



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

VARIACIÓN CLINAL EN *Pinus hartwegii* A PARTIR DE
CARACTERES FENOTÍPICOS PARA LA ESTACIÓN FORESTAL
EXPERIMENTAL ZOQUIAPAN, MÉXICO



APROBADA



TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

presenta:

ADRIÁN LÓPEZ LÓPEZ

Bajo la supervisión de: MARÍA ISABEL PALACIOS RANGEL, DRA.



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2022.

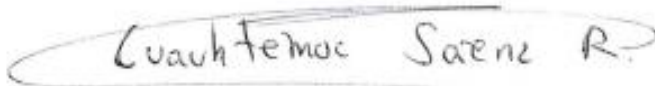
**VARIACIÓN CLINAL EN *Pinus hartwegii* A PARTIR DE CARACTERES
FENOTÍPICOS PARA LA ESTACIÓN FORESTAL EXPERIMENTAL
ZOQUIAPAN, MÉXICO**

Tesis realizada por **LÓPEZ LÓPEZ ADRIÁN** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTORA: 
DRA. MARÍA ISABEL PALACIOS RANGEL

ASESOR: 
DR. ANTONIO VILLANUEVA MORALES

ASESOR: 
DR. CUAUHTÉMOC SÁENZ ROMERO

ASESORA: 
DRA. VICTORIA PACHECO ALMARAZ

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
DATOS BIOGRÁFICOS.....	viii
RESUMEN GENERAL.....	ix
GENERAL ABSTRACT.....	x
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Antecedentes.....	4
1.2. Justificación.....	6
1.3. Planteamiento del problema.....	7
1.4. Problema de investigación	7
1.5. Objetivos	7
1.5.1 Objetivo general	7
1.5.2 Objetivos específicos.....	8
1.6. Preguntas de investigación.....	8
1.7. Hipótesis.....	8
1.8. Contenido capitular del documento de titulación	9
1.9. Estructura capitular del documento de titulación	9
1.10. Literatura citada.....	10
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	14
2.1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	14
2.1.1 Adaptación de árboles al ambiente	14

2.1.2. Cambio climático	17
2.1.3. Gestión forestal y cambio climático	26
2.2. MARCO DE REFERENCIA	33
2.3. Literatura citada	36
CAPÍTULO 3. ARTÍCULO CIENTÍFICO: Variación clinal en <i>Pinus hartwegii</i> Lindl. a partir de caracteres fenotípicos para la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, México	39
RESUMEN.....	40
ABSTRACT	41
INTRODUCCIÓN.....	42
MÉTODOS	43
Área de estudio	43
Diseño de muestreo	44
Toma de datos	46
Procesamiento y análisis de datos	47
RESULTADOS	51
Variables morfológicas	51
Germinación	52
Zonificación altitudinal	53
Zonificación para clima contemporáneo y clima futuro (RCP 6.0)	55
DISCUSIÓN.....	59
Variables morfológicas	59
Germinación	60
Zonificación altitudinal y climática	61
Lineamientos para movimiento de germoplasma	64
CONCLUSIONES	67
Referencias bibliográficas	68
CONCLUSIONES GENERALES	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Altitud y coordenadas UTM de poblaciones muestreadas de <i>P. hartwegii</i> en la EFEZ, Ixtapaluca, Estado de México, México	45
Tabla 2.	P-valores asociados al análisis de varianza para procedencias originadas a diferentes altitudes	51
Tabla 3.	Límites altitudinales y climáticos de dos zonas fijas para el aprovisionamiento y movimiento de germoplasma con clima contemporáneo	54
Tabla 4.	Límites altitudinales y climáticos para dos zonas fijas de germoplasma considerando un clima proyectado al año 2060, RCP 6.0	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Ubicación del área de estudio y transecto altitudinal.....	44
Figura 2.	Comportamiento de los valores promedios del largo de semilla de <i>P. hartwegii</i> respecto a la altitud de origen a lo largo del transecto altitudinal en la EFEZ	53
Figura 3.	Proyección del desplazamiento de temperatura contemporánea	56

DEDICATORIA

A mi familia que ha comprendido mi ausencia y me ha apoyado en mis objetivos.
A Dios padre por no abandonarme y permitirme concluir una etapa más en esta efímera vida.

A Mari Ortega, por apoyarme incondicionalmente antes y durante el proceso de obtención del grado.

La nobleza de las acciones define a las personas como tales, porque es en las acciones conscientes en donde se ubica el umbral de nuestra particularidad como seres vivos; vida efímera e incierta, muerte eterna y segura. Creo que servir a un propósito da dirección a nuestro frágil existir:

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el otorgamiento de la beca de posgrado sin la cual no se hubiera podido realizar esta investigación. A la Universidad Autónoma Chapingo que me dio la oportunidad de formarme y obtener el grado de Maestro en Ciencias.

Al comité asesor que apoyó durante el desarrollo del proyecto mediante su experiencia y conocimiento académico: María Isabel Palacios Rangel, Cuauhtémoc Sáenz Romero, Antonio Villanueva Morales y Victoria Pacheco Almaraz.

A los docentes de la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, así como a los profesores del Colegio de Postgraduados y de la Universidad Michoacana que integraron el mapa curricular para mi formación.

Al director de la División de Ciencias Forestales, el Dr. Ángel Leyva Ovalle por su apoyo durante la etapa de muestreo en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ).

Al personal técnico de la EFEZ que facilitó la etapa de muestreo del proyecto de investigación, proporcionando transporte hacia la EFEZ y guía en el bosque.

Al Dr. Javier López Upton del Colegio de Posgraduados, Campus Montecillos, quien facilitó el establecimiento de la prueba de germinación.

Por último, pero igual de importantes, a mis amigos y compañeros de grado que me apoyaron durante la etapa de muestreo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Adrián López López

Lugar de nacimiento: Tecamalucan, Acultzingo, Veracruz de Ignacio de la Llave

Profesión: Ingeniero Forestal



Desarrollo Académico

Bachillerato: Colegio de Bachilleres del Estado de Veracruz (COBAEV 06) (2007-2010)

Licenciatura: División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México (2014-2019).

Maestría en Ciencias: Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México (2020-2022).

RESUMEN GENERAL

VARIACIÓN CLINAL EN *PINUS HARTWEGII* A PARTIR DE CARACTERES FENOTÍPICOS PARA LA ESTACIÓN FORESTAL EXPERIMENTAL ZOQUIAPAN, MÉXICO

En México, las bajas tasas de supervivencia de planta en reforestaciones merman los esfuerzos de restauración ecológica, a pesar de ser una actividad clave en la recuperación de hábitats, de biodiversidad o de servicios ecosistémicos. Una de las razones es el uso de procedencias inadecuadas. Esto influye en la resistencia a frío y sequía, o en la velocidad de crecimiento, por lo que el germoplasma utilizado en reforestaciones debería ser (si es posible) de la misma zona geográfica y altitudinal o de menor altitud que el sitio a reforestar para compensar los efectos del cambio climático, para así aumentar la probabilidad de éxito en el establecimiento de individuos. Los objetivos del trabajo se centraron en determinar la variación que existe entre procedencias para rasgos fenotípicos de conos, semillas y acículas; en identificar si esto obedece a un cline ambiental, y en delimitar las zonas provisionales para el abastecimiento de germoplasma. El muestreo se realizó en ocho procedencias naturales de *Pinus hartwegii* Lindl., originadas cada 50 m de diferencia altitudinal, a lo largo de un transecto altitudinal (de 3265 a 3650 m s.n.m.), en el cerro "El Papayo", Ixtapaluca, Estado de México, México. Se analizó la variación entre procedencias y su patrón altitudinal. De las características analizadas (largo y ancho de semilla, largo de cono y longitud mayor de acícula; capacidad y velocidad germinativas) solo el *largo de semilla* ($p = 0.0058$) y la *capacidad germinativa* ($p < 0.0001$) indicaron diferencias entre procedencias. El patrón de distribución altitudinal resultó ser cuadrático para el *largo de semilla* ($p = 0.0144$ y una $r^2 = 0.88$) y para la *capacidad germinativa* ($p = 0.0456$ y una $r^2 = 0.7865$). Se delimitaron dos zonas para el abastecimiento y movimiento de germoplasma con anchos de 200 m de altitud y 1 °C de temperatura media anual. Se estimó un incremento en la temperatura media anual de 2.3 °C para el año 2060 y un movimiento altitudinal ascendente de las poblaciones de 400 m para compensarlo. Finalmente se sugieren lineamientos para el movimiento de germoplasma dentro y entre zonas con y sin considerar el cambio climático.

Palabras Clave: Cambio climático, zonificación, movimiento de germoplasma, *Pinus hartwegii*, variación clinal.

Tesis, Universidad Autónoma Chapingo, Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales
Autor: Adrián López López
Director de tesis: María Isabel Palacios Rangel, Dra.

GENERAL ABSTRACT

CLINAL VARIATION IN *PINUS HARTWEGII* FROM PHENOTYPIC CHARACTERS FOR THE ZOQUIAPAN EXPERIMENTAL FOREST STATION, MEXICO

In Mexico, low plant survival rates in reforestations undermine ecological restoration efforts, despite being a key activity in the recovery of habitats, biodiversity or ecosystem services. One of the reasons is the use of inadequate provenances. This influences resistance to cold and drought, or growth speed, so the germplasm used in reforestations should be (if possible) from the same geographical and altitudinal zone or lower altitude than the site to be reforested to compensate for the effects of climate change, in order to increase the probability of success in the establishment of individuals. The objectives of this work focused on determining the variation that exists among provenances for phenotypic traits of cones, seeds and needles; on identifying whether this is due to an environmental cline, and on delimiting provisional zones for germplasm supply. The sampling was carried out in eight natural provenances of *Pinus hartwegii* Lindl., originated every 50 m of altitudinal difference, along an altitudinal transect (from 3265 m to 3650 m), in the hill "El Papayo", Ixtapaluca, State of Mexico, Mexico. The variation among provenances and their altitudinal pattern was analyzed. Of the characteristics analyzed (seed length and width, cone length and maximum needle length; germination capacity and speed), only seed length ($p = 0.0058$) and germination capacity ($p < 0.0001$) indicated differences between provenances. The altitudinal distribution pattern was quadratic for seed length ($p = 0.0144$ and $r^2 = 0.88$) and germination capacity ($p = 0.0456$ and $r^2 = 0.7865$). Two zones were delimited for germplasm supply and movement with widths of 200 m altitude and 1 °C mean annual temperature. An increase in mean annual temperature of 2.3 °C was estimated for the year 2060 with an RCP of 6.0 and an upward altitudinal movement of the populations of 400 m to compensate for it. Finally, guidelines for germplasm movement within and between zones with and without considering climate change are suggested.

Key words: Climate change, zoning, germplasm movement, *Pinus hartwegii*, clinal variation.

Thesis, Universidad Autónoma Chapingo, Master of Science in Forest Science.

Author: Adrián López López

Advisor: María Isabel Palacios Rangel, Dr.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La restauración de un ecosistema se denomina pasiva cuando al no haber impedimentos éstos se regeneran por si solos, en contraste, al existir un elevado grado de perturbación es necesaria la intervención del hombre que ayude a su recuperación (restauración activa). En este sentido se pretende lograr volver a un estado de predisturbio, en el cual lo importante es recuperar la composición, estructura y función del ecosistema, así como de sus servicios ambientales, creando una organización sostenible y persistente que ayude a mejorar las condiciones de los núcleos poblacionales (Vargas, 2007). Además, las actividades de restauración de áreas prioritarias a nivel global, pueden ser clave para la mitigación del cambio climático y evitar la extinción de un gran porcentaje de especies a costos económicos relativamente bajos (Strassburg *et al.*, 2020).

Respecto a las acciones de restauración de ecosistemas terrestres en México Méndez-Toribio *et al.* (2018), reportaron que la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) se ha enfocado principalmente en zonas ubicadas en altitudes que se encuentran entre los 1000 y 3000 m s.n.m., esto considerando una categoría de altitud, que también corresponde a bosques templados; los proyectos de restauración terrestres para México utilizados en el estudio (periodo 1979 – 2017) sumaron un costo acumulado de USD 302 486 581, en donde las instituciones de gobierno fungieron (en mayor porcentaje de casos) como principales fuentes de financiamiento (sin definir la proporción que correspondió a cada nivel de gobierno: federal, estatal o municipal), además, las instituciones académicas fueron las principales diseñadoras y responsables técnicas. Respecto a la tenencia de la tierra tanto los ejidatarios como comuneros fueron los principales promotores y ejecutores.

Como propósitos de los trabajos de restauración terrestre se plantearon aspectos como la recuperación del hábitat, la conectividad para especies en peligro de extinción, recuperación de plantas y aves, recuperación de servicios

ecosistémicos (regulación climática, de enfermedades, entre otras); con tal fin, entre los aspectos tomados en cuenta en la ejecución existió el favorecer la regeneración natural y la selección de material biológico nativo, entre otros (Méndez-Toribio *et al.*, 2018).

Todas las actividades incluyendo los costos que conllevan tanto las reforestaciones como las restauraciones, en muchos casos se ven desacreditadas al obtener bajas tasas de supervivencia en planta después del primer año de plantadas. Hecho que se corresponde con el uso de especies y procedencias inadecuadas, ya que como mencionan Landis *et al.* (2010) la procedencia puede afectar al crecimiento y la tolerancia al frío. De esta manera, el origen del germoplasma utilizado para generar planta destinada a un determinado sitio de plantación debe ser de la misma zona geográfica y altitudinal (aclarando que esto sería sin considerar el cambio climático). Ante esto se ha propuesto aumentar el número de especies y procedencias que se produzcan en vivero, tener algún criterio encaminado a acoplar genotipos con ambientes, también llevar a cabo acciones en aras de la conservación de los recursos genéticos forestales (Sáenz-Romero y Linding-Cisneros, 2004).

En México las reforestaciones llevadas a cabo durante 2012 reportaron tasas de supervivencia del 30 % con una mejora en 2017, con un aumento al 60 % (CONAFOR, 2017). En el estado de Nuevo León, Sigala Rodríguez *et al.* (2015) reportaron una supervivencia general del 52.9%, para *P. pseudostrobus* 14 meses después de establecida la reforestación, presentándose mayor mortalidad en los primeros 97 días del 31.2 %. Por su parte, Robles Villanueva *et al.* (2017), evaluaron el efecto de la calidad de planta, reportando 88.6 % (exposición norte) y 83.3 % (exposición sur) de supervivencia de *Pinus montezumae* a 22 meses de llevarse a cabo una reforestación en el estado de Morelos. Ahora bien, Reyes González *et al.* (2019) evaluaron la supervivencia de árboles *P. montezumae*, *P. hartwegii* y *Abies religiosa*, utilizados en reforestaciones del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. En ese sentido, reportaron para el 2011 un 60% para *P. montezumae*, para 2014 un 54% para *P. hartwegii*, y para el 2015

un 89 % y 86 % para *P. montezumae* y *P. hartwegii*, respectivamente. Para *A. religiosa* se reportaron supervivencias del 61% en el 2011 y del 81% en el 2012.

En el estado de Durango, un estudio con *P. engelmannii*, cuyo fin fue evaluar el efecto de micorrizas y la fertilización sobre la supervivencia de la planta en campo, reportó una supervivencia general del 70.4 % con valores mínimos y máximos de 57.5 y 82.5 % respectivamente (Salcido Ruiz *et al.*, 2021); respecto a *P. hartwegii* en el volcán Ajusco, Distrito Federal Ortega-Baranda y Rodríguez-Trejo (2007) en un estudio preliminar de supervivencia (después de 6 meses de establecida la reforestación) en áreas tratadas con fuego reportaron tasas entre el 58.8 y 87.7 %; y en la Ciudad de México, con el objetivo de evaluar el efecto que pueden ejercer distintas plantas nodriza en la supervivencia de plántulas de *P. hartwegii*, se obtuvieron valores en el rango de 82 a 85 % (Ramírez-Contreras y Rodríguez-Trejo, 2009).

Inherente a lo anterior, la relación existente entre la tasa de supervivencia con las condiciones ambientales preponderantes en el sitio puede ser clave en el éxito del establecimiento de individuos, como mencionan Méndez-Toribio *et al.* (2018): la evaluación de las condiciones ambientales propicias (por ejemplo, la temperatura, la cual puede tomar aún mayor relevancia debido al cambio climático) en el sitio para el crecimiento de plantas es una variable que ha constituido parte de la línea base en proyectos de restauración en el país.

Landis *et al.* (2010) mencionan que es un deber evaluar las condiciones del sitio de plantación, basándose en el principio ecológico de factores limitantes, citando por ejemplo, que el crecimiento de la raíz merma por debajo de los 10 °C, caso que puede presentarse en sitios de mayor altitud o latitud norte, siendo en este caso la temperatura un factor limitante; además, Capó Arteaga (2006) concuerda en que la selección de la procedencia del germoplasma utilizado en una plantación es fundamental para el éxito de la misma.

Puesto que el aumento del número de especies y procedencias producidas es una opción para mejorar el establecimiento de plántula en los sitios de

reforestación de manera local, se han llevado a cabo investigaciones en las cuales se ha encontrado diferenciación genética entre poblaciones a lo largo de gradientes ambientales, tal es el caso de *Pinus hartwegii* (Viveros-Viveros *et al.*, 2009 y Loya-Rebollar *et al.*, 2013). Así mismo, otra manera de contribuir al mismo objetivo es la realización de investigación sobre la variación en atributos morfológicos, pudiendo ayudar a delimitar zonas de aprovisionamiento y movimiento de germoplasma de manera provisional mediante conos, semillas o acículas (Aparicio-Rentería *et al.*, 2020).

Estudios como los mencionados contribuyen a conocer parte de la variación genética de las poblaciones forestales, ayudando al manejo y conservación de los recursos genéticos forestales por los cuales actualmente existe preocupación debido al cambio climático que repercute en la distribución de hábitats adecuados para varias coníferas, entre ellas *P. hartwegii* (Gómez-Pineda *et al.*, 2020); por otra parte, estos recursos genéticos locales poseen valores económicos, ecológicos, estéticos y éticos y, si llegaran a perderse podría ser imposible su recuperación (Ledig, 2004).

1.1. Antecedentes

Relacionado al tema de investigación, sobre la variación clinal (para caracteres cuantitativos) existente en especies forestales y su vínculo con la adaptación de sus poblaciones al ambiente, así como su uso estratégico de manejo para la mejora de tasas de supervivencia de planta en campo, en México hay investigación que encontró existencia de variación genética en el crecimiento de plántulas originadas de poblaciones inmersas en un gradiente altitudinal en el caso de *P. hartwegii* (Viveros-Viveros *et al.* (2009); mientras que Loya-Rebollar *et al.* (2013) la apreciaron para varias características, reportando que existe un patrón de diferenciación genética que puede atribuirse al clima y a la altitud;

Para *P. devoniana* Castellanos-Acuña *et al.* (2013) reportaron la existencia de un patrón de crecimiento a los 3 y 5 meses relacionado con la altitud; para *P. patula* Ruíz-Talonia (2010) halló una relación entre la altitud y las variables altura y

diámetro de planta durante su crecimiento en vivero, y en pruebas de campo la halló a los 18 y 24 meses de edad para la altura de planta. Para la especie *Abies religiosa* Ortiz-Bibian et al. (2017) encontraron una significativa asociación entre la altitud de origen de la semilla y las variables elongación total de planta y daño por heladas; un caso más fue con el espécimen arbustivo *Lupinus elegans* donde se halló diferenciación genética entre procedencias (altitudes) para la altura y biomasa aérea de plantas a los 10 meses de edad, además de la asociación de ambos parámetros con la altitud (Soto-Correa et al., 2012).

Estos casos de estudio contribuyeron a la búsqueda de adaptaciones en poblaciones naturales de especies con el fin de que la información encontrada pudiera servir en el manejo y planeación de reforestaciones, así como en el movimiento de germoplasma dentro de gradientes ambientales.

En aras de contribuir al mismo fin, se realizó investigación sobre la variación de atributos morfológicos (acículas, conos y semillas), que puede ayudar a la delimitación de zonas provisionales para el aprovisionamiento y movimiento de germoplasma (Aparicio-Rentería et al., 2020). Estos autores reportaron la existencia de variación clinal a lo largo de un gradiente ambiental para *P. patula* en caracteres de cono y ancho de semilla; para la misma especie Viveros-Viveros et al. (2013) lo hallaron para el grueso de cono, ancho de quilla, longitud de vaina de la acícula y longitud de acícula. Del mismo modo, Castellanos-Acuña et al. (2014) reportan resultados similares para *Abies religiosa* en largo de cono y longitud de acícula, Ortiz-Bibian et al. (2019) lo respaldan con su hallazgo en variables como viabilidad y germinación de semilla.

Para *P. hartwegii* Iglesias et al. (2012) publicaron la existencia de diferenciación morfológica para caracteres foliares, de cono y semilla entre dos poblaciones del estado de Veracruz, indicando la existencia de heterogeneidad morfológica dentro de poblaciones, con ecotipos que difieren entre las poblaciones del Pico de Orizaba y el Cofre de Perote, pero no se supo si la diferenciación entre las dos poblaciones se relacionaba con alguna condición ambiental.

Para el caso de especies hojosas o latifoliadas también se han reportado hallazgos similares como ocurre con *Quercus rugosa* para el tamaño de hoja y su cline con la latitud (Uribe-Salas *et al.*, 2008); para la misma especie Pérez Gómez (2016) reportó diferencia significativa ($p < 0.05$) entre procedencias (diferentes altitudes), donde las semillas de la menor altitud recolectada difieren de las otras dos altitudes para el largo de semilla, pero no se define la existencia de un cline respecto a la altitud, además, en la prueba de transferencia recíproca los parámetros evaluados en la germinación (capacidad germinativa, tiempo de inicio de la germinación y velocidad de germinación) mostraron diferencias entre sitios.

1.2. Justificación

La variación fenotípica o genética atribuida a factores ambientales (en este caso la altitud como indicador de variación continua de temperatura, humedad, etc.) o a la localización de poblaciones forestales se ha comprobado en estudios realizados para México. Respecto a *Pinus hartwegii* existen estudios en el Cofre de Perote, Pico de Orizaba y Pico de Tancítaro, zonas montañosas que forman parte del Eje Neo-volcánico Transversal.

El planteamiento del presente estudio se basa en publicaciones realizadas con fines análogos en diferentes lugares y especies, y pretende confirmar la hipótesis de que existe variación fenotípica (y posiblemente genética) entre poblaciones de *P. hartwegii* atribuible a la altitud para la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ).

De ser el caso, ello contribuirá a confirmar lo hallado por otros autores y, principalmente beneficiará a la conservación y manejo de los recursos genéticos de la especie siempre y cuando se tome en cuenta para la recolección y movimiento de germoplasma dentro de zonas altitudinales, en la producción de plántula y establecimiento de reforestaciones o restauraciones que se lleven a cabo dentro de la EFEZ, ya que se entendería que dicho material estaría mejor adaptado y tendrían un mejor desarrollo dentro de esas zonas,

consecuentemente beneficiaría a los asentamientos humanos mediante la continuidad en la generación de servicios ambientales.

Aunque sea provisional, una zonificación basada en variación fenotípica de caracteres con posible valor adaptativo, puede indicar plasticidad fenotípica debida a la presión de selección ejercida por el ambiente, lo cual es una señal de adaptación de las poblaciones en su actual sitio de distribución.

1.3. Planteamiento del problema

Para contestar la disyuntiva de cómo mejorar el establecimiento de plántula en los sitios de reforestación de manera local, resulta necesario identificar la existencia de variación fenotípica entre procedencias de *Pinus hartwegii* asociadas a un gradiente altitudinal en la EFEZ, mediante la evaluación de caracteres morfológicos y germinativos que ayuden a delimitar zonas provisionales para el aprovisionamiento de germoplasma que apoye el establecimiento de plantas en programas de reforestación y la conservación de los recursos genéticos forestales, aludiendo al hecho de que las poblaciones pueden estar mejor adaptadas a condiciones particulares dentro de su distribución natural.

1.4. Problema de investigación

Con base en lo expuesto en el apartado previo, la interrogante que guía esta investigación es ¿existirá variación fenotípica en las poblaciones de *Pinus hartwegii* que pueda ser asociada a un gradiente altitudinal en la EFEZ? Esto podría ayudar a delimitar zonas preliminares de aprovisionamiento de germoplasma que funjan como referencia para actividades de reforestación y conservación de recursos genéticos forestales.

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Cuantificar la magnitud de la variación clinal asociada a la altitud entre procedencias de *Pinus hartwegii*, mediante la evaluación de caracteres fenotípicos que ayuden a delimitar zonas provisionales para el movimiento de germoplasma en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), México.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar el nivel de variación de caracteres fenotípicos entre procedencias (originadas a diferentes altitudes) de *Pinus hartwegii* para el tamaño de semilla, tamaño de cono, longitud de acícula, capacidad germinativa y velocidad germinativa de semilla, y con ello, definir si existe un patrón de variación clinal para la EFEZ.
- Definir zonas altitudinales para el aprovisionamiento y movimiento de germoplasma en función de la variación clinal.

1.6. Preguntas de investigación

¿Existirá variación fenotípica en *P. hartwegii* asociada a la altitud? Dado el caso ¿cómo se puede determinar dicha variación?

Si se determinara ¿podría esta variación ser utilizada para mejorar el establecimiento de planta en programas locales de reforestación, aludiendo a que las poblaciones pueden estar mejor adaptadas a condiciones particulares del lugar y, por consiguiente, ayudar con la conservación y manejo de los recursos genéticos de la especie para su sostenimiento en un largo plazo?

1.7. Hipótesis

- El tamaño de la semilla, conos y acículas de *Pinus hartwegii* variará entre altitudes, en donde las procedencias originadas a menor altitud tendrán valores más grandes, que es un patrón que se ha observado en otras especies.
- La capacidad germinativa y la velocidad germinativa de *Pinus hartwegii* variará entre altitudes, en donde las procedencias originadas a menor

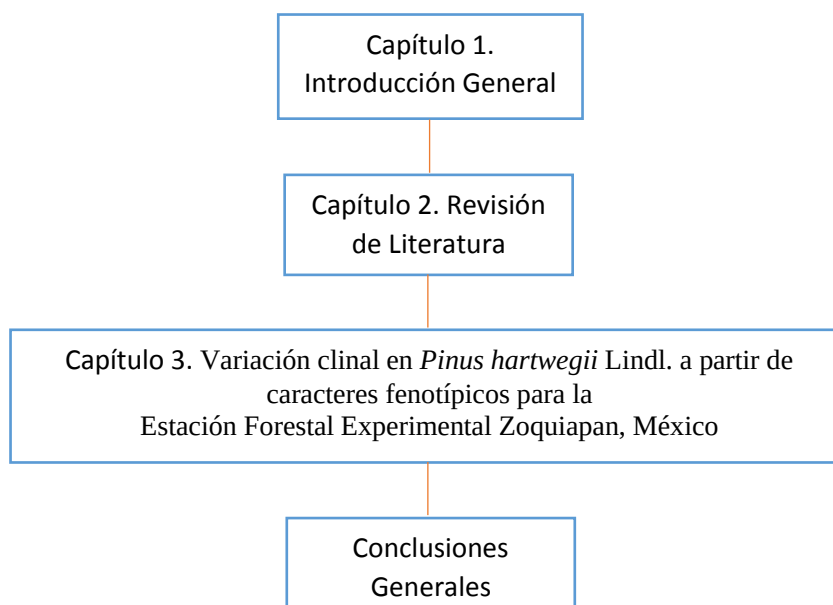
altitud tendrán valores menores (por estar posiblemente más estresadas por las mayores temperaturas y menor precipitación)

1.8. Contenido capitular del documento de titulación

El documento de titulación incluye el siguiente contenido: una portada principal, hoja de aprobación del comité asesor, tabla de contenidos, lista de cuadros, lista de figuras, dedicatoria, agradecimientos, datos biográficos del autor, resumen general y abstract.

Posteriormente, en el **capítulo uno** se presenta la *Introducción general*, antecedentes, justificación, planteamiento del problema, problema de investigación, objetivos generales y específicos, preguntas de investigación, hipótesis, contenido capitular, figura del contenido o estructura y por último la bibliografía consultada. En el **capítulo dos** se presenta la *Revisión de literatura*. En el **capítulo tres** se presentan los resultados de investigación en formato de *Artículo científico*, con base en las normas editoriales de la Revista Polibotánica. El **último apartado** muestra las *Conclusiones generales* a las que se llegó al concluir el proceso de investigación.

1.9. Estructura capitular del documento de titulación



1.10. Literatura citada

- Aparicio-Rentería, A., Viveros-Viveros, H., Hernández-Villa, J., Sáenz-Romero, C., Ruiz-Montiel, C., y Pineda Posadas, J. A. (2020). Zonificación altitudinal de *Pinus patula* a partir de conos y semillas en la sierra de Huayacocotla, Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 26(2), 1–12. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621962>
- Capó Arteaga, M. A. (2006). La importancia del manejo de germoplasma en plantaciones forestales. En N. A. Ruíz Torres (Ed.), *Producción Y Conservación de Semilla Forestales*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. https://www.researchgate.net/publication/257931811_PRODUCION_Y_CONSERVACION_DE_SEMILLAS_FORESTALES
- Castellanos-Acuña, D., Lindig-Cisneros, R. A., Silva-Farias, M. Á., y Sáenz-Romero, C. (2014). Zonificación Altitudinal Provisional de *Abies religiosa* en un área cercana a la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XX(2), 215–225. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.11.041>
- Castellanos-Acuña, D., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Sánchez-Vargas, N. M., Lobbit, P., y Montero-Castro, J. C. (2013). Variación Altitudinal entre Especies y Procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla*. Ensayo de Vivero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XIX(3), 399-411. <https://doi.org/doi:10.5154/r.rchscfa.2013.01.002>
- CONAFOR, C. N. F. (2017). *Alcanza 63% sobrevivencia de árboles plantados este sexenio*. gob.mx. <http://www.gob.mx/conafor/prensa/aumenta-63-la-sobrevivencia-de-arboles-plantados-este-sexenio>
- Gómez-Pineda, E., Sáenz-Romero, C., Ortega-Rodríguez, J. M., Blanco-García, A., Madrigal-Sánchez, X., Lindig-Cisneros, R., Lopez-Toledo, L., Pedraza-Santos, M. E., y Rehfeldt, G. E. (2020). Suitable climatic habitat changes for Mexican conifers along altitudinal gradients under climatic change scenarios. *Ecological Applications*, 30(2), 1–17. <https://doi.org/10.1002/eap.2041>
- Iglesias, L., Solís-Ramos, L., y Viveros-Viveros, H. (2012). Variación morfométrica en dos poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lindl. Del estado de Veracruz. *REVISTA INTERNACIONAL DE BOTÁNICA EXPERIMENTAL INTERNATIONAL JOURNAL OF EXPERIMENTAL BOTANY*, 81, 239–246. <http://www.revistaphyton.fundromuloraggio.org.ar/vol81/35-IGLESIAS.pdf>

- Landis, T. D., Dumroese, R. K., y Haase, D. L. (2010). *The container Tree Nursery Manual. Volume Seven, Seedling Processing, Storage, and Outplanting* (Vol. 7). U.S. Department of Agriculture, Forest Service. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=W9VRAQAAMAAJ&oi=fnd&pg=PA11&dq=Landis+2002+manual+volumen+7+capitulo+1&ots=lbxkZyN2V1&sig=ayOUxLni1y17_LQJzh56Q9WSVfY#v=onepage&q&f=false
- Ledig, T. F. (2004). Manejo de Recursos Genéticos Forestales. En J. J. Vargas H., B. Bermejo V., y T. F. Ledig (Eds.), *Manejo de Recursos Genéticos Forestales* (Segunda edición, p. 209). Colegio de Postgraduados; Universidad Autónoma Chapingo; CONAFOR.
- Loya-Rebollar, E., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Lobit, P., Villegas-Moreno, J. A., y Sánchez-Vargas, N. M. (2013). Clinal variation in *Pinus hartwegii* populations and its application for adaptation to climate change. *Silvae Genetica*, 62(3), 86–95. <https://doi.org/10.1515/sg-2013-0011>
- Méndez-Toribio, M., Martínez-Garza, C., Ceccon, E., y Guariguata, M. R. (2018). *La restauración de ecosistemas terrestres en México: Estado actual, necesidades y oportunidades*. Center for International Forestry Research (CIFOR). <https://doi.org/10.17528/cifor/006853>
- Ortega-Baranda, V., y Rodríguez-Trejo, D. A. (2007). SUPERVIVENCIA Y CRECIMIENTO INICIALES Y CONCENTRACIÓN DE NUTRIMENTOS DE *Pinus hartwegii* PLANTADO EN LOCALIDADES QUEMADAS. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13(2), 115–124. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62913204>
- Ortiz-Bibian, M. A., Blanco- García, A., Lindig - Cisneros, R. A., Gómez-Romero, M., Castellanos-Acuña, D., Herrerías - Diego, Y., Sánchez-Vargas, N. M., y Sáenz-Romero, C. (2017). Genetic Variation in *Abies religiosa* for Quantitative Traits and Delineation of Elevational and Climatic Zoning for Maintaining Monarch Butterfly Overwintering Sites in Mexico, considering Climatic Change. *Silvae Genetica*, 66(1), 14–23. <https://doi.org/DOI:10.1515/sg-2017-0003>
- Ortiz-Bibian, M. A., Castellanos-Acuña, D., Gómez-Romero, M., Lindig-Cisneros, R., Silva-Farías, M. Á., y Sáenz-Romero, C. (2019). VARIACIÓN ENTRE POBLACIONES DE *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. Et Cham A LO LARGO DE UN GRADIENTE ALTITUDINAL. I. CAPACIDAD GERMINATIVA DE LA SEMILLA. *Revista fitotecnia mexicana*, 42(3), 301–308. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802019000300301&script=sci_arttext
- Pérez Gómez, M. T. (2016). *Efecto de la procedencia en la germinación de las semillas de Quercus rugosa Née en Los Altos de Chiapas* [Tesis de maestría]. El Colegio de la Frontera Sur. <https://biblioteca.ecosur.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=000009325>
- Ramírez-Contreras, A., y Rodríguez-Trejo, D. A. (2009). PLANTAS NODRIZA EN LA REFORESTACIÓN CON *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Chapingo Serie*

- Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(1), 43–48.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182009000100005#:~:text=En%20el%20Ajusco%2C%20Distrito%20Federal,y%20en%20peque%C3%B1os%20claros%20naturales.
- Reyes González, E., Hernández Jardines, G., y Calvillo Arriola, A. (2019). Evaluación de la supervivencia en sitios reforestados como indicador de la restauración del paisaje en el área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. *Tlalli. Revista de Investigación en Geografía*, 1(2), 97–117.
<https://doi.org/10.22201/ffyl.26832275e.2019.2.1087>
- Robles Villanueva, F. A., Rodríguez Trejo, D. A., y Villanueva Morales, A. (2017). Calidad de planta y supervivencia en reforestación de *Pinus montezumae* Lamb. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42), 22.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i42.19>
- Ruíz-Talonia, L. F. (2010). *Variación genética altitudinal entre procedencias de Pinus patula Schltdl. & Cham. En ensayos de vivero y campo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca*. [Tesis de maestría] UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.
http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/1832
- Sáenz-Romero, C., y Linding-Cisneros, R. (2004). *Evaluación y propuestas para el programa de reforestación en Michoacán, México*. 37, 107-122.
https://www.researchgate.net/publication/291785913_Evaluacion_y_propuestas_para_el_programa_de_reforestacion_en_Michoacan_Mexico
- Salcido Ruiz, S., Prieto Ruíz, J. Á., Santana Aispuro, E., Chávez Simental, J. A., y Madrid Aispuro, R. E. (2021). Supervivencia y crecimiento de *Pinus engelmannii* Carr. En una reforestación por micorrización y fertilización. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(64), 45–65.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.847>
- Sigala Rodríguez, J. Á., González Tagle, M. A., y Jiménez Pérez, J. (2015). Análisis de supervivencia para una reforestación con *Pinus pseudostrobus* Lindl. En el sur de Nuevo León. *Ciencia UANL*, 18(75), 61–66.
<https://biblat.unam.mx/fr/revista/ciencia-uanl/articulo/analisis-de-supervivencia-para-una-reforestacion-con-pinus-pseudostrobus-lindl-en-el-sur-de-nuevo-leon>
- Soto-Correa, J. C., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R., Sánchez-Vargas, N., y Cruz-de-León, J. (2012). GENETIC VARIATION BETWEEN *Lupinus elegans* Kunth PROVENANCES, ALTITUDINAL SEED ZONING AND ASSISTED MIGRATION. *AGROCIENCIA*, 46(6), 593–608.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000600006
- Strassburg, B. B. N., Iribarrem, A., Beyer, H. L., Cordeiro, C. L., Crouzeilles, R., Jakovac, C. C., Braga, A., Lacerda, E., Latawiec, A. E., Balmford, A., Brooks, T. M., Butchart, S. H. M., Chazdon, R. L., Erb, K.-H., Brancalion,

- P., Buchanan, G., Cooper, D., Díaz, S., Donald, P. F., ... Visconti, P. (2020). Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, 586, 724–729. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2784-9>
- Uribe-Salas, D., Sáenz-Romero, C., González-Rodríguez, A., Téllez-Valdéz, O., y Oyama, K. (2008). Foliar morphological variation in the white oak *Quercus rugosa* Née (Fagaceae) along a latitudinal gradient in Mexico: Potential implications for management and conservation. *Forest Ecology and Management*, 256(12), 2121–2126. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.08.002>
- Vargas, O. (2007). Los pasos fundamentales en la restauración ecológica. En O. Vargas (Ed.), *Guía Metodológica para la Restauración ecológica del Bosque Altoandino* (Primera edición, p. 189). Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Biología; Convenio interinstitucional Acueducto de Bogotá-Jardín Botánico-Secretaría Distrital de Ambiente. https://www.researchgate.net/publication/275771783_Guia_Metodologica_para_la_Restauracion_Ecologica_del_Bosque_Altoandino
- Viveros-Viveros, H., Camarillo-Luna, A. R., Sáenz-Romero, C., y Aparicio-Rentería, A. (2013). Variación altitudinal en caracteres morfológicos de *Pinus patula* en el estado de Oaxaca (México) y su uso en la zonificación. *Bosque*, 34(2), 11–12. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002013000200006>
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Ramírez-Valverde, G., y Santacruz-Varela, A. (2009). Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management*, 257(3), 836–842. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.021>

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1.1 Adaptación de árboles al ambiente

Que las especies sean capaces de adaptarse a un entorno es sustancial para su supervivencia y por ende para la generación de servicios ecosistémicos. Como cita Herrero (2017): condiciones adversas como la sequía puede desatar mecanismos orientados a la mortalidad de árboles, muchas veces poblaciones adaptadas localmente muestran mayor eficacia reproductiva que poblaciones foráneas, además, poblaciones con alta variación genética o plasticidad fenotípica probablemente respondan mejor al cambio climático. La importancia de la adaptación actualmente trasciende a hacer frente al cambio climático global, como lo indican Brang et al. (2014) quienes sugieren seis principios de adaptación que pueden ayudar al manejo de bosques.

La supervivencia de una especie depende de su adaptación y aclimatación a las condiciones ambientales. En relación con esto, tanto las bajas temperaturas (Cavieres y Piper, 2004) como las sequías son factores limitantes en la distribución de las especies arbóreas. La relación que ambos factores tienen con estructuras como las hojas es primordial, ya que las hojas son consideradas un "cuello de botella" en el transporte de agua ocurrido en el suelo-planta-atmósfera, pues las variaciones en el sistema vascular foliar tienen consecuencias en el transporte de agua para la planta, además de limitar la productividad y la aptitud competitiva (di Francescantonio, 2017).

Las bajas temperaturas tienen efectos negativos como positivos en diferentes procesos durante la vida de las plantas, entre ellos la generación de hielo intracelular, que puede ser letal. Se sabe que las plantas hacen uso de mecanismos (evasión y tolerancia) para resistir las bajas temperaturas. La evasión consiste básicamente en mitigar el frío y evitar la formación de hielo a

temperaturas de congelación; este mecanismo es útil cuando los periodos de frío son moderados y se producen durante cortos periodos de tiempo. Por su parte, el mecanismo de tolerancia sirve cuando las heladas son perpetuas y severas, por lo que la planta resiste el hielo extracelular; implica la aclimatación a ambientes fríos mediante modificaciones morfológicas, anatómicas, fisiológicas y bioquímicas (di Francescantonio, 2017).

En este sentido, di Francescantonio (2017) encontró a través de un estudio relacionado con la resistencia de las hojas a eventos de sequía y bajas temperaturas que, en general, las especies siempreverdes mostraron mayor tolerancia a la formación de hielo extracelular en comparación con las especies brevidecíduas y deciduas. Por el contrario, las especies perennifolias mostraron una menor tolerancia a los eventos de estrés hídrico en comparación con los otros dos grupos de especies. De este modo, también se detectó que el mecanismo más utilizado para resistir las bajas temperaturas fue la evasión en las especies deciduas y la tolerancia en las especies siemprevivas.

Un rasgo foliar asociado a la resistencia a las bajas temperaturas en las plantas, es la rigidez de las paredes celulares, medida a partir del módulo de elasticidad, así las paredes más rígidas tienen una menor conductancia hidráulica en las hojas, pero paralelamente aumentan la resistencia a la formación de hielo. Por otro lado, paredes celulares aparentemente más elásticas se relacionan con una mejor resistencia a eventos de estrés hídrico o sequía (di Francescantonio, 2017).

Por otra parte, la interacción entre los factores bióticos y climáticos da lugar a cambios fenológicos a lo largo de la vida de una especie. Así, en el caso de las plantas, tanto la temperatura como las precipitaciones están relacionadas con las respuestas fenológicas de los individuos, aunque esto varía según la especie. La temperatura y la cantidad de horas diarias de luz están relacionadas con la caída de las hojas en las especies deciduas, tan importante es el papel de la temperatura que en las zonas subtropicales la estacionalidad está ligada a ella y no a la precipitación. Además, se ha reportado para especies del Bosque

Atlántico semideciduo (Argentina) como *Ceiba speciosa*, *Lonchocarpus muehlbergianus*, *Parapiptadenia rigida*, *Chrysophyllum gonocarpum*, que la brotación de las hojas se relaciona con el aumento de la temperatura, mientras que para especies como *Cedrela fissilis* y *Cordia trichotoma* ocurre cuando se alcanzan ciertas temperaturas mínimas. Esto indica que las especies deciduas tienen una estrecha relación entre su fenología y el clima, por lo que las variaciones climáticas podrían afectarlas (di Francescantonio, 2017).

Otra relación de las hojas con el entorno se observa en especies que generan nuevas hojas casi inmediatamente después de perderlas, y otras especies sólo las expanden inmediatamente si existen condiciones favorables. Además, parece que la capacidad fotosintética de especies como *Ceiba speciosa*, *Lonchocarpus muehlbergianus*, *Parapiptadenia rigida*, *Chrysophyllum gonocarpum*, *Cedrela fissilis*, *Cabralea canjerana*, *Ocotea diospyrifolia* *Balfourodendron riedelianum*, *Holocalyx balansae* y *Cordia trichotoma* está limitada por las bajas temperaturas, lo que sugiere que este factor ambiental podría estar limitando los rangos de distribución geográfica de muchos árboles subtropicales (di Francescantonio, 2017).

Este autor también reportó que el crecimiento para especies deciduas, brevideciduas y siempreverdes mostró una asociación positiva y significativa ($r = 0.62$, $r = 0.69$ y $r = 0.65$ respectivamente, y un $p < 0.001$) con el aumento de temperaturas medias, más no fue así para la precipitación. Básicamente el crecimiento en las plantas depende de dos procesos acontecidos en las hojas que son: el intercambio de gases mediante los estomas y el fijar carbono en los tejidos fotosintéticos. Según Cavieres y Piper (2004) las yemas son otra de las estructuras en árboles para las cuales se ha indicado que llegan a soportar temperaturas menores a las alcanzadas en sus ambientes naturales. Lo cual indica adaptación a través de rangos de tolerancia ante variables ambientales como las bajas temperaturas

En cuanto a los límites de distribución arbórea y, dado que los individuos en estos límites están condicionados a adaptarse o no a valores climáticos que actúan

como umbral entre la colonización y su límite de distribución, se han reportado correlaciones que indican una asociación entre el límite de distribución altitudinal con periodos mínimos de 30 días que presentan temperaturas medias superiores a 10 °C. En el mismo sentido, se ha mostrado una relación lineal entre el límite altitudinal de los árboles y las variables temperatura media anual y amplitud térmica estacional en zonas templadas; aunque si se quisiera incluir zonas templadas y tropicales, la temperatura media durante la estación de crecimiento que se ha asociado con los límites altitudinales de distribución de los árboles oscila entre 5 y 7 °C (Cavieres y Piper, 2004).

Se ha observado que el tiempo requerido para la duplicación celular tiende a aumentar considerablemente cuando las temperaturas son más bajas, por lo que se ha sugerido que las bajas temperaturas son un factor determinante en la adaptación de los árboles y delimitan su distribución. En relación con esto, se sabe que la acumulación de compuestos lipídicos y de carbono está asociada a la resistencia a las heladas; además, la desecación producida en invierno también interviene en el desarrollo de los árboles y, en consecuencia, en su rendimiento. La fotoinhibición es otra consecuencia asociada a las bajas temperaturas y a la alta radiación solar, que se incrementa a mayor altitud (Cavieres y Piper, 2004).

El desarrollo de estrategias adaptativas en las plantas, que utilizan para tolerar eventos ambientales extremos está en función de la plasticidad que poseen como individuos (Medellín-Zabala, 2018).

2.1.2. Cambio climático

Los cambios a largo plazo en las temperaturas y los patrones climáticos es lo que se conoce como cambio climático, que puede ser natural, o como ocurre desde el siglo XIX, impulsado por el hombre. Así, la quema de combustibles fósiles genera en primer lugar emisiones de gases de efecto invernadero que provocan el aumento de las temperaturas del planeta. Como resultado, la temperatura del planeta es 1.1 °C más alta que a finales del siglo XIX. Las consecuencias de este

cambio son sequías más intensas, incendios más graves, deshielo de los polos y reducción de la biodiversidad (Naciones Unidas, s/f).

No superar los 1.5 °C de aumento de temperatura nos ayudará a evitar las peores consecuencias, sin embargo, se estima que a finales del siglo XXI se alcanzará un aumento de hasta 3.2 °C. Una forma importante de alcanzar este objetivo es el cambio de los sistemas energéticos de combustibles fósiles al uso de energías renovables (Naciones Unidas, s.f.). De hecho, la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en su *Informe provisional sobre el estado del clima mundial en 2021*, informa de que los últimos siete años podrían ser los más cálidos de los que se tiene constancia.

En cuanto a la temperatura, el año 2021 superó en 1.09 °C la temperatura media del periodo 1850-1900. Por otra parte, la disminución de la masa de los glaciares de América del Norte casi se duplicó durante el período 2015-2019 (a partir de 2015, comenzaron los siete años más cálidos registrados) en comparación con el período 2000-2004. Hablando de eventos extremos, el 29 de junio de 2021 en Lytton, Columbia Británica, se registró una temperatura de 49.6 °C, batiendo el récord de Canadá en 4.6 °C, produciéndose terribles incendios al día siguiente; el 9 de julio, en el llamado Valle de la Muerte en California, Estados Unidos, se registró una temperatura de 54.4 °C. Eventos similares se observaron en el otro lado del mundo: el 14 de agosto de 2021 en Montoro, España, se reportó una temperatura de 47.4 °C, estableciendo un récord nacional, por mencionar sólo un ejemplo, ya que hubo varios eventos extremos (Naciones Unidas, s.f.).

Durante la década 2000-2010 la temperatura media anual de la tierra (excluyendo a los océanos) fue 0.8 °C superior respecto a la temperatura media anual del periodo 1961-1990. También se conoce que los eventos de temperaturas extremas (olas de calor) han sido más frecuentes, durante el periodo 1951-1990 ocurrieron en promedio sobre el 1 % de la superficie terrestre, mientras que para el periodo 1981-2010 se presentaron sobre el 10 % de la superficie terrestre. Desgraciadamente estos fenómenos muy probablemente continuarán debido a la acumulación de CO₂ en la atmósfera terrestre (Sáenz-Romero *et al.*, 2016).

La predicción del aumento de temperatura estimada a partir de los Modelos de Circulación Global para escenarios de tiempo futuros, ha dado pauta a pensar en cómo este fenómeno presionará a las diferentes poblaciones forestales dentro de su distribución actual y, por consiguiente, el estado futuro de los bosques; es así que se ha propuesto la reforestación de sitios en los cuales se prevé un incremento de temperatura a futuro con individuos genéticamente adaptados a dichas condiciones de clima, como medida de adaptación (Sáenz-Romero *et al.*, 2016). De manera general el cambio climático que se está presentando repercute sobre los diferentes ecosistemas, así como a los servicios ambientales que nos brindan; además la degradación de los mismos modifica su capacidad de resiliencia (OMM, 2021).

Impacto del cambio climático en árboles

Los cambios en el clima que se han detectado a nivel global pueden tener un efecto sobre la distribución geográfica de las poblaciones bióticas. Por una parte, la baja temperatura es el factor que comúnmente determina los límites de la distribución en las más elevadas altitudes y/o en dirección a los polos, temperaturas que se espera sean menos severas en el futuro próximo. Por otra parte, las altas temperaturas y el déficit hídrico son los factores que suelen determinar el límite de distribución en las zonas sureñas y/o más cercanas al ecuador, para los cuales se espera valores más altos. Es así que los límites de distribución pueden expandirse, contraerse o desplazarse (Matías, 2012).

Otros aspectos que pueden verse comprometidos en los ecosistemas debido a alteraciones en el clima son: la introducción de especies, extinción, efectos sobre la fenología, la fisiología y la dinámica poblacional, además de perturbaciones en las interacciones bióticas; más específicamente para las especies arbóreas se esperan cambios en el crecimiento, en las tasas reproductivas y en el reclutamiento de individuos (Matías, 2012).

Retomando lo anterior, en la producción de semilla se estima que en árboles y en el frente de avance de las poblaciones (límite de distribución ubicado a mayor

altitud o latitud) aumente como lo ha hecho ya en algunas especies del país finlandés, lo que apoya a la idea de expansión de las poblaciones debido al calentamiento global. De la misma manera se ha detectado un mayor reclutamiento de individuos en los límites de distribución altitudinales y latitudinales, que induce un avance en el rango de distribución. En el mismo sentido, el crecimiento es otra característica determinada por el clima y que se ha relacionado con el alza de temperaturas.

En el límite sur y/o menor altitud de distribución, también se han detectado impactos que sugieren el retroceso en la distribución de especies arbóreas como una consecuencia del incremento de sequías y temperaturas, en donde el reclutamiento y el crecimiento de árboles están siendo mermados y como consecuencia las poblaciones son más receptivas a patógenos y a la muerte. En este sentido se espera que los brotes de plagas sean más explosivos y por ende más agresivos hacia los árboles, además de un despliegue de patógenos hacia mayores altitudes y latitudes, esto último podría generar nuevas interacciones entre especies que no han tenido contacto previo de manera histórica (Matías, 2012).

Como menciona Sáenz-Romero et al. (2016) las diferentes especies, así como las poblaciones de especies forestales se han adaptado por evolución a las condiciones del lugar donde crecen, por ejemplo: al clima, suelo, etc. Esta adaptación puede ser a nivel genético, lo que apunta a que, a pesar de representar a la misma especie, poseen rasgos adaptativos que las diferencia entre sí, esto les proporciona la facultad de sobrevivir, crecer, competir y reproducirse en un entorno particular. Un ejemplo muy adecuado, ocurre en aquellas especies forestales que se desarrollan a lo largo de un gradiente altitudinal continuo, en el cual las poblaciones a mayores altitudes crecen menos y por un periodo menor de tiempo, además poseen una mayor resistencia a heladas, en comparación de las poblaciones ubicadas a menor altitud, quienes crecen más por un periodo más largo de tiempo y presentan mayor susceptibilidad al daño por heladas (Rehfeldt *et al.*, 1998).

Continuando en el mismo plano, el estudio de caracteres con valor adaptativo de especies arbóreas es actualmente muy valorado en la investigación del cambio climático y su amenaza hacia masas forestales. En este contexto, existen casos como los del género *Nothofagus*, donde a través de ensayos de trasplante recíproco dentro y fuera de su distribución natural y con datos de su primera temporada de crecimiento en la Patagonia Argentina, resultó que *N. pumilio* creciendo a 1340 msnm (área de distribución natural) presentó en promedio, mayores valores en la concentración de pigmentos fotosintéticos, crecimiento, fluorescencia de clorofila y, menores valores en la concentración de antocianinas, contrastando con los individuos creciendo a la altitud de 680 msnm (fuera del área de distribución natural). Además *N. obliqua* presentó un comportamiento similar a *N. pumilio* (Cagnacci, 2022).

La importancia de lo anterior radica en que mayores cantidades de clorofila y carotenoides se relacionan con altas tasas fotosintéticas, contrastantemente, bajo condiciones de estrés las cantidades de clorofila disminuyen y las antocianinas aumentan; además de que un diámetro a la altura del cuello (utilizado como parámetro de crecimiento) de plántulas indica un potencial en la supervivencia. Por lo que se sugiere que las condiciones de estrés abiótico, sumado con el catabolismo de clorofilas (senescencia de hojas) particular en las zonas más bajas del transecto (680 msnm) pueden influir en la diferencia aparente de concentración de pigmentos (Cagnacci, 2022).

Por otra parte, se prevé que el clima al cual están adaptadas actualmente muchas poblaciones de árboles se desplazará hacia áreas diferentes o incluso desaparecerá. El aumento de temperatura y la disminución de precipitación prevista y debida al cambio climático, podrá ejercer mayor estrés en poblaciones ubicadas en determinados lugares geográficos. Este tipo de eventos ejercerá mayor estrés sobre los individuos, lo que generará susceptibilidad, por ejemplo, ante plagas y enfermedades (Sáenz-Romero *et al.*, 2016).

Respecto a este tema, se sabe que el aumento de temperaturas actúa sobre la fenología y el metabolismo de insectos defoliadores y plantas, aunque, los

primeros presentan respuesta más rápida ante las temperaturas; por ejemplo, *Thaumetopoea pityocampa* (la procesionaria del pino), cuyas larvas se desarrollan en invierno, y un aumento de temperaturas supone beneficios en su desarrollo (inviernos suaves); incluso se ha documentado la expansión de sus poblaciones hacia mayores latitudes y altitudes, por lo que se sugiere que los aumentos en temperaturas han beneficiado a esta plaga forestal que afecta a especies como *Pinus nigra*, *P. radiata*, *P. sylvestris* y *P. canariensis* (Hódar *et al.*, 2012).

En este sentido, las formas de vida arbóreas al parecer son particularmente más susceptibles al cambio climático, debido a que poseen largos tiempos generacionales y relativa baja capacidad de dispersión, por lo que muy probablemente estén obligadas a adaptarse localmente (Cagnacci, 2022).

Así, la etapa de establecimiento y crecimiento de las plántulas durante los procesos de regeneración es aparentemente una de las más riesgosas para las especies arbóreas, pues es en este momento cuando la presión de selección sobre ellas determina qué individuos sobreviven y, en consecuencia, las características futuras de los árboles que constituirán el bosque; Un caso de esto fue documentado para *Nothofagus pumilio* en la Patagonia, Argentina, para su primera temporada de crecimiento, donde a mayor frecuencia de días con temperaturas máximas mayores o iguales a 28 °C, la muerte de las plántulas aumentaba y, cuando estas frecuencias eran aún mayores, la mortalidad alcanzaba el 100%, indicando que las plántulas toleran los eventos extremos pero a medida que su frecuencia aumenta, las plántulas encuentran sus umbrales de tolerancia y mueren (Cagnacci, 2022).

Los índices de sequía (como indicador de humedad) son otro factor inferido a partir del clima que pueden influir en la muerte de plántulas, como fue el caso de *Nothofagus alpina* en la Patagonia Argentina, en donde valores altos de este índice se relacionaron con altos valores de mortalidad de plántulas, también en su primera temporada de crecimiento; mientras que, para valores bajos e intermedios del índice, la mortalidad dependió de la edad de los individuos, edad

que vario por meses. De la misma manera para *N. oblicua* el índice de sequía fue un factor significativo en la muerte de plántulas durante la primera temporada de crecimiento, otro valor climático importante en este tenor fueron rangos de temperatura con valores por debajo de los 15 °C; es así que para las tres especies de *Nothofagus* en la Patagonia Argentina, existe mayor susceptibilidad a variables climáticas durante sus primeras semanas de vida (Cagnacci, 2022).

Además, el estrés hídrico es una condición que muy probablemente aumente en los límites inferiores de distribución de las especies debido al calentamiento global. En las plantas contribuye a la cavitación y embolismos, anulando así la capacidad de transportar agua. Esto conlleva una reacción en cadena comenzando con la reducción del flujo de agua, cierre de estomas, disminución de difusión del dióxido de carbono y una baja en la tasa fotosintética (di Francescantonio, 2017).

Sin embargo, una característica que se espera pueda en parte, mitigar el efecto del desacople de clima con las poblaciones de especies, es la plasticidad fenotípica, aunque es probable que la presión ejercida la supere; por lo que es probable una migración o una sustitución de poblaciones/especies por poblaciones/especies que presenten mayor tolerancia a condiciones de sequía en las partes sureñas de distribución o altitudes inferiores, que es en donde se distribuyen las poblaciones afectadas (Sáenz-Romero *et al.*, 2016).

Las especies de hábitats fríos presentan especial peligro ante el cambio climático, ya que probablemente tienen poco hábitat nuevo disponible para colonizar, por no mencionar que muchas plantas alpinas ya proliferan sobre las altitudes más altas de su localización geográfica, por lo que no existiría lugar a donde migrar, además, la naturaleza de las propias montañas puede hacer que sea más difícil el movimiento de las poblaciones (por ejemplo: montañas separadas por valles con vegetación adaptada a climas más cálidos), lo que agrava la amenaza de extinción para especies alpinas (Charles y Stehlik, 2021). Lo anterior, podría acoplarse para el caso de *Pinus hartwegii*, especie arbórea

que se distribuye de manera natural en el *tree-line* o en el límite arbóreo sobre las altitudes más elevadas de México.

Si se produce, esta migración puede ser mejor percibida desde el punto de vista productivo. Charles y Stehlik (2021) señalan la existencia de estudios de caso en los que el movimiento asistido de especies (*Liatris ligulistylis* y *Houstonia longifolia*) más allá de su rango de distribución ha resultado en rendimientos iguales y mejores con respecto a su distribución natural, lo que indica una adaptación por parte de las mismas. Por otro lado, Cagnacci (2022) reportó resultados similares para *Nothofagus oblicua* en ensayos realizados en un bosque templado mixto en el Parque Nacional Lanín, Neuquén, Argentina, que mostró un mejor rendimiento en el límite superior de su distribución natural.

Asociado a la migración, la hibridación es otro proceso que podría ser sustancial para el resguardo y perpetuidad de genomas o al menos parte de ellos. La hibridación ha sido catalogada como una posible forma de adaptación en las especies ante el cambio climático; donde el calentamiento global fuerza a las poblaciones a subir a mayores altitudes o migrar más hacia el norte provocando una superposición de especies (unas adaptadas al frío y otras adaptadas a temperaturas menos frías), con la probabilidad de una hibridación entre ellas, lo cual podría otorgar una mayor aptitud a los nuevos individuos. Este fenómeno ya se ha observado en animales como el oso polar y peces alpinos, además de plantas, el cual se espera siga aumentando conforme el calentamiento global continúe (ver Charles y Stehlik, 2021).

Como respuesta frente al cambio climático y con el fin de que siga existiendo acoplamiento entre las poblaciones de árboles y sus climas adecuados para fin de siglo, Sáenz-Romero et al. (2016) sugieren que es necesario que la velocidad de migración de las poblaciones sea más rápida de lo que se está dando actualmente. Especialmente para especies ubicadas en montañas, se requerirá un movimiento ascendente en altitud, lo que ya está ocurriendo, pero a tasas inferiores de las requeridas. Por consiguiente, los mismos autores indican que a

este ritmo es inevitable la intervención del hombre para mantener realineadas las poblaciones de varias especies de árboles a sus climas propicios.

Un estudio muy puntual enfocado al impacto del cambio climático fue realizado por McKenney et al. (2009) en el cual se estimó para las zonas semilleras de Ontario y British Columbia, Canadá, a través de Modelos de Circulación Global y Escenarios de cambio climático, el cambio en tres variables climáticas asociadas a la supervivencia y crecimiento de árboles: (1) temperatura diaria mínima promedio del mes más frío, (2) la duración de la temporada de crecimiento y (3) precipitación durante la temporada de crecimiento:

Para la temperatura diaria mínima promedio del mes más frío en Ontario se registró la existencia de cambios desde 1950 a 2005, que se encontraron en un rango de -0.8 a 4.3 °C; la estimación de la misma variable estuvo entre 1.5 y 4.2 °C para el 2040; de 4.5 a 7.5 °C para 2070; y de 7.0 a 10.3 °C para el año 2100. Respecto a las zonas semilleras de Douglas-fir en British Columbia se reportaron, aumentos entre 2.5 y 7.5 °C para el periodo entre 1950 y 2003; respecto al futuro, existieron aumentos entre 1.6 y 5.6 °C al 2040; 3.2 y 7.5 °C al 2070; y 5.1 y 9.7 °C al año 2100. Ahora bien, relacionado a la duración de la temporada de crecimiento, se encontraron aumentos relevantes de hasta casi 50 días de crecimiento para algunas zonas semilleras de Ontario, para fin de siglo (2100); Para British Columbia se estimó que en sus zonas semilleras la temporada de crecimiento experimentaría aumentos de entre 40 y 60 días para fin de siglo. Para la precipitación durante la temporada de crecimiento, se estimó para la región de Ontario y para fin de siglo, un aumento el cual varió entre 20 y 30 %; Para British Columbia se esperan aumentos de precipitación para la temporada de crecimiento durante este siglo de entre 35 y 50 %.

Estos datos indican que los cambios en el clima para algunas de las zonas semilleras en Canadá, ya han ocurrido, además de eventos extremos; aunque existe incertidumbre respecto al aumento en la precipitación que se presenta durante la temporada de crecimiento, ya que también se ha pronosticado incrementos de temperatura debidas al cambio climático, lo cual puede generar

niveles de evaporación mayores que es probable anulen los aumentos en precipitación. Dadas las estimaciones, sugieren que existirán impactos sustanciales sobre la composición, el crecimiento y los regímenes de perturbación en los bosques (McKenney *et al.* 2009).

En un estudio de caso para México reportado por Barradas *et al.* (2011) quienes señalan que el cambio climático causará posibles efectos en la fisiología y distribución de las especies. Por ejemplo, en la región montañosa central del estado de Veracruz se estima que *Pinus patula* podría desaparecer de los sitios en los que actualmente se distribuye, o bien desplazarse a sitios de mayor altitud donde la temperatura futura sería más favorable; en el caso de *Quercus sartorii* (especie de sombra) se teme que el aumento de la radiación solar (debido a una aparente disminución de la niebla y la nubosidad) también podría ayudar a su desaparición, provocando así un cambio en la estructura y composición florística del bosque de pino-encino de la región.

2.1.3. Gestión forestal y cambio climático

Migración asistida

Como indican Vitt *et al.* (2016), la migración asistida consiste básicamente en el movimiento deliberado de especies de un área geográfica a otra; actividad que puede ser referida con nombres como colonización asistida, reubicación controlada o translocación de especies. Existe controversia sobre el tema, ya que, por un lado, existen riesgos como la introducción de plagas, por otro, alternativas para la gestión de ecosistemas orientadas a la conservación de especies amenazadas. Respecto a esto último Vitt *et al.* (2016) y Sáenz-Romero *et al.* (2016) mencionan que generalmente para temas de restauración se cree que el material local es el mejor, pero el cambio climático actual desafía esta suposición.

Ahora bien, la migración asistida se considera una estrategia proactiva, viéndose motivada a partir de evidencia que indica que la migración natural se verá

retrasada respecto a la migración climática, esto apunta a la imperante necesidad de intervenir con el fin de acoplar especies y poblaciones a sus nichos climáticos adecuados para escenarios futuros; en donde se debe tomar una decisión sobre si plantar individuos bien adaptados a las condiciones presentes pero posiblemente mal adaptados a condiciones futuras o viceversa. Es precisamente aquí, en donde el periodo futuro a elegir, en el cual se desea plantar, dependerá del tiempo de rotación de la especie o de su ciclo de vida (McKenney *et al.*, 2009).

Ante el cambio climático, la migración asistida puede ser una herramienta de ayuda a la gestión forestal, consistente en el desplazamiento de individuos (semilla o plántula) hacia los polos o hacia arriba en altitud, para lo cual se debe realizar una recolección de semillas en una población natural de la especie, producir posteriormente plantas en viveros y, finalmente, plantarlas en un lugar para el que se hayan previsto las condiciones climáticas adecuadas para su desarrollo en un futuro concreto (Sáenz-Romero *et al.*, 2016). Además, los costos de llevar a cabo esta actividad pueden ser absorbidos por los costos de los mismos programas de reforestación (Gray *et al.*, 2011).

Charles y Stehlik (2021) indican que existen dos tipos de migración asistida: a) la migración asistida de especies, la cual consiste en la reubicación deliberada más allá de los límites naturales de distribución actual de la especie; y b) la migración asistida de poblaciones, que reside en el movimiento de individuos de latitudes/altitudes inferiores o adaptados al calor hacia latitudes/altitudes más altas, pero dentro de su rango histórico de distribución natural.

En la literatura se puede encontrar casos de estudio sobre el movimiento de plantas a partir de una procedencia a lo largo de gradientes ecológicos y de distancia, en los cuales se han evaluado, por ejemplo, compensaciones de adaptación de los especímenes respecto a la supervivencia, lo cual puede generar información sobre el potencial de migración asistida cuando estas compensaciones se comprarán con la distancia de traslado y por ende su tolerancia a variaciones en el clima. Algunas compensaciones utilizadas en análisis han sido: el crecimiento, la resistencia a heladas, el momento de

senescencia de hojas, supervivencia, entre otras. Así uno de los objetivos de analizar las compensaciones para definir si existe la posibilidad de realizar una migración asistida para especies, debe ser el garantizar la resiliencia de las mismas ante el cambio climático (Vitt *et al.*, 2016).

Un ejemplo de lo anterior, y de cómo se ha utilizado la migración asistida como respuesta al cambio climático, fue el caso de *Larix occidentalis* Nutt. en la Columbia Británica (Canadá), donde se estableció una delineación de transferencia de semillas 200 m más al norte que la distribución natural de la especie, donde dichas plantaciones parecen haber tenido éxito (Sáenz-Romero *et al.*, 2016). Otro, con la especie arbórea *Populus tremuloides* Michaux, desarrollado en el oeste de Canadá, describe el esfuerzo para crear directrices que guíen la ejecución de la migración asistida, concluyendo que una migración asistida bien planificada podría generar tanto retos como oportunidades en la gestión forestal y, específicamente para esta especie de álamo temblón, se podrían generar ganancias significativas en la productividad (Gray *et al.*, 2011).

En un estudio realizado en México, donde se midió la supervivencia de plántulas de tres especies de pino al trasladarlas hacia mayores altitudes, en el cual, al exceder los 450 m de diferencia altitudinal hacia arriba la sobrevivencia alcanzada fue solo del 56 %, el crecimiento varió entre especies. Sorprendentemente, la especie de *Pinus leiophylla* no tuvo cambios en su crecimiento incluso en movimientos altitudinales de hasta 600 m, esto generó información para una potencial migración asistida como medida de adaptación frente al cambio climático con límite de hasta 300 m de movimiento altitudinal ascendente (Castellanos-Acuña *et al.*, 2015).

Prescripciones para la transferencia de semilla

La migración asistida es aplicable solo si existen un control adecuado en la transferencia de semillas, esto debido a que la regeneración artificial implica el movimiento de recursos genéticos a cierta distancia desde el punto donde se originan. Dicho control debe considerar la tolerancia climática de lotes de semilla

para garantizar la adaptación de plantaciones actuales a los climas futuros. Es así que la delineación o límites de las zonas semilleras se establecen bajo el uso de distintas técnicas como: regresión, análisis de conglomerados, análisis de coeficientes sistemáticos diferenciales, análisis de redundancia, por mencionar algunos (McKenney *et al.*, 2009).

Básicamente una zona de semillas puede ser fija o de punto focal. La primera enfatiza que la semilla debe permanecer dentro de su zona de origen climática o geográfica. La zona de semillas de punto focal o flotante hace referencia a una distancia máxima (climática o geográfica), a la cual puede ser transferida la semilla o en la cual puede ser recolectada, buscando que tanto el lugar de plantación y el lugar de recolecta de semilla sean similares para la adaptación (McKenney *et al.*, 2009).

Modelado climático y distribución de especies

Una herramienta más de apoyo en la gestión forestal ante el cambio climático, han sido los modelados de hábitat climático apropiado y distribución potencial de especies, los cuales pueden basarse en datos de presencia-ausencia de especies que se guían de una selección de variables climáticas relevantes. De esta manera los productos obtenidos de este modelado pueden usarse para la planificación de migraciones asistidas potenciales (Sáenz-Romero *et al.*, 2016).

Esta modelización de especies consiste en la predicción de los nichos ecológicos que con mayor probabilidad aparecerán en el futuro en nuevos emplazamientos geográficos, donde dicha predicción se basa en la selección de variables climáticas o de otro tipo, indicando en un mapa la probabilidad de que aparezcan determinadas condiciones favorables para una especie durante un periodo de tiempo determinado

Algunas especies para las cuales se ha implementado el modelado son: *Populus tremuloides* en el oeste de Canadá, para el cual se observó una merma en el hábitat climático de distribución de la especie de manera paulatina para las

décadas 2020, 2050 y 2080, además de una pérdida de hábitat climático adecuado en el sur de su distribución para el periodo 1997-2006 respecto al periodo de referencia 1961-1990. En dicho estudio se sugiere el uso de las proyecciones del modelo de bioclima como herramienta para definir los límites de movimiento de fuentes de semilla (Gray *et al.*, 2011).

La modelización también ha ayudado a darnos una idea del cómo, en un futuro, muy probablemente se conformarán nuevos ecosistemas configurados a partir de los ecosistemas contemporáneos e incluso la aparición de ecosistemas que carecen de equivalentes contemporáneos (Sáenz-Romero *et al.*, 2016), lo cual indica un significativo impacto del calentamiento global sobre la biota terrestre.

Castellanos-Acuña *et al.* (2018) realizaron una zonificación basados en dos variables climáticas (temperatura mínima e índice de aridez) para México, obteniendo por productos mapas climáticos, en los cuales se indica que los valores de temperatura media del mes más frío ya habían aumentado en 0.74 °C, por su parte el aumento de aridez también ya había sido un hecho a lo largo del país. Para la década del 2050 con un Trayectoria de Concentración Representativa (RCP por sus siglas en inglés) 4.5 la variable relacionada con la temperatura indicó incrementos de 1.7 °C y la aridez en + 0.23; así para el mismo año y un RCP de 8.5, se encontraron aumentos de 2.4 °C en la temperatura y en la aridez de + 0.33 (condiciones de mayor sequía) con respecto al periodo climático de referencia (1961-1990). Por lo que se estima para México un incremento en áreas más secas y cálidas, así como una disminución de regiones climáticas ubicadas en la cima de montañas.

Plagas y enfermedades

En relación con la prevención, control y gestión de las plagas forestales, especialmente las favorecidas por el aumento de los valores de temperatura inherentes al cambio climático global, se ha propuesto enfatizar el modelado forestal capaz de reducir el establecimiento de plagas y otros eventos relacionados con el cambio climático, además de reducir la intervención humana,

lo que se refiere a tener en cuenta la propia estructura del bosque en la gestión forestal, a través de la gestión de densidades, espaciamiento, diversidad (intra e interespecífica), clases de tamaño, es decir, la gestión proactiva. Esto puede apoyarse en saber que, en general, un bosque más diverso es menos susceptible a las plagas y enfermedades, por lo que la diversidad y la estructura pueden reducir el número de individuos potencialmente susceptibles (Hódar *et al.*, 2012).

Un caso de aplicación de este enfoque puede ser descrito con la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*), en el cual, la suma de especies vegetales a las masas forestales puede servir para otorgar materiales de provisión para agentes parasitarios de la especie plaga, además, pueden acondicionarse áreas en las cuales la pupación de la procesionaria no sea favorecida (Hódar *et al.*, 2012).

Existe evidencia reciente de que los brotes de escarabajo descortezador están aumentando de manera importante en el Eje Neovolcánico, aparentemente ligados a un debilitamiento del arbolado, como resultado de condiciones climáticas más cálidas y secas (Gómez-Pineda *et al.*, 2022).

Radiación ionizante

Otro tipo de investigación, pero también orientada a mejorar la gestión forestal es aquella relacionada con la radiación ionizante, la cual consiste en irradiar germoplasma generando variabilidad genética heredable (mutagénesis) y a la vez se manifiesta en respuestas adaptativas ante diferentes tipos de estrés para la especie (Rojas Vergara *et al.* (2018), esto puede ser de gran ayuda ante los potenciales efectos del cambio climático sobre las poblaciones forestales, y así mediante el aumento de variabilidad genética ayudar los procesos de reforestación.

El mismo autor cita que los efectos de una baja radiación en plantas producen un aumento en la respiración celular, activación de enzimas, aumento en la producción de estructuras reproductivas, resistencia a enfermedades, entre

otros. Pudiendo irradiar plantas enteras, semillas, granos de polen, meristemos, células vegetales y cultivos de tejido in vitro. Por tanto, la radiación ionizante permite la creación de variabilidad genética no existente en la naturaleza y no disponible por las tecnologías tradicionales de mejoramiento genético. Un ejemplo lo reportan Gutiérrez et al. (2021) quienes observaron un aumento en la germinación de semillas de *Eucalyptus nitens* con dosis de 10 Gy de radiación gamma.

Zonas semilleras

Partiendo del conocimiento sobre el abastecimiento y distribución de semillas que se ha dado en México, en donde comúnmente la semilla es recolectada en rodales naturales y distribuida en su mayoría dentro de la distribución natural de las especies, además del hecho de que existen pocos estudios de jardín común a largo plazo para contadas especies, Castellanos-Acuña et al. (2018) propusieron una zonificación de semillas provisional basada en el clima del país, apoyándose de variables ambientales como temperatura mínima e índice de aridez. De este estudio se delimitaron 63 zonas semilleras para México con una correspondencia muy similar a las zonas ecológicas.

Esta forma de delimitar las zonas semilleras es susceptible a las redelimitaciones que podrían provocarse debido al cambio climático proyectado a futuro, por lo que se sugiere su uso como herramienta en la implementación de programas de migración asistida, de manera que se recolectaría semilla en las áreas de adquisición actual y se reforestaría con sus plántulas en las mismas áreas, pero delimitadas bajo proyecciones climáticas futuras (para el estudio el 2050). En este sentido, también se sugiere que el movimiento de semillas y plántulas adaptadas localmente a ambientes más fríos y húmedos estaría justificado dado que el cambio climático ya se ha producido (Castellanos-Acuña et al., 2018).

Otra herramienta que permite inferir probables cambios en las poblaciones de las especies como posible efecto del cambio climático, es el análisis de funciones envolventes, que es más fácil y directa en comparación de modelos GARP o

MaxEnt según Barradas et al. (2011), por lo que podrían ser de utilidad para la gestión forestal.

2.2. MARCO DE REFERENCIA

Como señala Cagnacci (2022), el estudio de caracteres adaptativos en especies que presentan rangos de distribución a lo largo de gradientes ambientales es de especial importancia, ya que recae en que los factores ambientales que convergen presentan una variación a lo largo del gradiente. Así, pueden ser estudiadas potenciales respuestas de las especies ante diferentes escenarios climáticos; por ejemplo, en gradientes altitudinales donde la temperatura varía imponiendo distintas condiciones de hábitat a las especies.

En el estudio de la variación clinal y adaptación de especies forestales, existen investigaciones que conforma una base para la verificación de hipótesis y herramientas para el manejo forestal, tales como las que a continuación se señalan:

Un estudio realizado en el entonces Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán, por Viveros-Viveros et al. (2009) para *Pinus hartwegii*, donde encontraron diferencias entre poblaciones para caracteres como altura total de planta a dos edades distintas, daño por bajas temperaturas, término de etapa cespitosa y porcentaje de planta con brotes desarrollados, con un patrón de diferenciación moderadamente clinal; de manera general las plantas que representaban la población de menor altitud presentó valores diferentes a las de mayores altitudes; la variación genética encontrada sirvió para delimitar dos zonas altitudinales para la transferencia de semilla y planta de 350 m de ancho altitudinal.

Otros investigadores como Loya-Rebollar et al. (2013) hallaron diferencias en elongación total, altura final de la plántula, diámetro basal, tasa de elongación, peso seco de agujas, ramas y tallo, y peso seco total, indicando que existe un patrón de diferenciación genética atribuida tanto a la altitud como al clima para

poblaciones de *P. hartwegii* ubicadas en la Pico de Tancítaro, Michoacán; encontrando que en menores altitudes las plántulas son más grandes y acumulan más peso seco en comparación con altitudes mayores. De esta forma, pudieron delimitar tres zonas altitudinales de 200 m de ancho altitudinal para el movimiento de semillas.

En cuanto al análisis de variación morfométrica de caracteres en *P. hartwegii*, Iglesias et al. (2012) apreciaron, a través del análisis de componentes principales, que la variación morfológica de acículas, conos y semillas indica una variación continua en estas características, lo cual no permite la diferenciación fenotípica entre poblaciones, pero si entre individuos dentro de poblaciones, sugiriendo la posibilidad de que esta heterogeneidad fenotípica en la especie podría estar relacionada con ciertas variables ambientales y sus efectos, debido al íntimo lazo que existe entre el desarrollo de una planta con el medio. También se sugiere la posibilidad de que la variación en el largo del cono en las dos poblaciones analizadas, puede ser el resultado de la plasticidad fenotípica debido a microambientes experimentados por los árboles o a diferencias entre genotipos. Además, resaltan que el conocimiento de la variación fenotípica y genotípica de la especie es esencial para su conservación.

Viveros-Viveros et al. (2013) analizaron la variación morfológica en semillas, conos y acículas para la especie *Pinus patula* distribuida a lo largo de un gradiente altitudinal. Detectaron que aquellas características que presentaron mayor variación que podía atribuírsele a la población fueron la longitud de cono y la longitud de vaina, contrastantemente la que presentó menor variación atribuible a la población fue la longitud de la acícula más larga, sin embargo, esta última característica y el grueso del cono presentaron la mayor variación atribuida a individuos dentro de poblaciones, de manera general, se encontró que la variación de árboles dentro de las poblaciones contribuyó más a la varianza total en comparación con las mismas poblaciones.

Estos autores, a partir de un análisis de correlación, estimaron que las poblaciones de mayor altitud de la especie estudiada presentaron conos más

gruesos, quillas más anchas y fascículos con vainas más largas, respecto a la longitud de acículas se encontró una correlación negativa con la altitud. Además, obtuvieron una zonificación altitudinal basados en la diferencia mínima significativa entre poblaciones para la longitud de acícula, dicha zonificación consistió en dos zonas de 450 m de amplitud altitudinal para el movimiento de semillas. Los autores plantean la posibilidad de que tanto la longitud de vaina y el grueso del cono podrían ser caracteres con papel adaptativo para la especie. Asimismo, mencionan que la comparación entre zonificaciones basadas en caracteres morfológicos con valor adaptativo versus las realizadas con caracteres cuantitativos es recomendada, ya que la primera es mucho más económica, sin embargo, la ideal es la segunda.

Otro caso en el cual se utilizó la variación morfológica a lo largo de un gradiente altitudinal para realizar una zonificación, fue por Aparicio-Rentería et al. (2020) con *Pinus patula*, quienes reportaron variación significativa tanto dentro de poblaciones como entre las mismas para las variables longitud de cono, diámetro de cono, largo de semilla y ancho de semilla. La contribución atribuida a las poblaciones y a los árboles dentro de poblaciones para la varianza total fue de hasta un 12.2 y 50.2 % respectivamente. La longitud de cono fue la variable que presentó mayor variación atribuible a la población y la de menor fue el largo de semilla. Para la variación atribuible a árboles dentro de poblaciones las variables que mayor atribución tuvieron fueron longitud y diámetro del cono y la de menor atribución fue ancho de semilla.

Respecto a la conformación de la varianza total, en general, el mayor aporte fue por los árboles dentro de poblaciones y no por las poblaciones. Se encontró que en poblaciones de mayor altitud existen conos más largos y anchos, además de semillas más anchas. Mediante las diferencias mínimas significativas para las variables largo de cono, diámetro de cono y ancho de semilla se delimitaron dos zonas altitudinales de 500 m de amplitud cada una para el movimiento de semillas. Se menciona que la variación fenotípica que se encontró entre poblaciones puede indicar una posible variación genética entre las mismas dentro

del gradiente altitudinal, sin descartar que las características evaluadas están influenciadas tanto por el ambiente como por el componente genético.

2.3. Literatura citada

- Aparicio-Rentería, A., Viveros-Viveros, H., Hernández-Villa, J., Sáenz-Romero, C., Ruiz-Montiel, C., y Pineda Posadas, J. A. (2020). Zonificación altitudinal de *Pinus patula* a partir de conos y semillas en la sierra de Huayacocotla, Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 26(2), 1–12. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621962>
- Barradas, V. L., Tapia Vargas, L. M., y Cervantes Pérez, J. (2011). Consecuencias del cambio climático en la ecofisiología vegetal de un bosque templado en Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 183–194.
- Brang, P., Spathelf, P., Larsen, J. B., Bauhus, J., Boncina, A., Chauvin, C., Drossler, L., García-Guemes, C., Heiri, C., Kerr, G., Lexer, M. J., Mason, B., Mohren, F., Muhlethaler, U., Nocentini, S., & Svoboda, M. (2014). Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. *Forestry An International Journal of Forest Research*, 87(4), 492–503. <https://doi.org/10.1093/silvicultura/cpu018>
- Cagnacci, J. M. (2022). *Bases fisiológicas y moleculares asociadas al establecimiento de plántulas de Nothofagus en ambientes naturales* [Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales]. <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/11803>
- Castellanos-Acuña, D., Lindig-Cisneros, R., y Sáenz-Romero, C. (2015). Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere*, 6(1), 1-16. <https://doi.org/10.1890/ES14-00375.1>
- Castellanos-Acuña, D., Vance-Borland, K. W., St. Clair, J. B., Hamann, A., López-Upton, J., Gómez-Pineda, E., Ortega-Rodríguez, J. M., y Sáenz-Romero, C. (2018). Climate-based seed zones for Mexico: Guiding reforestation under observed and projected climate change. *New Forests*, 49(3), 297–309. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9620-6>
- Cavieres, L. A., y Piper, F. I. (2004). Determinantes ecofisiológicos del límite altitudinal de los árboles. En H. Marino-Cabrera (Ed.), *Fisiología Ecológica en Plantas: Mecanismos y Respuestas a Estrés en los Ecosistemas* (pp. 221–234). Ediciones Universitarias de Valparaíso Castellano.
- Charles, K. M., y Stehlik, I. (2021). Assisted species migration and hybridization to conserve cold-adapted plants under climate change. *Conservation Biology*, 35(2), 559–566. <https://doi.org/10.1111/cobi.13583>
- di Francescantonio, D. (2017). *Características ecológicas, fisiológicas y anatómicas de especies arbóreas del Bosque Atlántico y su relación con*

los diferentes patrones fenológicos [Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires]. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis_n6213_DiFrancescantonio

- Gómez-Pineda, E., Hammond, W. M., Trejo-Ramírez, O., Gil-Fernández, M., Allen, C. D., Blanco-García, A., Sáenz-Romero, C. (2022). Drought years promote bark beetle outbreaks in Mexican forests of *Abies religiosa* and *Pinus pseudostrobus*. *Forest Ecology and Management* 505 (119944), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119944>
- Gray, L. K., Gylander, T., Mbogga, M. S., Chen, P., y Hamann, A. (2011). Assisted migration to address climate change: Recommendations for aspen reforestation in western Canada. *Ecological Applications*, 21(5), 1591–1603. <https://doi.org/10.1890/10-1054.1>
- Gutiérrez, B., Koch, L., Villegas, D., Gonzalez, J., Ly, D., Molina, M., Rojas, P., y Velásquez, E. (2021). Análisis de Germinación de Semillas de *Eucalyptus nitens* Tratadas con Radiación Gamma: Indicios de Efecto Hormético. *Ciencia e Investigación Forestal*, 27(3), 7–16. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.554>
- Herrero, A. (2017). Impactos, vulnerabilidad y adaptación al Cambio Climático en los bosques ibéricos. *Munibe Ciencias naturales*, 65, 7–28. <https://doi.org/doi:10.21630/mcn.2017.65.11>
- Hódar, J. A., Zamora, R., y Cayuela, L. (2012). Cambio climático y plagas: Algo más que el clima. *Ecosistemas*, 21(3), 73–78. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.09>
- Iglesias, L., Solís-Ramos, L., y Viveros-Viveros, H. (2012). Variación morfométrica en dos poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lindl. Del estado de Veracruz. *REVISTA INTERNACIONAL DE BOTÁNICA EXPERIMENTAL INTERNATIONAL JOURNAL OF EXPERIMENTAL BOTANY*, 81, 239–246.
- Loya-Rebollar, E., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Lobit, P., Villegas-Moreno, J. A., y Sánchez-Vargas, N. M. (2013). Clinal variation in *Pinus hartwegii* populations and its application for adaptation to climate change. *Silvae Genetica*, 62(3), 86–95. <https://doi.org/10.1515/sg-2013-0011>
- Matías, L. (2012). Cambios en los límites de distribución de especies arbóreas como consecuencia de las variaciones climáticas. *Ecosistemas*, 21(3), 91–96. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.12>
- McKenney, D., Pedlar, J., y O'Neill, G. (2009). Climate change and forest seed zones: Past trends, future prospects and challenges to ponder. *The Forestry Chronicle*, 85(2), 258–266. <https://doi.org/10.5558/tfc85258-2>
- Medellín-Zabala, D. M. (2018). Estrategias Adaptativas de Plantas de Páramo y Bosque Altoandino al Cambio Climático. En J. H. Solorza-Bejarano (Ed.), *Ecología y Cambio Climático en Ecosistemas de Alta Montaña en*

Colombia (pp. 31–34). Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. https://www.researchgate.net/publication/332109282_Sistemas_de_Informacion_Geografica_para_la_Gestion_del_Cambio_Climatico_en_Ecosistemas_de_Alta_Montana

- Nations United. (s/f). *¿Qué es el cambio climático?* | Naciones Unidas. United Nations; United Nations. Recuperado el 1 de agosto de 2022, de <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- OMM. (2021, octubre 31). *Estado del clima en 2021: Los fenómenos extremos y sus principales repercusiones*. Organización Meteorológica Mundial. <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/estado-del-clima-en-2021-los-fen%C3%B3menos-extremos-y-sus-principales>
- Rojas Vergara, P., Aguirre, P., Durán, O., y Nario, A. (2018). Aplicaciones de tecnologías nucleares en conservación y mejoramiento genético forestal bajo un escenario de cambio climático. *Ciencia e Investigación Forestal INFOR*, 24(3), 116–127. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2018.506>
- Rehfeldt, G.E. (1988). Ecological genetics of *Pinus contorta* from the Rocky Mountains (USA): a synthesis. *Silvae Genetica* 37(3-4), 131-135.
- Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Joyce, D. G., Beaulieu, J., St. Clair, J. B., y Jaquish, B. C. (2016). Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 22(3), 303–323. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.052>
- Vitt, P., Belmaric, P. N., Book, R., y Curran, M. (2016). Assisted migration as a climate change adaptation strategy: Lessons from restoration and plant reintroductions. *Israel Journal of Plant Sciences*, 63(4), 250–261. <https://doi.org/10.1080/07929978.2016.1258258>
- Viveros-Viveros, H., Camarillo-Luna, A. R., Sáenz-Romero, C., y Aparicio-Rentería, A. (2013). Variación altitudinal en caracteres morfológicos de *Pinus patula* en el estado de Oaxaca (México) y su uso en la zonificación. *Bosque*, 34(2), 11–12. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002013000200006>
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Ramírez-Valverde, G., y Santacruz-Varela, A. (2009). Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management*, 257(3), 836–842. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.021>

CAPÍTULO 3. ARTÍCULO CIENTÍFICO

Variación clinal en *Pinus hartwegii* Lindl. a partir de caracteres fenotípicos para la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, México

Clinal variation in *Pinus hartwegii* Lindl. from phenotypic characters for the Zoquiapan Experimental Forest Station, Mexico

López López Adrián¹

Palacios Rangel María Isabel^{1*}

Sáenz Romero Cuauhtémoc²

Villanueva Morales Antonio¹

Pacheco Almaraz Victoria³

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

² Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. San Juanito Itzícuar, s/n, Col. Nueva Esperanza, Morelia, Michoacán, 58337, México.

³ Centro de Investigaciones Económicas Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial. Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México. C. P. 56230.

(*Dra. María Isabel Palacios Rangel: MARISAPALACIOS6@gmail.com)

RESUMEN:

La variación natural entre poblaciones de árboles distribuidas en gradientes ambientales ayuda a delimitar zonas de manejo de germoplasma; éstas apoyan en reforestaciones y ayudan a conservar los recursos genéticos forestales. El objetivo fue cuantificar la magnitud de variación clinal entre procedencias asociada a la altitud, para rasgos de semilla, conos y acículas que ayuden a delimitar zonas provisionales para el abastecimiento de germoplasma en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ) perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo. Se realizó un muestreo de transecto en un gradiente altitudinal (ocho procedencias) en el cerro “El Papayo”, Ixtapaluca, Estado de México; se analizó la variación entre procedencias y su patrón altitudinal. Sólo las variables *largo de semilla* ($p= 0.0058$) y *capacidad germinativa* ($p< 0.0001$) presentaron variación significativa entre procedencias; mediante un análisis de regresión, se observó un patrón de variación altitudinal cuadrático: el *largo de semilla* mostró un $r^2 = 0.88$ y un $p= 0.0144$ y la *capacidad germinativa* un $r^2= 0.7865$ y un $p= 0.0456$. Se delimitaron dos zonas fijas para obtención de germoplasma con rangos altitudinales de 200 m y con un intervalo de temperatura media anual de 1 °C. Finalmente, para el año 2060 en la zona de estudio se estimó un incremento de 2.3 °C de temperatura media anual y se espera obligará a las poblaciones de *P. hartwegii* a migrar altitudinalmente 400 m hacia arriba para reacoplarse a su nicho de temperatura.

Palabras Clave: *Pinus hartwegii*, variación clinal, zonificación, cambio climático.

ABSTRACT:

Natural variation among tree populations distributed along environmental gradients helps to delimit germplasm management zones, it supports reforestation and helps to conserve forest genetic resources. The objective was to quantify the magnitude of clinal variation among provenances associated with altitude, for seed, cone and needle traits that help to delimit provisional zones for germplasm supply in the Zoquiapan Forest Experimental Station (EFEZ, by its Spanish acronym) belonging to the Universidad Autónoma Chapingo. A transect sampling was carried out in an altitudinal gradient (eight provenances) in "El Papayo" mountain, Ixtapaluca, State of Mexico; the variation among provenances and their altitudinal pattern was analyzed. Only the variables seed length ($p=0.0058$) and germination capacity ($p<0.0001$) showed significant variation among provenances. A regression analysis indicated a quadratic altitudinal variation pattern: seed length showed an $r^2 = 0.88$ and $p=0.0144$ and germination capacity an $r^2=0.7865$ and $p=0.0456$. Two fixed zones were delimited to obtain germplasm with an altitudinal range of 200 m and an average annual temperature interval of 1 °C. Finally, an increase of 2.3 °C of mean annual temperature was projected for the year 2060 in the study area, which is expected to force the populations of *P. hartwegii* to migrate altitudinally 400 m upwards in order to relocate to their temperature niche.

Key words: *Pinus hartwegii*, clinal variation, zoning, climate change.

INTRODUCCIÓN

Uno de los pasos esenciales durante los proyectos de restauración es la selección de especies (Vargas Ríos, 2011). Al respecto, en México algunos de los aspectos que se han tomado en cuenta durante la restauración de ecosistemas terrestres han sido, entre otros, favorecer la regeneración natural, así como la selección de material biológico nativo (Méndez-Toribio *et al.*, 2018). Sin embargo, a pesar de las consideraciones que se tienen en cuenta en las actividades de reforestación, las bajas tasas de supervivencia de las plantas después del primer año de ser plantadas desacreditan este tipo de actividades. Debido a que una de las posibles razones de esta baja supervivencia es el uso de especies y procedencias inadecuadas, se ha sugerido diversificar las especies y procedencias producidas en viveros, así como determinar criterios orientados a la adecuación de los genotipos a los ambientes, además de realizar acciones encaminadas a mejorar la conservación de los recursos genéticos forestales (Sáenz-Romero y Linding-Cisneros, 2004).

Se ha encontrado que existe una importante diferenciación genética entre poblaciones a lo largo de gradientes ambientales. Por ejemplo, para *Pinus hartwegii* Viveros-Viveros *et al.* (2009) reportaron variación genética en el crecimiento de plántulas provenientes de poblaciones distribuidas a lo largo de un gradiente altitudinal en Pico de Tancítaro, Michoacán. También, Loya-Rebollar *et al.* (2013) encontraron diferencias en varios caracteres, indicando la existencia de un patrón de diferenciación genética atribuido a la altitud y por tanto al clima. Otro enfoque es realizar investigaciones sobre la variación de los atributos morfológicos (conos, semillas y acículas), que pueden ayudar en la

delimitación de zonas provisionales para el aprovisionamiento y movimiento de germoplasma (Aparicio-Rentería *et al.*, 2020). Respecto a *P. hartwegii*, actualmente existe una preocupación relacionada con la conservación de sus recursos genéticos, debido al cambio climático, que se espera tenga un impacto significativo en la distribución de los hábitats adecuados para ésta y otras coníferas a finales de siglo (Gómez-Pineda *et al.*, 2020).

Por ello, el presente trabajo se centró en el estudio de la relación fenotípica de *P. hartwegii* asociada a un gradiente altitudinal, útil para delimitar zonas preliminares de suministro de germoplasma, que sirvan de referencia en las actividades de reforestación y conservación de recursos genéticos forestales para la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), Estado de México, de la Universidad Autónoma Chapingo.

Los objetivos del presente trabajo son determinar el nivel de variación de los caracteres fenotípicos entre las procedencias (originadas a diferentes altitudes) de *Pinus hartwegii* para el tamaño de la semilla, tamaño del cono, longitud de la acícula, capacidad y velocidad de germinación de la semilla, y así, definir si existe un patrón de variación clinal para la EFEZ. Asimismo, se propuso delimitar zonas altitudinales para el suministro y movimiento de germoplasma según la variación clinal.

MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se estableció en la EFEZ, estación de investigación perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo (Figura 1), ubicada en el municipio de Ixtapaluca, Estado de México, entre las coordenadas 19° 12' 30" y 19° 20' 00" de latitud norte y 98°

42' 30" y 98° 30' 00" de longitud oeste. Su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano y estación seca en invierno; presenta una temperatura media anual de 11 °C y una precipitación media anual de 964 mm. La vegetación predominante es bosque de pino, bosque de oyamel, bosque de aile y pastizales (Universidad Autónoma Chapingo, 2020).

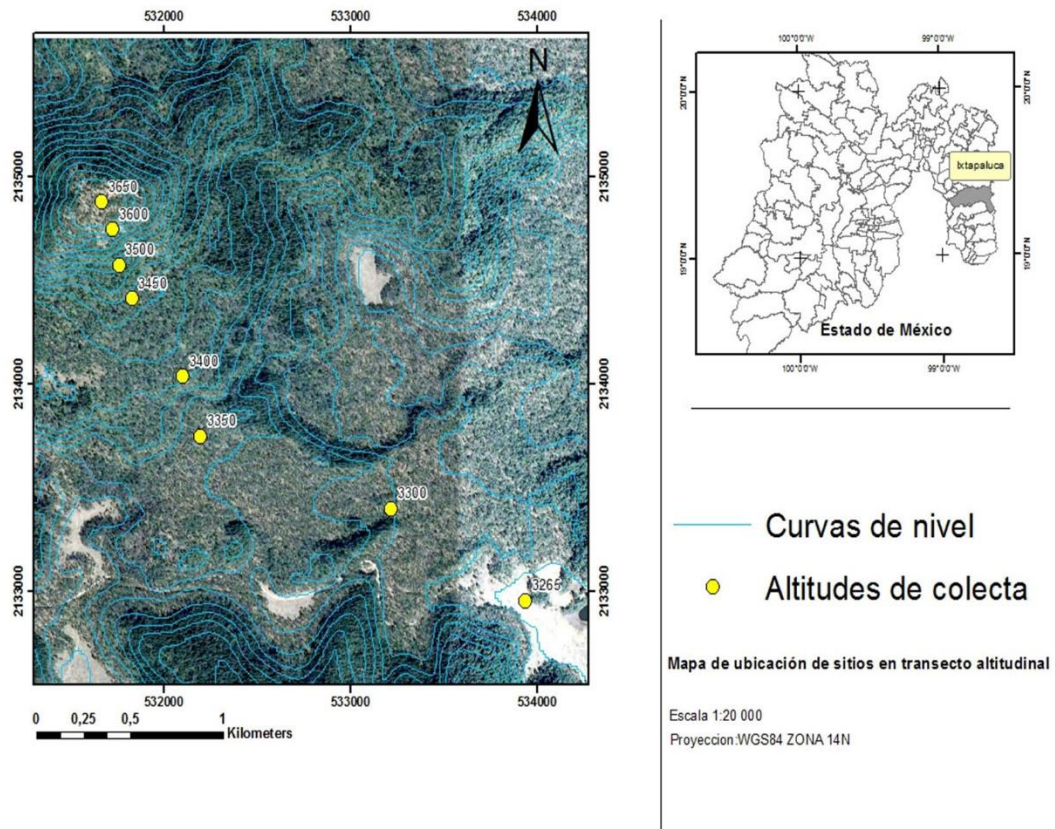


Figura 1. Ubicación del área de estudio y transecto altitudinal.

Fuente: elaboración propia con datos tomados en la zona de estudio, 2021.

Diseño de muestreo

Entre los meses de marzo y mayo de 2021 se recolectó material biológico en un transecto altitudinal (de 3265 m a 3650 msnm) que pretendía incluir la variación existente entre las procedencias de *P. hartwegii*. Se consideró como exposición cardinal promedio la sudeste y una zona en la cual la especie se distribuye de manera natural en el cerro nombrado localmente como “El Papayo”. Con ayuda de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) (GARMIN, Map 78s), se ubicaron las procedencias recolectadas en promedio cada 50 metros de altitud (Tabla 1). Se muestrearon ocho procedencias (excepto de la procedencia a 3550 metros de altitud, por tener baja densidad de árboles, pocos estróbilos femeninos maduros y difícil acceso). En cada procedencia, se seleccionaron al azar de cinco a diez árboles con una distancia mínima de 30 metros entre ellos para reducir la probabilidad de parentesco.

Tabla 1. Altitud y coordenadas UTM de poblaciones muestreadas de *P. hartwegii* en la EFEZ, Ixtapaluca, Estado de México, México.

Procedencia	Altitud (metros)	Latitud (norte)	Longitud (oeste)
1	3650	19.307481	-98.698560
2	3600	19.306261	-98.698033
3	3500	19.304712	-98.697707
4	3450	19.303265	-98.697050
5	3400	19.299849	-98.694478
6	3350	19.297305	-98.693561
7	3300	19.294050	-98.683872

Fuente: elaboración propia a partir de datos tomados en campo con GPS, 2021.

Recolección de material biológico

Se recolectaron al azar cinco conos maduros y aparentemente sanos por árbol, mismos que fueron separados por árbol. De los mismos árboles se recogió una muestra de 5 ramas con fascículos maduros, que no presentaban síntomas de decaimiento.

Toma de datos Variables morfológicas

Las variables morfológicas utilizadas fueron: conos, acículas y semillas. Con la ayuda de un vernier digital (STEREN, HER-411) se midieron los conos desde la base hasta la punta; de esta forma se obtuvo la longitud de cada cono por árbol y por procedencia. Igualmente, con la ayuda de una regla graduada, se midió la acícula más larga de cada una de las 5 ramas de cada árbol y se ordenaron por procedencia. En cuanto a las semillas, en cada procedencia se recogió la semilla llena obtenida de sus respectivos árboles y se obtuvieron 90 semillas al azar de cada procedencia. Las semillas seleccionadas se midieron tanto en largo (de la base a la punta) como en anchura (parte más ancha) con la ayuda del vernier digital.

Prueba de germinación

La prueba de germinación se realizó en una cámara de germinación, acondicionada con bombillas eléctricas domésticas de diferentes voltajes para ajustar la temperatura a una media de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. En recipientes de plástico se vertió perlita como sustrato, que fue previamente desinfectada con el fungicida-bactericida OxiDate 2.0® (BioSafe Systems,

LLC, USA) a una dosis de 1 mililitro/litro de agua, se agitó la solución con el sustrato y se dejó reposar durante 3 días con el recipiente tapado. La semilla se remojó durante 24 horas en agua corriente y luego se desinfectó con el fungicida CAPTANE 50 PH® (Agroquímica Tridente S.A de C.V., México) a una dosis de 3 gramos/litro de agua filtrada durante 30 minutos.

El ensayo tuvo una duración de 40 días en los que la lectura de la germinación se realizó diariamente durante dos semanas (tiempo en el que se presentó una germinación constante) y posteriormente cada tercer día, ya que la germinación fue esporádica. El criterio para considerar una semilla germinada fue el agronómico (emergencia y desarrollo de una plántula) (Pita-Villamil y Pérez-García, 1998). Los datos de *capacidad germinativa (%)* y *velocidad de germinación* (días necesarios para alcanzar el 50% de la capacidad germinativa) se obtuvieron para cada población con la siguiente fórmula:

$$cg = (sg \times 100) \div ts$$

Donde:

cg = capacidad germinativa en porcentaje.

sg = número de semillas germinadas.

ts = total de semillas sembradas.

Procesamiento y análisis de datos

Para análisis de los datos de las variables morfológicas, capacidad *germinativa* y *velocidad de germinación* se empleó el software estadístico SAS (versión 9.4; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Para la velocidad de germinación se realizó una

comparación de medias mediante la prueba no paramétrica de Wilcoxon utilizando el programa IBM SPSS Statistics© versión 25.

Variables morfológicas

Para determinar la existencia de variación entre procedencias se realizó un análisis de varianza con el procedimiento Proc Mixed de SAS, para cada una de las variables fenotípicas (*longitud de la acícula, longitud del cono, largo y ancho de la semilla*), usando un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, donde el modelo utilizado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + P_i + A(P)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = valor de la ijk -ésima observación

μ = media general del experimento

P_i = efecto de la i -ésima procedencia

$A(P)_{ij}$ = efecto del j -ésimo árbol anidado en la i -ésima procedencia

ε_{ijk} = término de error aleatorio

El mismo procedimiento se utilizó para obtener los componentes de la varianza en los efectos considerados como aleatorios (árbol anidado en la procedencia y error aleatorio). Posteriormente, para visualizar qué procedencias diferían entre sí, se realizó la comparación de medias con el método de Tukey-Kramer, usando en este caso un nivel de significancia de 0.2 (valor de α considerado para determinar la zonificación descrita posteriormente).

Germinación

El diseño experimental para la colección de datos en este caso fue en bloques completos al azar, con un total de cuatro bloques (corridas), donde cada una de las ocho poblaciones (representadas por las semillas de cada altitud de origen) fue representada con una sola replicación (25 semillas llenas) por bloque, las cuales fueron distribuidas aleatoriamente dentro de cada bloque. Así, el modelo estadístico de análisis utilizado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + P_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ijk} = valor de la ijk -ésima observación

μ = media general del experimento

B_i = efecto del i -ésimo bloque (corrida)

P_j = efecto de la j -ésima población (originada en su respectiva altitud)

ε_{ij} = término de error aleatorio

Para estimar la variación entre poblaciones se utilizó el procedimiento de SAS Proc Glimmix para la variable *capacidad germinativa*, y Proc Freq (para obtener la prueba no paramétrica de Friedman) para la variable *velocidad de germinación* usando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$; asimismo, para esta variable se realizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon, que permitió la comparación de medias entre poblaciones con un $\alpha = 0.1$.

Posteriormente, para observar el posible comportamiento clinal a lo largo del transecto altitudinal, se realizaron diagramas de dispersión de los porcentajes medios de *capacidad*

germinativa y de los valores medios de *velocidad de germinación* frente a sus respectivas altitudes de origen, ajustando un modelo de regresión a los datos según su significación ($\alpha = 0.05$) y su coeficiente de determinación (r^2).

Zonificación

Zonificación altitudinal

Para los análisis de varianza de las variables morfológicas en los que existió diferencia significativa entre procedencias se calculó la Diferencia Mínima Significativa, DMS (Least Significant Difference: LSD) entre medias correspondiente a un $\alpha = 0.2$. Para observar si existía un patrón altitudinal de la variación entre procedencias, se realizó una regresión entre las medias por procedencia y su altitud de origen. Finalmente, se realizó una zonificación altitudinal provisional considerando un clima contemporáneo (promedio 1961 - 1990), basado en transferir la DMS entre procedencias a su equivalente en altitud y climática (Sáenz-Romero 2004).

Zonificación para clima contemporáneo y clima futuro (RCP 6.0)

El clima contemporáneo (temperatura) de referencia utilizado fue el promedio de los años 1961 a 1990. El clima futuro fue el centrado en la década de 2060, estimado por un ensamble de modelos-escenarios, spline para todo Norte América, con una Vía de Concentración Representativa o RCP, con un forzamiento radiativo de 6.0 W/m^2 . Ambos fueron obtenidos de la plataforma online de Investigación sobre el Cambio Climático Forestal: <http://charcoal.cnre.vt.edu/climate/>. La información proporcionada por esta plataforma se generó a partir de datos originados por el Laboratorio de Ciencias Forestales de Moscow del Servicio Forestal en Idaho, USA, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA.

Una vez obtenidos los datos climáticos puntuales, se repitió el procedimiento descrito en el apartado "Zonificación altitudinal", pero ahora se cambiaron los datos del eje de abscisas por la temperatura media anual del clima contemporáneo (1961-1990) correspondiente a cada una de las altitudes de origen, obteniendo así una zonificación para el clima contemporáneo. Para la zonificación del clima futuro, también se repitió el procedimiento, pero, los datos del eje de abscisas se cambiaron por la temperatura climática media anual estimada para la década de 2060 (ver Sáenz-Romero *et al.*, 2012; Ortiz-Bibian *et al.*, 2017).

Una vez definida la zonificación, se sugirieron directrices para la toma de decisiones en el movimiento de germoplasma dentro de las zonas y entre ellas, según se consideraran o no los efectos del cambio climático (Loya-Rebollar *et al.*, 2013).

RESULTADOS

Variables morfológicas

El análisis de la varianza indicó que de las cuatro variables analizadas sólo el *largo de semilla* mostró ser significativa a un $\alpha = 0.05$. La Tabla 2 muestra los *P-valores* correspondientes al ANOVA de cada variable.

Tabla 2. *P-valores* asociados al análisis de varianza para procedencias originadas a diferentes altitudes.

Variables	<i>P-valor</i>
Longitud de cono	0.1054
Longitud de acícula	0.0910

Ancho de semilla	0.2671
<i>Largo de semilla</i>	0.0058

En cuanto a los componentes de la varianza para los efectos considerados como aleatorios para la variable *largo de semilla*, se encontró que el 53.4 % de la varianza total corresponde al factor árbol (procedencia) y a los residuales el 46.7 % de la varianza total ($p < 0.0001$); lo que indica que más de la mitad de la varianza se explica por la variación entre árboles dentro de las procedencias.

La comparación de medias por pares ($\alpha = 0.2$) para el *largo de semilla* indicó que las altitudes 5 (3400 msnm; $p = 0.1793$; media ajustada = 5.09 mm) y 6 (3350 msnm; $p = 0.0205$; media ajustada = 5.34 mm) difieren de la altitud 1 (3650 msnm; media ajustada = 4.49 mm). De manera similar, las altitudes 5 ($p = 0.0834$) y 6 ($p = 0.0089$) son diferentes de la altitud 8 (3265 msnm; media ajustada = 4.37 mm), no hubo diferencias significativas para las demás comparaciones de pares de medias. En otras palabras, las procedencias ubicadas aproximadamente en la mitad del transecto altitudinal difieren en el valor promedio del *largo de semilla* con respecto a las procedencias ubicadas en los extremos del mismo transecto.

Germinación

El factor población tuvo un efecto altamente significativo ($p < 0.0001$) para la variable respuesta *capacidad germinativa*. En el análisis de regresión, se observó un modelo cuadrático (significativo con la omisión de una población atípica) de los valores medios de germinación contra su altitud de origen ($r^2 = 0.7865$; $p = 0.0456$), reforzando así la

aparente existencia de variación clinal en la especie encontrada para el *largo de la semilla*. Sin embargo, para la *velocidad de germinación* se encontró una débil evidencia estadística ($p = 0.0556$) de variación entre poblaciones.

La comparación de pares de medias indicó una débil evidencia estadística de diferencia entre las poblaciones 4 (3450 m) y 3 (3500 m) con una $p = 0.059$, 8 (3265 m) y 3 (3500 m) con $p = 0.066$, 5 (3400 m) y 4 (3450 m) con $p = 0.066$ y, 8 (3265 m) y 7 (3300 m) con $p = 0.068$, pero sin un patrón aparente de distribución altitudinal.

Zonificación altitudinal

El valor de la DMS obtenida considerando un alfa de 0.2 para la variable *largo de semilla* fue de 0.27 mm, que por razones prácticas se redondeó a 0.3 mm. El modelo de regresión cuadrática ($r^2 = 0.88$, $p = 0.0144$) entre la media por población para *largo de semilla* contra su altitud de origen fue el que mejor se ajustó, sin tener en cuenta una altitud atípica a 3350 msnm (Figura 2).

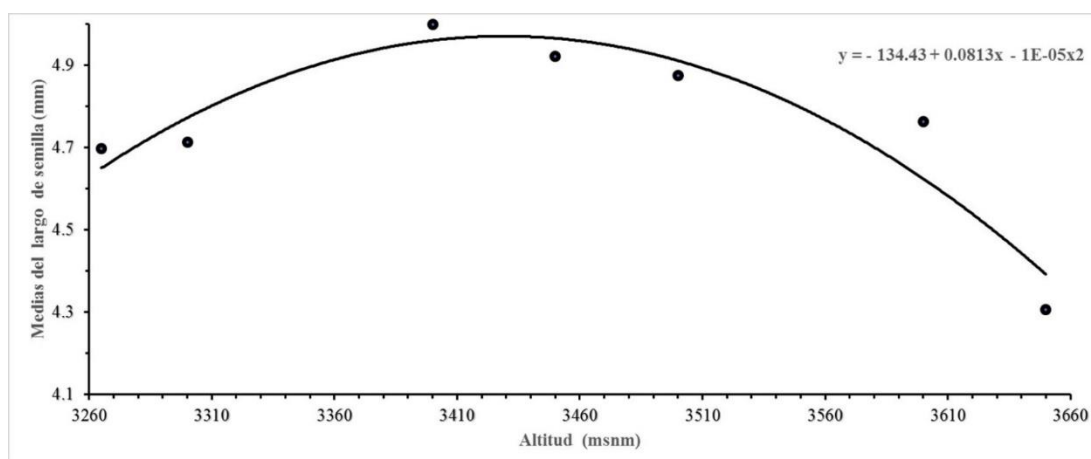


Figura 2. Comportamiento de los valores promedios del *largo de semilla* de *P. hartwegii* respecto a la altitud de origen a lo largo del transecto altitudinal en la EFEZ.

Fuente: elaboración propia, basado en los promedios obtenidos a partir de datos generados para cada altitud para la variable *largo de semilla*, 2022.

Posteriormente, a partir del valor de la DMS, se delimitaron tres zonas altitudinales para el aprovisionamiento y movimiento de germoplasma a lo largo del transecto altitudinal. Debido a que la zona altitudinal más alta cubría un rango muy pequeño (aproximadamente 70 m de diferencia altitudinal), se decidió fusionar las tres zonas en sólo dos zonas, partiendo de una altitud inferior fija de 3250 m como punto de partida. Este punto inicial arbitrario sigue perteneciendo a la distribución altitudinal natural de la especie (Tabla 3)

Tabla 3. Límites altitudinales y climáticos de dos zonas fijas para el aprovisionamiento y movimiento de germoplasma con clima contemporáneo.

Elevación (m)					Media anual de temperatura (°C)				
Zona	Límite (m)		Rango (m)	Intervalo (±)	Zona	Límite (°C)		Rango (°C)	Intervalo (±)
	Inferior	Superior				Inferior	Superior		
1	3250	3450	200	100	1	8.0	9.0	1.0	0.5
2	3450	3650	200	100	2	7.0	8.0	1.0	0.5

Fuente: Metodología basada en Loya-Rebollar et al. (2013); datos de temperatura obtenidos de la página <http://charcoal.cnre.vt.edu/climate/> (plataforma online de investigación sobre el cambio climático), 2022.

Zonificación para clima contemporáneo y clima futuro (RCP 6.0)

Bajo el mismo razonamiento de simplificación realizado para la zonificación en base a la altitud, para la zonificación climática, la zona número tres (parte más alta del transecto altitudinal) tenía un rango muy estrecho (0.3 °C), por lo que, se decidió fusionarlas dejando solo dos zonas (ver Tabla 3).

En cuanto a la zonificación para el clima proyectado al año 2060, comparando con los límites de las zonas fijas con el clima contemporáneo, se estimó a qué altitudes se tendrían que desplazar las poblaciones para reacoplarse a las temperaturas para las cuales están adaptadas actualmente, pero que ocurrirán a mayor altitud debido al cambio climático. Se estimó que las temperaturas que conforman los límites de las zonas fijas de germoplasma se desplazan altitudinalmente hacia arriba aproximadamente 400 m (Figura 3).

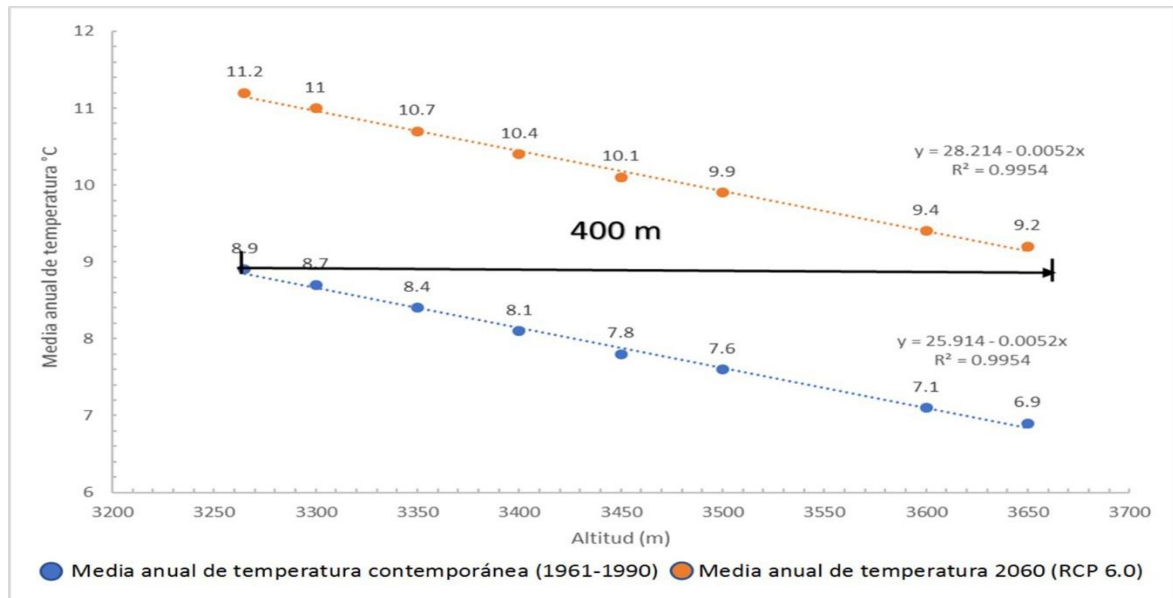


Figura 3. Proyección del desplazamiento de temperatura contemporánea

+En la actualidad ocho poblaciones de *P. hartwegii* están adaptadas de forma natural, pero se estima que en un futuro estas temperaturas se desplazarán a altitudes mayores.

Fuente: Metodología basada en Loya-Rebollar et al. (2013). La variable del eje de las ordenadas se cambió por valores de media anual de temperatura presentes en las poblaciones muestreadas, 2022.

En consecuencia, se esperaría que en aproximadamente cuatro décadas (década centrada en 2060), las zonas climáticas fijas actuales estarían fuera de los límites altitudinales del cerro "El Papayo" (Tabla 4).

Tabla 4. Límites altitudinales y climáticos para dos zonas fijas de germoplasma considerando un clima proyectado al año 2060, RCP 6.0.

Zona		Elevación (m)			Media anual de temperatura (°C)			
Límite (m)		Rango (m)	Intervalo (±)		Límite (°C)		Rango Intervalo	
Inferior	Superior				Inferior	Superior	(°C)	(±)
1 ₂₀₆₀	3650	3850	200	100	8.0	9.0	1.0	0.5
2 ₂₀₆₀	3850	4050	200	100	7.0	8.0	1.0	0.5

Fuente: Metodología basada en Loya-Rebollar et al. (2013). Datos de temperatura obtenidos de la página <http://charcoal.cnre.vt.edu/climate/> (plataforma online de investigación sobre el cambio climático), 2022.

Lineamientos para el movimiento de germoplasma

Las directrices para el abastecimiento y movimiento de germoplasma que se utilizará en actividades de reforestación o restauración ecológica, con base en lo planteado por Loya-Rebollar et al. (2013) serían:

- 1) Sin considerar los inminentes efectos del cambio climático:
 - a) Obtención de germoplasma de una de las zonas fijas, producir plantas en vivero y plantarlas dentro de la misma zona (delimitada ya sea por intervalos altitudinales o climáticos) donde se recolectó el material de propagación.
 - b) Recolectar germoplasma a una determinada altitud, producir plantas y plantarlas a intervalos de $\pm$ la mitad del ancho de una zona fija (ver Tabla 3); es decir, $\pm$ 100

m hacia arriba o hacia abajo con respecto a la altitud de recolección o $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ con respecto a la temperatura media anual del punto de recolección (zonas de punto focal).

- 2) Si se tienen en cuenta los efectos del cambio climático en la dinámica de las poblaciones de *P. hartwegii*, se debe considerar que las temperaturas actuales a las que se establecen naturalmente las poblaciones se moverán aproximadamente 400 m más arriba (ver Figura 3). Así, los límites climáticos que determinan las zonas fijas para determinar el sitio de plantación se situarán fuera del límite altitudinal del cerro "El Papayo" (3650 m).
- 3) Si se considera que los intervalos climáticos y altitudinales de las zonas futuras₂₀₆₀ son los mismos que los de las zonas contemporáneas, y con el objetivo de realinear poblaciones de *P. hartwegii* a un clima al que actualmente están adaptadas, pero que debido al calentamiento global se espera su desplazamiento a 400 m de altitud más arriba, se recomienda:
 - a) Recolectar germoplasma en una zona contemporánea, producción de planta en vivero y plantarla a 400 m de altitud en promedio más arriba, lo que implica recolectar germoplasma de la zona 1 contemporánea y plantar en la zona 1 futura del año 2060; para la zona 2 contemporánea se debe repetir el proceso descrito para la zona 1.

Cabe mencionar que si las zonas climáticas fijas contemporáneas se desplazaran altitudinalmente fuera de los límites altitudinales del cerro "El Papayo", aún existe la posibilidad de que en el futuro existan condiciones de temperatura adecuadas en el área para las poblaciones de *P. hartwegii* que actualmente se desarrollan a altitudes menores a

las consideradas en el transecto altitudinal utilizado en este estudio, y para las cuales podrían transponerse los límites altitudinales o de zona climática aquí delimitados.

DISCUSIÓN

Variables morfológicas

El valor promedio del *largo de semilla* (4.9 mm) encontrado para *P. hartwegii* en este estudio es similar al reportado por Iglesias et al. (2012) y Niembro-Rocas (1992) de 4.9 mm y valores entre 3.4 a 5.4 mm respectivamente. En cuanto al valor promedio obtenido para el *ancho de semilla* (3.5 mm), éste fue similar al reportado por Iglesias et al. (2012) de 3.4 mm. Asimismo, estuvo dentro del rango de valores conseguido por Niembro-Rocas (1992) de 2 mm a 3.7 mm.

El valor medio de la *longitud del cono* (8.59 cm) fue similar al mostrado por Iglesias et al. (2012) de 7.82 ± 1.1 cm. Asimismo, estuvo dentro del rango de valores descrito por Iglesias-Andreu y Tivo-Fernández (2006) quienes reportaron valores entre 4.2 a 11.7 cm para esta característica. Por su parte, Farjón et al. (1997) los situaron en el rango de 8 a 12 cm.

En cuanto al valor promedio de la *longitud de acícula más larga* (18.63 cm) fue ligeramente superior al descrito en Guízar-Nolazco (2014) quien indica valores entre 10 cm a 17 cm, y contrastado drásticamente por lo publicado por Iglesias-Andreu y Tivo-Fernández (2006) quienes indican valores medios para la especie, pero en poblaciones del Cofre de Perote en Veracruz, México de 8.4 ± 1.71 cm, aunque Farjon et al. (1997) indican valores de hasta 22 cm de longitud.

En cuanto a la variación morfológica de caracteres con posible valor adaptativo como los estudiados, se plantea que se debe a la plasticidad fenotípica o a la adaptación a diferentes condiciones ambientales o incluso a ambas, como se observó en un estudio realizado en México, relacionado con la variación del tamaño de las hojas para *Quercus rugosa* Nee, reportado por Uribe-Salas et al. (2008). Al respecto, se considera que esto podría explicar la variación encontrada en el tamaño de las acículas en el presente estudio con respecto a otros publicados sobre esta especie.

Ahora bien, la diferenciación encontrada entre poblaciones para el *largo de semilla* en *P. hartwegii*, también fue reportada por Iglesias et al. (2012) entre las poblaciones del Cofre de Perote y Pico de Orizaba en el estado de Veracruz, México. Cabe decir, a diferencia de ellos en el presente estudio, no se encontraron diferencias significativas en las variables *longitud de acícula más larga* y *longitud de cono* ($p \leq 0.05$).

Germinación

La existencia de una diferencia significativa en la *capacidad germinativa* entre las poblaciones de *P. hartwegii* encontradas en este estudio también fue reportada por Ortiz-Bibian et al. (2019) para *Abies religiosa*, en Michoacán, México, donde a lo largo de un gradiente altitudinal las poblaciones del centro presentaron mayor capacidad germinativa y viabilidad; coincidiendo con este estudio para la *capacidad germinativa* (donde las poblaciones a 3400 m y 3500 msnm presentaron un 90 % y 78 % de germinación media respectivamente y una *velocidad de germinación* media de 13 y 13.25 días respectivamente), siendo las poblaciones situadas en los extremos del transecto las de menor porcentaje de germinación media. Estos autores también coinciden con el patrón

de variación altitudinal encontrado para la capacidad de germinación, sugiriendo que se debe a las condiciones ambientales que prevalecen en los extremos altitudinales de distribución de la especie, como estrés por heladas (en la parte alta) y eventualmente sequía (en la parte baja).

Montero-Nava (2020) también reportó los valores más altos de germinación a una altitud de 3400 msnm, para un transecto altitudinal en Puebla con *P. hartwegii*, indicando que los valores de capacidad germinativa disminuían a medida que aumentaba la altitud a partir de esta ubicación, lo que también coincide con lo hallado aquí (tendencia de menor *capacidad germinativa* promedio).

Por otro lado, Capilla-Dinorin (2018) encontró un alto porcentaje de óvulos abortados y semillas vanas (entre otras características de producción de semillas) para poblaciones de *P. chiapensis* que indicaban problemas en el proceso de polinización relacionados con el tamaño de las poblaciones. Cabe mencionar que en el presente estudio se observó que las poblaciones de los extremos altitudinales presentaban una menor densidad de árboles de la especie en estudio, lo que podría repercutir en el proceso de polinización, y, por lo tanto, en el desarrollo de las semillas, así como en el proceso de germinación, aunque esto debe tomarse con reserva ya que no se realizaron correlaciones con la densidad de árboles.

Zonificación altitudinal y climática

El patrón de distribución relativo a los valores medios de *largo de semilla* con respecto a la altitud de origen (Figura 2), indica la existencia de una tendencia (cuadrática) específicamente para el cerro "El Papayo". Asimismo, y según López-Ríos (2009), el óptimo ecológico existente se sitúa en la parte media del transecto altitudinal, por lo que

hablando de temperatura los valores ecológicos máximos y mínimos se situarían en los extremos altitudinales inferior y superior, respectivamente.

En cuanto al factor temperatura se considera que este aspecto tiene una alta correlación con la altitud, (Figura 3). A su vez, la diferenciación entre poblaciones y su asociación con un gradiente altitudinal es mencionada por Viveros-Viveros et al. (2009) para *P. hartwegii* en el Pico de Tancítaro, Michoacán, específicamente para rasgos como altura de planta y daño por heladas.

Además, teniendo en cuenta que los factores ambientales pueden influir en el desarrollo de los individuos en función de la capacidad genética que poseen los taxones en los rangos de tolerancia, se podría inferir que la plasticidad fenotípica de *P. hartwegii* se expresa en este caso, influenciada por la variación de la temperatura a lo largo del gradiente altitudinal, un patrón que ha sido reportado para árboles (Thomas, 2011), y que posiblemente denote que existe una diferenciación genética entre las poblaciones atribuida a la presión de selección ejercida por el mismo cline de temperatura a lo largo de la altitud, aunque, no es el único aspecto que influye, ya que hay más factores además de la temperatura que podrían estar interviniendo.

Sin embargo, esto último tendría que ser verificado con pruebas que incluyan rasgos cuantitativos con valor adaptativo como lo hicieron Loya-Rebollar et al. (2013), quienes determinaron diferencias genéticas entre poblaciones de *P. hartwegii* para diferentes rasgos como: alargamiento total, tasa de alargamiento, altura final de la plántula, diámetro basal, peso seco de acículas, ramas, tallo y peso seco total; mismos que se agruparon en un componente principal y reflejaron un patrón de variación (modelo cuadrático) a lo largo de un gradiente climático-altitudinal.

Asimismo, se reportó que la temperatura media anual, entre otros elementos a considerar, fue una variable climática que resultó significativa como predictora de los valores medios por población del primer componente principal antes mencionado, lo que coincide con lo encontrado en este trabajo, con un modelo cuadrático ($r^2 = 0.84$, $p = 0.0251$) para la media por población para *largo de semilla* frente a la temperatura media anual.

Thomas (2011) indica que las especies arbóreas comúnmente presentan cambios morfológicos y fisiológicos dramáticos cuando se distribuyen a lo largo de gradientes altitudinales, siendo la disminución de la temperatura y su relación con el aumento de altitud el factor que posiblemente más impacta directamente a los procesos fisiológicos de las plantas.

Estos clines climáticos-altitudinales significativos han sido reportados para diferentes especies de coníferas en atributos morfológicos y rasgos cuantitativos, tales como *Pinus devoniana* en Michoacán (Castellanos-Acuña *et al.*, 2013; Sáenz-Romero *et al.*, 2012), *Abies religiosa* (Ortiz-Bibian *et al.*, 2019; Ortiz-Bibian *et al.*, 2017; Castellanos-Acuña *et al.*, 2014), *P. patula* en Oaxaca (Viveros-Viveros *et al.*, 2013) y en Veracruz (Aparicio-Rentería *et al.*, 2020).

En este sentido, el rango de altitud y temperatura media anual correspondiente a cada una de las dos zonas delimitadas en este estudio coincidió con el determinado por Loya-Rebollar *et al.* (2013) para la misma especie, y fue el mismo que se especificó por Ruíz-Talonia (2010) en *P. patula*, para la altitud. En ambos casos, las zonificaciones se basaron en la diferenciación genética de rasgos cuantitativos, lo cual es similar a lo planteado por Castellanos-Acuña *et al.* (2014) para *A. religiosa* (250 m).

Lineamientos para movimiento de germoplasma

Una premisa aceptada por la comunidad de investigadores forestales es que la adaptación de las poblaciones arbóreas a ambientes heterogéneos (tanto en el espacio como en el tiempo) depende de la variación genética que éstas posean, así como de la capacidad que tienen para modificar el fenotipo (a nivel individual) en relación con el ambiente (Chambel *et al.*, 2005). En ese sentido, se considera que cuando el material de propagación disminuye su capacidad de adaptación al enfrentar determinadas condiciones desfavorables presentes en los lugares de plantación, se da lugar a la aparición de fenómenos tales como una baja supervivencia y una alta mortalidad antes de que los individuos alcancen la edad reproductiva; así como un crecimiento reducido y un descenso en la producción de semillas, e incluso la pérdida de competitividad entre individuos (Thomas *et al.*, 2014).

Bajo el supuesto de que estas poblaciones naturales de árboles ocupan su espacio de distribución actual porque están adaptadas a las condiciones ambientales del mismo, como resultado de un largo proceso evolutivo, entonces las directrices sobre el movimiento de germoplasma, sin considerar el cambio climático dentro de la misma zona fija o considerando las zonas de puntos focales, son opciones que se ajustarían al supuesto, ya que se consideran las zonas que proporcionan a las poblaciones arbóreas las condiciones a las que están razonablemente adaptadas. En consecuencia, el establecimiento de individuos bien adaptados en actividades de reforestación o restauración es más probable que ocurra con más éxito en cada zona, por lo que su uso puede ser una herramienta útil en la gestión forestal.

Por otro lado, no se pueden ignorar los efectos inminentes y potencialmente desastrosos del cambio climático sobre las poblaciones de árboles. En ese sentido, Cervantes-Martínez et al. (2019) mencionan que el clima modula la dinámica de los insectos descortezadores, y dado que se prevé para los bosques templados de México condiciones que alteran el comportamiento de sus especies arbóreas como un efecto más del cambio climático, se ha previsto una posible relación de estos dos fenómenos: un aumento del fenómeno de la sequía, que afecta el funcionamiento fisiológico de los árboles, debilitándolos y así convirtiéndolos en candidatos susceptibles a ataques de estos insectos (Del-Val y Sáenz-Romero, 2017; Gómez-Pineda *et al.*, 2022). En ese sentido, el aumento proyectado de temperatura media anual promedio para la zona de estudio fue de 2.3 °C (año 2060), lo que puede en un futuro, dificultar los procesos de establecimiento y crecimiento de las plantas, ya que de acuerdo con Thomas et al. (2014) la presión de selección aumenta cuando el clima es más inhóspito.

La estimación mundial del aumento de la temperatura y su relación con la desviación del lugar de distribución de las poblaciones de varias especies arbóreas ha generado incertidumbre sobre su adaptación a temperaturas más cálidas (Hammon *et al.*, 2022). En México, las coníferas no están exentas de esta situación, en ese sentido, Gómez-Pineda et al. (2020) reportaron que para finales de siglo (año 2090) especies como *P. oocarpa* sufrirán una reducción de su hábitat climático propicio de 67%, *P. devoniana* de 58%, *Abies religiosa* de 88%, *P. hartwegii* de 87% con respecto a su área de distribución actual (año 1961-1990) a nivel nacional. Así, para *P. hartwegii* se prevé que para el año 2060 su clima favorable desaparecerá en varias de las montañas donde se distribuye actualmente, y éste aparecerá en montañas que superan los 4300 metros sobre el nivel del mar, como el

Nevado de Colima, Nevado de Toluca, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Pico de Orizaba y el Cofre de Perote.

Otros autores como Manzanilla-Quiñones et al. (2019) reportaron proyecciones de incrementos de temperatura media anual para el Eje Neovolcánico Transversal para el periodo 2041-2060 de entre 0.7 °C y 1.5 °C, con pérdidas del bosque subalpino de *P. hartwegii* de entre 11.7 % y 18.3 % y, 1.1 °C y 2.1°C con pérdidas de entre el 18.3 % y el 26.9 % respecto a su distribución actual, lo que sugiere que para el mismo periodo de tiempo la especie se vería obligada a ascender altitudinalmente entre 100-500 m, lo que coincide con los hallazgos de este estudio, con un desplazamiento de la especie de aproximadamente 400 m para que las poblaciones actuales se vuelvan a acoplar a las condiciones de temperatura a las que están adaptadas.

La migración natural de las poblaciones de algunas especies arbóreas a mayores alturas como posible efecto del cambio climático se ha dado por sentada en México, por ejemplo, para el oyamel (Romahn-Hernández et al., 2020). En el caso de *P. hartwegii*, Alfaro-Ramírez et al. (2017) informan que no está claro si la especie podrá migrar altitudinalmente por encima de su límite altitudinal superior, debido a las condiciones ambientales adversas a las que está expuesta la especie en esas alturas.

Sin embargo, aunque las poblaciones pueden migrar altitudinalmente, las tasas de migración pueden ser superadas por las tasas de aumento de la temperatura (Peñuelas et al., 2007), por lo que la migración asistida puede servir como una herramienta con el propósito de reacoplar las poblaciones con sus climas favorables que en el futuro aparezcan en altitudes mayores. Este tipo de acciones han sido probadas en lugares como Canadá (Marris, 2009) y han sido sugeridas en otros lugares para diferentes especies

(Loya-Rebollar *et al.*, 2013; Carvajal-Navarro *et al.*, 2019); donde el uso de plantas nodriza en sitios de reforestación a mayor altitud podría ser una estrategia para ayudar al establecimiento de individuos procedentes de áreas fijas ubicadas a menor altitud (Ramírez-Contreras y Rodríguez-Trejo, 2009).

CONCLUSIONES

En la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, México, se observa una diferenciación fenotípica (rasgos con posible valor adaptativo) entre las procedencias de *P. hatwegii* originadas a lo largo de su transecto natural de distribución altitudinal, donde las procedencias centrales difieren significativamente de las ubicadas en los extremos del transecto climático-altitudinal.

La presencia de un patrón de distribución clinal significativo en los atributos fenotípicos (*largo de semilla y capacidad germinativa*) de *P. hartwegii* con respecto al transecto climático-altitudinal en el cerro “El Papayo”, puede ser utilizado para la delimitación de zonas fijas para el aprovisionamiento y movimiento de germoplasma en actividades de reforestación local.

Se sugiere el uso de las zonas delimitadas con un ancho de 200 m altitudinales o de 1 °C, para actividades de recolección de germoplasma, sin considerar al cambio climático. También, se sugiere un movimiento altitudinal de 400 m hacia arriba de las fuentes de semilla, considerando el cambio climático proyectado al año 2060.

El aumento previsto de la temperatura media anual de 2.3 °C para la década centrada en el año 2060 en la zona de estudio, indica que las poblaciones de *P. hartwegii* necesitarán ayuda para migrar altitudinalmente hacia zonas más altas. Esto no significa

necesariamente la desaparición de la especie en la zona, pero sí una mayor presión de selección para las poblaciones actuales que podrían: a) desarrollarse en condiciones menos favorables, con el costo que ello conlleva: menor crecimiento y mayor susceptibilidad al ataque de plagas y enfermedades, o b) la presión de selección eventualmente dejaría sólo a los individuos con la constitución genética adecuada para superar las nuevas condiciones.

Agradecimientos

Al Dr. Javier López Upton por su apoyo en la prueba de germinación. Al Dr. Ángel Leyva Ovalle por las facilidades otorgadas para realizar el muestreo en la EFEZ y al Ing. Isaac Ramírez Barraza por la ayuda otorgada durante la estancia en la EFEZ.

Referencias bibliográficas

- Alfaro-Ramírez, F. U., Arredondo-Moreno, J. T., Pérez-Suárez, M., y Endara-Agramont, Á. R. (2017). *Pinus hartwegii* Lindl. Treeline ecotone: Structure and altitudinal limits at Nevado de Toluca, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(2), 261–273. <https://doi.org/doi: dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.06.040>
- Aparicio-Rentería, A., Viveros-Viveros, H., Hernández-Villa, J., Sáenz-Romero, C., Ruiz-Montiel, C., y Pineda Posadas, J. A. (2020). Zonificación altitudinal de *Pinus patula* a partir de conos y semillas en la sierra de Huayacocotla, Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 26(2), 1–12. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621962>
- Capilla-Dinorin, E. (2018). *Variación en indicadores reproductivos, germinación y crecimiento inicial de plántulas de poblaciones de Pinus chiapensis* [Tesis de

maestría, Colegio de postgraduados].

[http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/10521/2977/1/Capilla_Dinorin E MC Ciencias Forestales 2018.pdf](http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/10521/2977/1/Capilla_Dinorin_E_MC_Ciencias_Forestales_2018.pdf)

Carbajal-Navarro, A., Navarro-Miranda, E., Blanco-García, A., Cruzado-Vargas, A. L., Gómez-Pineda, E., Zamora-Sánchez, C., Pineda-García, O'Neill, G., Gómez-Romero, M., Lindig-Cisneros, R., Johnsen, K. H., Lobit, P., Lopez-Toledo, L., Herrerías-Diego, Y., 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), 1–16. <https://doi.org/doi: 10.3389/fevo.2019.00421>

Castellanos-Acuña, D., Lindig-Cisneros, R. A., Silva-Farias, M. Á., y Sáenz-Romero, C. (2014). Zonificación altitudinal provisional de *Abies religiosa* en un área cercana a la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca, Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XX(2), 215–225. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.11.041>

Castellanos-Acuña, D., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Sánchez-Vargas, N. M., Lobbit, P., y Montero-Castro, J. C. (2013). Variación altitudinal entre especies y procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla*. Ensayo de vivero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XIX(3), 399–411. <https://doi.org/doi: 10.5154/r.rchscfa.2013.01.002>

Cervantes-Martínez, R., Cerano-Paredes, J., Sánchez-Martínez, G., Villanueva-Díaz, J., Esquivel-Arriaga, G., Cambrón-Sandoval, V. H., Méndez-González, J., y Castruita-Esparza, L. U. (2019). Historical bark beetle cutbreaks in Mexico, Guatemala and Honduras (1985-2015) and their relationship with droughts.

- Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 25(2), 269–290.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.01.006>
- Chambel, M. R., Climent, J., Alia, R., y Valladares, F. (2005). Phenotypic plasticity: A useful framework for understanding adaptation in forest species. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 14(3), 334–344.
<https://doi.org/10.5424/srf/2005143-00924>
- Del-Val, E. y Sáenz-Romero, C. (2017). Insectos descortezadores (Coleoptera: Curculionidae) y cambio climático: Problemática actual y perspectivas en los bosques templados. TIP. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 20(2), 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2017.04.006>
- Farjon, A., Pérez de la Rosa, J. A., y Styles, B. T. (1997). *Guía de campo de los Pinos de México y América Central* (Primera). Continental Printing Bélgica.
- Gómez-Pineda, E., Sáenz-Romero, C., Ortega-Rodríguez, J. M., Blanco-García, A., Madrigal-Sánchez, X., Lindig-Cisneros, R., Lopez-Toledo, L., Pedraza-Santos, M. E., y Rehfeldt, G. E. (2020). Suitable climatic habitat changes for Mexican conifers along altitudinal gradients under climatic change scenarios. *Ecological Applications*, 30(2), 1–17. <https://doi.org/10.1002/eap.2041>
- Gómez-Pineda, E., Hammond, W. M., Trejo-Ramírez, O., Gil-Fernández, M., Allen, C. D., Blanco-García, A., Sáenz-Romero, C. (2022). Drought years promote bark beetle outbreaks in Mexican forests of *Abies religiosa* and *Pinus pseudostrobus*. *Forest Ecology and Management*, 505 (119944), 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119944>
- Guízar-Nolazco, E. (2014). *MANUAL PARA IDENTIFICACIÓN DE BOTÁNICA FORESTAL MEXICANA* (Primera). Universidad Autónoma Chapingo.

- Hammond, W. M., Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Adams, H. D., Klein, T., López, R., Sáenz-Romero, C., Hartmann, H., Breshears, D. D., y Allen, C. D. (2022). Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communications*, 13(1761), 1–11.
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2>
- Iglesias, L., Solís-Ramos, L., y Viveros-Viveros, H. (2012). Variación morfométrica en dos poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lindl. Del estado de Veracruz. *Revista Internacional de Botánica Experimental. International Journal of Experimental Botany*, 81, 239–246.
- Iglesias-Andreu, L. G., y Tivo-Fernández, Y. (2006). Caracterización morfométrica de la población de *Pinus hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Ra Ximhai*, 2(2), 449–468.
- López-Ríos, G. F. (2009). *Ecofisiología de árboles* (segunda). Universidad Autónoma Chapingo.
- Loya-Rebollar, E., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Lobit, P., Villegas-Moreno, J. A., y Sánchez-Vargas, N. M. (2013). Clinal variation in *Pinus hartwegii* populations and its application for adaptation to climate change. *Silvae Genetica*, 62(3), 86–95. <https://doi.org/10.1515/sg-2013-0011>
- Manzanilla-Quiñones, U., Aguirre-Calderón, Ó. A., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., y Yerena-Yamallel, J. I. (2019). Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y Bosques*, 25(2), 1–16. <https://doi.org/doi:10.21829/myb.2019.2521804>
- Marris, E. (2009). Planting the forest of the future. *Nature*, 459, 906–908.
<https://doi.org/10.1038/459906a>

- Méndez-Toribio, M., Martínez-Garza, C., Ceccon, E., y Guariguata, M. R. (2018). La restauración de ecosistemas terrestres en México: Estado actual, necesidades y oportunidades. Center for International Forestry Research (CIFOR). <https://doi.org/10.17528/cifor/006853>
- Montero-Nava, R. M. (2020). *Diferenciación de los indicadores reproductivos, sobrevivencia y crecimiento de plántulas de Pinus hartwegii procedentes de un gradiente altitudinal en el Parque Nacional La Malinche* [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de Tlaxcala.
- Niembro-Rocas, A. (1992). Variación dimensional y características morfológicas de semillas de 36 especies y variedades de pinos mexicanos. *La ciencia y el hombre*, 11, 107–143.
- Ortiz-Bibian, M. A., Blanco- García, A., Lindig - Cisneros, R. A., Gómez-Romero, M., Castellanos-Acuña, D., Herrerías - Diego, Y., Sánchez-Vargas, N. M., y Sáenz-Romero, C. (2017). Genetic Variation in *Abies religiosa* for Quantitative Traits and Delineation of Elevational and Climatic Zoning for Maintaining Monarch Butterfly Overwintering Sites in Mexico, considering Climatic Change. *Silvae Genetica*, 66(1), 14–23. <https://doi.org/DOI:10.1515/sg-2017-0003>
- Ortiz-Bibian, M. A., Castellanos-Acuña, D., Gómez-Romero, M., Lindig-Cisneros, R., Silva-Farías, M. Á., & Sáenz-Romero, C. (2019). Variación entre poblaciones de *Abies religiosa* (h.b.k.) schl. et cham a lo largo de un gradiente altitudinal. i. capacidad germinativa de la semilla. *Revista fitotecnica mexicana*, 42(3), 301–308.
- Peñuelas, J., Ogaya, R., Boada, M., y S. Jump, A. (2007). Migration, invasion and decline: Changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European

- beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography*, 30(6), 829–837.
<https://doi.org/10.1111/j.2007.0906-7590.05247.x>
- Pita-Villamil, J. M., y Pérez-García, F. (1998). *Germinación de semillas* (1a ed.). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1998_2090.pdf
- Ramírez-Contreras, A., y Rodríguez-Trejo, D. A. (2009). Plantas nodriza en la reforestación con *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(1), 43–48.
- Romahn-Hernández, L. F., Rodríguez-Trejo, D. A., Villanueva-Morales, A., Monterroso-Rivas, A. I., y Pérez-Hernández, M. de J. (2020). Rango altitudinal: Factor de vigor forestal y determinante en la regeneración natural del oyamel. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 8(22), 1–17. <https://doi.org/DOI:10.22201/enesl.20078064e.2020.22.72751>
- Ruíz-Talonia, L. F. (2010). *Variación genética altitudinal entre procedencias de Pinus patula Schltdl. y Cham. En ensayos de vivero y campo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca*. [Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].
http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/1832
- Sáenz-Romero, C. (2004). Zonificación Estatal y Altitudinal para la Colecta y Movimiento de Semillas de Coníferas en México. En J. J. Vargas H., B. Bermejo V., & T. Ledig (Eds.), *Manejo de Recursos Genéticos Forestales* (Segunda edición). Colegio de Postgraduados; Universidad Autónoma Chapingo; CONAFOR.
- Sáenz-Romero, C., y Linding-Cisneros, R. (2004). *Evaluación y propuestas para el programa de reforestación en Michoacán, México*. 37, 16, Ciencia Nicolaita.

- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Soto-Correa, J. C., Aguilar-Aguilar, S., Zamarripa-Morales, V., y y-Upton, J. (2012). Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrobus* populations from Michoacán, México. Two location shadehouse test results. *Revista Fitotenia Mexicana*, 35(2), 111–120.
- Thomas, E., Jalonen, R., Loo, J., Boshier, D., Gallo, L., Cavers, S., Bordács, S., Smith, P., y Bozzano, M. (2014). Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species. *Forest Ecology and Management*, 333, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.015>
- Thomas, S. C. (2011). Genetic vs. Phenotypic responses of trees to altitude. *Tree Physiology*, 31, 1161–1163. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq015>
- Universidad Autónoma Chapingo. (2020). Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ). <http://dicifo.chapingo.mx/zoquiapan/>
- Uribe-Salas, D., Sáenz-Romero, C., González-Rodríguez, A., Téllez-Valdéz, O., y Oyama, K. (2008). Foliar morphological variation in the white oak *Quercus rugosa* Née (Fagaceae) along a latitudinal gradient in Mexico: Potential implications for management and conservation. *Forest Ecology and Management*, 256(12), 2121–2126. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.08.002>
- Vargas Ríos, O. (2011). Restauración Ecológica: Biodiversidad y Conservación. *Acta biológica. Colombiana*, 16(2), 221–246.
- Viveros-Viveros, H., Camarillo-Luna, A. R., Sáenz-Romero, C., y Aparicio-Rentería, A. (2013). Variación altitudinal en caracteres morfológicos de *Pinus patula* en el estado de Oaxaca (México) y su uso en la zonificación. *Bosque*, 34(2), 11–12. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002013000200006>

Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J.,
Ramírez-Valverde, G., y Santacruz-Varela, A. (2009). Altitudinal genetic
variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost
damage in seedlings. *Forest Ecology and Management*, 257(3), 836–842.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.021>

CONCLUSIONES GENERALES

La hipótesis que plantea que "el tamaño de la semilla de *P. hartwegii* variará entre las procedencias (éstas originadas en diferentes altitudes), donde las procedencias originadas en altitudes más bajas tendrán valores más grandes, lo cual es un patrón que se ha observado en otras especies", se refuta. Esto se debe a que, como resultado de la investigación, *P. hartwegii* presentó los valores promedio más bajos tanto en las altitudes inferiores como en las más altas, y los valores promedio más altos en las altitudes medias del gradiente climático-altitudinal.

Se confirmó la segunda hipótesis, que establece que la capacidad de germinación de *P. hartwegii* variará entre altitudes, donde las procedencias originadas en altitudes más bajas tendrán valores más bajos. Los valores medios más bajos se encontraron tanto en las altitudes inferiores como en las más altas, y los valores promedio más altos se encontraron en la parte media del gradiente climático-altitudinal, lo que sugiere la existencia de condiciones menos favorables para el desarrollo y la germinación de las semillas en los extremos del gradiente, como el estrés en los árboles debido a las temperaturas más altas en la parte baja y las temperaturas extremadamente frías en la parte alta del gradiente.

Con base en los resultados, se concluye que existe un patrón clinal de variación fenotípica para *Pinus hartwegii* asociado tanto a la altitud como al clima, lo que ayudó con la delimitación de dos zonas provisionales fijas (con una anchura de 200 m de altitud o 1 °C de intervalo de temperatura media anual) para el movimiento de germoplasma en las actividades locales de reforestación.

La limitación del estudio reside en que la variación encontrada entre procedencias está influenciada tanto por un componente genético como ambiental, así como su interacción, por lo que las zonas delimitadas tienen un carácter provisional. Por ello, para confirmar la existencia de una variación puramente genética que pueda asociarse al gradiente climático-altitudinal (un

cline genético de adaptación), se sugiere el establecimiento de ensayos de jardín común en la zona de estudio.

A partir de los resultados de este estudio, se abre el camino para nuevas investigaciones que profundicen en la búsqueda y comprensión de la variación intraespecífica de *P. hartwegii* en la zona de estudio tales como: ensayos de jardín común para confirmar la existencia de variación genética que ayude a redelimitar las zonas propuestas en este estudio; el establecimiento de trasplantes recíprocos para estudiar la respuesta de las poblaciones a diferentes condiciones de temperatura, y una estimación de su comportamiento ante el cambio climático; asimismo se pueden generar ensayos de migración asistida como medida de mitigación del impacto del cambio climático en las poblaciones de *P. hartwegii*.

La migración asistida podría ser una herramienta para la gestión forestal como parte de la mitigación del efecto de cambio climático en la zona, subrayando que antes debe de realizarse la planificación de un estudio que indique el potencial de migración de la especie junto con las consideraciones necesarias para su éxito.

Si se considera un aumento de la temperatura media anual previsto de 2.3 °C para el año 2060 debido al cambio climático, se sugiere un movimiento de las fuentes de semillas 400 m hacia arriba en altitud en la zona de estudio.