírez-Marcial N, Ruiz-Montoya L, eds, *Diversidad Biológica en Chiapas*. México: Plaza y Valdés. COCYTECH, ECOSUR, pp. 325-369. ISBN: 970-722-399-5
- Ramírez-Marcial N, Camacho-Cruz A, González-Espinosa M. 2008. Clasificación de grupos funcionales vegetales para la restauración del Bosque Mesófilo de Montaña. In: Sánchez-Velásquez LR, Galindo-González J, Díaz-Fleischer F, eds, *Ecología, Manejo y Conservación de los Ecosistemas de Montaña en México*. DF, México: Mundi-Prensa, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, LABIOTECA Universidad Veracruzana pp.51-72. ISBN: 978-968-7462-57-8
- Ramírez-Soto A, Villa-Bonilla B, Lucio-Palacio CR, Landa Libreros L, Sánchez-Velásquez LR, Ruelas Inzunza E. 2018. Mexico's official reforestation programs are shrinking and narrowing its vision at a higher financial expense. *Forest Policy and Economics* **94**: 32-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.06.006>
- Richardson BA, Rehfeldt GE, Sáenz-Romero C, Milano ER. 2024. A climate analog approach to evaluate seed transfer and vegetation transitions. *Frontiers in Forest and Global Change* **7**: 1325264. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1325264>
- Rodrigues ASL, Andelman SJ, Bakarr MI, Boitani L, Brooks TM, Cowling RM, Fishpool LDC, da Fonseca GAB, Gaston KJ, Hoffmann M, Long JS, Marquet PA, Pilgrim JD, Pressey RL, Schipper J, Sechrest W, Stuart SN, Underhill LG, Waller R W, Matthew EJ, Yan X. 2004. Effectiveness of the global protected area network in representing species diversity. *Nature* **428**: 637-640. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature02422>
- Rodríguez-Trejo DA, Fulé PZ. 2003. Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International of Journal Wildland Fire* **12**: 23-37. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF02040>
- Rzedowski J. 1978. Vegetación de México. México: Limusa. ISBN: 9681800028
- Rogers DL, Vargas-Hernández JJ, Matheson AC, Guerra-Santos JJ. 2003. Poblaciones Insulares Mexicanas de *Pinus Radiata*: Una Expedición Internacional y la Colaboración en Marcha para la Conservación Genética. Recursos Genéticos N° 30. Food Agriculture Organization. www.fao.org/docrep/005/y4341s/Y4341S07.htm#P968_103908 (accessed November 28, 2024)
- Sáenz-Romero C, Beaulieu J, Rehfeldt GE. 2011. Variación genética altitudinal entre poblaciones de *Pinus patula* de Oaxaca, México, en cámaras de crecimiento simulando temperaturas de calentamiento global. *Agrociencia* **45**: 399-411.
- Sáenz-Romero C, Lindig-Cisneros RA, Joyce DG, Beaulieu JSt, Clair JB, Jaquish BC. 2016. Migración asistida de las poblaciones forestales para la adaptación de árboles ante el cambio climático. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* **22**: 303-323. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.052>
- Sáenz-Romero C, Mendoza-Maya E, Gómez-Pineda E, Blanco-García A., Endara-Agramont AR, Lindig-Cisneros R, López-Upton J, Trejo-Ramírez O, Wehenkel C, Cibrián-Tovar D, Flores-López C, Plascencia-González A, Vargas-Hernández JJ. 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**: 843-854. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0329>
- Sánchez-González A. 2008. Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques* **14**: 107-120. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1411222>
- Sánchez Mejorada N, Huguet L. 1959. Las coníferas de México. *Unasylva* **13**: 24-35.
- Sánchez-Velásquez LR. 1986. Estudio de la sucesión forestal en la Sierra de Juárez, Oaxaca, México, después de un incendio forestal superficial. *Biotica* **4**: 219-232.

- Sánchez-Velásquez LR. 2003. A model to infer succession mechanisms in forests (bilingüe). *Agrociencia* **37**: 533-543.
- Sánchez-Velásquez LR, García-Moya E. 1993. Sucesión forestal en la Sierra de Manantlán Jal., México: Bosque mesófilo de montaña y bosque de *Pinus*. *Agrociencia* **3**: 7-26.
- Sánchez-Velásquez LR, Hernández-Vargas G, Ibarra-Zavaleta SP, Pineda-López MR, Saldaña-Vázquez RA, Ruiz-Sánchez E. 2023. Climatic variability and plant functional traits in tropical montane cloud forest refugia along the Trans Mexican Volcanic Belt. *Flora* **308**: 152397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152397>
- Sánchez-Velásquez LR, Pineda-López MR. 2009. Distribución de la vegetación y cambio climático como un proceso de selección natural. *La Ciencia y el Hombre* **22**: 51-58.
- Sánchez-Velásquez LR, Pineda-López MR, Galindo-González J, Zúñiga-González JL, Díaz-Fleischer F. 2009. Opportunity for the study of critical successional processes for the restoration and conservation of mountain forest: the case of Mexican pine plantations. *Interciencia* **34**: 518-522.
- Sánchez-Velásquez LR, Ramírez-Bamonde E, Andrade-Torres A, Rodríguez-Torres P. 2008. Ecología, florística y restauración del bosque mesófilo de montaña. In: Sánchez-Velásquez LR, Galindo-González J, Díaz-Fleischer F, eds, *Ecología, Manejo y Conservación de los Ecosistemas de Montaña en México*. México: Mundi Prensa, Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad, LABIOTECA Universidad Veracruzana, pp. 9-50. ISBN 978-968-7462-57-8
- Schaaf AA, Nadalin Rioja JM, Reppucci JI, Ruggera RA. 2024. Efecto de las plantaciones forestales no nativas de pinos y eucaliptos en los vertebrados terrestres: Una revisión descriptiva sobre los trabajos realizados en la Argentina. *Ecología Austral* **34**: 477-485. DOI: <https://doi.org/10.25260/EA.24.34.3.0.2390>
- SEMARNAT [Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales]. 2021. Superficie reforestada. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2021/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet8d97.html (accessed June 15, 2024)
- SEMARNAT [Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales]. 2024. Programa Nacional Forestal 2020-2024: Avances enero 2023-junio 2024. https://www.conafor.gob.mx/transparencia/docs/2024/Avances_y_resultados_PNF_enero_2023_a_junio_2024.pdf (accessed June 15, 2024)
- Senbeta F, Teketay D, Näslund BÅ. 2002. Native woody species regeneration in exotic tree plantations at Munessa-Shashemene Forest, southern Ethiopia. *New Forests* **24**: 131-145. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021201107373>
- Styles TB. 1998. El género *Pinus*: su panorama en México. In: Ramamorthy TP, Bye R, Lot A, Fa J, eds, *La Diversidad Biológica de México, Orígenes y Distribución*. México: Instituto de Biología, UNAM, pp. 385-408. ISBN: 9683665888
- Tapia-Tapia EdelC, Reyes-Chilpa R. 2008. Productos forestales no maderables en México: Aspectos económicos para el desarrollo sustentable. *Madera y Bosques* **14**: 95-112. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1431208>
- Terán-Valdez A, Duarte N, Pérez A, Cuesta F, Pinto E. 2018. Selección de especies potenciales para la restauración. In: Proaño R, Duarte N, Cuesta F, Maldonado G, eds, *Guía para la Restauración de Bosques Montanos Tropicales*. Ecuador, Perú: Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecoregión Andina. <https://condesan.org/recursos/guia-la-restauracion-bosques-montanos-tropicales-modulo-3/> (accessed December 2, 2024)
- Trejo RI, Sánchez Colón S. 2016. Actualización y análisis del impacto del cambio climático en zonas bioclimáticas de México con nuevos escenarios de cambio climático. Informe Final del proyecto #86487 Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México. México: Ciudad de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/444330/CGACC_2016_Actualizacion_y_analisis_del_impacto_del_cambio_climatico_en_zonas_bioclimaticas_de_Mexico.pdf (accessed December 4, 2024)
- Trujillo-Miranda AL, Toledo-Aceves T, López-Barrera F, Günter S. 2021. Tree diversity and timber productivity in planted forests: *Pinus patula* versus mixed cloud forest species. *New Forests* **52**: 177-195. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09787-1>
- Ventura-Ríos A, Plascencia-Escalante FO, Hernández-de la Rosa P, Ángeles-Pérez G, Aldrete A. 2017. ¿Es la

- reforestación una estrategia para la rehabilitación de bosques de pino? Una experiencia en el centro de México. *Bosque* **38**: 55-66. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000100007>
- Villaseñor L. 2010. *El bosque húmedo de montaña en México y sus plantas vasculares*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto de Biología Universidad Autónoma de México. ISBN: 978-607-02-1557-5
- Villacide JM, Gomez DF, Perez CA, Corley JC, Ahumada R, Rodrigues Barbosa L, Furtado EL, González A, Ramirez N, Balmelli G, Dias de Souza C, Martínez G. 2023. Forest health in the Southern Cone of America: State of the art and perspectives on regional efforts. *Forests* **14**: 756. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14040756>
- Villers L, Trejo I. 2004. Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales. In: Martínez J, Fernández A, eds, *Cambio Climático: Una Visión Desde México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, pp. 239-254. ISBN: 9688177040
- Villers-Ruiz L, Trejo-Vázquez EI. 1997. Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. *Climate Research* **9**: 87-93.
- Walker LR, del Moral R. 2003. *Primary Succession and Ecosystems Rehabilitation*. United Kingdom; Cambridge University Press. ISBN 0521529549.
- Wang Y, Pedersen JL, Macdonald SE, Nielsen SE, Zhang J. 2019. Experimental test of assisted migration for conservation of locally range-restricted plants in Alberta, Canada. *Global Ecology and Conservation* **17**: e00572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00572>
- Williams-Linera G. 2012. *El bosque de niebla del centro de Veracruz: ecología, historia y destino en tiempos de fragmentación y cambio climático*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto de Ecología, A.C. ISBN: 9707091010
- William MT, Taylor JJ, Rytwinski T, Aitken SN, MacDonald AL, Van Bogaert R, Cooke SJ. 2023. The application of assisted migration as a climate change adaptation tactic: An evidence map and synthesis. *Biological Conservation* **280**: 109932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.109932>
- White PS. 1979. Pattern, process and natural disturbance in vegetation. *Botanical Review* **49**: 483-533.
- Zedler PH, Goff FG. 1973. Size-association analysis of forest successional trends in Wisconsin. *Ecological Monographs* **43**: 70-94. DOI: <https://doi.org/10.2307/1942160>
- Zhao D, Bullock BP, Wang M. 2023. Long-term dynamics of aboveground carbon stocks in managed loblolly pine plantations in the southeast United States. *Forest Ecology and Management* **546**:121384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121384>

Editor de sección: Teresa Terrazas

Contribuciones de los autores: LRSV: Concepción de la idea, escritura del manuscrito. MRPL: Concepción de la idea, revisión del manuscrito. GHV: Revisión del manuscrito, síntesis de la información. MAEG: Análisis y síntesis de la información geográfica. OAHD: Escritura del manuscrito, propuesta de grupos funcionales. CGM: Revisión del manuscrito, diagramas.

Entidades Financiadoras: Los autores Candelaria Garcías-Morales (CVU 339887) y Omar A. Hernández-Dávila (CVU 371134) agradecen al CONAHcyT por su beca otorgada como posdoctorantes en el Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada de la Universidad Veracruzana.

Conflictos de interés: Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses, financiero o personal, en la información, presentación de datos y resultados de este artículo.