



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales

Maestría Institucional en Ciencias Biológicas

Opción: Fisiología y Genética Vegetal

Migración asistida de procedencias de *Abies religiosa* en el
Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca

TESIS

Que para obtener el Título de:

MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

IBT. Patricia Herrejón Calderón

Director de Tesis: Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero

Co-Director: Dr. Arnulfo Blanco García

Morelia, Michoacán, abril del 2023



Tesis elaborada en el Laboratorio de Genética Forestal del Instituto de
Investigaciones sobre los Recursos Naturales



Director de tesis: Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero¹

Co-Director: Dr. José Arnulfo Blanco García²

Comité:

Dr. Roberto Lindig Cisneros³

Dr. Leonel López Toledo¹

Dr. Ángel Rolando Endara Agramont⁴

¹ Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Av. San Juanito Itzícuaró s/n, Col. Nueva Esperanza, Morelia, Michoacán, CP 58330, México.

² Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Morelia, Michoacán, CP 58030, México.

³ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Morelia, Michoacán, CP 58190, México.

⁴ Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR), *campus* “El Cerillo Piedras Blancas”, Toluca de Lerdo, Edo de México, CP 50200, México.



AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca 1106671 otorgada.

Al Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

Al financiamiento a C. S.-R. del Monarch Butterfly Fund (Madison, Wisconsin, USA), de American Forest y de la North American Forest Commission a través del US Forest Service (Washington, D.C., USA), y la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH; a R. L.-C. del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT-UNAM clave IG200221).

A mi directo de tesis, Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero, por permitirme formar parte de su equipo de trabajo y guiar este proyecto.

A todas aquellas personas que en algún momento me ayudaron en la toma de datos durante el tiempo del proyecto, mis copañeras: Verónica, Lupita, Ana Laura.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a los comuneros de Calimaya, en el Estado de México, por su inestimable apoyo durante todo el proyecto. Sin su colaboración, este proyecto no habría sido posible. Su compromiso y contribución han sido fundamentales para su éxito.

DEDICATORIA

Esta TESIS está dedicada al **M.C. Luis Corona Alcantar:**

Gracias por enseñarme el verdadero valor de la vida, por guiarme para ser cada día mejor persona; gracias por ejercer la bella profesión de educar y sembrar siempre nuevo conocimiento, por compartir conmigo vivencias únicas y enseñanzas magníficas; quiero expresar mis más sinceros sentimientos de gratitud y mis infinitas gracias por el tiempo que dedicó a mi persona, por el esfuerzo, paciencia y compromiso, por sus consejos, enseñanza y sabiduría, que me han permitido afrontar de mejor manera los problemas y obstáculos que a diario enfrento; sus clases cambiaron mi vida, su amistad mi forma de pensar. Educar a una persona no es hacerle aprender algo que no sabía sino hacer de él alguien que no existía.

Dicen que “un buen profesor inspira confianza, enciende la imaginación y sobre todo ayuda a inculcar el amor por aprender para lograr tus sueños”, y eso eres precisamente tú, un excelente profesor; sin ti no podría haber llegado hasta aquí, ni alcanzar lo que estoy logrando en este momento de mi vida.

Quiero simplemente darte las gracias por ser quién eres y sobre todo reconocerte de esta forma lo que has hecho por mí, has logrado que alcance mi meta. Como dijo Albert Einstein: “El arte supremo del profesor es despertar el goce de la expresión creativa y del conocimiento.” ¡Gracias por despertarme esa alegría!”

DEDICATORIA

A mis padres, **Silvia Calderón Corona** y **Juan Herrejón Merino**:

Quiero aprovechar este momento para expresar mi más sincero agradecimiento por todo el apoyo incondicional que me han brindado durante el proceso de mi tesis. Sin su constante apoyo no habría sido posible alcanzar este logro tan significativo en mi vida académica.

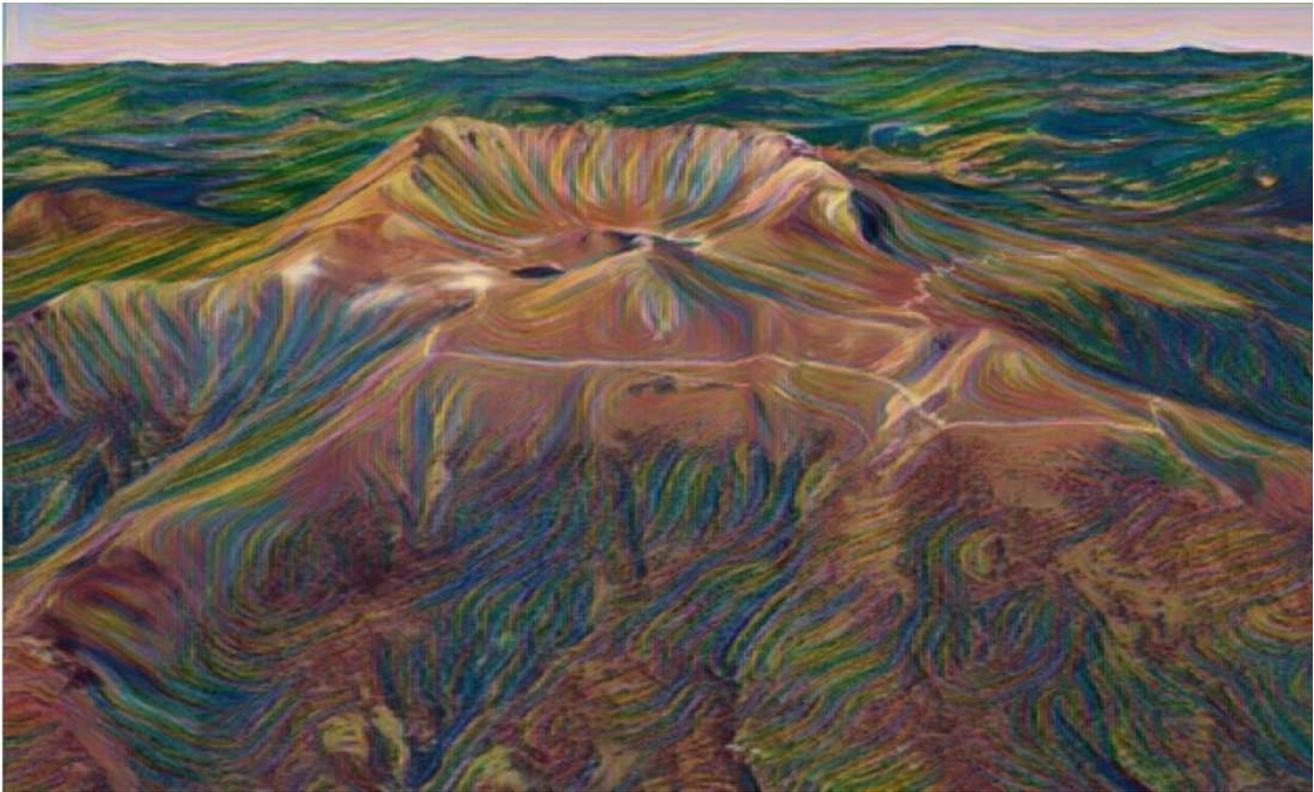
Gracias por ser quienes me han enseñado el valor del trabajo duro y la perseverancia. Siempre han sido mi mayor inspiración y aliciente para seguir adelante, sobre todo cuando las cosas se ponían difíciles. Su ejemplo y palabras de aliento han sido la brújula que me ha guiado hacia el logro de mis objetivos.

No tengo palabras suficientes para expresar lo agradecido que estoy por tenerlos como mis padres. Su amor, dedicación y sacrificio han sido la piedra angular de mi formación como persona.

Este logro es también suyo y les estaré eternamente agradecida por haberme ayudado a llegar hasta aquí.

Con todo mi amor y agradecimiento,

Patricia Herrejón Calderón.



<< No es la especie más fuerte la que sobrevive, ni la más inteligente, sino la que responde mejor al cambio.>>

Charles Darwin

I. RESUMEN GENERAL.....	8
II. GENERAL ABSTRACT	9
III. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	10
IV. CAPÍTULO I: Patrones de variación genética altitudinal entre procedencias de <i>Abies Religiosa (kunth) Schltdl. & Cham. en etapa de vivero.</i>	19
V. CAPÍTULO II: Migración asistida de procedencias de <i>Abies religiosa en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca</i>	50
VI. DISCUSIÓN GENERAL.....	101
VII. CONCLUSIÓN GENERAL	104
VIII. REFERENCIAS	105



I. RESUMEN GENERAL

México es uno de los países más afectados por el cambio climático debido al crecimiento demográfico, la urbanización, la acidificación de los océanos, las enormes cantidades de residuos sólidos y líquidos y la pérdida de biodiversidad. Se espera que algunos ecosistemas forestales se vean más impactados debido a su fragilidad biológica y al extenso manejo humano al que han sido sometidos los bosques de coníferas. Para restaurar los bosques de oyamel con mayor rapidez, es necesario comprender los patrones de variación genética entre procedencias a lo largo de gradientes ambientales. El cambio climático provocará un desacoplamiento entre las poblaciones forestales y el clima de los lugares que habitan, ya que las poblaciones forestales migrarán a elevaciones y/o latitudes más altas, reaparecerán en un lugar diferente o desaparecerán por completo. Por ello, es necesario incorporar medidas de gestión que busquen reacoplar las poblaciones a los nuevos ambientes generados por el calentamiento global, como la migración asistida, que consiste en recolectar semillas y producir plántulas en viveros para posteriormente plantarlas en lugares donde los modelos climáticos proyectan que se producirá su clima favorable en un futuro próximo. Por lo que en el capítulo I se analizó y comparó los patrones de variación genética altitudinal entre procedencias de *Abies religiosa* en etapa de vivero, con el objetivo de comparar la expresión de los patrones de variación genética altitudinal entre planta originada de semilla colectada y planta rescatada de regeneración natural de *Abies religiosa*, provenientes de dos gradientes altitudinales similares de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM). En el capítulo II se exploró la posibilidad de éxito del establecimiento de *Abies religiosa* a una altitud superior (3,800 y 4000 msnm) al límite natural actual máximo (3,600 msnm) mediante la migración asistida, con el uso de plantas nodriza nativas, en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

Palabras clave: Cambio climático, Bosques de Oyamel, RBMM, Gradiente altitudinal, Patrones de variación genética.

I. GENERAL ABSTRACT

Mexico is one of the countries most affected by climate change due to population growth, urbanization, ocean acidification, enormous amounts of solid and liquid waste, and loss of biodiversity. Some forest ecosystems are expected to be more impacted due to their biological fragility and the extensive human management to which coniferous forests have been subjected. To restore oyamel forests more rapidly, it is necessary to understand patterns of genetic variation among provenances along environmental gradients. Climate change will cause a decoupling between forest populations and the climate of the places they inhabit, as forest populations will migrate to higher elevations and/or latitudes, reappear in a different location, or disappear altogether. Therefore, it is necessary to incorporate management measures that seek to re-couple populations to the new environments generated by global warming, such as assisted migration, which consists of collecting seeds and producing seedlings in nurseries to later plant them in places where climate models project that their favorable climate will occur in the near future. Chapter I analyzed and compared the patterns of altitudinal genetic variation between *Abies religiosa* provenances in the nursery stage, with the objective of comparing the expression of patterns of altitudinal genetic variation between plants originating from collected seed and plants rescued from natural regeneration of *Abies religiosa*, coming from two similar altitudinal gradients of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (RBMM). Chapter II explored the possibility of successful establishment of *Abies religiosa* at a higher altitude (3,800 and 4,000 masl) than the current maximum natural limit (3,600 masl) through assisted migration, with the use of native nurse plants, in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area.

Key words: Climate change, Oyamel forests, RBMM, Altitudinal gradient, Patterns of genetic variation.

II. INTRODUCCIÓN GENERAL

Desde el principio de los tiempos, el clima y la temperatura de la Tierra han estado en constante cambio (Conde, 2006). Miles de años de mediciones y registros históricos demuestran los cambios climáticos (Conde, 2006). Ha habido periodos en la historia de la Tierra en los que predominaban las bajas temperaturas, pero también ha habido épocas cálidas (Cifuentes, 2010). Un cambio en el clima atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas y que forma parte de la variabilidad climática observada se define como cambio climático (Rozelot y Lefebvre, 2006; Cifuentes, 2010).

Las principales causas antropogénicas del cambio climático están relacionadas con el aumento de la temperatura global provocado por la acumulación de gases de efecto invernadero. El efecto invernadero es un mecanismo natural que hace posibles temperaturas que mantienen la vida. Sin el efecto invernadero, el planeta sería inhabitable debido al frío extremo (Margulis y Lovelock, 1974). La liberación constante de diversos gases, como el metano y el dióxido de carbono, resultante de las actividades humanas (incluidas las operaciones agrícolas, animales e industriales), ha provocado un aumento constante y peligroso de la temperatura en las últimas décadas.

Los efectos del cambio climático son ampliamente reconocidos, ampliamente publicitados y cada vez más medibles. Durante las últimas décadas, hemos asistido a un aumento de la frecuencia y la gravedad de fenómenos meteorológicos extremos, así como a cambios en las precipitaciones, la turbulencia de las corrientes y la subida del nivel del mar (Bolin et al., 1986; Jacobson y Price, 1990).

La distribución geográfica de biomas y especies es un indicador observable del impacto del cambio climático en los organismos, y está ampliamente aceptado que el clima controla esta distribución (Gaston, 2000).

Estos cambios tienen un impacto significativo en las distribuciones de las especies, por lo que, como reacción, éstas pueden mantener o modificar sus áreas de distribución según una de estas tres estrategias de persistencia 1) adaptación a nuevas condiciones ambientales, 2) migración a nuevas zonas, o 3) extinción (Clark et al., 2002; Aitken et al., 2008).

Por otro lado, González et al. (2003) señalan que la vegetación relacionada con el sistema montañoso, como la alpina, responde con mecanismos migratorios altitudinales al aumento de la temperatura. Si este supuesto se cumple, las especies de alta montaña están abocadas a la extinción. En los entornos montañosos en los que existen grandes diferencias climáticas en distancias pequeñas, es probable que los movimientos de especies provocados por el cambio climático se produzcan a distintas altitudes, lo que implica migraciones más largas (Korner, 2007). Pauli et al. (1996) y Davis y Shaw (2001) señalan que, en el periodo postglaciar, los bosques se adaptaron a los nuevos entornos, lo que es atribuible a la heterogeneidad fenotípica que se forma dentro de una misma población de especies, que está directamente ligada a su dispersión geográfica.

Se estima que la tasa media de migración de las plantas alpinas altas es de sólo cuatro metros por década (Pauli et al. 1996). Peñuelas et al. (2002), por su parte, señalan que se prevé que las alteraciones fenológicas en el establecimiento de la vegetación alpina provoquen su extinción y la invasión de especies procedentes de elevaciones inferiores. Dudley (1998) señaló que las especies herbáceas e invasoras son las que tienen mayor

capacidad de migración (debido a sus ciclos vitales cortos y a su rápido crecimiento), mientras que las especies arbóreas y leñosas requieren procedimientos más largos.

Los ecosistemas de montaña tienen una importancia fundamental, ya que ocupan el 25% de la superficie terrestre, dan agua a la mitad de la población mundial y albergan aproximadamente un tercio de la biodiversidad de especies vegetales, por lo que su conservación es indispensable (Körner, 2007).

El cambio climático puede exacerbar el nivel de estrés fisiológico al que están expuestas las especies vegetales, dando lugar a disminuciones esporádicas del crecimiento y a un aumento de las tasas de mortalidad (McDowell et al., 2010; Linares et al., 2012). Los episodios de mortalidad importantes pueden modificar el paisaje regional alterando la estructura y composición de las especies forestales dominantes (Aitken et al., 2008; González et al., 2010). Los cambios en la cubierta forestal pueden afectar significativamente a los flujos de carbono, los balances hídricos, los flujos de energía superficial y, por tanto, al clima (Pautasso et al., 2010; Linares et al., 2012).

Como se mencionó anteriormente, uno de los efectos del cambio climático puede ser el aumento de la temperatura, lo que puede crear condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades y plagas en diversos ecosistemas; es decir, se forma una relación entre el huésped susceptible, el patógeno virulento y el ambiente favorable. Como resultado, pueden desarrollarse alteraciones o una mayor incidencia de las plagas de las plantas, lo que provoca ajustes en el entorno actual. El cambio climático también tiene efectos directos sobre el crecimiento, la morfología, la fisiología, la reproducción, la supervivencia y la susceptibilidad de las plantas, lo que provoca cambios en la incidencia y la gravedad de las enfermedades. Como consecuencia del mayor desarrollo de infecciones, los sistemas de resistencia de las plantas podrían verse dañados rápidamente.

Existen pruebas de que las especies vegetales responden a los procesos migratorios altitudinales; por ello, es crucial comprender lo que ocurre en las regiones montañosas, que son ecosistemas frágiles y se consideran los más susceptibles al cambio climático. De acuerdo con Sáenz-Romero et al. (2010), en México existen sitios con climas extremadamente secos y cálidos a lo largo de las posibles rutas migratorias que tomarían las especies de montaña al migrar a sitios más fríos en latitudes más al Norte. Esto supone un obstáculo formidable que probablemente sea difícil de superar para muchas especies.

México es uno de los países más afectados por el cambio climático. Esto se ve agravado por una serie de razones, como el crecimiento demográfico, la urbanización, la acidificación de los océanos, las enormes cantidades de residuos sólidos y líquidos y la pérdida de biodiversidad. Se prevé que algunos ecosistemas forestales serán más impactados que otros debido a su fragilidad biológica y al extenso manejo humano al que han sido sometidos los bosques de coníferas (Noss, 2002; CONABIO, 2006).

La riqueza de especies en México se ha atribuido a su ubicación donde se traslapan las regiones biogeográficas Neártica y Neotropical, así como a la presencia de cadenas montañosas como la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico Transversal, que han facilitado la existencia de una gran variación altitudinal y climática, promoviendo así la heterogeneidad de hábitats (Toledo, 1998). Esta abundancia es susceptible a factores ambientales. Numerosas especies forestales están sufriendo cambios en su composición y estructura genética, como lo demuestra la heterogeneidad u homogeneidad de sus poblaciones, que es fácilmente observable cerca de sus límites de distribución, como si estuvieran experimentando el efecto de borde (Alba-Landa et al., 2008). Los bosques templados fríos de México componen la vegetación de las principales sierras de México (Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental y Sierra Madre del Sur), compuesto por bosques de pino, oyamel, el encino, el enebro y el bosque mesófilo de montaña (Granados-Sánchez et al., 2007).

Abies religiosa

Abies religiosa (H.B.K) Schl. et Cham (oyamel) fue clasificada por primera vez por Humboldt y Bonpland en 1803. La descripción original se encuentra en Humboldt, Bonpland y Kunth (1817), mientras que Martínez clasifica la especie como *Abies religiosa* (1963). En 1830, Schlechtendal y Chamisso introdujeron la designación actual. En México, existen de seis a ocho especies del género (Martínez, 1963). Según la misma fuente, el género *Abies* consiste en árboles monoicos, robustos, resinosos, perennifolios, de copa simétrica y aguda, foliolos lineares y tronco erecto de 30 a 40 m (se han registrado individuos de hasta 50 m de altura), con corteza oscura, gruesa y fisurada.

El bosque de oyamel está compuesto por *Pinus* spp. y *Quercus* spp., este tipo de bosque se encuentra típicamente en secciones aisladas, frecuentemente confinadas a una ladera, barranca o colina. Con una superficie de 1937,17 ha y se encuentra a una altitud de entre 2.400 y 3.600 m, en un clima ligeramente húmedo, sin estaciones cálidas y frías claramente definidas, y con una precipitación media anual de 1000 mm. En el Eje Volcánico Transversal es donde se encuentran los fragmentos más significativos; la región norte del país tiene menos bosques de *Abies* y de menor tamaño (Granados-Sánchez et al., 2007). En la Cuenca del Valle de México, los límites altitudinales de esta especie van de los 2,560 metros a los 3,660 metros. Los suelos de los bosques de oyamel son profundos, bien drenados, ricos en materia orgánica, arenosos, tienen un afloramiento de roca menor a 1.5% y tienen un pH cercano a 7.



Según Amezcua y Valderrama (1999), variables como la baja pedregosidad, pendientes de 20 a 40%, una altitud de 2,000 metros y la exposición al norte aumentan la productividad de esta planta. Madrigal (1964), menciona que *Abies religiosa* se relaciona con mayor frecuencia con *Pinus pseudostrobus*, *Pinus hartwegii*, *Pinus rudis* y *Cupressus lindleyi*.

Este tipo de bosque destaca por sus funciones de protección contra la erosión, captura de carbono, captación de agua y regulación de la esorrentía (Hernández, 1985); adicionalmente, ofrece beneficios económicos por poseer la madera más rica en celulosa, la cual es utilizada en la producción de papel fino de alto precio (Rodríguez-Laguna et al., 2015). *Abies religiosa* y el bosque de oyamel que habita están experimentando un precipitado declive debido a la tala excesiva, deforestación, incendios, pastoreo, contaminación ambiental, plagas y enfermedades (Rzedowski, 1978; Challenger, 1998; Sánchez-González & López-Mata, 2005). En el contexto del cambio climático, el patrimonio que las especies de coníferas representan para México demanda especial atención en términos de proporcionar información ecológica y biológica.

Senecio cinerarioides

Es un arbusto muy frondoso y ramificado desde la base, de 1 a 3 metros de alto, alcanzando algunos ejemplares los 4.5 metros. Los tallos son medulosos y quebradizos,



Las hojas son sésiles, angostamente lanceoladas de unos 15 cm de largo y hasta 2 de ancho. La inflorescencia en forma de panícula contiene numerosas cabezuelas radiadas y pediceladas de involucro campanulado o subcilíndrico. El capullo está conformado por alrededor de una docena de flores liguladas y medio

centenar de flores del disco, todas amarillas (Calderón de Rzedowski et al., 2010).

Senecio cinerarioides, es una planta endémica del Eje Neovolcánico de México. Se ve favorecida por el disturbio, de modo que forma parte de la vegetación secundaria derivada de bosques mixtos o de coníferas, por encima de los 2400 metros sobre el nivel del mar. Es común encontrarla en flor en el primer tercio del año, al borde de caminos en laderas volcánicas de clima semifrío (Villers Ruiz et al., 2006; Calderón de Rzedowski et al., 2010).



En este trabajo se presentan dos capítulos, el capítulo I, se analizó y comparo los patrones de variación genética altitudinal entre procedencias de *Abies religiosa* en etapa de vivero, con el objetivo de comparar la expresión de los patrones de variación genética altitudinal entre planta originada de semilla colectada y planta rescatada de regeneración natural de *Abies religiosa*, provenientes de dos gradientes altitudinales similares de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM). En el capítulo II se exploró la posibilidad de éxito del establecimiento de *Abies religiosa* a una altitud superior (3,800 y 4000 msnm) al límite natural actual máximo (3,600 msnm) mediante la migración asistida, con el uso de plantas nodriza nativas, en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.



<<La actividad más importante que un ser humano puede lograr es aprender para entender, porque entender es ser libre.>>

Spinoza

Página | 18



CAPÍTULO I

Patrones de variación genética altitudinal entre
procedencias de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham.
en etapa de vivero



I. RESUMEN	23
II. ABSTRACT	24
III. INTRODUCCIÓN	25
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	28
1. Planta de Semilla	28
1.1. Recolección de Semilla.....	28
1.2. Sitio de ensayo de vivero.....	29
1.3. Producción de planta y diseño experimental.....	30
1.4. Análisis Estadístico.....	32
2. Planta rescatada de regeneración natural	33
2.1. Recolección de Planta	33
2.2. Ensayo de vivero y diseño experimental	33
2.3. Análisis estadístico para planta de regeneración natural	35
V. RESULTADOS	36
VI. DISCUSIÓN	40
VII. CONCLUSIÓN	43
VIII. AGRADECIMIENTOS	43
IX. REFERENCIAS	44

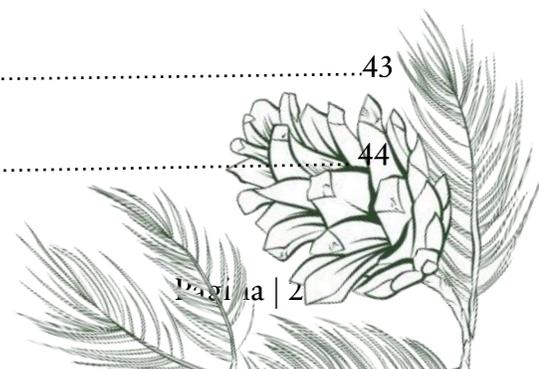


Figura 1. (A). Localización del sitio de ensayo de vivero de plántula originada de semilla colectada. (B). Municipio de San José del Rincón, Estado de México, sitio del ensayo de vivero. (C). Geolocalización de los sitios de recolección de semillas de *Abies religiosa* dentro de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) y de la ubicación del vivero (poblado del Ejido La Mesa)..... 29

Figura 2. (A) Acomodo de las plántulas originadas de semilla en una rejilla por procedencia, con un diseño de bloques completos al azar en el Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales. Cucharas de diferente color se usaron para etiquetar a las diferentes procedencias. (B) Acomodo posterior (dos años de edad) de la plántula en bloques al azar en el vivero ubicado en el ejido La Mesa (3,000 m de altitud), Municipio de San José del Rincón, Estado de México.....31

Figura 3. Altura promedio de planta originada de semilla colectada de ocho procedencias de *Abies religiosa* a tres años de su establecimiento en el vivero del Ejido La Mesa, San José del Rincón, Estado de México.....37

Figura 4. Regresión cuadrática de altura final de ocho procedencias de planta originada de semilla colectada y seis procedencias de planta originada de rescate de regeneración natural de *Abies religiosa*, contra altitud de origen. Letras distintas indican diferencia significativa entre procedencias, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las barras verticales indican el error estándar de cada media por procedencia. Línea azul: regresión cuadrática de planta originada de semilla colectada. Línea anaranjada: regresión cuadrática de plántulas rescatada de regeneración natural. Símbolos azules: procedencias de planta originada de semilla colectada. Símbolos anaranjados: procedencias de plantas rescatadas de regeneración natural.....39

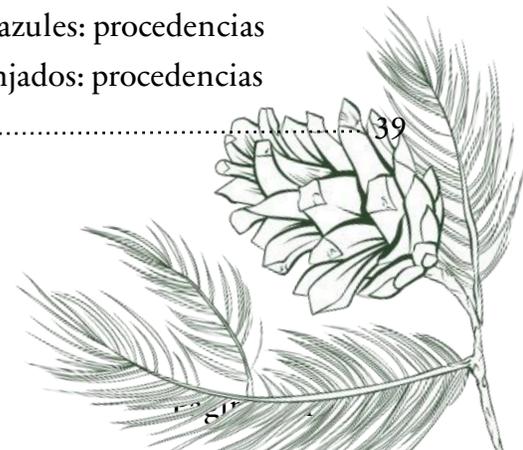


Tabla 1. Ubicación de los sitios de recolección de semillas de *Abies religiosa* dentro de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) y el sitio del ensayo de vivero.....28

Tabla 2. Ubicación de los sitios de recolección de plántula de regeneración natural de *Abies religiosa* dentro de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) y el sitio del ensayo de vivero. Fuente: Cruzado-Vargas et al. (2020).....34

Tabla 3. Análisis de varianza del crecimiento en altura de planta de ocho procedencias de *Abies religiosa* producidas a partir de semilla a tres años de establecimiento en vivero.....36

Tabla 4. Comparación de medias de altura de ocho procedencias de *Abies religiosa* originadas de semilla colectada a tres años de establecimiento en vivero.....38



I. RESUMEN

Los impactos actuales y proyectados del cambio climático en los bosques de oyamel [*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.] están haciendo y harán más difícil su restauración ecológica. La elección de procedencias adaptadas al clima futuro de los sitios de reforestación se convierte en una decisión importante. Para ello, es necesario comprender los patrones de variación genética entre procedencias a lo largo de gradientes ambientales. El objetivo del presente trabajo fue comparar la variación genética expresada como altura de plántula de *Abies religiosa*, entre plantas producidas en un vivero forestal a gran altitud (3000 msnm) a partir de semilla recolectada, comparada contra plántulas rescatadas de regeneración natural y transferidas al mismo vivero, de dos gradientes altitudinales similares (3000 a 3350 msnm, ocho procedencias, y 2960 a 3450 msnm, seis procedencias, respectivamente), dentro de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM). Las plantas originadas de semilla presentaron diferencias significativas entre procedencias ($p < 0.0001$); las procedencias de la parte intermedia del transecto altitudinal mostraron mayor crecimiento, en comparación con las plantas de los extremos altitudinales. El patrón altitudinal de plantas de semilla es contrastante y opuesto al de las procedencias rescatadas de regeneración natural ya que, en éstas últimas, las procedencias originadas de los extremos superior e inferior expresaron mayor crecimiento de planta, en comparación con las procedencias originadas de la parte central de la distribución altitudinal. Sin embargo, tal patrón no fue estadísticamente significativo. El patrón de variación genética entre procedencias de planta originada de semilla es acorde con lo esperado, mientras que los resultados atípicos de plantas de regeneración natural pudieran estar influenciados por el eventual efecto de una selección natural en campo, previo a su rescate y trasplante a bolsa de vivero, lo que probablemente diluyó la expresión del patrón altitudinal esperado.

Palabras clave: Gradiente altitudinal, altura de planta, planta de regeneración natural, planta de semilla colectada.

II. ABSTRACT

The current and projected impacts of climate change on oyamel forests [*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.] are doing and will make their ecological restoration more difficult. The choice of provenances adapted to the future climate of reforestation sites becomes an important decision. This requires the understanding of genetic variation patterns among provenances along environmental gradients. The objective of this study was to compare the genetic variation expressed for *Abies religiosa* seedling height, among plants produced on a forest nursery at high altitude (3000 masl) from collected seed, compared against plants rescued from natural regeneration and transferred to the same forest nursery, from two similar altitudinal gradients (3000 to 3350 masl, eight provenances, and 2960 to 3450 masl, six provenances, respectively), within the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR). The plants originating from seed presented significant differences between provenances ($p < 0.0001$); the provenances of the intermediate altitudes showed greater growth, in comparison with the plants of the altitudinal extremes. The altitudinal pattern of seed plants is contrasting and opposite to that of the provenances of rescued natural regeneration since, in the latter, the provenances originating from the upper and lower extremes have greater plant growth, while the provenances originating from the central part of the altitudinal distribution had lower growth. However, such a pattern was not statistically significant. The pattern of genetic variation between provenances of plants originating from seed is in accordance with what was expected, while the atypical results of naturally regenerated plants could be influenced by the eventual effect of natural selection in the field, prior to their rescue and transplantation to the nursery, with the possible dilution of the expression of the expected altitudinal pattern.

Keywords: Altitude gradient; plant height; natural regeneration plants, plants from seed collected.

III. INTRODUCCIÓN

Los bosques de *Abies religiosa* (Kunth) Schldt. & Cham. en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMM) son de gran importancia ecológica, social y cultural. Esta importancia radica en la variedad de servicios de los que proveen a la comunidad en general. Por ejemplo, la captación de agua de lluvia, recarga de manto freático, captura de carbono y refugio para diversos animales, de los cuales uno de los principales es la mariposa monarca (*Danaus plexippus* L.) (Anderson y Brower, 1996).

Uno de los bosques de oyamel más importantes en México es la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM), que se encuentra entre los límites entre Michoacán y el Estado de México, a 120 km al oeste de la Ciudad de México. Este hábitat está seriamente amenazado debido a actividades antropogénicas (Arriola et al., 2015), adicionalmente está el impacto de los efectos actuales y proyectados del cambio climático (Sáenz-Romero et al., 2012).

Se tiene la creciente percepción de que cada vez es más difícil el reclutamiento de plántulas jóvenes en los bosques de oyamel de la RBMM (Guzmán-Aguilar et al., 2020), además de que la mayor parte de la producción de semillas viables se encuentra principalmente en la parte intermedia de la distribución altitudinal del oyamel (Ortiz-Bibian et al., 2019), lo cual podría ser un factor contribuyente que dificultaría lograr el reclutamiento en la parte baja de la RBMM (Guzmán-Aguilar et al., 2020). Una alternativa para restaurar los bosques de forma más rápida y eficaz es la colecta de semilla a lo largo de gradientes altitudinales y la producción de planta en vivero; las procedencias

se eligen con un clima similar al que ocurriría en el futuro en el sitio de plantación (Sáenz-Romero et al., 2016; Carbajal-Navarro et al., 2019).

Con el fin de obtener información sobre el tipo de adaptación de las poblaciones a su lugar de origen, se han realizado ensayos de procedencias, encontrando que los patrones de variación dependen en parte, de la variación altitudinal (Rehfeldt, 1983a).

La variación clinal dentro de la misma especie se debe a la selección natural influenciada por los gradientes geográficos y ambientales que se tienen a lo largo del área de distribución y que se ven reflejadas en sus características fisiológicas y morfológicas (Zobel y Talbert, 1984).

Las poblaciones de especies forestales con extensa distribución en gradientes altitudinales tienden a diferenciarse en el crecimiento en altura de planta, como respuesta a la presión de selección impuesta por el ambiente. En general, las plantas originadas de semillas recolectadas a menor altitud tienden a tener un mayor crecimiento que las procedentes de mayor altitud, cuando crecen bajo condiciones favorables (Rehfeldt, 1983b).

Antes de realizar producción de planta en vivero de forma masiva, es importante saber si existe variación genética entre poblaciones, ya que se ha demostrado que las especies que tienen una extensa distribución en gradientes altitudinales tienden a diferenciarse, como adaptación a las condiciones ecológicas de los sitios en donde crecen (Viveros-Viveros, et al., 2005), como respuesta a la presión de selección impuesta por el ambiente (Rehfeldt, 1983b). Una de las formas de determinar si existen estas diferencias es mediante ensayos

de procedencias, ya que permiten la expresión de caracteres cuantitativos bajo un mismo ambiente (Sáenz-Romero et al., 2006).

El objetivo del presente trabajo fue comparar la expresión de los patrones de variación genética altitudinal entre planta originada de semilla colectada y planta rescatada de regeneración natural de *Abies religiosa*, provenientes de dos gradientes altitudinales similares de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM). Las plantas fueron establecidas en un vivero a 3000 mnsn, muy cercano a la zona de amortiguamiento de la RBMM, en el Ejido La Mesa, Edo. de México, con la intención de poder detectar tales patrones de variación a temprana edad. La información obtenida es importante para conocer o seleccionar la fuente de semilla a usar en los programas de reforestación, considerando los efectos del cambio climático sobre las plantas.

La hipótesis de este trabajo es que las plantas originadas de semilla y las de regeneración natural, obtenidas ambas a lo largo de gradientes altitudinales, si crecen en un vivero a la misma altitud, expresarán los patrones de variación genética altitudinal (de haberlos) entre procedencias de manera similar, toda vez que es de suponer que la presión de selección ambiental operaría de manera similar a lo largo de los diferentes transectos altitudinales, induciendo la diferenciación genética entre poblaciones con patrones similares (Yeaman et al., 2016).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Planta de semilla

1.1. Recolección de semillas

En diciembre de 2017, se recolectaron conos de árboles de ocho procedencias de *Abies religiosa* (Kunth Schltl. & Cham.) a lo largo de un gradiente altitudinal, de 3000 a 3550 msnm, con una diferencia altitudinal entre sitios de 50 m, dentro de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) (Tabla 1). Se recolectaron conos al azar de diez árboles por sitio, con una distancia entre árboles de al menos 30 m, con el fin de reducir la posibilidad de endogamia (Cruzado-Vargas et al., 2021).

Tabla 1. Ubicación de los sitios de recolección de semillas de *Abies religiosa* dentro de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) y el sitio del ensayo de vivero.

Procedencia	Altitud (msnm)	Latitud N	Longitud O
2	3491	19° 34' 04.1"	100° 13' 59.5"
3	3457	19° 34' 17.1"	100° 14' 08.2"
5	3364	19° 34' 31.7"	100° 14' 03.8"
6	3300	19° 34' 46.2"	100° 13' 53.6"
7	3233	19° 34' 50.9"	100° 13' 26.6"
8	3210	19° 34' 52.6"	100° 13' 15.5"
9	3143	19° 34' 53.0"	100° 12' 53.1"
10	3099	19° 35' 12.0"	100° 12' 52.9"
Sitio del ensayo de vivero			
Ejido La Mesa	3000	19° 35' 18.2"	100° 10' 46.1"

1.2. Sitio de ensayo de vivero

El sitio de ensayo de vivero fue en el ejido de La Mesa, Municipio de San José del Rincón, Estado de México (Figura 1, Tabla 1).

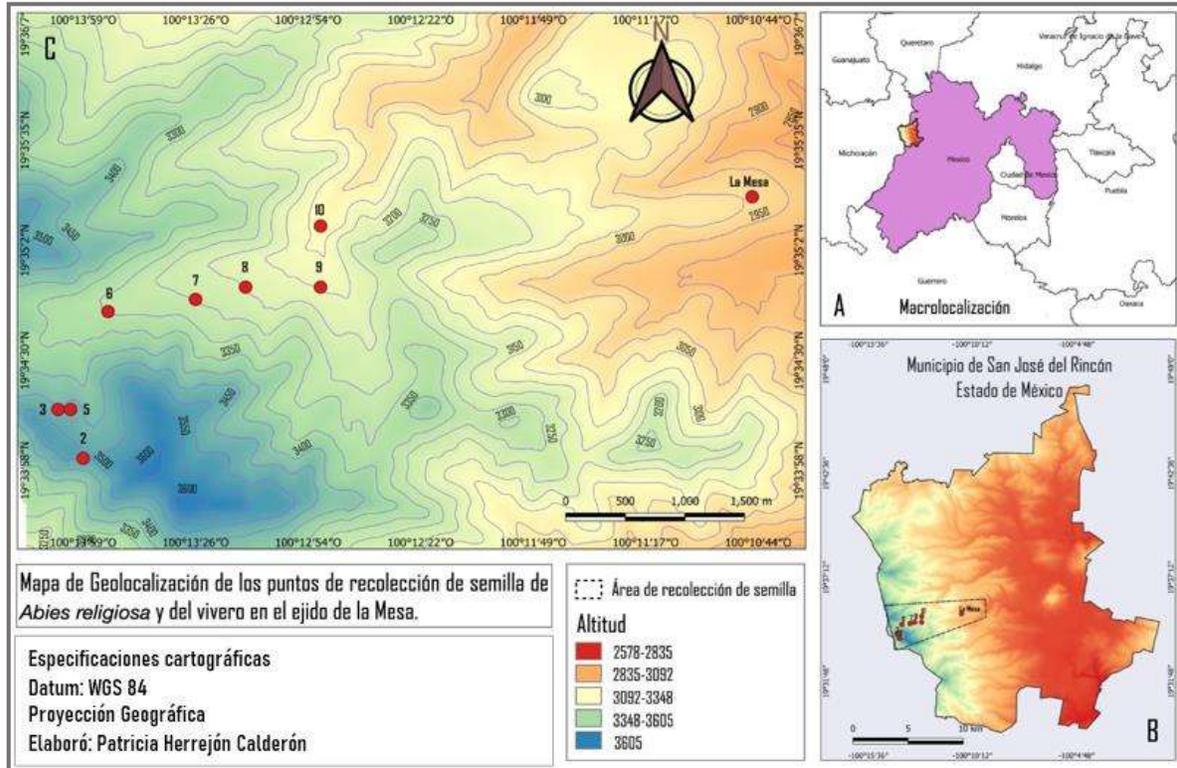


Figura 1. (A). Localización del sitio de ensayo de vivero de plántula originada de semilla colectada. (B). Municipio de San José del Rincón, Estado de México, sitio del ensayo de vivero. (C). Geolocalización de los sitios de recolección de semillas de *Abies religiosa* dentro de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) y de la ubicación del vivero (poblado del Ejido La Mesa).

1.3. Producción de plántula y diseño experimental

Las semillas extraídas de los conos se estratificaron a 4°C durante 14 días. Cada lote de semillas sometido a estratificación comprendía una cantidad similar de semillas provenientes de cada árbol madre, por lo que las progenies estaban representadas por igual en las procedencias.

La producción de planta se llevó a cabo de mayo de 2018 a junio de 2019 en una casa de sombra (malla de 35% de sombra), en el Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales (INIRENA; 19°41'23.02"N, 101°15'0.87"O, 1899 msnm), Morelia, Michoacán, México.

Las plantas fueron germinadas en un almácigo y posteriormente en mayo del mismo año se trasladaron a tubetes rígidos de 380 cm³, con un sustrato mixto compuesto por polvilla, agrolita, vermiculita y peat moss (volumen 60: 15: 15: 10, respectivamente). Las plántulas trasladadas se colocaron en rejillas de 54 tubetes, cada charola con una procedencia. Las procedencias se etiquetaron con cucharas de colores (Figura 2A).

Las plántulas permanecieron durante dos años en la casa sombra. Posteriormente, en marzo del 2020, se trasladaron a un vivero ubicado en el ejido La Mesa, Edo. de México a 3000 msnm dentro de la zona de amortiguamiento de la RBMM. Para evitar la restricción de crecimiento en el envase de 380 cm³, las plantas se trasladaron a envases de 1 litro. Las plántulas se acomodaron en bloques al azar, en parcelas de diez plantas, de las cuales dos se usaron como faja de protección (Figura 2B). Se midió la altura final de la planta desde la base hasta la punta de la yema principal (mm) en mayo del 2021.



Figura 2. (A) Acomodo de las plántulas originadas de semilla en una rejilla por procedencia, con un diseño de bloques completos al azar en el Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales. Cucharas de diferente color se usaron para etiquetar a las diferentes procedencias. (B) Acomodo de la plántula en bloques al azar en el vivero ubicado en el ejido La Mesa (3,000 m de altitud), Municipio de San José del Rincón, Estado de México.

1.4. Análisis estadístico

Para describir la tendencia clinal se realizó un modelo de regresión cuadrática y un análisis de varianza (ANOVA) de la altura de planta originada de semilla colectada de 8 procedencias de *A. religiosa*, mediante el paquete estadístico Rstudio versión 4.2. (R Core Team, 2021), con un nivel de confianza del 95% y la función aov. El modelo estadístico es el siguiente:

$$\gamma_{ijk} = \mu + \beta_i + p_j + \beta_i * p_j + \varepsilon_{ijk}$$

donde:

γ_{ijk} = observación del k -ésimo individuo en la j -ésima procedencia del i -ésimo bloque

μ = media general

β_i = efecto del i -ésimo bloque

p = efecto de la j -ésima procedencia

$\beta_i * p_j$ = interacción entre bloque y procedencia (fuente de variación usado como término de error para determinar la significancia de bloque y procedencia)

ε_{ijk} = error.

La procedencia y el bloque se consideraron efectos aleatorios. Posterior a la prueba ANOVA se evaluaron las diferencias entre categorías con una prueba de Tukey (TukeyHSD; R Core Team, 2022).

Para determinar la asociación entre la altura de planta y el gradiente altitudinal, se realizó una regresión de medias de la altura de planta por procedencia contra la altitud de origen, con la función lm de Rstudio (R Core Team, 2022).

2. Planta rescatada de regeneración natural

A fin de comparar el patrón altitudinal encontrado en el experimento con planta originada de semilla, y plántula rescatada de regeneración natural se revisaron los datos del ensayo de procedencias en vivero de Cruzado-Vargas et al., (2020) de planta rescatada de regeneración natural. Una breve descripción de la metodología utilizada se describe a continuación.

2.1. Recolección de plántulas

Las plántulas se recolectaron *in situ* en noviembre de 2015 a lo largo de un gradiente altitudinal dentro de la RBMM, con seis sitios de recolecta (Tabla 2). Las plántulas recolectadas fueron de reciente germinación, tomando como criterio que la plántula colectada aún mantuviera la testa de la semilla de la cual emergieron (indicación indudable de que eran de muy reciente germinación), que no tuvieran una altura mayor a 5 cm y que su tallo fuera rosado, delgado y vigoroso.

2.2. Ensayo de vivero y diseño experimental

El vivero para realizar el ensayo de procedencias de plantas de regeneración natural se estableció en el mismo sitio que el ensayo de plantas originadas de semilla, en el Ejido La Mesa, a 3000 msnm, bajo una malla sombra, también del 35 % (Tabla 1).

Las plántulas obtenidas de regeneración natural se trasplantaron a bolsas de vivero con tierra de monte como sustrato. El diseño experimental fue de seis bloques completos al azar con parcelas continuas de 36 plántulas (tres hileras de 12 individuos). Se agregó una

hilera de plántulas de procedencias mezcladas a los extremos de las platabandas, para evitar el efecto de borde.

A finales del mes de mayo de 2017 se tomaron las mediciones finales de altura de planta para realizar el análisis estadístico.

Tabla 2. Ubicación de los sitios de recolección de plántula de regeneración natural de *Abies religiosa* dentro de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) y el sitio del ensayo de vivero. Fuente: Cruzado-Vargas et al. (2020).

Procedencia	Altitud (msnm)	Latitud N	Longitud O
1	3450	19° 34' 05.4"	100° 13' 53.0"
2	3350	19° 34' 28.0"	100° 13' 05.5"
3	3239	19° 34' 44.2"	100° 12' 51.6"
4	3157	19° 35' 24.0"	100° 12' 31.2"
5	3052	19° 35' 44.5"	100° 12' 06.9"
6	2960	19° 36' 56.0"	100° 11' 13.3"
Sitio del ensayo de vivero			
Ejido La Mesa	3000	19° 35' 18.2"	100° 10' 46.1"

2.3. Análisis estadístico para plántulas rescatadas de regeneración natural

Con las mediciones de altura final de plántula se realizó un análisis de varianza con el mismo modelo estadístico descrito anteriormente. Con los resultados se generó un análisis de regresión cuadrática para determinar su patrón altitudinal (Cruzado-Vargas et al., 2020).

Finalmente, se realizó una comparación entre el patrón altitudinal encontrado en el experimento de planta originada de semilla y el de plántula rescatada de regeneración natural.

V. RESULTADOS

El análisis de varianza de altura para las plántulas originadas de semilla de *A. religiosa* muestra que el valor de p para procedencias y bloques fue altamente significativo a tres años del establecimiento en vivero ($p < 0.0001$), y que la interacción procedencias*bloques también fue significativa ($P = 0.0423$), pero en menor grado (ver Tabla 3).

Tabla 3. Análisis de varianza del crecimiento en altura de planta de ocho procedencias de *Abies religiosa* producidas a partir de semilla a tres años de establecimiento en vivero.

<i>FV</i>	g. l	Sum Sq	CM	F	P
<i>Bloques</i>	143	1172640	8200.3	2.4019	<0.0001
<i>Procedencias</i>	7	21797	31139.2	9.1208	<0.0001
<i>Procedencias*Bloques</i>	624	2749710	4406.6	1.2907	0.0423
<i>Residuales</i>	120	409690	3414.1		

g.l = grados de libertad, Sum Sq = Suma de cuadrados, CM = Cuadrado medio.

De acuerdo con la Figura 3 y Tabla 4, las plantas de mayor crecimiento en altura de planta fueron de las procedencias originadas de la parte central de la distribución altitudinal (3143 – 3457 msnm); mientras que las procedencias originadas de los extremos altitudinales superior e inferior (3099 y 3491 msnm) presentaron un menor crecimiento.

La tendencia clinal se describe mediante una regresión cuadrática de la altura promedio de las plantas en la elevación de la procedencia, obteniéndose valores de $R^2 = 0.6771$ y un valor de significancia muy cercano al umbral usualmente aceptado de 0.05 ($p = 0.0592$; Figura 4).

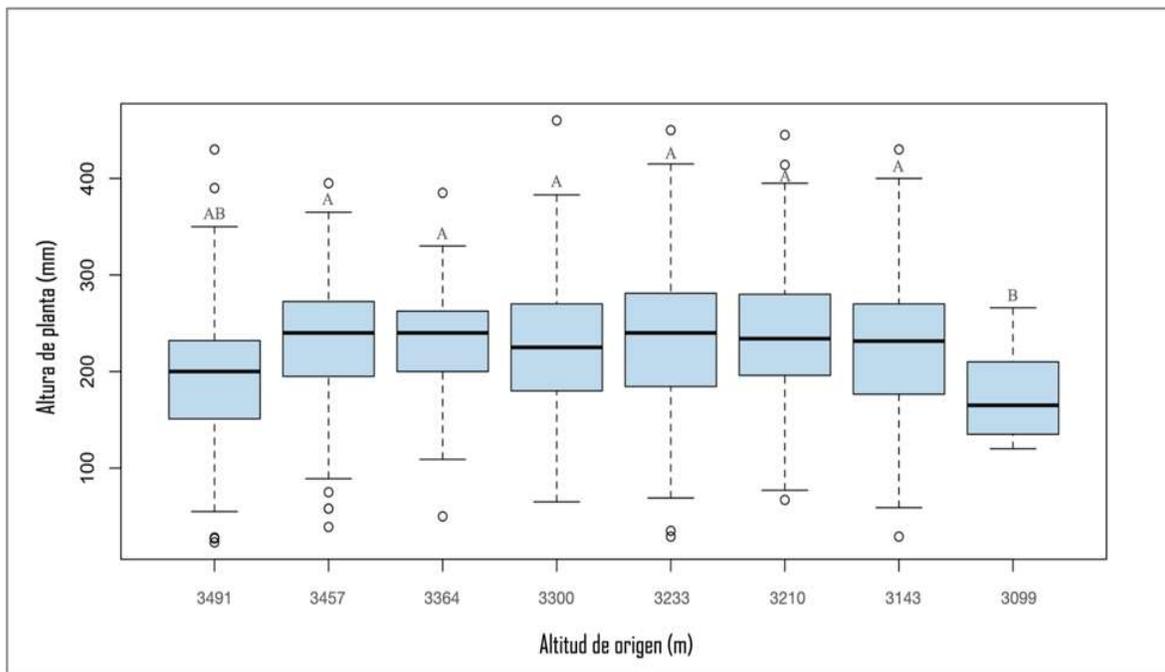


Figura 3. Altura promedio de planta originada de semilla colectada de ocho procedencias de *Abies religiosa* a tres años de su establecimiento en el vivero del Ejido La Mesa, San José del Rincón, Estado de México.

La tendencia clinal se describe mediante una regresión cuadrática de la altura promedio de las plantas en la elevación de la procedencia, obteniéndose valores de $R^2 = 0.6771$ y un valor de significancia muy cercano al umbral usualmente aceptado de 0.05 ($p = 0.0592$; Figura 4).

Este patrón altitudinal es contrastante y opuesto al de las procedencias rescatadas de regeneración natural del estudio de Cruzado-Vargas et al., (2020), donde las plantas que tienen un mayor crecimiento en altura son de las procedencias de los extremos altitudinales superior e inferior (3450 y 2960 msnm) (Figura 4). Sin embargo, el modelo de regresión cuadrática no obtiene un patrón altitudinal estadísticamente significativo ($R^2 = 0.4040$, $p = 0.4601$).

Tabla 4. Comparación de medias de altura de ocho procedencias de *Abies religiosa* originadas de semilla colectada a tres años de establecimiento en vivero.

Procedencia	Altitud de origen (msnm)	Altura (mm)
8	3210	237.8 A
7	3233	235.2 A
3	3457	234.0 A
5	3364	231.3 A
6	3300	230.9 A
9	3143	228.6 A
2	3491	194.6 AB
10	3099	174. B

Valores medios con letras iguales entre procedencias indican diferencias no significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

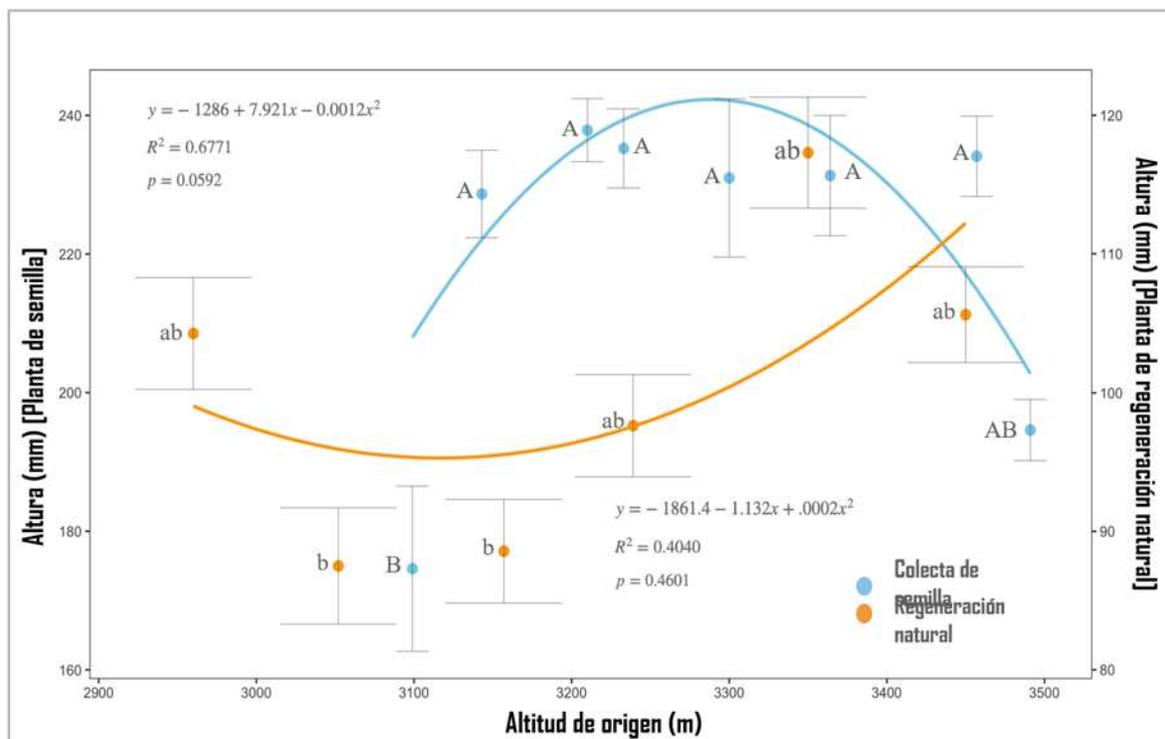


Figura 4. Regresión cuadrática de altura final de ocho procedencias de planta originada de semilla colectada y seis procedencias de planta originada de rescate de regeneración natural de *Abies religiosa*, contra altitud de origen. Letras distintas indican diferencia significativa entre procedencias, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las barras verticales indican el error estándar de cada media por procedencia. Línea azul: regresión cuadrática de planta de semilla colectada. Línea anaranjada: regresión cuadrática de plántulas rescatada de regeneración natural. Símbolos azules: procedencias de planta de semilla colectada. Símbolos anaranjados: procedencias de plantas rescatadas de regeneración natural.

VI. DISCUSIÓN

El patrón de variación genético altitudinal a temprana edad encontrado en las procedencias de *A. religiosa* originadas de semilla es coincidente con un patrón encontrado en otras coníferas mexicanas, como *Pinus patula* Sch. Et Cham, (Sáenz et al., 2011 ; Ruíz-Talonia et al., 2014), y *Pinus oocarpa* Schiede ex Schldtl. (Sáenz-Romero et al., 2006). El patrón consiste en que las poblaciones presentan mayor crecimiento genéticamente determinado cuando se originan de sitios con las mejores condiciones ambientales, es decir, tienen un óptimo ecológico y este suele encontrarse en altitudes intermedias de su rango natural de distribución (Rehfeldt et al., 2002). Mientras que, en los extremos de su óptimo altitudinal, las poblaciones experimentan condiciones ambientales menos favorables, por lo que dan prioridad a características de mayor valor adaptativo bajo condiciones estresantes, tales como mayor resistencia a las heladas o a la sequía (Mátyás et al., 2010).

El patrón altitudinal encontrado también es coincidente con la mayor calidad de planta expresada en vivero de familias de medios hermanos de *Pinus pseudostrobus*, originadas de un gradiente altitudinal (desde 2264 msnm hasta 2671 msnm en la Meseta Purépecha de Michoacán), en donde el mayor número de familias con los mejores promedios de índices de calidad de planta (en términos de la relación entre altura, diámetro, grado de lignificación e índice de calidad de planta de Dickson), son aquellas originadas del intervalo altitudinal entre 2400 y 2550 msnm, que es aproximadamente el centro de la distribución altitudinal de la especie en esa región (Chávez-García et al., 2022).

Para las plantas de *A. religiosa* obtenidas de regeneración natural, el patrón altitudinal encontrado fue atípico; es decir, una procedencia de altitud elevada (3350 msnm) tuvo el mayor crecimiento en altura de planta en comparación con las procedencias de partes más bajas del gradiente altitudinal. Esta respuesta es similar a la encontrada en etapas juveniles (11 meses) de procedencias de *Pinus hartwegii* Lindl. colectadas en un gradiente altitudinal, en donde se encontró que la procedencia de mayor elevación fue la que tuvo un mayor crecimiento en altura de planta (Viveros-Viveros et al., 2018). Esta tendencia de crecimiento en altura de plantas de regeneración natural durante las etapas juveniles de *A. religiosa* podría atribuirse a la presencia de mayor número de días soleados en el vivero (grados día $> 5^{\circ}\text{C}$), lo que probablemente les permitió a las plantas de mayor elevación aprovechar estas condiciones óptimas de temperatura para desarrollarse de una forma que en su sitio de origen no sería posible debido a las bajas temperaturas. Por ejemplo, Cruzado-Vargas et al. (2021) encontró un crecimiento mucho mejor de *A. religiosa* en un ensayo de jardín común de trasplantes recíprocos de procedencias creciendo a 3000 msnm, en comparación con el sitio de ensayo a 3400 msnm.

Cabe la posibilidad de considerar otras interpretaciones del patrón atípico de variación altitudinal encontrado en las plantas originadas de regeneración natural: (a) Tal patrón simplemente debe desestimarse, toda vez que no es estadísticamente significativo. (b) Existen otros efectos confundidos que pudieron haber promovido tal resultado; por ejemplo, al ser plántulas rescatadas de regeneración natural, no se conoce la fecha exacta de germinación (aunque sí que ocurrió al inicio de la temporada de lluvias del año de colecta; Cruzado-Vargas et al., 2020), y cabría la posibilidad de que las plantas de mayor altitud hubieran germinado primero. (c) La medición de altura de planta originada de regeneración natural se realizó en el mes de mayo de 2017 (debido a que la planta se

plantó en un ensayo de campo al inicio de las lluvias de ese año), antes de que las yemas apicales cesaran su crecimiento y se encontraran en reposo; eso podría haber jugado un papel si las yemas elongaran en campo con una periodicidad distinta según su origen. (d) Las plantas de regeneración natural pudieron haber sufrido un proceso de selección natural en el micrositio donde germinaron, aumentando así las posibilidades de un desacoplamiento entre las condiciones de origen de la semilla, las del micrositio en donde sobrevivieron en una etapa muy temprana posterior a su germinación y las del sitio experimental (Alfaro et al., 2014).

Este proceso de selección pudo haber diluido la expresión medible de su potencial de crecimiento genéticamente determinado, que, en condiciones óptimas, habrían expresado que las plántulas originadas de poblaciones de altitudes bajas pueden crecer más, mientras que las de poblaciones de mayores altitudes crecen menos (Ortiz-Bibian et al., 2017).

Se recomienda seguir con las evaluaciones en etapas posteriores para comprobar si se mantienen las mismas tendencias. En particular sería importante enfocarse en el desempeño de plántulas de regeneración natural crecidas en vivero, por lo atípico del patrón expresado, y porque podría ser una alternativa menos costosa en comparación a la producción de planta originada de recolecta de semillas, sobre todo considerando el gran tamaño de los árboles de oyamel dentro de la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca.

VII. CONCLUSIÓN

Los resultados contrastantes del presente trabajo indican que aun cuando las plantas de *A. religiosa* se desarrollen en el mismo sitio, estas pueden comportarse de forma diferente dependiendo de si se originaron de semilla colectada o de rescate de plántulas de regeneración natural, en ambos casos a lo largo de gradientes altitudinales. Por esta razón y debido a que son evaluaciones realizadas a temprana edad, los resultados deben tomarse con reserva. El patrón de variación genético altitudinal de plantas originadas de semilla es coincidente con patrones encontrados en otras coníferas mexicanas (en donde las procedencias de la parte central de la distribución altitudinal tienen el mejor crecimiento), mientras que los resultados atípicos de plantas de regeneración natural pudieran estar influenciados por el efecto de una selección natural en campo, con la dilución de la expresión del patrón altitudinal esperado.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el financiamiento a C. S.-R. del Monarch Butterfly Fund (Madison, Wisconsin, USA), de American Forest y de la North American Forest Commission a través del US Forest Service (Washington, D.C., USA), y la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH; a R. L.-C. del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT-UNAM clave IG200221). Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca para estudios de posgrado a P. H.-C. (1106671) y a A.L.C.-V. (699285).

IX. REFERENCIAS

- Alfaro RI, Fady B, Vendramin GG, Dawson IK, Fleming RA, Sáenz-Romero C, Lindig-Cisneros RA, Murdock T, Vinceti B, Navarro CM, Skrøppa T, Baldinelli G, El-Kassaby YA, Loo J (2014) The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change. *Forest Ecology and Management*, 333 (1), 76-87. doi: 10.1016/j.foreco.2014.04.006
- Arriola P, Flores G, Gijón H, Pineda O, Jacob C, Nieto de Pascual P (2015) Producción de Planta de *Abies Religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham. en Vivero; Folleto Técnico Núm 19; CENID-COMEF, INIFAP: Ciudad de México, México, 2015. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/325578817_PRODUCCION_DE_PLANTA_DE_Abies_religiosa_Kunth_Schltld_Cham_EN_VIVERO
- Carbajal-Navarro A, Navarro-Miranda E, Blanco-García A, Cruzado-Vargas AL, Gómez-Pineda E, Zamora-Sánchez C, Pineda-García F, O'Neill G, Gómez-Romero M, Lindig-Cisneros R, Johnsen KH, Lobit P, López-Toledo L, Herrerías-Diego, Sáenz-Romero C (2019) Ecological restoration of *Abies religiosa* forests using nurse plants and assisted migration in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, México. *Frontiers in Ecology and Evolution* 7(Article 421):1-16. doi: <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00421>
- Chávez-García A, Hernández-Ramos J, Muñoz-Flores H, García-Magaña J, Cárdenas M, Gutiérrez-Contreras M (2022) Phenotypic plasticity of tree progenies of *Pinus pseudostrobus* Lindl. superiors in resin production in nursery. *Madera y Bosques*. 28. 1-14. doi: 10.21829/myb.2022.2812381

- Cruzado-Vargas AL, Zamudio-Sánchez FJ, Rodríguez-Yam GA, Carbajal-Navarro AL, Blanco-García, JA, Sáenz-Romero C (2020) Growth of naturally regenerated *Abies religiosa* (Kunth) Schltldl. & Cham. seedlings in a nursery and genetic variation among provenances. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(1), 85-96. doi: 0.5154/r.rchscfa.2019.01.013
- Cruzado-Vargas AL, Blanco-García A, Lindig-Cisneros R, Gómez-Romero M, López-Toledo L, de la Barrera E, Sáenz-Romero C (2021) Reciprocal common garden altitudinal transplants reveal potential negative impacts of climate change on *Abies religiosa* populations in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve overwintering sites. *Forests*, 12(1), 69. doi: 10.3390/f12010069
- Guzmán-Aguilar G, Carbajal-Navarro A, Sáenz-Romero C, Herrerías-Diego, López-Toledo L, Blanco-García A (2020) *Abies religiosa* seedling limitations for passive restoration practices at the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Mexico. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 115. doi: 10.3389/fevo.2020.00115
- Mátyás C, Berki I, Czúcz B, Gálos B, Móricz N, Rasztovits E (2010) Future of beech in Southern Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 6, 91–110. Obtenido de http://publicatio.uni-sopron.hu/110/1/08_matyas_et_al_p.pdf
- Ortiz-Bibian M. A, Blanco-García A, Lindig-Cisneros R. A, Gómez-Romero M, Castellanos-Acuña D, Herrerías-Diego Y, Sánchez-Vargas N. M, 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. 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* (HBK) Schl. et Cham a lo largo de un gradiente altitudinal. I. Capacidad germinativa de la semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(3), 301-308. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v42n3/0187-7380-rfm-42-03-00301.pdf>

R Core Team (2021) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.

Rehfeldt GE (1983 a) Seed transfer guidelines for Douglas-fir in Western Montana. Research Note INT-329. United States Department of Agriculture. Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Ogden, UT 84401. 4 pp.

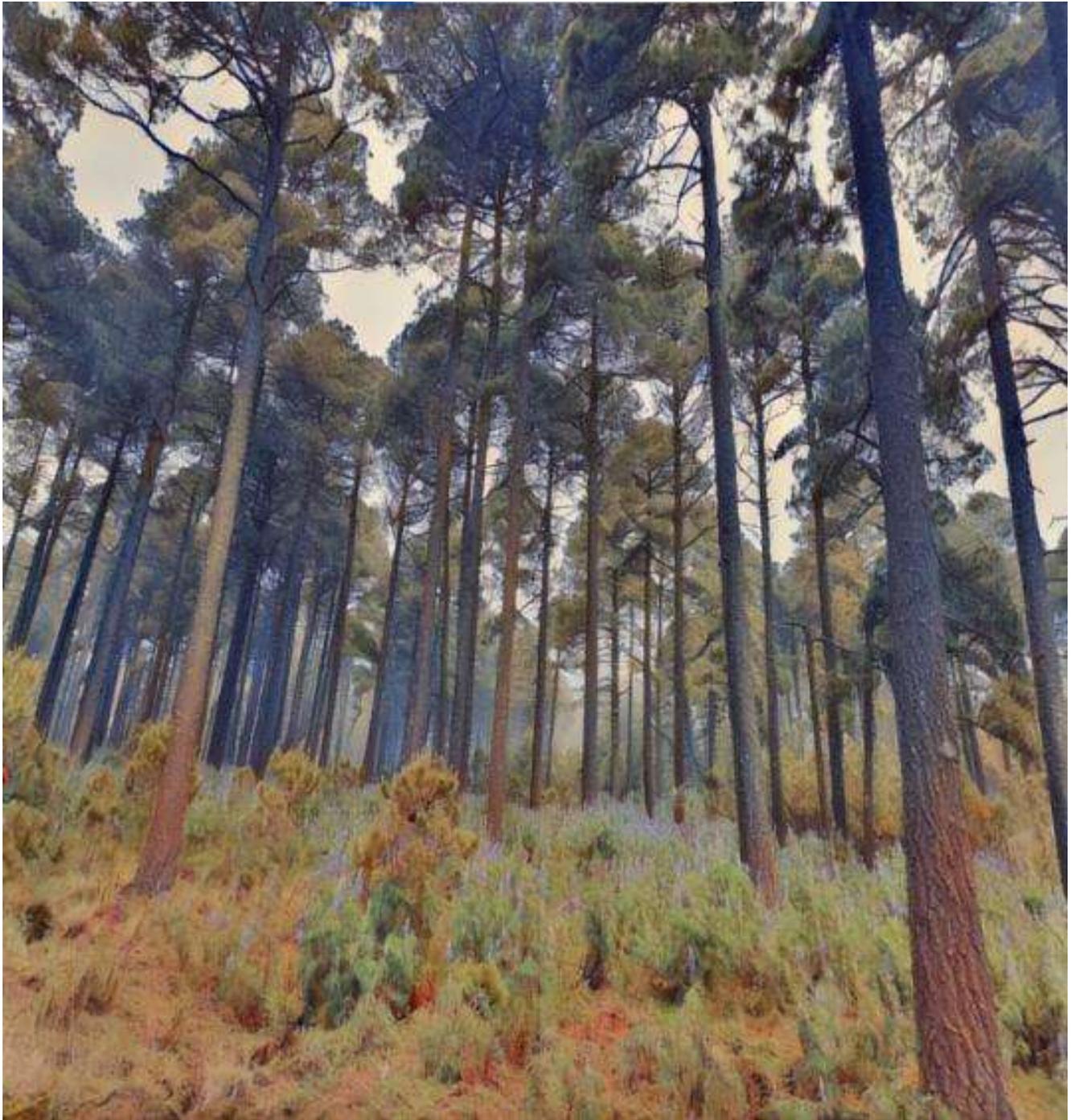
Rehfeldt GE (1983 b) Seed transfer guideline for Douglas-fir in central Idaho. United States Department of Agriculture. Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Ogden, UT 84401. 3 pp.

Rehfeldt GE, Tchebakova NM, Parfenova YI, Wykoff WR, Kuzmina NA, Milyutin LI (2002). Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris*. *Global Change Biology*, 8, 912–929. doi: 10.1046/j.1365-2486.2002.00516. x

Ruiz-Talonia LF, Sánchez-Vargas NM, Bayuelo-Jiménez JS, Lara-Cabrera SI, Sáenz-Romero C. (2014) Altitudinal genetic variation among native *Pinus patula*

- provenances: performance in two locations, seed zone delineation and adaptation to climate change. *Silvae Genetica*, 63(4), 139-149. doi: 10.1515/sg-2014-0019
- Sáenz-Romero C, Guzmán-Reyna RR, Rehfeldt GE (2006) Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, Mexico: Implications for seed zoning, conservation, tree breeding and global warming. *Forest Ecology and Management*, 229(1-3), 340-350. doi: 10.1016/j.foreco.2006.04.014
- Sáenz-Romero C, Ruiz-Talonia LF, Beaulieu J, Sánchez-Vargas NM, Rehfeldt GE (2011) Genetic variation among *Pinus patula* populations along an altitudinal gradient. Two environment nursery tests. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34(1), 19-25. Obtenido de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v34n1/v34n1a5.pdf>
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt GE, Duval P, Lindig-Cisneros R (2012) *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management* 275:98-106. doi: 10.1016/j.foreco.2012.03.004
- Sáenz-Romero C, Lindig-Cisneros RA, Joyce DG, Beaulieu J, St-Clair JB, Jaquish BC (2016) Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22(3): 303 - 323. doi: 10.5154/r.rchscfa.2014.10.052
- Viveros-Viveros H, Sáenz-Romero C, López-Upton J, Vargas- Hernández JJ (2005) Variación genética altitudinal en el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en campo. *Agrociencia*, 39(5), 575–587. Obtenido de <https://www.redalyc.org/html/302/30239511/>

- Viveros-Viveros H, Sáenz-Romero C, Vargas-Hernández JJ, Tapia-Olivares BL, López-Upton J, Santacruz-Varela A, Beaulieu J (2014) Comparación de Q_{ST} vs. F_{ST} en poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(2), 117-127. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v37n2/v37n2a3.pdf>
- Viveros-Viveros H, Marín-Hernández J, Aparicio-Rentería A, Sáenz-Romero C (2018) Variación en el crecimiento inicial de la altura de plántulas de *Pinus hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Veracruz. *Acta Fitogenética*, 5(1), 273. Obtenido de https://www.somefi.mx/wp-content/uploads/2018/10/ACTA-5-2018_Texcoco_Colpos.pdf
- Yeaman S, Hodgins KA, Lotterhos KE, Suren H, Nadeau S, Degner JC, Nurkowski KA, Smets P, Wang T, Gray LK, Liepe KJ, Hamann A, Holliday JA, Whitlock MC, Rieseberg LH, Aitken SN (2016) Convergent local adaptation to climate in distantly related conifers. *Science*. 353. 1431-1433. doi: 10.1126/science. aaf7812
- Zobel B, Talbert J (1984). *Applied Forest Tree Improvement*. John Wiley & Sons. New York, USA. 510p.



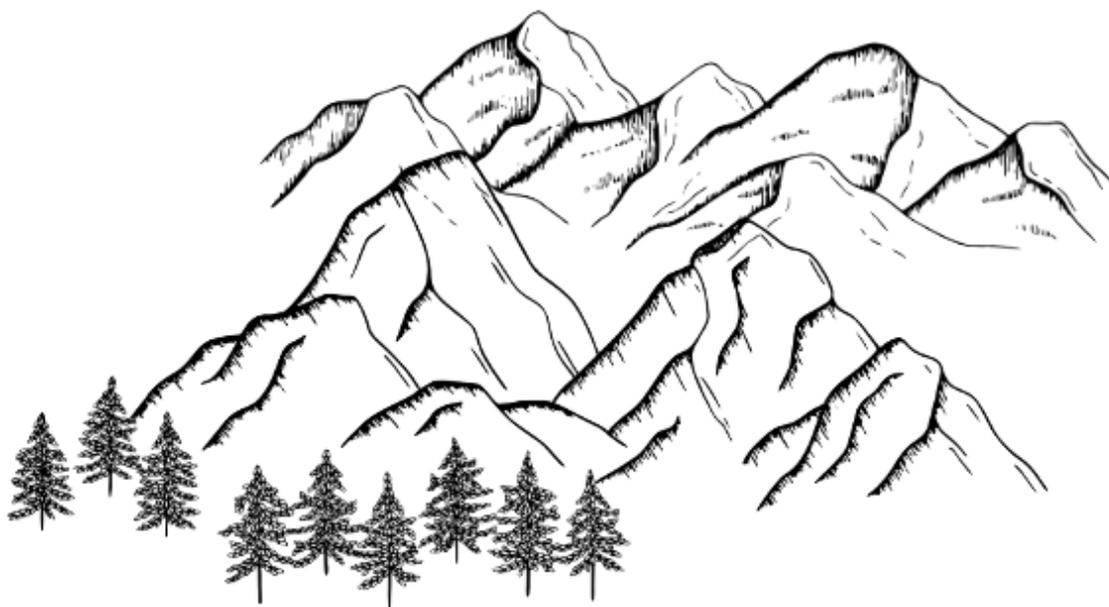
<<No todo lo que cuenta puede ser cuantificado, y no todo lo que puede ser cuantificado cuenta>>

Albert Einstein

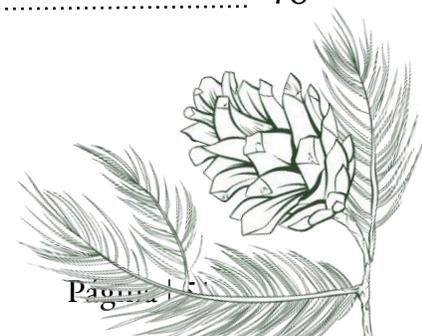


CAPÍTULO II

Migración asistida de procedencias de *Abies religiosa* en el
Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca



I. RESUMEN	57
II. ABSTRACT	59
III. INTRODUCCIÓN	61
IV. PLANTEAMIENTO CIENTÍFICO	64
1. Justificación.....	64
2. Hipótesis.....	64
3. Objetivo General.....	65
4. Objetivos Específicos.....	65
5. Pregunta de Investigación	65
V. MATERIALES Y MÉTODOS	66
1. Metodología General.....	66
2. Área de Estudio.....	67
3. Diseño Experimental.....	67
4. Evaluaciones en Campo.....	74
5. Datos Climáticos.....	75
6. Análisis Estadístico.....	75



VI. RESULTADOS	77
1. Supervivencia General.....	77
2. Curva de respuesta a la distancia de transferencia climática y altitudinal	79
2.1. Supervivencia.....	79
2.2. Índice de Estrés	82
2.3. Incremento en Altura.....	84
3. Precipitación	86
4. Temperatura	89
VII. DISCUSIÓN	91
VIII. CONCLUSIÓN	94
IX. AGRADECIMIENTOS	95
X. REFERENCIAS	96



Capítulo II

Figura 1. Localización de los sitios de ensayo experimentales en campo y del origen de las procedencias. En el panel A tenemos la ubicación de los cuatro sitios experimentales a altitudes contrastantes en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT). En el panel B tenemos el sitio de colecta de las procedencias de *A. religiosa* a lo largo de un gradiente altitudinal en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMB)..... 69

Figura 2. Diagrama del acomodo de bloques por sitio..... 71

Figura 3. Imagen del acomodo y etiquetado de la planta en campo. Panel A, etiquetado de la planta con etiquetas de aluminio. Panel B, acomodo de la planta bajo la sombra de *S. cinerarioides*, en rodel en sentido de las manecillas de reloj..... 71

Figura 4. Panel A: Traslado la planta del vivero en el Ejido la Mesa, Municipio de San José del Rincón, Estado de México (3000 msnm) a la Comunidad de Calimaya, Estado de México. Panel B: Cercado de los sitios de ensayo por comuneros del lugar. Panel C: Distribución de la planta el día de plantación.....72

Figura 5. Panal: A, tenemos una imagen representativa de la colocación de los Dataloggers en campo. Panal: B, podemos observar el armado de las trampas de lluvia. Panel: C, Tenemos una imagen del etiquetado de los bloques con cinta amarilla para facilitar su ubicación (Cada bloque es un arbusto de *S. cinerarioides* en el que se plantó bajo su sombra las procedencias de *A. religiosa*) y como se ve en campo la colocación de las trampas de lluvia..... 73



Capítulo II

Figura 6. Gráfico de porcentaje de supervivencia promedio por sitio por mes de medición..... 77

Figura 7. Gráfico de promedio de muerte por tuza de los cuatro sitios experimentales..... 78

Figura 8. Respuesta de las plántulas a la distancia de transferencia climática para la supervivencia. Sitios más fríos para valores negativos y más cálidos para los positivos, cero significa un clima similar al sitio de procedencia.....80

Figura 9. Curva de respuesta estimada (basada en una regresión lineal) de las plantas al traslado altitudinal para la supervivencia. Los valores positivos en el eje x indican movimiento hacia sitios de mayor altitud, que son más fríos y húmedos; mientras que los valores negativos indican movimiento hacia sitios de menor altitud, que son más cálidos y secos.....80

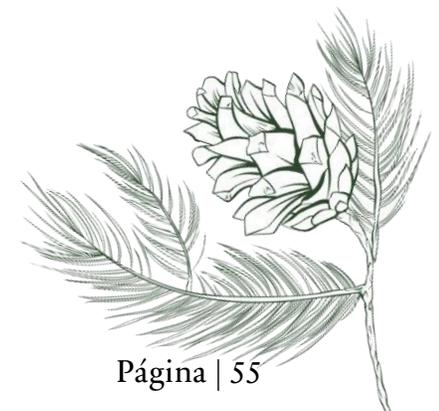
Figura 10. Extrapolación de la distancia de transferencia climática para la supervivencia. Las líneas verdes representan el intervalo donde se encuentra el 90 % de supervivencia respecto al óptimo. Las líneas moradas representan el 80 % de supervivencia respecto al óptimo.....81

Figura 11. Respuesta de las plántulas a la distancia de transferencia climática para el índice de estrés. Sitios más fríos para valores negativos y más cálidos para los positivos, cero significa un clima similar al sitio de procedencia.....82



Capítulo II

- Figura 12.** Curva de respuesta estimada (basada en una regresión lineal) de las plantas al traslado altitudinal para el índice de estrés. Los valores positivos en el eje x indican movimiento hacia sitios de mayor altitud, que son más fríos y húmedos; mientras que los valores negativos indican movimiento hacia sitios de menor altitud, que son más cálidos y secos.....83
- Figura 13.** Respuesta de las plántulas a la distancia de transferencia climática para el incremento de altura de planta. La distancia de transferencia climática significa la transferencia a sitios más fríos si son negativos y más cálidos si son positivos..... 84
- Figura 14.** Curva de respuesta estimada (basada en una regresión lineal) de las plantas al traslado altitudinal para el incremento en altura de planta. Los valores positivos en el eje x indican movimiento hacia sitios de mayor altitud, que son más fríos y húmedos; mientras que los valores negativos indican movimiento hacia sitios de menor altitud, que son más cálidos y secos..... 85
- Figura 15.** Media mensual de precipitación (mm) en el período de Julio de 2021 a junio de 2022 vs precipitación histórica (1961-1990), para los cuatro sitios. A: sitio 3400 msnm, B: sitio 3600 msnm, C: sitio 3800 msnm, D: sitio 4000 msnm.88
- Figura 16.** Media mensual de Temperatura (°C) en el período de Julio de 2021 a junio de 2022 vs precipitación histórica (1961-1990). A, Sitio 3400 y B, 3600 msnm.....90



Capítulo II

Tabla 1. Altitud, coordenadas geográficas, media anual de temperatura (MAT) y media anual de precipitación (MAP), para cada una de las procedencias. Las variables climáticas de las procedencias corresponden al periodo 1961-1990 (disponibles en el sitio web (<http://charcoal.cnre.vt.edu/climate/>))..... 68

Tabla 2. Coordenadas geográficas, elevación, media anual de temperatura (MAT) y media anual de precipitación (MAP), para cada uno de los sitios de ensayo. Las variables climáticas de los sitios corresponden al periodo 2021-2022 tomados de los dataloggers y trampas de lluvia que se colocaron en los sitios..... 70

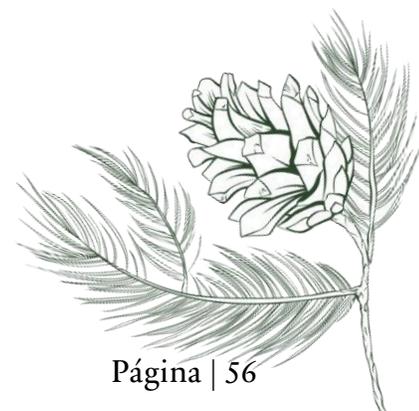
Tabla 3. Análisis del modelo mixto para supervivencia de plántulas.....78

Tabla 4. Análisis de varianza del índice de estrés de planta de ocho procedencias de *Abies religiosa*..... 83

Tabla 5. Análisis de varianza del incremento en altura de planta de ocho procedencias de *Abies religiosa*.....85

Tabla 6. Análisis de varianza de la altura final de planta de ocho procedencias de *Abies religiosa*.....86

Tabla 7. Comparación de las variables climáticas de temperatura (MAT) y precipitación (MAP), correspondientes al período de referencia 1961-1990 y los datos obtenidos.....87



I. RESUMEN

De acuerdo con algunas predicciones, para 2090 México sufriría un aumento de la temperatura media anual de 3,7°C y una disminución de las precipitaciones del 18,2%, lo que daría lugar a un clima más seco. La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) cuenta con un extenso bosque de oyamel, que podría reducirse en un 69,2% para 2030, un 87,6% para 2060 y un 96,5% para 2090. El clima ideal para *A. religiosa* se encuentra en el altiplano de México, entre 2.400 y 3.600 m s.n.m., en lugares como la Faja Volcánica Transmexicana y la Sierra Madre del Sur.

Debido al deterioro acelerado de los bosques de oyamel a causa del cambio climático y perturbaciones antropogénicas, en este trabajo se buscan alternativas de manejo que sirvan para mitigar esos procesos. Por lo cual este proyecto tiene como objetivo demostrar la viabilidad de la migración asistida, con el uso plantas nodriza, a altitudes de hasta 400 metros sobre el límite superior altitudinal de la distribución natural de *A. religiosa*; como una estrategia adaptativa hacia el cambio climático que incluya la creación de sitios potenciales de estancia invernal para la mariposa monarca en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT).

Se establecieron cuatro sitios experimentales con altitudes contrastantes en la ladera este del APFFNT (3400, 3600, 3800 y 4000 msnm). En los sitios 3800, 3600 y 3400 msnm, se establecieron 30 bloques cada uno con 8 procedencias. En el sitio 4000, se sembraron únicamente 13 bloques con 5 plántulas cada uno; allí se sembraron también tres parcelas adicionales, sin un diseño formal de bloques al azar. La planta fue plantada bajo la sombra de planta nodriza (arbustos nativos presentes en los sitios).

Se tomaron mediciones de altura, diámetro, sobrevivencia y vigor de la planta durante 14 meses. También se obtuvieron datos de temperatura ambiental y precipitación de los cuatro sitios experimentales. Se realizó una regresión para cada una de las cuatro variables de respuesta estudiadas: sobrevivencia, estrés de planta, altura final e incremento de altura

de plántulas de *A. religiosa*, para medir el efecto de la transferencia climática y altitudinal. Así mismo se determinó las diferencias estadísticas significativas entre sitios y procedencias de las diferentes variables realizando un análisis de varianza (ANOVA).

La supervivencia general final del ensayo de procedencias fue del 71.8 %. El sitio con mayor supervivencia fue el sitio 3400 con el 95.8 %, seguido por el sitio 3800 con el 80.7%; mientras que el sitio 3600 tuvo una supervivencia del 71.9 % y el sitio 4000 obtuvo el 52.7%. Se encontró diferencias significativas entre sitios ($p < 0.0005$). La distancia de transferencia climática en cuanto a la supervivencia nos indica que por cada grado de transferencia climática la supervivencia disminuye en un 6.8 %. Cuando las fuentes de semilla se trasladaron hacia sitios de mayor elevación y por tanto 2 °C más fríos, la supervivencia promedio general es del 84%. Cuando el movimiento llega a 4°C la sobrevivencia disminuye llegando al 70 %. El óptimo de supervivencia se obtiene al realizar una transferencia climática de -2.6 grados. El 90 % de supervivencia respecto al óptimo lo obtenemos en el intervalo de transferencia climática de -1.4 a -3.9 grados; mientras que el 80 % se obtiene en el intervalo de -0.93 a -4.4 grados. Por lo que es recomendable no mover más de 2.6 grados a las procedencias para que estas se adapten mejor y tengan un mejor crecimiento y supervivencia y un menor estrés.

Los resultados presentados en este proyecto son alentadores ya que al migrar las procedencias 200 y hasta 400 msnm sobre el límite altitudinal superior de la *A. religiosa* es factible con el uso de plantas nodrizas, esto como una alternativa para la conservación de la especie.

Palabras clave: Migración asistida, Cambio climático, Distancia de transferencia climática; *Abies religiosa*.

II. ABSTRACT

According to some predictions, by 2090 Mexico will experience an increase in average annual temperature of 3.7°C and a decrease in precipitation of 18.2%, resulting in a drier climate. The Monarch Butterfly Biosphere Reserve (RBMM) has an extensive oyamel forest, which could be reduced by 69.2% by 2030, 87.6% by 2060 and 96.5% by 2090. The ideal climate for *A. religiosa* is found in the highlands of Mexico, between 2,400 and 3,600 msnm, in places such as the Transmexican Volcanic Belt and the Sierra Madre del Sur.

Due to the accelerated deterioration of the oyamel forests as a result of climate change and anthropogenic disturbances. This work seeks management alternatives to mitigate these processes. Therefore, this project aims to demonstrate the feasibility of assisted migration, with the use of nurse plants, at altitudes up to 400 meters above the upper altitudinal limit of the natural distribution of *A. religiosa*, as an adaptive strategy to climate change that includes the creation of potential wintering sites for monarch butterflies in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area (APFFNT).

Four experimental sites with contrasting altitudes were established on the eastern slope of the APFFNT (3400, 3600, 3800 and 4000 msnm). At sites 3800, 3600 and 3400 msnm, 30 blocks each with 8 provenances were established. At site 4000, only 13 blocks were planted with 5 seedlings each; three additional plots were also planted there, without a formal randomized block design. The plant was planted under the shade of nurse plants (native shrubs present in the sites).

Measurements of plant height, diameter, survival and vigor were taken for 14 months. Environmental temperature and precipitation data were also obtained from the four experimental sites.

Precipitation data were also obtained from the four experimental sites. A regression was performed for each of the four response variables studied: survival, plant stress, final height and height increment of *A. religiosa* seedlings, to measure the effect of climatic or

altitudinal transfer. The significant statistical differences between sites and provenances of the different variables were also determined by performing an analysis of variance (ANOVA).

The final overall survival of the provenance trial was 71.8%. The site with the highest survival was site 3400 with 95.8 %, followed by site 3800 with 80.7 %; while site 3600 had a survival of 71.9 % and site 4000 obtained 52.7 %. Significant differences were found between sites ($p < 0.0005$). The distance of climatic transfer in terms of survival indicates that for each degree of climatic transfer, survival decreases by 6.8 %. When seed sources were moved to sites of higher elevation and therefore 2°C cooler, overall average survival is 84%. When the movement reaches 4°C, survival decreases to 70 %. The optimum survival is obtained when a climatic transfer of -2.6 degrees is made. The 90% of survival with respect to the optimum is obtained in the interval of climatic transfer of -1.4 to -3.9 degrees; while the 80% is obtained in the interval of -0.93 to -4.4 degrees. Therefore, it is advisable not to move more than 2.6 degrees to the provenances so that these adapt better and have a better growth and survival and less stress. The results presented in the project are encouraging since migrating the provenances 200 and up to 400 meters above the upper altitudinal limit of *A. religiosa* is feasible with the use of nurse plants, as an alternative for the conservation of the species.

Key words: Assisted migration, Climate change, Climate transfer distance; *Abies religiosa*.

III. INTRODUCCIÓN

El Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) Nevado de Toluca, ocupa el cuarto lugar entre las cumbres de mayor altitud en México (4,660 msnm). Debido a sus condiciones edáficas y geográficas, cuenta con una enorme capacidad de captación hídrica, la cual pertenece a dos grandes cuencas hidrológicas del país: Lerma-Santiago y Balsas (CONANP, 2016).

En el APFF Nevado de Toluca, se tiene mayor representación vegetativa por especies herbáceas, seguido por arbustos y árboles; principalmente pinos, encinos y en menor número por el oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schldtl. & Cham.) el cual se encuentra de manera fragmentada en las laderas norte, sur y oeste (CONANP, 2016).

Los bosques de coníferas proveen de distintos servicios ecosistémicos, como lo es prevención de erosión del suelo y facilitar la captación hídrica; se estima que los bosques de oyamel comprenden el 0.15% de la superficie del país (Palacio-Prieto et al. 2000). Estos bosques se han visto afectados intensamente por cuestiones antropogénicas y, en las últimas décadas, por el cambio climático, lo que hace que los árboles sean mayormente susceptibles a enfermedades, plagas e incendios, se estima que las condiciones calurosas y secas aumenten conforme pasa el tiempo (Halofsky et al., 2020).

El clima ideal para *A. religiosa* se encuentra en las tierras altas de México, entre 2.400 y 3.600 msnm, en lugares como la Faja Volcánica Transmexicana y la Sierra Madre del Sur (Rzedowski, 2006).

Algunas predicciones sugieren que, para 2090, México sufriría un aumento de la temperatura media anual de 3,7° C y una disminución de las precipitaciones del 18,2%, lo que daría lugar a un clima más seco (Sáenz-Romero et al., 2010). Debido a esto y a las limitaciones físicas de las plantas, éstas no podrán migrar al mismo ritmo que aumenta la temperatura, lo que podría provocar una mayor pérdida de cubierta forestal (Sáenz-Romero et al., 2016; 2020).

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) cuenta con masas forestales extensas de bosque de oyamel, donde reciben en su periodo hibernal a la mariposa monarca (*Danaus plexippus* L. 1758). Como consecuencia del cambio climático, las predicciones sobre la disminución de su hábitat resultan alarmantes, debido a que se estima se reduzca el hábitat climático propicio para el oyamel en 69.2 % para 2030, 87.6 % para 2060 y de 96.5% para 2090; condiciones que ya no tendría la RBMM. *A. religiosa* tendría que desplazarse altitudinalmente 300 m para el 2030 siguiendo a su hábitat, la única forma factible de lograr un movimiento de tal magnitud sería mediante la migración asistida (Sáenz-Romero et al. 2012).

La migración asistida se refiere a la reubicación de poblaciones naturales (mediante reforestación) en un nuevo lugar donde las previsiones de cambio climático muestran que (en el futuro) las condiciones climáticas coincidirán con aquellas a las que ya están acostumbradas (Sáenz-Romero et al., 202). Además, se ha demostrado que el uso de plantas nodrizas, que sirven de amortiguador frente a condiciones desfavorables y potencializan el éxito de establecimiento de la especie, son muy beneficiosas en los esfuerzos de reforestación (Carbajal-Navarro et al. 2019).

El uso de arbustos locales como plantas nodrizas tiene un efecto positivo en la supervivencia de las plantas de *A. religiosa*, permitiendo la reforestación en sitios hasta 400 m más altos que la fuente de semillas, lo que podría representar una alternativa para la conservación de esta especie ante las proyecciones de cambio climático y pérdida de hábitat (Carbajal-Navarro et al., 2019; Navarro-Miranda, 2020).

Las plantas nodrizas brindan protección a las plántulas de otras especies en un ambiente desafiante, permitiéndoles crecer lo suficiente para enfrentar las condiciones (Gómez-Aparicio et al., 2004; Tewksbury y Lloyd 2001), ya que bajo su dosel las temperaturas del aire y del suelo son menos extremas, y la humedad del suelo tiende a permanecer a menor profundidad (Ramírez-Contreras y Rodríguez-Trejo 2009), favoreciendo así la supervivencia de las plántulas, su crecimiento y desarrollo (Padilla y Pugnaire, 2006).

Este proyecto tiene como objetivo demostrar la viabilidad de la migración asistida con el uso de plantas nodriza, a altitudes de hasta 400 metros sobre el límite superior altitudinal de la distribución natural de *A. religiosa*; como una estrategia adaptativa hacia el cambio climático que incluya la creación de sitios potenciales de estancia invernal para la mariposa monarca en el APFF Nevado de Toluca, debido a que las proyecciones demuestran que para el año 2090 no habrá condiciones favorables para el oyamel dentro de la RBMM (Sáenz-Romero et al 2012).

IV. PLANTEAMIENTO CIENTÍFICO

1. Justificación

Algunas proyecciones sugieren que, para 2090, México tendrá un entorno más seco debido a un aumento de la temperatura media anual de 3,7 °C y una disminución de las precipitaciones del 18,2% (Sáenz-Romero et al., 2010). Dado que las plantas no pueden migrar de forma natural al mismo ritmo que el cambio de temperatura, esto podría provocar una reducción aún mayor de la cubierta forestal (Sáenz-Romero et al., 2016; 2020). La migración asistida, la reubicación o traslado deliberado de especies fuera de sus hábitats históricos, es un método de gestión forestal que puede ayudar a compensar las pérdidas de biodiversidad debidas al cambio climático (O'Neill 2017; Vitt et al., 2010).

2. Hipótesis

La migración asistida de *A. religiosa* en un gradiente altitudinal (3400, 3600, 3800 y 4000 msnm) bajo la protección de *Senecio cinerarioides* como planta nodriza (dos de ellos más allá de la parte superior de su distribución natural) mostrará que las plantas con un origen climático similar al de su lugar de origen tendrán un mejor crecimiento y supervivencia, y un menor estrés. Mientras que las que se encuentren más alejadas a su clima similar mostrarán un menor crecimiento y supervivencia.

3. Objetivo General

Explorar las posibilidades de éxito del establecimiento de *Abies religiosa* en una altitud superior (3,800 msnm) al límite natural actual máximo (3,600 msnm) mediante la migración asistida, con el uso de plantas nodriza nativas, en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

4. Objetivos Específicos

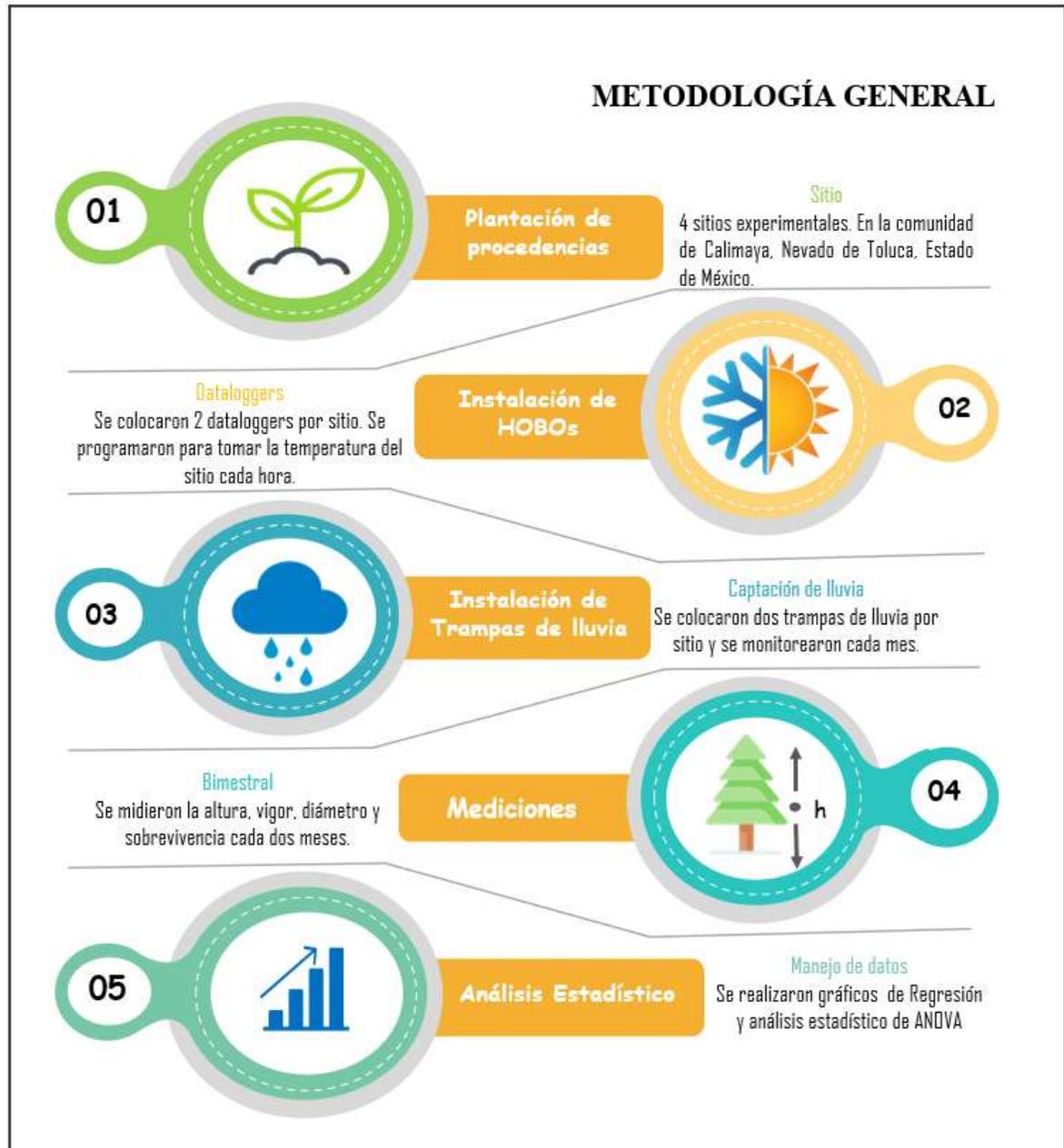
- Determinar la respuesta (en supervivencia y crecimiento) de las plantas de *A. religiosa* cuya procedencia altitudinal es menor a las del sitio de plantación seleccionado (a mayor altitud).
- Registrar las condiciones climáticas del sitio altitudinalmente mayor y del sitio de referencia, al igual que sus condiciones edáficas.
- Comparar condiciones climáticas entre sitios y respuesta de las plantas.

5. Pregunta de investigación

¿Puede *A. religiosa* adaptarse a una migración asistida hacia un sitio con una altitud superior a su límite altitudinal?

V. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Metodología General



2. Área de Estudio

El estudio se realizó en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT), en el Estado de México. Esta zona forma parte del eje Neovolcánico y abarca 53 590 hectáreas. Alberga al volcán del mismo nombre, que es el cuarto pico más alto del país (4660 msnm) (CONANP, 2016).

La importancia ecológica, hidrológica, social y económica del APFFNT a nivel estatal es sustancial. Desde una perspectiva zoogeográfica, es un punto de contacto y transición entre la fauna neártica y neotropical (CONANP, 2013) debido a que cerca del 66% de su superficie está conformada por bosques de pino (*Pinus* spp.), y abeto (*Abies religiosa*) (Franco y Burrola, 2009), que albergan cerca de 288 especies de flora (CONANP, 2013). En un sentido similar, la ciudad de Toluca, su zona metropolitana y una porción del Valle de México se abastecen de los escurrimientos que se originan en sus laderas, lo que convierte a estas dos localidades entre las regiones hidrológicas más importantes del país (García et al., 2009).

3. Diseño Experimental

Como parte de un proyecto previo de Maestría (Cruzado-Vargas, 2021), fueron colectadas semillas de *A. religiosa* a lo largo de un gradiente altitudinal, de 3000 a 3550 msnm, dentro de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) (Tabla 1, Figura 1A). Obteniéndose un total de 10 procedencias, las cuales fueron sembradas en envases de vivero dentro de una casa sombra en el Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales (INIRENA; 19°41'23.02"N, 101°15'0.87"O, 1899 msnm), Morelia, Michoacán,

permaneciendo ahí por dos años. Posteriormente las plántulas fueron trasladadas a un vivero en el ejido La Mesa, Edo. de México, a 3000 msnm dentro de la zona de amortiguamiento de la RBMM, donde estuvieron por un año. Para el ensayo de procedencias en campo fueron utilizadas solamente 8 de las 10 procedencias.

Tabla 1. Altitud, coordenadas geográficas, media anual de temperatura (MAT) y media anual de precipitación (MAP) para cada una de las procedencias. Las variables climáticas de las procedencias corresponden al periodo 1961-1990 (disponibles en el sitio web (<http://charcoal.cnre.vt.edu/climate/>)).

Procedencias					
Procedencias	Altitud (msnm)	Latitud (N)	Longitud (W)	MAT (°C)	MAP (mm)
2	3491	19° 34' 04.1"	100° 13' 59.5"	8.81	1094
3	3457	19° 34' 17.1"	100° 14' 08.2"	9.01	1089
5	3364	19° 34' 31.7"	100° 14' 03.8"	9.54	1065
6	3300	19° 34' 46.2"	100° 13' 53.6"	9.89	1049
7	3233	19° 34' 50.9"	100° 13' 26.6"	10.2	1029
8	3210	19° 34' 52.6"	100° 13' 15.5"	10.31	1022
9	3143	19° 34' 53.0"	100° 12' 53.1"	10.6	1001
10	3099	19° 35' 12.0"	100° 12' 52.9"	10.79	987

El 5 de julio de 2021 se trasladaron plántulas de *Abies religiosa* del Ejido La Mesa, en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMB), ver figura 3A, a la Comunidad de Calimaya, Estado de México, en las tierras bajas del Nevado de Toluca, cerca de la ciudad de Toluca (capital del Estado).

Se establecieron cuatro sitios experimentales con altitudes contrastantes en la ladera este del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT), ver tabla 2. El sitio “tres” a 3400 msnm, parte superior de la distribución de *A. religiosa*; el sitio “dos” a 3600 msnm, límite altitudinal superior extremo de la especie con sólo unos pocos individuos dispersos de *A. religiosa* presentes; el sitio “uno” a 3800 msnm, más allá del límite altitudinal superior de la especie; y el sitio “cero” a 4000 msnm, justo en el límite arbóreo y mucho más allá del límite altitudinal superior de la especie (Figura 1A). Los sitios elegidos fueron sitios perturbados por incendios forestales anteriores, brotes de escarabajos descortezadores del pino seguidos de talas fitosanitarias por realización de terrazas cm medida de conservación de suelos (sitio 3600 m). La elección de los sitios tuvo como objetivo evitar la necesidad de eliminar individuos de las especies de árboles dominantes existentes, como *Pinus hartwegii*, que es el único pino mexicano que llega al límite altitudinal superior del bosque.



Figura 1. Localización de los sitios de ensayo experimentales en campo y del origen de las procedencias. En el panel A tenemos la ubicación de los cuatro sitios experimentales a altitudes contrastantes en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT). En el panel B tenemos el sitio de colecta de las procedencias de *A. religiosa* a lo largo de un gradiente altitudinal en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMB).

Tabla 2. Coordenadas geográficas, elevación, media anual de temperatura (MAT) y media anual de precipitación (MAP) para cada uno de los sitios de ensayo. Las variables climáticas de los sitios corresponden al periodo 2021-2022 tomados de los dataloggers y trampas de lluvia que se colocaron en los sitios.

Sitios de Ensayos de Procedencias					
Sitios	Altitud (msnm)	Latitud (N)	Longitud (W)	MAT (°C)	MAP (mm)
Las Peñas B	4000	19° 07' 35.4"	099° 44' 04.1"	4.65	1194
Las Peñas	3800	19° 07' 32.3"	099° 43'	6.15	1160
Paderón	3600	19° 07' 38.2"	099° 43' 15.1"	7.65	1114
Barranca	3400	19° 08' 30.7"	099° 42'	8.98	1083

Las plántulas se plantaron los días 6 y 7 de julio de 2021. En los sitios 3800 msnm, 3600 msnm y 3400 msnm, se establecieron 30 bloques cada uno con 8 procedencias (240 plántulas por cada sitio); en general con una procedencia por bloque (recolectadas a lo largo de un gradiente altitudinal en la RBBM), algunos bloques tenían dos plántulas de la misma procedencia por falta de plántulas suficientes de todas las procedencias (Figura 2). Fueron plantadas en rodal bajo la sombra de arbustos existentes, en nuestro caso *Senecio cinerarioides* elegido en base a nuestra experiencia previa (Figura 3B).

En el sitio 4000, debido a la insuficiencia de plántulas, se sembró únicamente 13 bloques con 5 plántulas cada uno, una plántula por procedencia; allí se sembraron también tres parcelas adicionales, sin un diseño formal de bloques al azar (65 plántulas en bloques formales + 67 en parcelas informales = 130 plántulas en ese sitio). En total se sembraron 852 plántulas de *A. religiosa* y los sitios fueron previamente cercados (Figura 4B).

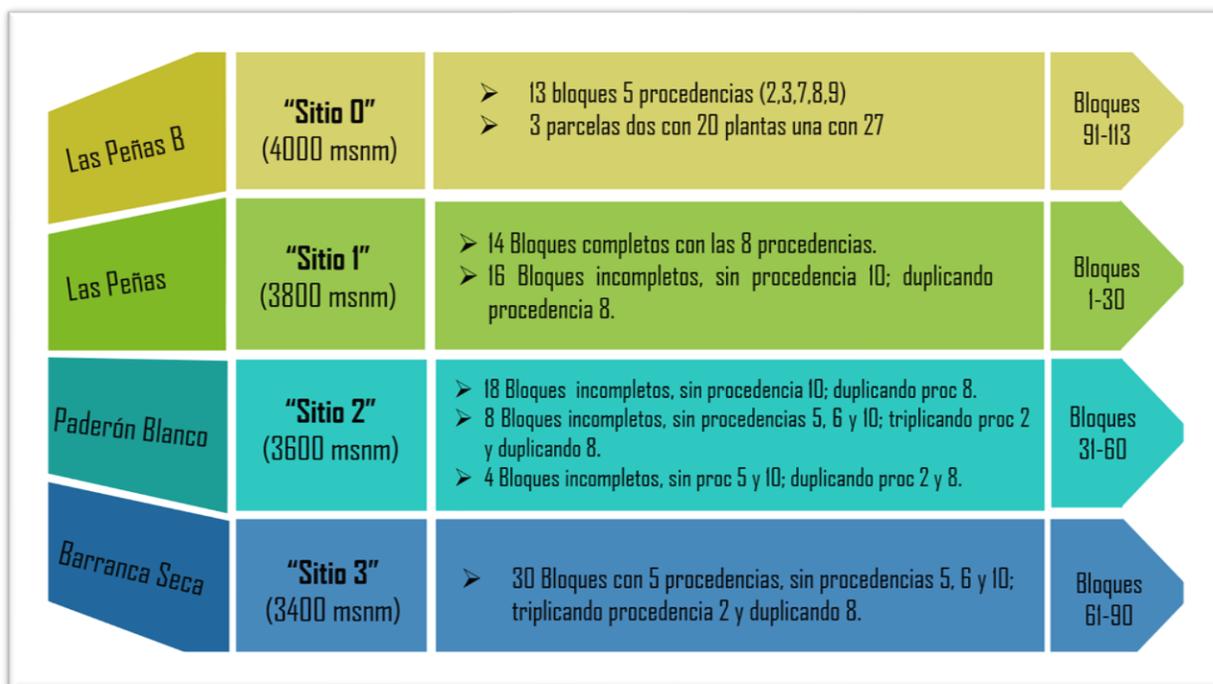


Figura 2. Diagrama del acomodo de bloques por sitio.

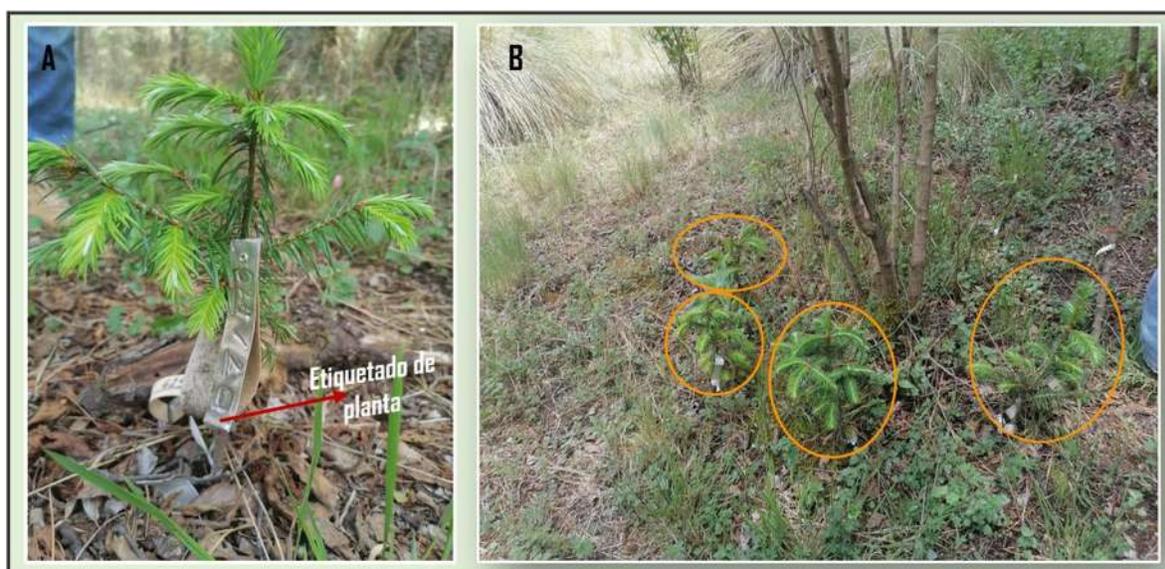


Figura 3. Imagen del acomodo y etiquetado de la planta en campo. Panel A, etiquetado de la planta con etiquetas de aluminio. Panel B, acomodo de la planta bajo la sombra de *Senecio cinerarioides*, en rodela en sentido de las manecillas de reloj.



Figura 4. Panel A: Traslado de la planta del vivero en el Ejido la Mesa, Municipio de San José del Rincón, Estado de México (3000 msnm) a la Comunidad de Calimaya, Estado de México. Panel B: Cercado de los sitios de ensayo por comuneros del lugar. Panel C: Distribución de la planta el día de plantación.

Se colocaron dos datalogger (HOBO Pendant® Data Logger de Temperatura/Luz, 8K) por sitio para registrar la temperatura de los sitios experimentales (figura 5A). Los datalogger se programaron para registrar la temperatura de los sitios experimentales en campo, cada hora por un año. Así mismo se colocaron dos trampas de agua de lluvia por sitio (garrafones de agua con un embudo), ver figura 5B, para determinar la precipitación de los sitios, tomando mediciones cada mes y promediando los resultados de las dos trampas de agua de lluvia.

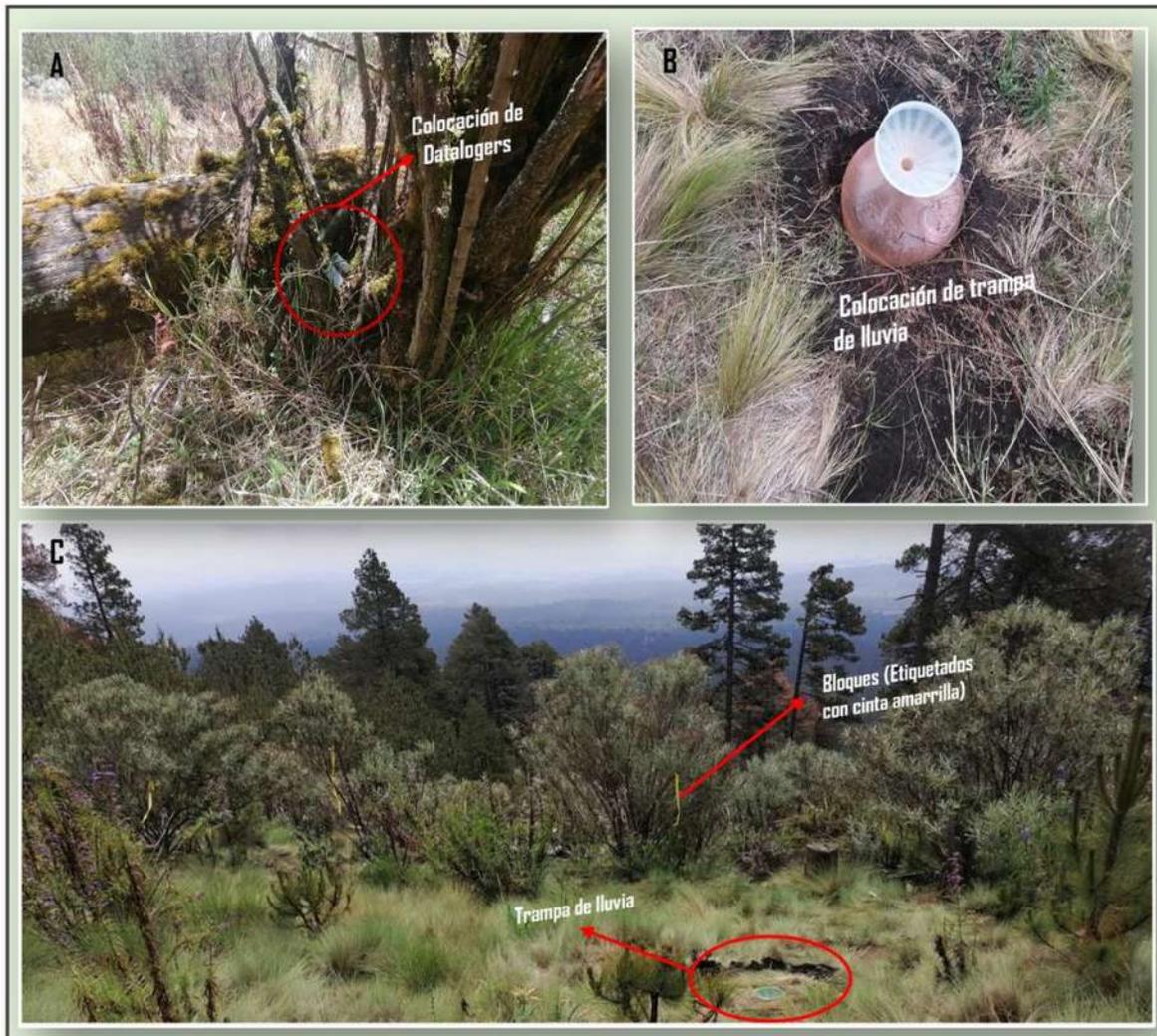
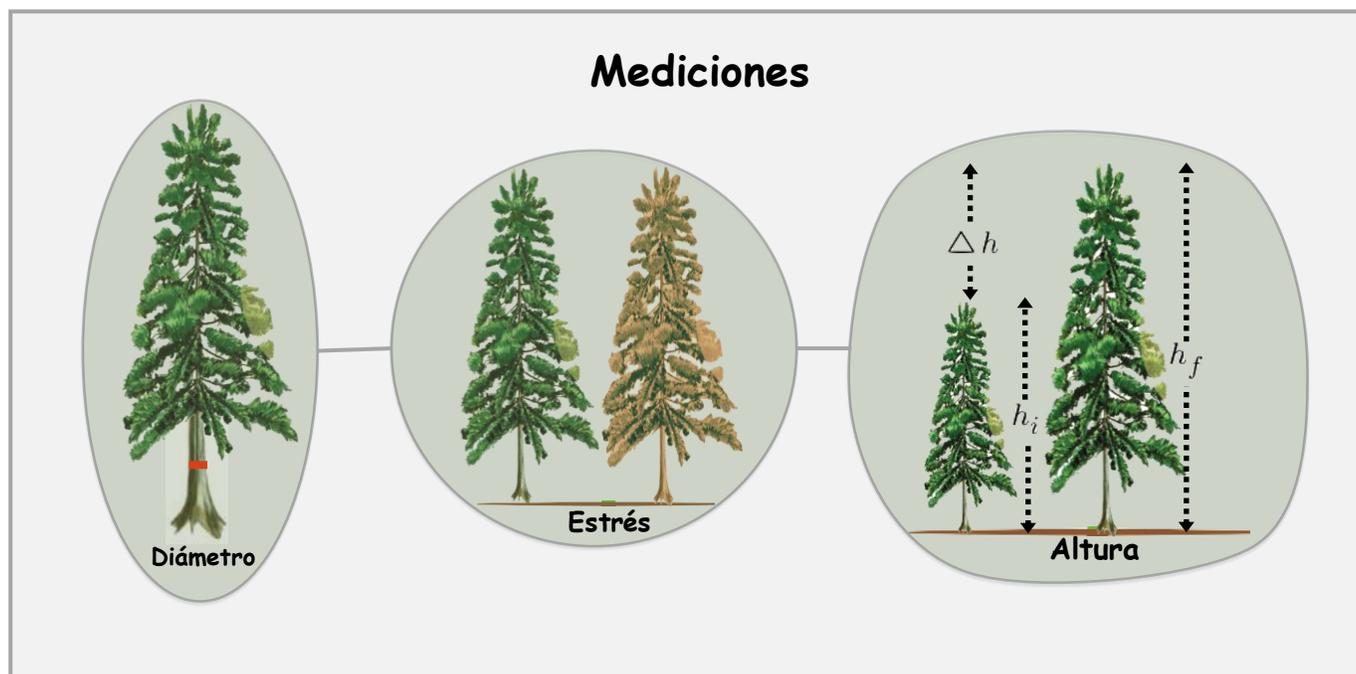


Figura 5. Panel: A, tenemos una imagen representativa de la colocación de los Dataloggers en campo. Panel: B, podemos observar el armado de las trampas de lluvia. Panel: C, Imagen del etiquetado de los bloques con cinta amarilla para facilitar su ubicación (cada bloque es un arbusto de *Senecio cinerarioides* en el que se plantó bajo su sombra las procedencias de *A. religiosa*) y como se ve en campo la colocación de las trampas de lluvia.

4. Evaluaciones en campo



Durante 14 meses se realizaron evaluaciones bimestrales de supervivencia, altura de la planta, diámetro y estrés de planta con el índice desarrollado por Carbajal-Navarro (2019) y colaboradores para evaluar el estado físico de las plantas. Este índice visual de estrés contiene valores que van de 1 a 6, donde, el nivel 1 representa el mejor estado de la planta y el nivel 6 representa el daño máximo (planta muerta).

Se realizó una medición inicial de altura de planta (septiembre del 2021) a dos meses de la plantación en campo y una medición final (agosto del 2022), para determinar la respuesta de crecimiento y supervivencia de las plantas y verificar si existe diferencia entre los sitios experimentales y entre las procedencias de las plantas.

La altura de la planta se midió con una precisión de 1 mm hasta la punta de la yema apical. El diámetro basal se midió en la base del tallo con un vernier digital (KNOVA®, Cupertino, CA, EE. UU.) con una precisión de 0.1 mm.

5. Datos climáticos

Los datos climáticos de la procedencia de origen de las semillas se obtuvieron para el período de referencia 1961–1990 a través de modelos spline climáticos (Sáenz-Romero et al., 2010), disponibles en el sitio web (<http://charcoal.cnre.vt.edu/climate/>).

El clima de la procedencia se considera el clima histórico reciente al que han evolucionado y adaptado las procedencias (Sáenz-Romero et al., 2015). El clima de los sitios experimentales de campo, que fue el experimentado por las plántulas mientras crecían campo, se estimó usando los datos registrados por los dos HOBOs colocados en los sitios.

A partir del clima de las procedencias y de los sitios de prueba de campo, se realizó una función de la distancia de transferencia climática y altitudinal (DTC y DTA = clima o altitud del sitio de prueba – clima o altitud de la fuente de la procedencia) para representar el impacto de las procedencias de *A. religiosa* en un sitio con un clima (o altitud) diferente al del origen de la semilla.

6. Análisis Estadístico

Se realizó una regresión para cada una de las cuatro variables de respuesta estudiadas: sobrevivencia, estrés de planta, altura final e incremento de altura (Altura final- Altura inicial) de plántulas de *A. religiosa*, para medir el efecto de la transferencia climática o altitudinal (crecer en un sitio con un clima o altitud que difería del origen de la semilla), con la función `lm` de Rstudio (R Core Team, 2022).

Para determinar diferencias estadísticas significativas entre sitios y procedencias de las diferentes variables (Altura final, Incremento en altura de planta, Índice de estrés) se

realizó un análisis de varianza (ANOVA) mediante el paquete estadístico Rstudio versión 4.2. (R Core Team, 2022), con un nivel de confianza del 95% y la función aov. Utilizando el siguiente modelo estadístico:

$$\gamma_{ijkl} = \mu + S_i + \rho_j + \beta_k(S_i) + S_i * \rho_j + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

γ_{ijk} = observación de la l -ésima plántula en el i -ésimo sitio de la j -ésima procedencia en el k -ésimo bloque.

μ = media general.

S_i = efecto del i -ésimo sitio.

ρ_j = efecto de la j – ésima procedencia.

β_k = efecto del k -ésimo bloque.

$\beta_k(S_i)$ = es el efecto del k -ésimo bloque anidado dentro del i -ésimo sitio de prueba.

Posterior a la prueba ANOVA se evaluaron las diferencias entre categorías con una prueba de Tukey (TukeyHSD).

VI. RESULTADOS

1. Supervivencia General

La supervivencia general final del ensayo de procedencias fue del 71.8 %. El sitio con mayor supervivencia fue el sitio 3400 con el 95.8 %, seguido por el sitio 3800 con el 80.7%; mientras que el sitio 3600 tuvo una supervivencia del 71.9 % y el sitio 4000 obtuvo el 52.7%. Se encontró diferencias significativas entre sitios (p 0.0005) y bloque anidado en sitios (p 0.0001), ver Tabla 3. Durante los primeros diez meses de medición (julio del 2021- abril del 2022) se observó el patrón esperado en cuanto a la supervivencia de los sitios donde a menor altitud mayor supervivencia, pero de abril a agosto del 2022 se observó que el sitio de 3600 msnm obtuvo menor supervivencia que el sitio de 3800 msnm (Figura 6); en éste sitio tuvimos problemas con mucha muerte por tuza, pero para los análisis estadísticos y gráficos los individuos con muerte por tuza no fueron incluidos en la estimación de supervivencia, por no ser un factor climático relacionado a la altitud del sitio de plantación. El porcentaje de muerte por tuza del sitio 3600 msnm fue de 8.5 %, mientras que en los sitios 3400,3800 y 4000 msnm el porcentaje de muerte por tuza se encontró por debajo del 0.5 % (Figura 7).

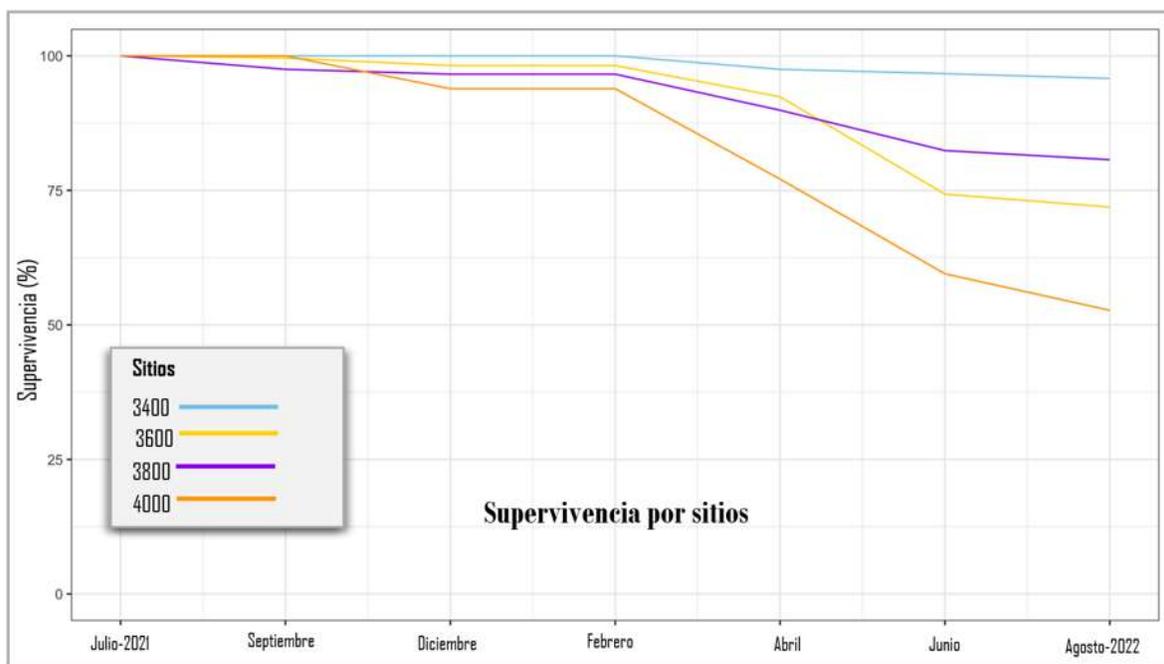


Figura 6. Gráfico de porcentaje de supervivencia promedio por sitio por mes de medición.

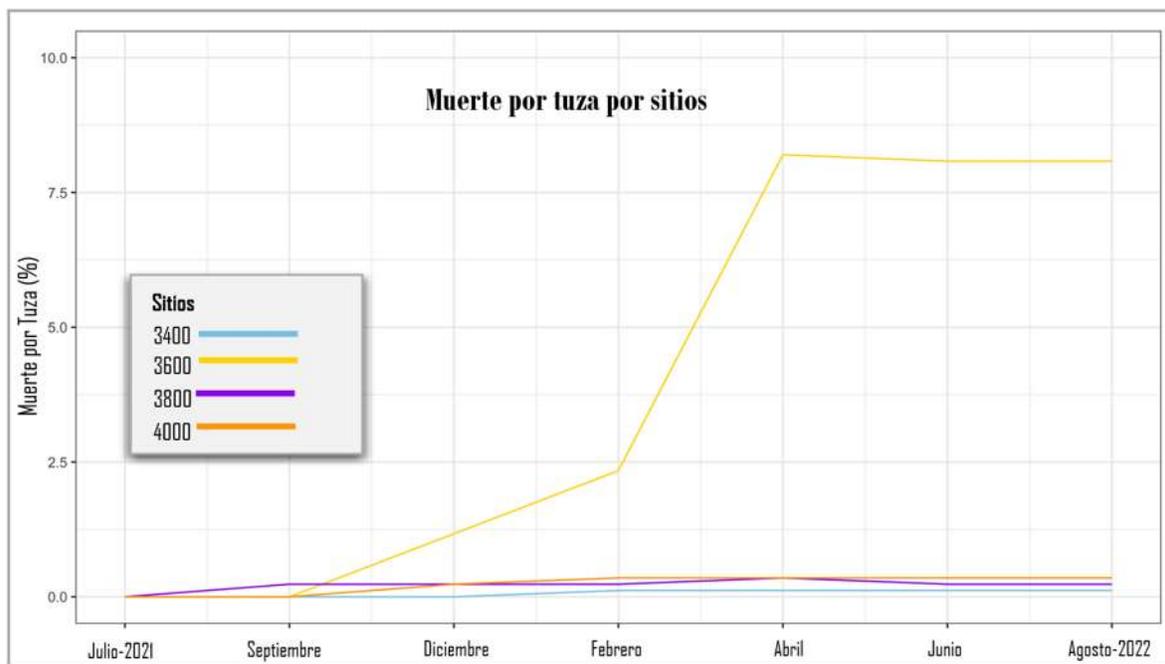


Figura 7. Gráfico de muerte promedio por tuza de los cuatro sitios experimentales.

Tabla 3. Análisis del modelo mixto para supervivencia de plántulas.

	F.V	g.l	Varianza	P
Efectos Fijos				
 Sitios		3	-----	0.0007
Efectos Aleatorios				
 Procedencias		----	0	1
 Bloque (Sitio)		----	1.25	<0.0001
 Procedencia*Sitio		----	0	1

2. Curvas de Respuesta a la Distancia de Transferencia climática y Altitudinal.

2.1 Supervivencia

La curva de respuesta pronosticada para la supervivencia indicó que cuando las fuentes de semillas se movieron hacia sitios con una altitud más elevada a la de su lugar de origen; 2 °C más fríos (lado izquierdo de la curva en la Figura 8), la supervivencia promedio general es del 81%. Cuando el movimiento llega a 4°C la sobrevivencia disminuye llegando al 49 %. Esto es aún más evidente cuando se ajusta una regresión simple de supervivencia frente a la distancia de transferencia altitudinal (Figura 9), donde se supera el cambio de 400 m a altitudes más altas (equivalente a grandes rasgos a +2 °C, basado en un lapso de 0,5 °C por 100 m, Sáenz-Romero et al., 2010) provoca una disminución significativa de la supervivencia llegando a 76 %. Cuando las fuentes de semilla se desplazan hasta 800 m, la supervivencia disminuye llegando al 51%. Esto sugiere que el óptimo de supervivencia para la especie en general, es no desplazar más de 400 m a la especie hacia sitios más fríos respecto a su lugar de origen.

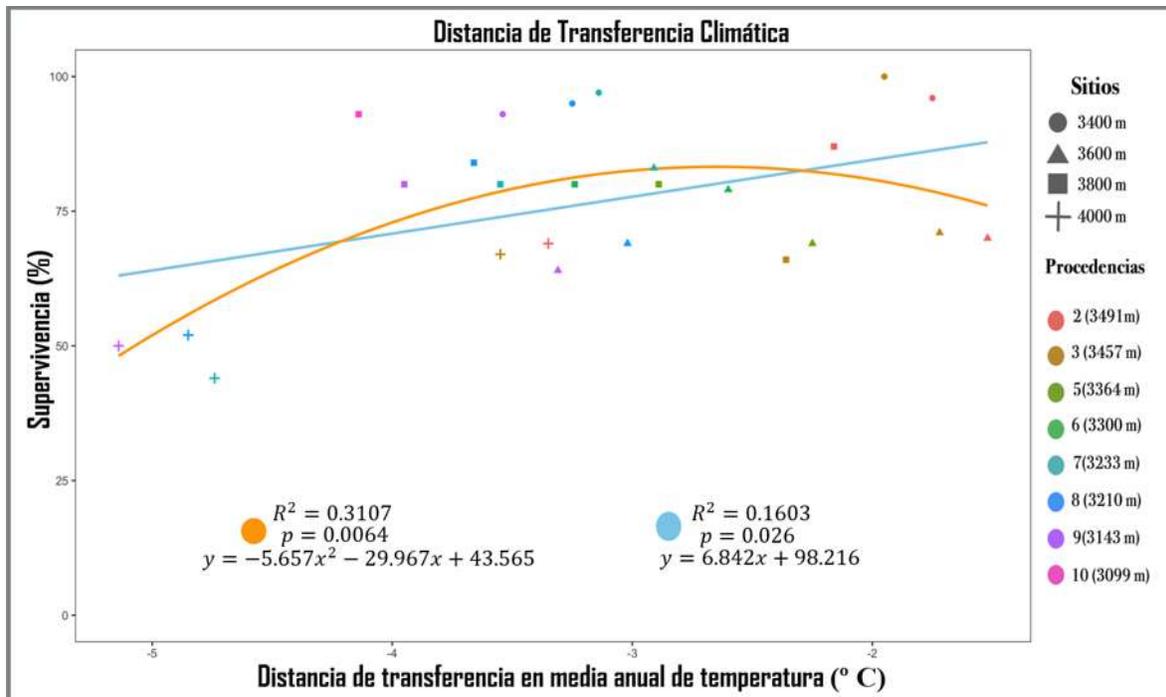


Figura 8. Respuesta de las plántulas a la distancia de transferencia climática para la supervivencia. Sitios más fríos para valores negativos y más cálidos para los positivos, cero significa un clima similar al sitio de procedencia. Línea naranja regresión cuadrática, línea azul regresión lineal.

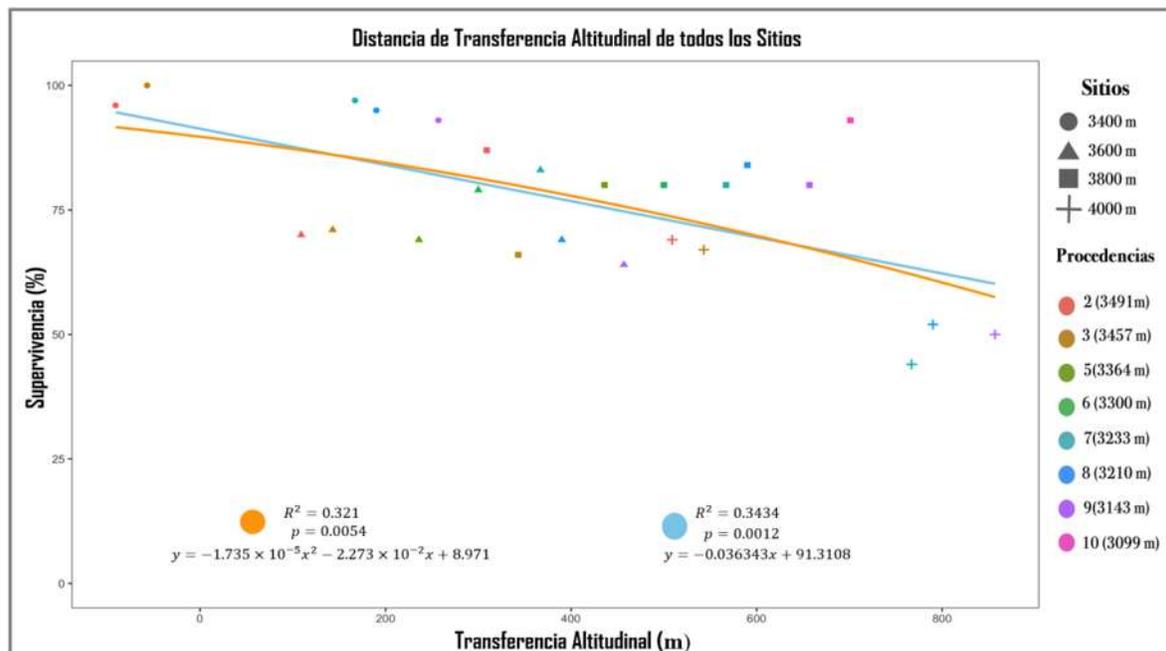


Figura 9. Curva de respuesta estimada (basada en una regresión lineal o cuadrática) de las plantas al traslado altitudinal para la supervivencia. Los valores positivos en el eje x indican movimiento hacia sitios de mayor altitud, que son más fríos y húmedos; mientras que los valores negativos indican movimiento hacia sitios de menor altitud, que son más cálidos y secos. Línea naranja regresión cuadrática, línea azul regresión lineal.

Con base en la regresión cuadrática para la supervivencia (Figura 8), se realizó una extrapolación en la cual se encontró que el óptimo de supervivencia se obtiene al realizar una transferencia climática de -2.6 grados. Este grafico nos ayudó a identificar la pérdida aceptable de planta. Donde observamos que el 90 % de supervivencia respecto al óptimo lo obtenemos en el intervalo de transferencia climática de -1.4 a -3.9 grados; mientras que el 80 % se obtiene en el intervalo de -0.93 a -4.4 grados. Esta información es importante ya que nos permite identificar que tanto podemos desplazar a las procedencias teniendo una pérdida de planta aceptable (Figura 10).

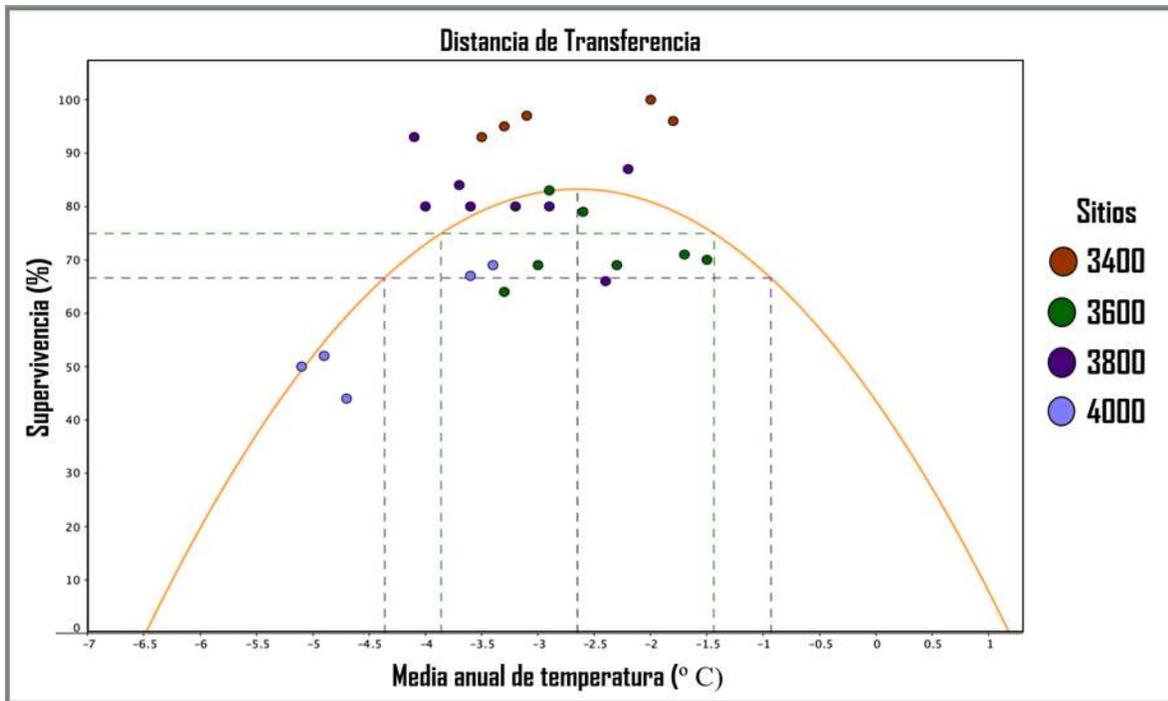


Figura 10. Extrapolación de la distancia de transferencia climática para la supervivencia. Las líneas verdes representan el intervalo donde se encuentra el 90 % de supervivencia respecto al óptimo. Las líneas moradas representan el 80 % de supervivencia respecto al óptimo.

2.2 Índice de estrés

Para el índice de estrés la curva de respuesta indicó que, a mayor distancia de transferencia climática y altitudinal, es mayor el estrés presentado por las plantas (Figura 11 y 12), ya que por cada 200 m que movamos a las plantas el índice de estrés aumenta un 0.8 en una escala de 1 a 6; recordando que el valor 1 es el mejor estado fisiológico de la planta y el valor 6 representa el daño mayor (muerte de la planta). Se obtuvo diferencias significativas entre sitios ($p < 0.0001$), ver tabla 4.

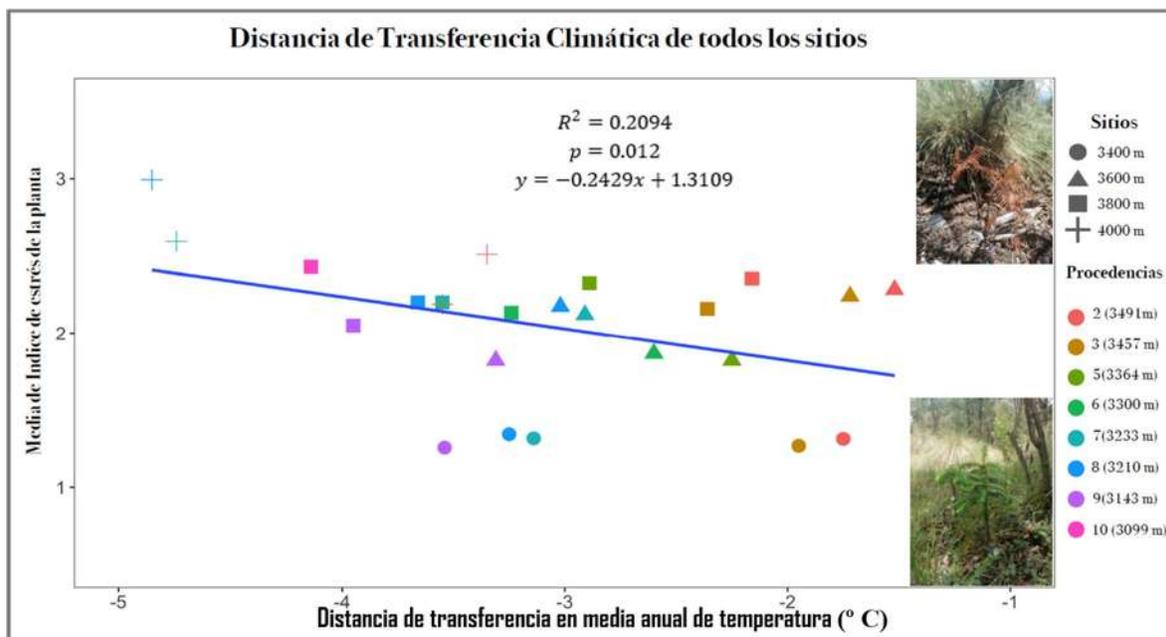


Figura 11. Respuesta de las plántulas a la distancia de transferencia climática para el índice de estrés. Sitios más fríos para valores negativos y más cálidos para los positivos, cero significa un clima similar al sitio de procedencia.

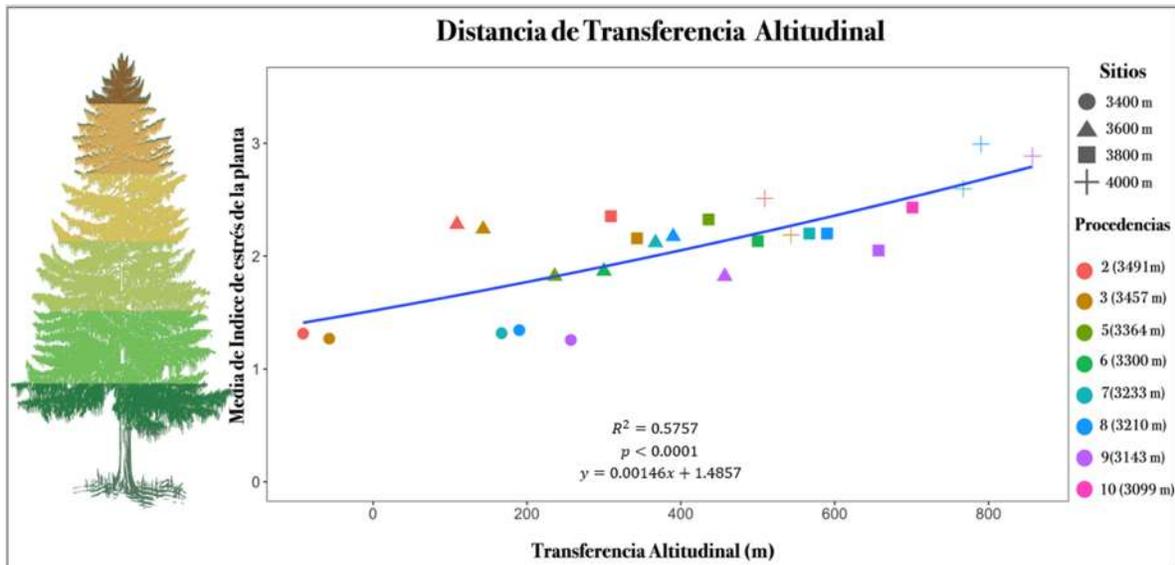


Figura 12. Curva de respuesta estimada (basada en una regresión lineal) de las plantas al traslado altitudinal para el índice de estrés. Los valores positivos en el eje x indican movimiento hacia sitios de mayor altitud, que son más fríos y húmedos; mientras que los valores negativos indican movimiento hacia sitios de menor altitud, que son más cálidos y secos.

Tabla 4. Análisis de varianza del índice de estrés de planta de ocho procedencias de *Abies religiosa*.

	F.V	g.l	CM	F	P
 Sitios		3	37.3423	28.71	0.0001
 Procedencias		7	0.6542	0.95	0.48
 Bloque (Sitio)		100	1.491152	2.95	<0.0001
 Procedencia*Sitio		16	0.7347	1.45	0.1250
 Error		486	245.86	-----	-----

2.3 Incremento en Altura

En cuanto el incremento en altura de planta la curva de respuesta nos indica que por cada grado centígrado que traslademos a las plantas hacia sitios más fríos la disminución en el incremento de altura es de 12 mm (11% de elongación total promedio) ver Figura 13. Siendo más evidente en el gráfico de Transferencia altitudinal ya que se observa que por cada 200 m que traslademos a las plantas la disminución en el incremento de altura es de 17 mm (15% de elongación total promedio) ver Figura 14. Se encontró diferencias estadísticamente significativas entre sitios para el incremento en altura ($p < 0.0001$, Tabla 5) y para la altura final de planta ($p < 0.0001$, Tabla 6) de ocho procedencias de *A. religiosa* a un año de su establecimiento en campo.

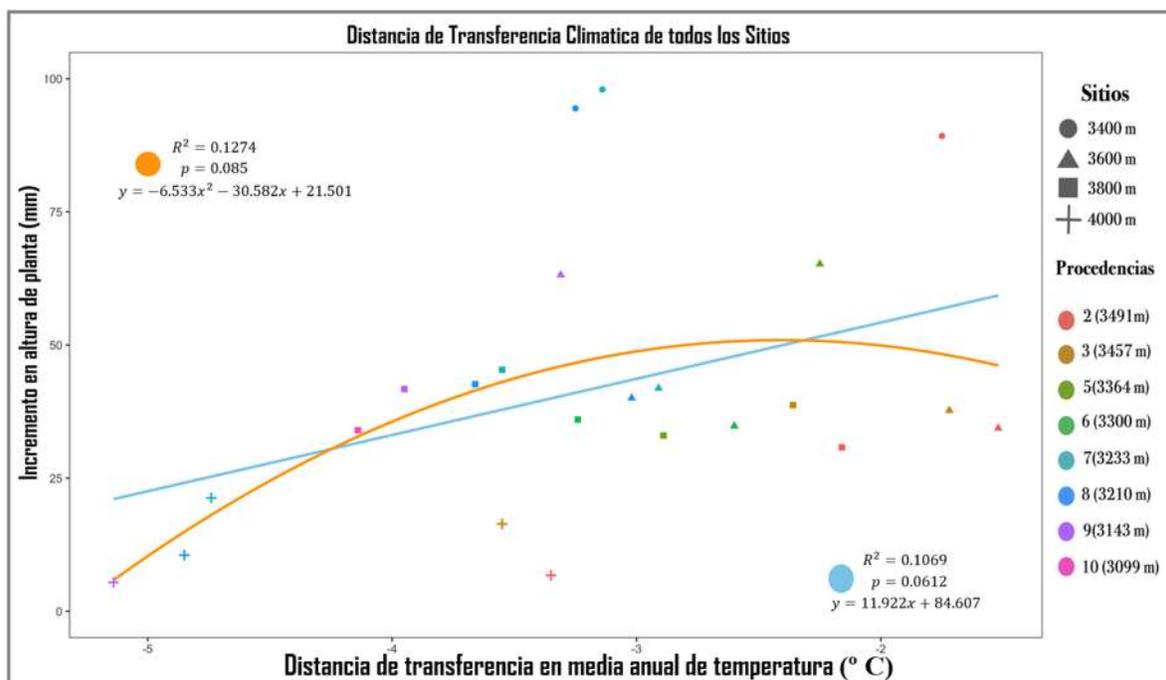


Figura 13. Respuesta de las plántulas a la distancia de transferencia climática para el incremento de altura de planta. Sitios más fríos para valores negativos y más cálidos para los positivos, cero significa un clima similar al sitio de procedencia.

Tabla 5. Análisis de varianza del incremento en altura de planta de ocho procedencias de *Abies religiosa*.

	F.V	g.l	CM	F	P
	Sitios	3	146716	38.6	0.0001
	Procedencias	7	1607.95	0.67	0.6934
	Bloque (Sitio)	100	6516.35	1.82	0.0001
	Procedencia*Sitio	16	1931.21	0.54	0.9261
	Error	485	3580.4	-----	-----

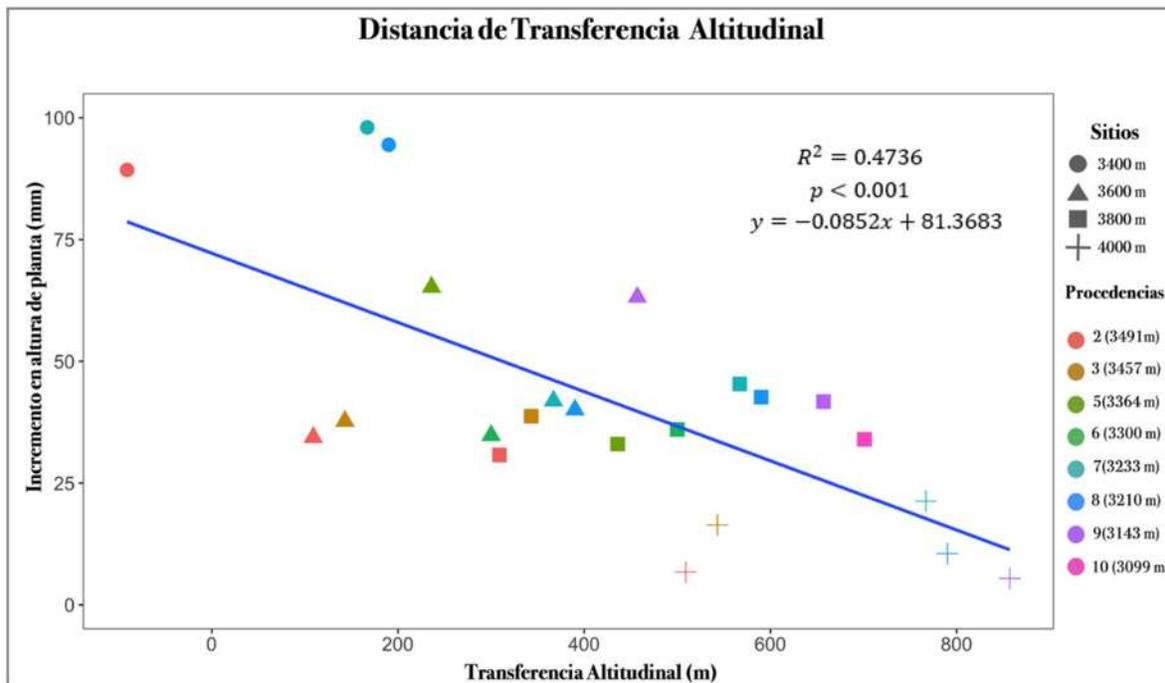


Figura 14. Curva de respuesta estimada (basada en una regresión lineal) de las plantas al traslado altitudinal para el incremento en altura de planta. Los valores positivos en el eje x indican movimiento hacia sitios de mayor altitud, que son más fríos y húmedos, mientras que los valores negativos indican movimiento hacia sitios de menor altitud, que son más cálidos y secos.

Tabla 6. Análisis de varianza de la altura final de planta de ocho procedencias de *Abies religiosa*.

	F.V	g.l	CM	F	P
 Sitios		3	134,497	12.48	0.0001
 Procedencias		7	20,678	2.31	0.0589
 Bloque (Sitio)		100	10,134	1.59	0.0007
 Procedencia*Sitio		16	9,971	1.57	0.0731
 Error		486	6,358	-----	-----

3. Precipitación

Al graficar la precipitación mensual por sitios en comparación con la precipitación histórica (1961-1990) observamos que en general tienen el mismo comportamiento, donde los meses de mayor precipitación son julio y agosto, y los de menor precipitación son el periodo de noviembre a marzo en los cuatro sitios (Figura 15). Siendo evidente que las diferencias de precipitación entre los sitios no son particularmente grandes.

El sitio 3400 msnm que es el de menor altitud tuvo la mayor precipitación anual (1043 mm) teniendo un 4% menos de precipitación promedio anual en comparación con el período de referencia (1961-1990), seguido por el sitio de 3600 msnm (1017 mm) con 9 % menos, el sitio 3800 msnm (1018 mm) con un 13 % menos y el sitio 4000 msnm (948 mm) con el 21 % de menor precipitación siendo el sitio con la mayor diferencia en cuanto a precipitación promedio anual entre la histórica (1961-1990) y la del periodo julio 2021 – junio 2022, ver Tabla 7.

Tabla 7. Comparación de las variables climáticas de temperatura (MAT) y precipitación (MAP), correspondientes al período de referencia 1961-1990 y los datos obtenidos 2021-2022.

	VARIABLES CLIMÁTICAS	PERIODO DE REFERENCIA 1961-1990	PERIODO JULIO 2021 - JUNIO 2022	DIFERENCIA
3400	MAT 	8.98 °C	7.86 °C	-1.12 °C
	MAP 	1083 mm	1043 mm	-40mm
3600	MAT 	7.62 °C	7.29 °C	-0.33 °C
	MAP 	1114 mm	1017 mm	-97 mm
3800	MAT 	6.15 °C	6.65 °C	+0.5 °C
	MAP 	1160 mm	1018 mm	-142 mm
4000	MAT 	4.65 °C	5.46 °C	+0.81 °C
	MAP 	1194mm	948 mm	246 mm

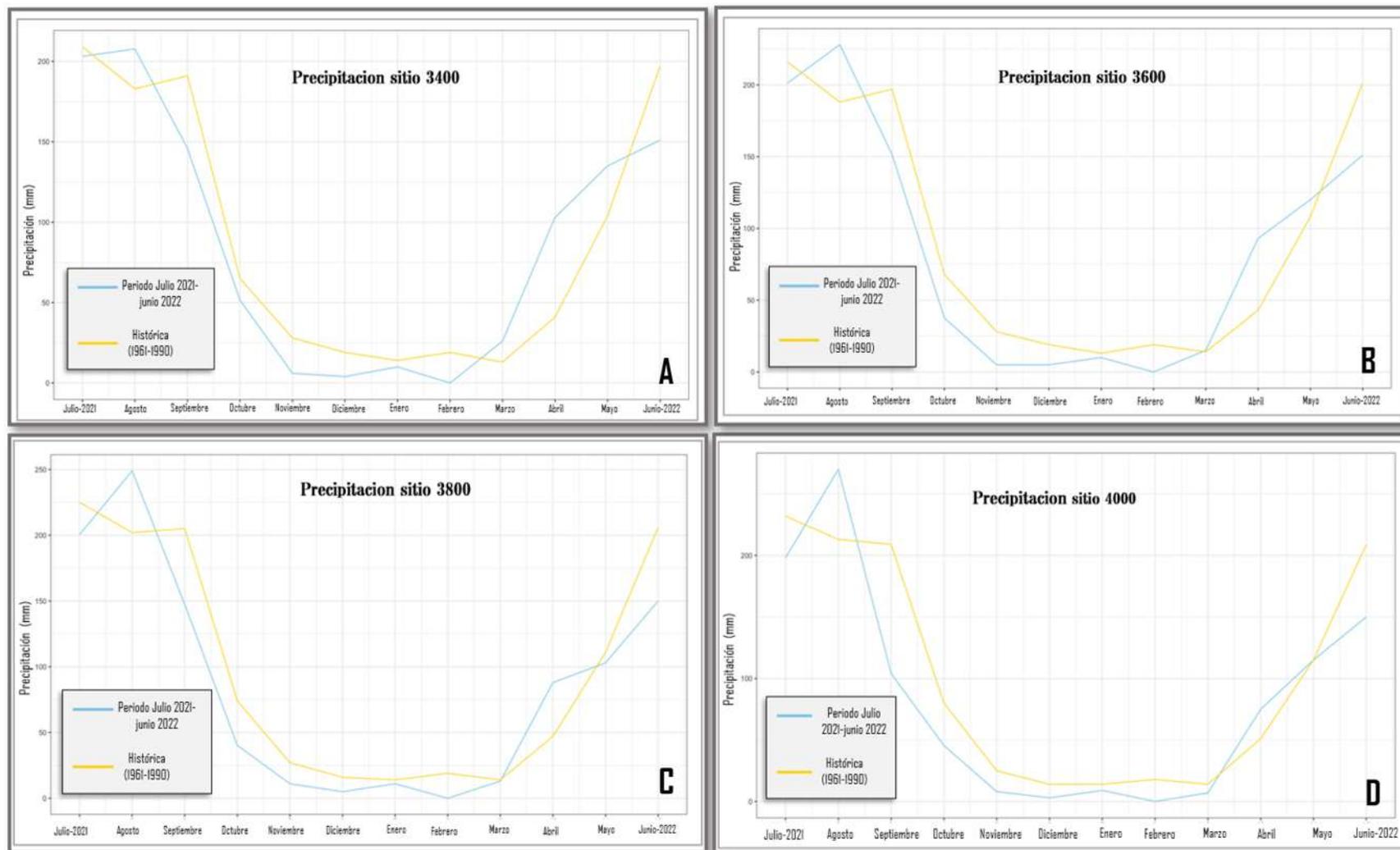


Figura 15. Media mensual de precipitación (mm) en el período de Julio de 2021 a junio de 2022 vs precipitación histórica (1961-1990), para los cuatro sitios. A: sitio 3400 msnm, B; sitio 3600 msnm, C: sitio 3800 msnm, D: sitio 4000 msnm.

4. Temperatura

Los grafico de Temperatura mensual por sitios en comparación con la temperatura histórica (1961-1990) muestran un comportamiento similar para tres de los sitios (3600, 3800 y 4000 msnm). En el sitio de 3400 msnm (Figura 16 A) la temperatura del periodo julio del 2021 a junio del 2022 se mantiene por debajo de la temperatura histórica (1961 – 1990), lo que significa que este sitio tiene una temperatura más baja de $-1.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ menor que la media de la temperatura anual (Tabla 7). En el sitio de 3600 msnm se observa que en general la temperatura histórica se mantiene por debajo de la temperatura actual (en los meses más calurosos) siendo el periodo de octubre a febrero (meses más fríos) en donde la temperatura histórica se encuentra por encima de la temperatura actual (Figura 16 B). La media anual de temperatura del periodo actual es $-0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ más baja que la temperatura histórica (Tabla 7).

Para el sitio 3800 msnm de noviembre a febrero (meses más fríos) la temperatura de periodo actual está por debajo de la temperatura histórica y para el resto de los meses (meses más cálidos) la temperatura histórica se encuentra por debajo (Figura 16 C). La temperatura media anual para este sitio aumento $+0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tabla 7). Este mismo comportamiento se presentó en el sitio 4000 msnm donde solamente en el mes de noviembre la temperatura del periodo actual está por debajo de la temperatura histórica (Figura 16 D). Para este sitio la media anual de temperatura aumentó $+0.81\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tabla 7).

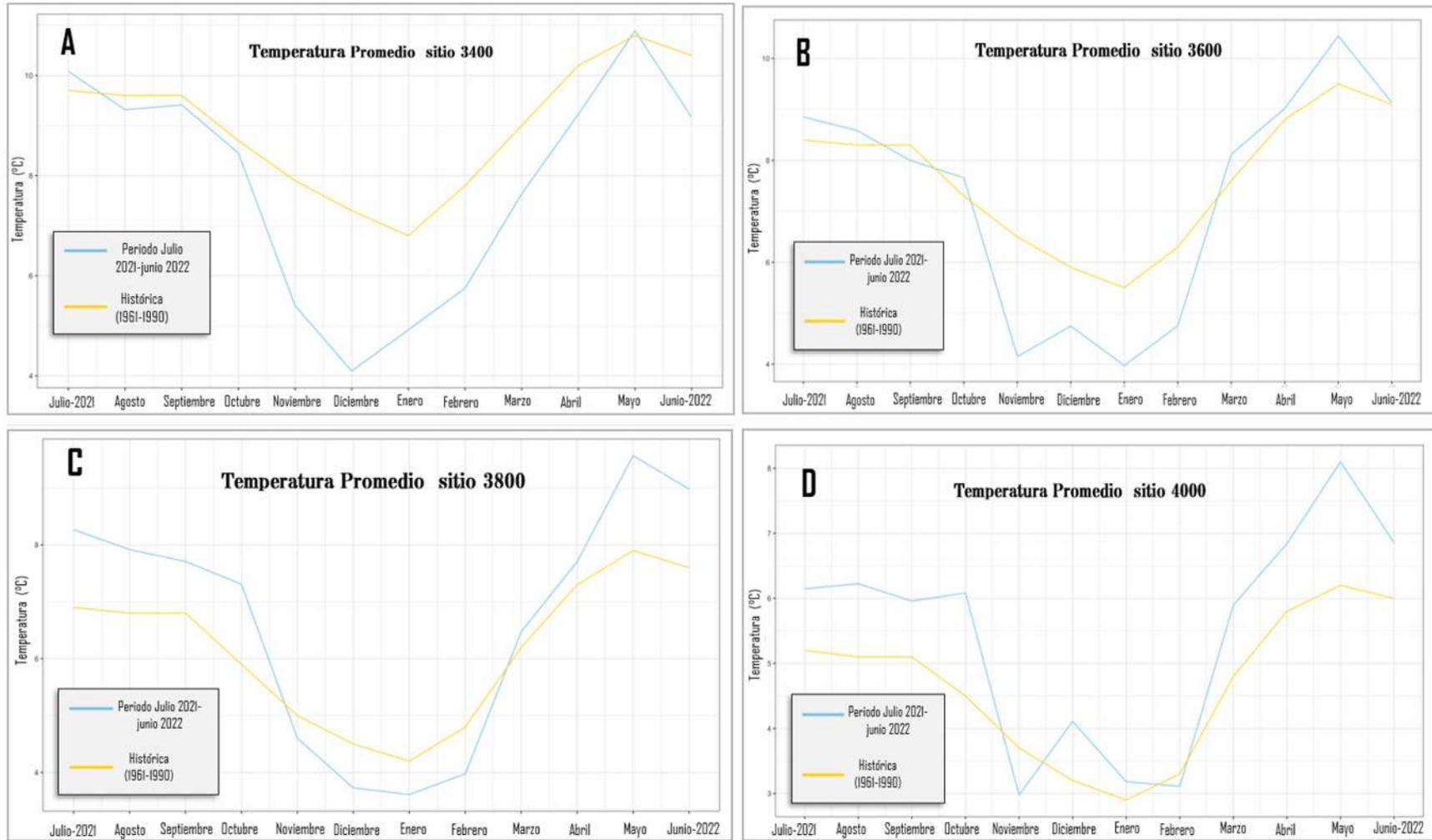


Figura 16. Media mensual de Temperatura (°C) en el período de julio de 2021 a junio de 2022 vs precipitación histórica (1961-1990). A: sitios 3400, B: 36000, C: 3800 y D: 4000 msnm.

VII. DISCUSIÓN

La migración asistida de *Abies religiosa* en el APFF Nevado de Toluca, como una estrategia de adaptación debido al cambio climático, es una alternativa para la creación de posibles sitios futuros para la hibernación de la mariposa monarca. Esto con el fin de realinear las poblaciones con el entorno al que están acostumbradas. Ya que como menciona Gómez-Pineda et al., (2020), las fuentes de semillas de *A. religiosa* tendrán que ser reubicadas entre 300 y 500 m de mayor altitud que su sitio de origen, para la década de 2060.

Esto representó un reto ya que, a 3800 y 4000 msnm, las temperaturas extremadamente bajas hacen que el ambiente sea bastante duro. Es crucial emplear arbustos locales como plantas nodrizas para mitigar los efectos negativos de las temperaturas extremas, como inviernos extremadamente fríos o temperaturas extremadamente cálidas durante el verano, sobre las plántulas de oyamel.

Dado que los nuevos lugares son más fríos que aquellos de los que procede originalmente la población, la migración asistida plantea el peligro de que las plántulas a edades tempranas no se adapten a las nuevas circunstancias climáticas (Hewitt et al., 2011). En este estudio se presentan los resultados de una reubicación de *A. religiosa* a una altitud extrema de hasta 4000 msnm.

El desplazamiento de *A. religiosa* 200 m más allá de su límite superior conocido (en el sitio a 3800 m) bajo la sombra de planta nodriza presentó resultados favorables en cuanto a sobrevivencia (80.7%). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Carbajal-Navarro et al., 2019 quien reporto una supervivencia del 83 % de *A. religiosa* cuando éstas fueron plantadas bajo la sombra de plantas nodrizas (*Baccharis conferta*, *Ribes ciliolata*, *Salix paradoxa* y *Senecio cinerarioides*). Mientras que la respuesta del oyamel a un desplazamiento de 400 m (sitio 4000) más allá de su límite altitudinal fue de una supervivencia de 52.7 %. Esto pudieron deberse a varios factores, uno de ello es que en este sitio debido a que se encuentra justo en el límite arbóreo no se encontró *S. cinerarioides* para ser utilizado como planta nodriza como en el resto de los sitios; en su lugar se utilizó *Lupinus montanus* el cual no brindó la misma protección al oyamel, ya que éste no es frondoso y en época del invierno 2021-2022 *L. montanus* perdió su flor y hojas, dejando a las plántulas de oyamel desprotegidas ante las temperaturas más frías del año. Otro factor importante es que en este sitio se registró la menor precipitación y las temperaturas más bajas, lo que afecta de manera importante en el desarrollo óptimo de la planta como es su crecimiento. Como lo menciona Cruzado-Vargas et al., (2021), quien encontró que el equilibrio entre la temperatura y la precipitación es un factor determinante para el establecimiento de *A. religiosa*, ya que la supervivencia depende de la humedad residual del suelo durante la estación seca.

En cuanto al efecto que tuvo la distancia de transferencia climática sobre la supervivencia, el índice de estrés y el incremento en altura, este fue más negativo cuando se transfirieron más de 4 °C hacia temperaturas más frías, ya que pasada esta transferencia la supervivencia decae y aumenta el estrés de las plantas; es decir, a mayor transferencia climática o altitudinal se observa un mayor estrés en las plantas, lo que se ve reflejado como un menor crecimiento. Este comportamiento de las procedencias de *A. religiosa* es el

esperado ya que las poblaciones originadas de semilla colectada en sitios altitudinalmente más cercanos al sitio de reforestación de referencia (en nuestro caso el sitio de 3400 m) en términos de altitud son las que presentan mayor supervivencia, crecimiento y menor estrés; esto es similar a lo reportado en Carvajal-Navarro et al., (2019). Mientras que las procedencias transferidas a sitios que eran 2°C más fríos sufrieron una menor mortalidad. Este hallazgo es consistente con lo reportado por Cruzado-Vargas et al., (2021) quien obtuvo que el óptimo de supervivencia para *A. religiosa* se encuentra en una transferencia climática hacia sitios 2 °C más fríos. También es consistente con los resultados reportados por St. Clair et al (2020), quienes encontraron que las fuentes de semillas de abeto de *Douglas* se trasladaron a sitios 2 °C más fríos que su origen y conservaron una supervivencia aceptable.

VIII. CONCLUSIÓN

Los resultados encontrados en este proyecto son alentadores ya que al migrar las procedencias 200 y hasta 400 msnm sobre el sitio de origen de la semilla de *A. religiosa* es factible con el uso de plantas nodrizas, esto como una alternativa para la conservación de la especie, obteniendo resultados muy aceptables en cuanto a supervivencia y crecimiento; lo cual es muy alentador ya que esto incrementa la posibilidad de mantener los sitios de hibernación de la mariposa monarca bajo el clima futuro proyectado.

Un factor importante a considerar es que estos resultados fueron posibles gracias a la protección que *Senecio cinerarioides* brindó a las plantas de *A. religiosa*; por lo que se sugiere realizar más proyectos de producción de plantas nodrizas, debido a que en sitios de mayor altitud (4000 msnm) es más difícil encontrar arbustos que sirvan como planta nodriza para proteger a las plántulas de oyamel. Por lo tanto, es relevante considerar la migración asistida de plantas que hayan mostrado efectividad como plantas nodriza, como *Senecio cinerarioides* y *Baccharis conferta*, para su uso futuro.

IX. AGRADECIMIENTOS

Agradezco al M.C. Luis Corona Alcantar por su invaluable apoyo en la elaboración de esta Tesis. Por ayudarme en la elaboración de los modelos estadísticos y de los gráficos en el programa Rstudio. Gracias por su tiempo y por compartir sus valiosos conocimientos.

Agradecemos el financiamiento a C. S.-R. del Monarch Butterfly Fund (Madison, Wisconsin, USA), de American Forest y de la North American Forest Commission a través del US Forest Service (Washington, D.C., USA), y la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH; a R. L.-C. del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT-UNAM clave IG200221). Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca para estudios de posgrado a P. H.-C. (1106671)

X. REFERENCIAS

- Blanco-García A., Sáenz-Romero C., Martorell C., Alvarado-Sosab P., Lindig- Cisneros R. (2011). Nurse-plant and mulching effects on three conifer species in a Mexican temperate forest. *Ecological Engineering*. 37: 994-998.
- Carbajal-Navarro A. L., Navarro-Miranda E., Blanco-García A., Cruzado-Vargas A. L., Gómez-Pineda E., Zamora-Sánchez C., Pineda-García F., O'Neill G., Gómez-Romero M., Lindig-Cisneros R., Johnsen K. H., Lobit P., Lopez-Toledo L.,Herrerías-Diego Y. and Sáenz-Romero C. (2019) Ecological restoration of *Abies religiosa* forests using nurse plants and assisted migration in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Front. Ecol. Evol.* 7:421. doi:10.3389/fevo.2019.00421
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2016). Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.
- Cruzado-Vargas, A. L., Blanco-García, A., Lindig-Cisneros, R., Gómez-Romero, M., López-Toledo, L., de la Barrera, E., Sáenz-Romero, C. (2021). Reciprocal common garden altitudinal transplants reveal potential negative impacts of climate change on *Abies religiosa* populations in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve overwintering sites. *Forests*. 12. 69. 10.3390/f12010069.
- Franco Maass, S. y C. Burrola Aguilar (2009). Los hongos comestibles del Parque Nacional Nevado de Toluca. México, Ciencias Naturales y Exactas. Toluca: UAEM.
- García Frapolli, E., G. Ramos Fernández, E. Galicia y A. Serrano (2009). The complex reality of biodiversity conservation through Natural Protected Area policy: Three cases from the Yucatan Peninsula, Mexico. *Land Use Policy*, 26(3), pp. 715-722.

- Gómez-Aparicio, L., Zamora, R., Gómez, J. M., Hódar, J. A., Castro, J., & Baraza, E. (2004). Applying plant facilitation to forest restoration: A meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants. *Ecological Applications*, 14(4), 1128-1138.
- Gómez-Pineda, E., Sáenz-Romero, C., Ortega-Rodríguez, J.M., Blanco-García, A., Madrigal-Sánchez, X., Lindig-Cisneros, R., López-Toledo, L., Pedraza-Santos, M.E., Rehfeldt, G.E. (2020). Suitable climatic habitat changes for Mexican conifers along altitudinal gradients under climatic change scenarios. *Ecol. Appl.* 30, e02041.
- Guzmán-Aguilar, G., Carbajal-Navarro, A., Sáenz-Romero, C., Herrerías-Diego, Y., López-Toledo, L., and Blanco-García, A. (2020). *Abies religiosa* seedling limitations for passive restoration practice at the Monarch Butterfly Biosphere Reserve. *Front. Ecol. Evol.* 8: 115. doi:10.3389/fevo.2020.00115.
- Halofsky J. E., Peterson D. L. and Harvey B. J. (2020). Changing wildfire, changing forests: the effects of climate change on fire regimes and vegetation in the Pacific Northwest, USA. *Fire Ecology*, 16:4, pp.1-26.
- Navarro-Miranda E. (2020). “Evaluación de dos ensayos de procedencias de *Abies religiosa*, originadas de un gradiente altitudinal, dentro de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, usando plantas nodrizas”. Tesis de Maestría. Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- O'Neill, G. (2017). Proposed climate-based seed transfer system for British Columbia. *Technical report (British Columbia. Forest Science Program); 099.*
- Padilla, F. M., & Pugnaire, F. I. (2006). The role of nurse plants in the restoration of degraded environments. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4(4), 196-202.

- Palacio-Prieto, J.L., Bocco, G., Velásquez A., Mas, J.-F., Takaki-Takaki, F., Victoria, A., Luna-Gonzales, L. (2000). La condición actual de los recursos forestales en México: Resultados del I Forestal Nacional 2000 Invest. Geograf. 43:183–203.
- Ramírez-Contreras, A., & 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.
- R Core Team (2022) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.
- Research on Forest Climate Change: Potential Effects of Global Warming on Forests and Plant Climate Relationships in Western North America and Mexico. Disponible en línea: <http://charcoal.cnre.vt.edu/climate/> (Consultado el 15 de agosto 2022)
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504.
- Sáenz-Romero C., Rehfeldt G.E., Crookston N.L., Duval P., St-Amant R., Beaulieu J. and Richardson B.A. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for México and their use in understanding climate-change Impacts on the vegetation. *Climatic Change* 102:595-623.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G.E., Duval, P., Linding-Cisneros, R. A. (2012). *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management* 275:98-106.

- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G.E., Ortega-Rodríguez, J.M., Marín-Togo, M.C., Madrigal-Sánchez, X. (2015). *Pinus leiophylla* suitable habitat for 1961–1990 and future climate. *Bot. Sci.* 93, 709–718.
- Sáenz-Romero C., Lindig-Cisneros R.A., Joyce D.G., Beaulieu J., St-Clair J.B., Jaquish B. C. (2016). Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change (Migración asistida de las poblaciones forestales para la adaptación de árboles ante el cambio climático). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22(3):303 – 323.
- Sáenz-Romero, C., Lamy, J.-B., Ducouso, A., Musch, B., Ehrenmann, F., Delzon, S., Cavers, S., Chałupka, W., Dağdaş, S., Hansen, J.K., Lee, S.J., Liesebach, M., Rau, H.-M., Psomas, A., Schneck, V., Steiner, W., Zimmermann, N.E. and Kremer, A. (2017), Adaptive and plastic responses of *Quercus petraea* populations to climate across Europe. *Glob Change Biol*, 23: 2831-2847. <https://doi.org/10.1111/gcb.13576>
- Sáenz-Romero C., Mendoza-Maya E., Gómez-Pineda E, Blanco-García A., Endara-Agramont A. R., Lindig-Cisneros R., López-Upton J., Trejo-Ramírez O., Wehenkel C., Cibrián-Tovar D., Flores-López C, Plascencia-González A. and Vargas-Hernández J.J. (2020). Recent evidence of Mexican temperate forest decline and the need for ex situ conservation, assisted migration, and translocation of species ensembles as adaptive management to face projected climatic change impacts in a megadiverse country. *Canadian Journal of Forest Research.* 50(9): 843-854. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0329>
- Sáenz-Romero, C., O'Neill, G., Aitken, S.N., Lindig-Cisneros, R. (2021). Assisted migration field tests in Canada and Mexico: Lessons, limitations, and challenges. *Forests* 12, 9:1-19. <https://dx.doi.org/10.3390/f12010009>

- St. Clair, J.B., Howe, G.T., Kling, J.G. (2020). The 1912 Douglas-Fir Heredity Study: Long-Term Effects of Climatic Transfer Distance on Growth and Survival, *Journal of Forestry*, Volume 118, Issue 1, Pages 1–13, <https://doi.org/10.1093/jofore/fvz064>
- Tewksbury, J. J., & Lloyd, J. D. (2001). Positive interactions under nurse-plants: spatial scale, stress gradients and benefactor size. *Oecologia*, 127(3), 425-434.
- Vitt, P., Havens, K., Kramer, A. T., Sollenberger, D., Yates, E., (2010). Assisted migration of plants: Changes in latitudes, changes in attitudes. *Biological Conservation*, 143:18-27

VII. Discusión General.

El cambio climático es una gran preocupación debido a sus características propias y a su velocidad. En menos de un siglo se esperan cambios que superan los patrones climáticos actuales (Fernández-Manjarrés y Benito-Garzón., 2015). Esto supone grandes obstáculos para los gestores forestales, tanto para fines comerciales como de conservación (Sáenz-Romero et al. 2016). El objetivo principal de la conservación genética de los recursos forestales es mantener la supervivencia, la adaptación y el desarrollo continuo de una especie en un entorno cambiante (Eriksson, 2000). Sin embargo, el cambio climático está desacoplando el clima del hábitat de los árboles forestales, lo que puede provocar la desaparición de sus hábitats naturales (Rehfeldt et al., 2012). Es necesario implementar nuevas estrategias de manejo para adaptarse a las circunstancias climáticas futuras. La migración asistida es una opción de manejo importante que puede ayudar a realinear las poblaciones naturales con el clima para el cual están adaptadas. Esto se considera una opción de manejo forestal activo para mantener los ecosistemas con árboles saludables, pero también ha generado controversia debido a sus implicaciones (Choi, 2004; Harris et al., 2006).

A pesar de que la migración asistida es una estrategia controvertida, muchos autores creen que en ciertas situaciones es viable y que los beneficios de su aplicación superan los riesgos asociados (Schwartz et al., 2012). Se ha recomendado la migración asistida para varias especies de árboles en los bosques templados de América del Norte, como el álamo temblón en el oeste de Canadá (Gray et al., 2011), el oyamel en el Cinturón Volcánico Transmexicano, Transmexicano (Sáenz-Romero et al., 2012) y el roble negro del Este en

el estado de Wisconsin. Aunque hay algunos casos documentados sobre la migración asistida, la investigación sobre este tema es limitada. A continuación, se mencionarán algunos estudios relevantes sobre la migración asistida.

En México se han realizado un estudio de migración asistida llamado, “Ecological restoration of *Abies religiosa* forests using nurse plants and assisted migration in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, México, por Carbajal-Navarro et al., 2019. Este estudio es un proyecto de restauración ecológica de los bosques de *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca en México, utilizando plantas nodrizas y migración asistida. Los autores plantaron plántulas de *Abies religiosa* bajo la protección de plantas nodrizas (arbustos del lugar) y sin plantas nodrizas; en sitios seleccionados dentro de la reserva y evaluaron la supervivencia y el crecimiento de las plántulas durante dos años. Los resultados mostraron que las plántulas de *Abies religiosa* tuvieron una mayor supervivencia y crecimiento en presencia de las plantas nodrizas, lo que sugiere que estas pueden ayudar a mejorar las condiciones del suelo y la retención de agua. Además, los autores discuten la posibilidad de utilizar la migración asistida para aumentar la resiliencia de los bosques de *Abies religiosa* ante el cambio climático. El estudio destaca la importancia de las prácticas de restauración ecológica y la necesidad de implementar medidas para conservar y proteger las especies clave en los ecosistemas forestales.

Otro estudio en el que se habla sobre migración asistida es el realizado por Gómez-Pineda et al., 2021. En el cual se describe un ensayo de migración asistida de *Pinus pseudostrobus* en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, con el objetivo de mantener la cobertura forestal en un entorno afectado por el cambio climático. Los autores instalaron un experimento de exclusión de lluvia en el área de estudio para simular las condiciones de sequía previstas en el futuro y evaluaron la supervivencia y el crecimiento de las

plántulas de *Pinus pseudostrobus*. Descubrieron que las plántulas sobrevivieron y crecieron bien bajo las condiciones de sequía, lo que sugiere que la migración asistida de *Pinus pseudostrobus* puede ser una estrategia efectiva para mantener la cobertura forestal en la región en el futuro. Los autores destacan la importancia de considerar la migración asistida como una opción para abordar los impactos del cambio climático en los ecosistemas forestales y llaman a más estudios y experimentos para evaluar la efectividad y la seguridad de esta estrategia de conservación.

Las especies arbóreas enfrentan un grave riesgo debido al cambio climático, y la migración asistida se presenta como una de las pocas estrategias viables para contribuir a su supervivencia, ya que los modelos predictivos indican que se necesitan altas tasas de migración latitudinal, al menos 1000 m al año, para mantener estas especies en hábitats adecuados (Malcolm, et al., 2002; Gómez-Ruiz y Lindig-Cisneros et al., 2017).

Es por ello que en el presente estudio se analizó la migración asistida como una estrategia de conservación para especies amenazadas por el cambio climático, específicamente en el caso de *Abies religiosa*. Se utilizaron plantas nodrizas y se compararon los patrones de variación genética entre diferentes procedencias de la especie. Los resultados obtenidos demostraron que la migración asistida puede ser efectiva en la conservación de especies forestales. La supervivencia del 80.7% en una transferencia de 200 m sobre el límite natural de *A. religiosa* es alentadora y puede facilitar la toma de decisiones para futuras acciones de conservación.

VIII. CONCLUSIÓN GENERAL

En conclusión, la migración asistida puede ser una herramienta útil para enfrentar los desafíos que el cambio climático representa para la biodiversidad y la conservación de especies forestales. Esta estrategia se está convirtiendo en una herramienta importante ya que busca realinear las poblaciones con el clima para el cual están adaptadas, permitiéndoles sobrevivir y adaptarse en un entorno cambiante. Aunque se necesitan más estudios para comprender los efectos a largo plazo de la migración asistida, estos estudios sugieren que puede ser una estrategia efectiva para ayudar a las especies a adaptarse al cambio climático y recuperarse de la pérdida de hábitat.

IX. Referencias

- Aitken, S., N., S. Yeaman., J. A. Holliday., T. Wang. and S. Curtis-McLane (2008).
Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations.
Ecological Applications 1:95-111
- Alba-Landa J., L del C. Mendizábal-Hernández., A. Aparicio-Rentería. y E. O. Ramírez-García. (2008). Conocimiento biológico de las especies de coníferas del Pinetum
“Hans Nienstaedt & Jeffrey K. Donahue. Foresta Veracruzana. Recursos Genéticos
Forestales México 10 (1):67-72
- Amezcuca, C. P. y H. Valderrama, L. (1999). Productividad de suelos con *Abies religiosa*
(H. B.K.) Schl. et Cham., en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo. Tesis de
licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, departamento de suelos. Chapingo,
México. 121 p
- Bolin, B., B. R. Doos., J. Jager., R. A. Warrick. (1986). The greenhouse effect, climatic
change and ecosystems. SCOPE Report 29, Wiley, Nueva York 541 p
- Brown H. J. (2001). Mammals on mountainsides: elevational patterns of diversity. Global
Ecology and Biogeography 10:101-109
- Carrión G. J. S. (2001). Condicionantes de la respuesta vegetal al cambio climático. Una
perspectiva paleobiológica. Acta Botánica Malacitana 26:157-176
- Carbajal-Navarro A. L., Navarro-Miranda E., Blanco-García A., Cruzado-Vargas A. L.,
Gómez-Pineda E., Zamora-Sánchez C., Pineda-García F., O'Neill G., Gómez-Romero
M., Lindig-Cisneros R., Johnsen K. H., Lobit P., Lopez-Toledo L.,Herrerías-Diego Y.
and Sáenz-Romero C. (2019) Ecological restoration of *Abies religiosa* forests using

nurse plants and assisted migration in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Front. Ecol. Evol.* 7:421. doi:10.3389/fevo.2019.00421

Chandy S., D. J. Gibson. Y P. Robertson. (2006). Additive partitioning of diversity across hierarchical spatial scales in a forested landscape. *Journal of Applied Ecology* 43:792-801

Cifuentes J. M. (2010). ABC del Cambio Climático en Mesoamérica. Serie Técnica. CATIE 383:71 p

Choi, Y. (2004). Theories for ecological restoration in changing environment: toward “futuristic” restoration. *Ecological Research*, 19(1), 75–81. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00594.x>

Clark, J.S., Beckage, B., Hillerislambers, J., Ibanez, I., LaDeau, S., McLachlan, J., Mohan, J. y Rocca, M. (2002). Plant dispersal and migration. In: Mooney, H.A. & Canadell, J.G. (eds.) *Encyclopedia of global environmental change*, pp. 81-93. John Wiley & Sons, Chichester, UK.

Conabio. Consultado el 15 de enero del 2023 de:

<http://www.biodiversidad.gob.mx/planeta/CDB/cdb.html> el 29 de junio 2012

Conde C. (2006). México y el Cambio Climático. Dirección general de divulgación de la ciencia. UNAM 1-28

Davis, M., B. and R. G. Shaw. (2001). Range shifts and adaptive responses to Quaternary Climate Change. *Science* (292):673-679

Dudley, N. (1998). Forest and climate changes. A report for WWF International, Forest Innovations, IUCN, GTZ, WWF

- Eriksson, G., 2000. Red Europea de Conservación de Recursos Genéticos de Frondosas Nobles. Invest. Agr.: Sist. Recur. For.: Fuera de Serie Nº 2-2000. p. 59-69.
- Fernández-Manjarrés, J. F. y Benito-Garzón, M., 2015. El debate de la migración asistida en los bosques de la Europa Occidental. Capítulo 41 en Herrero, A. & Zavala, M. A. (Eds). Los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en España. Magrama. pp 463-468.
- Fossa, A. M. (2004). Biodiversity patterns of vascular plant species in mountain vegetation in the Faroe Islands. *Diversity and Distributions* 10:217-223
- Gaston, J. K. (2000). Global patterns in biodiversity. *Nature* 15:220-227
- Gómez-Pineda E., A. Blanco-García, R. Lindig-Cisneros, G. A. O'Neill, L. Lopez-Toledo and C. Sáenz-Romero. Pinus pseudostrobus assisted migration trial with rain exclusion: maintaining Monarch Butterfly Biosphere Reserve Forest cover in an environment affected by climate change. *New Forests*. DOI: 10.1007/s11056-021-09838-1.
- Gray, L.K., Gylander, T., MBogga, S., Pei-yu, C., Hamann, A. (2011). Assisted migration to address climate change: recommendations for aspen reforestation in western Canada. *Ecological Applications*, 21(5), pp. 1591-1603.
- González E. M., E. Jurado., E. S. González., C. O. Aguirre., P. J. Jiménez., J. Navar. (2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *CiENCiA UANL* (6):377-385.
- Gonzalez, P., R. P. Neilson., J. M. Lenihan., R. J. Drapek. (2010). Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change. *Global Ecology and Biogeography* 19:755-768

- Granados-Sánchez D., G. F. López-Ríos., M. A. Hernández-García. (2007). Ecología y silvicultura en bosques templados. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 13(1):67-83
- Harris, J., Hobbs, R., Higgs, E. & Aronson, J. (2006). Ecological restoration and global climate change. *Restoration Ecology*, 14(2), 170–176. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2006.00136.x>
- Hernández, M. E. (1991). Distribución y utilidad de los Abies en México. *Boletín del Instituto de Geografía. México* 15:75-118
- Ipinza, R. y Müller-Using, S. 2021. Migración asistida de *Araucaria araucana*. Santiago de Chile, FAO y MINAGRI. <https://doi.org/10.4060/cb2901es>
- Jacobson, H. K. and M. F. Price. (1990). A Framework for Research on the Human Dimensions of Global Environmental Change. *Human Dimensions of Global Environmental Change Programme*, Barcelona, España
- Körner, C. (2007). The use of “altitude” in ecological research. *Trends in Ecology and Evolution* 22:569-574
- Linares J. C., S. R. Pazo., L. Taiqui., J. J. Camarero., V. Ochoa., V. Lechuga., J. I. Seco., B. Viñegla., G. Sangüesa., P. Gilarte., J. Merino., J. A. Carreira. (2012). Efectos de las tendencias climáticas y la degradación del hábitat sobre el decaimiento de los cedrales (*Cedrus atlantica*) del norte de Marruecos. *Ecosistemas* 21(3):7-14
- Madrigal S. X. (1964). Contribución al conocimiento de la ecología de los bosques de Oyamel (*Abies religiosa* H. B.K. Schl. et Cham) en el Valle de México. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. México, D. F. 111 p

- Malcolm, J. R., Markham, A., Neilson, R. P. y Garaci, M. (2002). Estimated migration rates under scenarios of global climate change. *Journal of Biogeography* doi: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2002.00702.x>
- Margulis L. y J. E. Lovelock. (1974). Biological modulation of the Herat`s Atmosphere. *Icarus*. Academic Press, EE.UU 21:471-489
- Martínez M. (1963). Las Pináceas mexicanas. 3ra Ed. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 400 p
- McDowell, N., G., C. D. Allen., L. Marshall. (2010). Growth, carbon isotope discrimination, and climate-induced mortality across a *Pinus ponderosa* elevation transect. *Global Change Biology* 16:399-415
- Noss, R. F. (2002). Beyond Kyoto: Forest Management in a Time of Rapid Climate Change. *Conservation Biology* 15(3): 578-590
- Pauli, H., M. Gottfried., G. Grabherr. (1996). Effects of climate changes on mountain ecosystem upward shifting of alpine plants. *World Resource Review* (8):382-390
- Pautasso M., K. Dehnen-Schmutz., O. Holdenrieder., S. Pietravalle., N. Salama., M. J. Jeger., E. Lange., S. Hehl-Lange. (2010). Plant health and global change some implications for landscape management. *Biological Reviews* 85:729-755
- Peñuelas, J., I. Filella., P. Comas. (2002). Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology* (8):531-544
- Gómez-Ruiz. P y Lindig-Cisneros. R. (2017). Classical Ecological Restoration and its Current Challenges: Assisted Migration as an Adaptation Strategy to Climate Change. *Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci)*. (Julio-Diciembre,

2017). EISSN: 2215-3896. Vol 51(2): 31-51. DOI: <http://dx.doi.org/10.15359/rca.51-2.2>

Rozelot J. P. and S. Lefebvre. (2006). It is possible to find a solar signature in the current climatic warming? *Physics and Chemistry of the Earth* 31-41 p

Sánchez-González A., L. López-Mata L., D. Granados-Sánchez. (2005). Semejanza florística entre los bosques de *Abies religiosa* (H.B.K.) Cham. & Schltldl. de la Faja Volcánica Transmexicana. *Investigaciones Geográficas* 56:62-76

Sáenz-Romero, C., G. E. Rehfeldt., N. L. Crookston., P. Duval., R. St-Amanta., J. Beaulieu., B. A. Richardson. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates of Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climate Change*, 102:595-623

Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G.E., Duval, P., Linding-Cisneros, R. A. (2012). *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management* 275:98-106.

Schwartz, M.W., Hellmann, J.J., McLachlan, J.M., Sax, D.F., Borevitz, J.O., Brennan, J., Camacho, A.E., Ceballos, G., Clark, J.R., Doremus, H., Early, R., Etterson, J.R., Fielder, D., Gill, J.L., Gonzalez, P., Green, N., Hannah, L., Jamieson, D.W., Javeline, D., Minter, B.A., Odenbaugh, J., Polasky, S., Richardson, D.M., Root, T.L., Safford, H.D., Sala, O., Schneider, S.H., Thompson, A.R., Williams, J.W., Vellend, M., Vitt, P., Zellmer, S., (2012). Managed Relocation: Integrating the Scientific, Regulatory, and Ethical Challenges. *BioScience*, 62(8), pp. 732-743.

Swingland, I. R. (2001). Biodiversity, definition of. *Encyclopedia of biodiversity*, 1, 377-391

Toledo V. M. (1998). La diversidad biológica de México. *Ciencia y Desarrollo* 14:17-29

Willig, M. R., D. M. Kaufman., R. D. Stevens. (2003). Latitudinal Gradients of Biodiversity: Pattern, Process, Scale, and Synthesis. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst* 34:273-309