



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE BIOLOGÍA
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
BIOLÓGICAS: “ECOLOGÍA Y CONSERVACIÓN”

"Efecto de plantas nodriza en un en un ensayo de procedencias de Abies religiosa en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca"

Tesis

Que presenta:

Biól. Aglaen Lucero Carbajal Navarro

Como requisito parcial para obtener el título profesional de:

Maestra en Ciencias Biológicas

Director de tesis:

Dr. José Arnulfo Blanco García



MARZO- 2018

Director de tesis: Dr. José Arnulfo Blanco García¹

Comité:

Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero²

Dr. Fernando Pineda García³

Dra. Mariela Gómez Romero¹

Dra. Yvonne Herrerías Diego¹

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH)

¹Facultad de Biología, UMSNH.

²Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, UMSNH.

³Escuela Nacional de Estudios Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

ÍNDICE

1 ÍNDICE DE FIGURAS	1
2 RESUMEN GENERAL	2
4 INTRODUCCIÓN GENERAL	4
5 HIPÓTESIS	6
6 OBJETIVOS	6
7 CAPÍTULO I: “Desempeño de plantas de <i>Abies religiosa</i> de distintas altitudes en una reforestación bajo el dosel de plantas nodriza en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca”	7
7.1 RESUMEN.....	7
7.2 INTRODUCCIÓN.....	8
7.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
7.3.1 Análisis estadístico.....	12
7.4 RESULTADOS.....	13
7.4.1 Efecto del nodricismo en la temperatura ambiental.....	13
7.4.2 Supervivencia.....	14
7.4.3 Crecimiento.....	17
7.4.4 Índice visual de estrés.....	18
7.4.5 Función de transferencia climática.....	19
7.7 LITERATURA.....	25
8 CAPÍTULO II: “Una propuesta para la evaluación de la respuesta al estrés ambiental de <i>Abies religiosa</i>”	28
8.1 RESUMEN.....	28
8.2 INTRODUCCIÓN.....	29
8.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
8.3.1 Análisis estadístico.....	32
8.4.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
8.5.-ANEXOS.....	34
8.6.-LITERATURA CITADA.....	36
9.-DISCUSIÓN GENERAL.....	37
10.-LITERATURA GENERAL.....	39

1 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Rango diario de variación de la temperatura ambiental en ambos tratamientos durante la época seca de 2016.	13
Figura 2.- Rango diario de variación de la temperatura ambiental en ambos tratamientos durante el invierno 2016-2017	14
Figura 3.- Porcentaje de supervivencia a lo largo del tiempo por tratamiento.	15
Figura 4.- <i>Relación entre cobertura del dosel y supervivencia por bloque</i>	15
Figura 5.- <i>Porcentaje de supervivencia por procedencia a lo largo del tiempo en bloques sin nodriza.</i>	16
Figura 6.- <i>Porcentaje de supervivencia por procedencia a lo largo del tiempo en bloques con nodriza.</i>	17
Figura 7.- <i>Crecimiento en altura por tipo de tratamiento.</i>	18
Figura 8.- <i>Estrés de las plantas por tratamiento.</i>	19
Figura 9.- <i>Porcentaje de supervivencia con relación a la variable ambiental DD_0 (grados días por debajo de 0°C.</i>	20
Figura 10.- Porcentaje de supervivencia con relación a la variable ambiental NFFD (número de días libres de heladas).....	20
Figura 11.- <i>Porcentaje de supervivencia con relación a la variable ambiental eFFP (día del año en que termina el periodo libre de heladas).</i>	21

2 RESUMEN GENERAL

Los bosques de *Abies religiosa* en Michoacán presentan un deterioro acelerado a causa del cambio climático y perturbaciones antropogénicas. En este trabajo se buscan alternativas de manejo que sirvan para mitigar esos procesos. Se evaluó la sobrevivencia, crecimiento y desarrollo de plantas de *Abies religiosa* originadas de un gradiente altitudinal y establecidas bajo la influencia de plantas nodriza en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Esto con la intención de implementar y proponer estrategias alternativas en la restauración de estos bosques. Se realizó una plantación experimental a 3440 msnm con planta de *Abies religiosa* originada de 10 procedencias colectadas a lo largo de un gradiente altitudinal (3000 - 3450 msnm, una procedencia cada 50 metros de diferencia altitudinal). Se establecieron 10 bloques con 12 parcelas cada uno (cada parcela presenta 3 individuos por procedencia), cinco bloques fueron ubicados debajo de plantas nodriza (arbustos nativos presentes en el sitio) y cinco sin planta nodriza. Se tomaron mediciones de altura, diámetro y vigor de la planta durante 18 meses y se obtuvieron datos de temperatura ambiental, porcentaje de cobertura forestal y contenido de clorofila en acículas. Para evaluar el vigor se diseñó un índice visual de estrés que va de uno (sin daño aparente) a seis (daño total). A dos años de la plantación se presenta un 85.6% de supervivencia en los bloques con nodriza y 23% en los bloques sin nodriza. Se realizó una función de transferencia para conocer cuáles variables ambientales influyen en el desarrollo de *Abies religiosa*. Se presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos para la supervivencia, crecimiento y el estrés de las plantas, pero no entre procedencias. En promedio el índice de estrés de las plantas con y sin nodrizas es de 2.8 y 5.6 respectivamente; además se encontró una alta relación entre el índice de estrés y la cantidad de clorofila que se presenta en cada una de las plantas.

Palabras clave: *Abies religiosa*, Migración asistida, Plantas nodriza, Índice de estrés, Reforestación.

3 GENERAL ABSTRACT

The sacred fir (*Abies religiosa*) forests at Michoacán present an accelerated deterioration due to climate change and anthropogenic perturbations, and this paper aims to develop conceptual and technical guidelines that might serve to mitigate this process. Therefore, the survival, growth and performance of *Abies religiosa* seedlings originated from an altitudinal gradient and established under the influence of nurse plants at the Monarch Butterfly Biosphere Reserve were evaluated; with the intention of implementing and proposing alternative strategies for the restoration of those forests. A reforestation was carried out at 3440 masl with a plant originated from seed from 10 provenances collected along an altitudinal gradient (3000 - 3450 masl, one provenance every 50 m of altitudinal difference). Ten blocks were established with 12 plots each (each plot including 3 individuals per provenance), 5 blocks with nurse plants (native shrubs already present in the site) and 5 without nurse plants. Measurements of height, diameter and vigor of the plant were taken every two months for two years. Likewise, data on environmental temperature, percentage of shrub cover and chlorophyll content in needles were obtained. To assess vigor, a visual stress index was designed ranging from one (no apparent damage) to six (total damage). Two years after planting, we registered 85.6% of survival in nurse plant blocks and 23% at control blocks (without nurse plants). There were statistical differences between treatments for survival, growth and stress of the plants, but not between provenances. On average, the stress index of plants with and without shade of nurses is 2.8 and 5.6 respectively. In addition, a high relationship was found between the stress index and the chlorophyll content of the plants. A transfer function was performed in order to know which environmental variables affect the development of *Abies religiosa*.

Keywords: *Abies religiosa*, Assisted Migration, Nurse Plants, Stress Index, Reforestation.

4 INTRODUCCIÓN GENERAL

Una de las posibles causas de la baja supervivencia (y en ocasiones del pobre crecimiento de las plantas) en los programas de reforestación, es la falta de acoplamiento entre los genotipos y las características ecológicas de los sitios a reforestar, ya que normalmente se utilizan poblaciones de otras zonas (Sáenz-Romero y Lindig-Cisneros, 2004). Por ejemplo, se ha encontrado que la mayor ocurrencia de daños por heladas en ensayos de procedencias y plantaciones de campo se presenta en las procedencias de altitudes menores, lo que indica la falta de compatibilidad entre el genotipo del árbol y el clima del lugar de plantación (Sáenz-Romero y Tapia Olivares, 2007). Estudios previos han demostrado que las poblaciones de especies forestales muestran diferenciación genética a lo largo de gradientes altitudinales, como una respuesta a la presión de selección de gradientes de temperatura y precipitación (Rehfeldt 1988). Esto sugiere que el éxito de las plantaciones estará determinado si la población evolucionó bajo las mismas condiciones ambientales que experimentará en el nuevo sitio donde sea establecida.

Por otro lado, el cambio climático reciente está alterando las condiciones ambientales rápidamente, y es probable que las poblaciones locales experimenten en un futuro cercano climas a los que no están bien adaptados (Isaac-Renton *et al.*, 2014; Carter 1996), por lo que se requiere de estrategias que consideren los efectos ambientales a corto plazo considerando las diferencias climáticas entre el sitio de prueba y las características genéticas de la población para predecir el impacto del cambio climático en la adaptación y el crecimiento de los árboles (Wang *et al.*, 2010). Una nueva estrategia de mitigación y adaptación de las especies forestales es la migración asistida, donde el principal objetivo es el de re-acoplar individuos, poblaciones y especies a los ambientes a los que están adaptados; esto, a través del movimiento hacia mayores altitudes o latitudes donde se predice ocurrirán los nichos climáticos de las especies (Williams y Dumroese, 2013). La propuesta del movimiento altitudinal de las poblaciones (migración asistida) recomienda que sean 300 o 400 metros hacia arriba de la montaña para reacoplarlas al clima de la década centrada en el año 2030 (Sáenz-Romero *et al.*, 2009). Sin embargo es importante considerar que bajo estos movimientos altitudinales propuestos se pudieran esperar afectaciones en las primeras etapas de establecimiento de las plántulas, ya sea en la supervivencia o en el estado físico y fisiológico (Carter, 1996).

Una estrategia utilizada en la restauración ecológica para la mejora de las condiciones microclimáticas, el aumento de agua, la disponibilidad de nutrientes, y la protección contra la herbivoría en sitios degradados, áridos y/o alpinos es el uso de plantas nodriza (Padilla y Pugnaire, 2006), lo que favorece la supervivencia y desarrollo de las plántulas con las que se reforesta (Blanco-García *et al.*, 2011). Es por ello que su uso en la implementación de migración asistida podría ser de gran utilidad para el establecimiento de las plántulas en sus primeros años de vida, protegiendo a las plántulas de las condiciones ambientales a las que no están adaptadas, particularmente a las temperaturas extremas.

En México, una de las especies de coníferas de gran importancia ecológica, económica y cultural que presentará mayor impacto negativo a consecuencia del cambio climático es *Abies religiosa*. Los bosques de *Abies religiosa* además de presentar fuertes problemas causados por presiones antropogénicas, se predice que se enfrentarán a condiciones poco favorables a consecuencia del cambio climático, que pudiesen ocasionarle una gran reducción (hasta 87.6% para el año 2060, Sáenz-Romero *et al.*, 2012).

Abies religiosa es una conífera nativa de México que se encuentra distribuida a lo largo del Eje Neovolcánico transversal entre los 2400 y los 3600 metros sobre el nivel del mar; sin embargo, forma bosques monoespecíficos entre los 3000 y los 3300 msnm (Rzedowski 2006). Estos bosques cumplen con diversas funciones ecológicas y proveen beneficios económicos, culturales, estéticos y recreativos a más de 20 millones de habitantes (Navarro-Sandoval *et al.*, 2013). Además, es utilizado como hábitat natural de hibernación por la mariposa monarca en los límites del Estado de México y Michoacán (CONAFOR 2010). Por lo tanto, se han realizado diversos programas de reforestación con *Abies religiosa* intentando mitigar el proceso de degradación de su hábitat. Sin embargo, la mayoría de estos programas de restauración han sido poco exitosos (Carbajal-Navarro 2015).

Por tal motivo, en este estudio se realizó y monitoreó una reforestación experimental de migración asistida con plántulas de *Abies religiosa* de diferentes procedencias altitudinales en un sitio de elevada altitud en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca implementando también el uso de plantas nodriza. Los resultados obtenidos se presentan en dos capítulos: En el primer capítulo se reporta el desempeño de las plántulas de *Abies religiosa* (en cuanto a supervivencia, crecimiento y estrés) al ser transferidas altitudinalmente y enfrentarse a condiciones ambientales a las que no

necesariamente estarían adaptadas; así mismo se presentan los resultados de utilizar plantas nodriza al realizar esta transferencia altitudinal. En el segundo capítulo se presenta una propuesta metodológica para la evaluación en campo de la respuesta de *Abies religiosa* ante el estrés ambiental.

5 HIPÓTESIS

Si la diferenciación genética a lo largo de gradientes altitudinales representa una respuesta a la presión de selección de gradientes de temperatura y precipitación, se espera que las plantas de las procedencias más cercanas al sitio de la reforestación sean las que presenten mayor supervivencia, crecimiento y menor estrés. Sin embargo, se espera que en general el nodricismo tenga efectos positivos sobre la supervivencia y crecimiento, sobre todo en las procedencias de menor altitud.

Se espera que el índice visual de estrés sea un método confiable para reflejar el estado fisiológico de las plántulas ya que este índice estará soportado por el contenido de clorofila de las acículas.

6 OBJETIVOS

Objetivo General.

- Evaluar la influencia que tiene la procedencia altitudinal de *Abies religiosa* en una reforestación experimental bajo dos distintas condiciones de apertura del dosel arbustivo.

Objetivos particulares.

- Evaluar la respuesta de las plantas de las procedencias originadas a diferentes altitudes a las condiciones ambientales del sitio.
- Evaluar el desempeño de una reforestación hecha con planta de diferentes procedencias altitudinales y la interacción que estas tendrán con plantas nodrizas

7 CAPÍTULO I

“Desempeño de plantas de *Abies religiosa* de distintas altitudes en una reforestación bajo el dosel de plantas nodriza en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca”

7.1 RESUMEN

El futuro de los bosques de *Abies religiosa* (oyamel) de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM), está seriamente comprometido a causa del cambio climático, es decir, el aumento de las temperaturas y posible disminución de lluvia, pudiese ocasionar una gran reducción del hábitat climático propicio para esta especie. En este proyecto se evaluó una reforestación experimental de migración asistida con plántulas de *Abies religiosa* de 10 diferentes procedencias altitudinales (entre los 3000 y los 3450 msnm, una procedencia cada 50 metros) como estrategia de mitigación ante el cambio climático. Además, se evaluó la influencia de arbustos como plantas nodriza en la supervivencia y crecimiento de las plantas de oyamel. La reforestación se realizó a 3440 msnm en la zona núcleo de la RBMM. Se colocaron 10 bloques con 12 parcelas cada uno (cada parcela presenta 3 individuos por procedencia), 5 bloques se encuentran bajo el efecto de planta nodriza y los otros 5 sin planta nodriza. Se tomaron datos de temperatura ambiental y cobertura arbustiva para describir las condiciones de los bloques. También se tomaron mediciones de altura, diámetro y estrés de la planta cada dos meses para determinar la respuesta de supervivencia, crecimiento y grado de estrés. Para evaluar el estrés se diseñó una índice visual de estrés que va de uno (sin daño aparente) a seis (daño total). Se presentó una supervivencia total del 85.6% en los bloques con nodriza y 23% en los bloques sin nodriza. La función de transferencia indica que tres variables ambientales están asociadas a la supervivencia y estrés de las plántulas. Se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos de con y sin nodriza para la supervivencia, crecimiento y el estrés de las plantas. En promedio el estrés de las plantas con y sin nodriza es de 2.8 y 5.6 respectivamente. En el presente estudio se demostró una técnica de reforestación alternativa, eficiente y de bajo costo que mejora sustancialmente el desempeño de las reforestaciones de oyamel convencionales.

7.2 INTRODUCCIÓN

El incremento de la temperatura y la disminución de la precipitación, son algunas de las consecuencias del cambio climático que influyen de forma negativa en la sobrevivencia, en la fisonomía y la fecundidad de las especies forestales, principalmente aquellas de climas templados (Leech *et al.*, 2011). Por ejemplo especies como *Pinus contorta*, *Populus tremuloides*, *Pinus edulis* y algunas especies de *Picea* en América del Norte han presentado ya una gran mortalidad a causa del cambio climático (Allen *et al.*, 2010). Se predice que el incremento en la temperatura obligará a las especies a migrar hacia mayores latitudes y/o hacia mayores elevaciones en las montañas, donde se encontrarán las condiciones adecuadas para su desarrollo (O'Neill 2017). Sin embargo, esto es una situación difícil para las especies que migran lentamente por medios naturales como las coníferas (Sáenz-Romero *et al.*, 2015), ya que necesitarían varios cientos de años para migrar y reacomodarse naturalmente a los climas donde están mejor adaptados y la velocidad con la que está ocurriendo el cambio climático hará que sea prácticamente imposible que este proceso de adaptación ocurra de manera natural a la velocidad requerida (Leech *et al.*, 2011).

Es por ello que una respuesta directa de manejo a fin de mitigar las pérdidas de la biodiversidad reales o previstas causadas por el cambio climático, es a través de la migración asistida (O'Neill 2017; P. Vitt *et al.*, 2010), la cual, es una acción de traslocación intencional o del movimiento de especies fuera de sus rangos históricos. Sin embargo, al realizar migración asistida es probable que las especies no se encuentren adaptadas a las condiciones actuales del nuevo sitio y sufran algunos daños por bajas temperaturas y/o por heladas (Hewitt *et al.*, 2011). A pesar de que estos daños serán menos frecuentes y graves con el paso del tiempo (Sáenz-Romero *et al.*, 2009), es necesario utilizar estrategias de protección en las primeras etapas para la supervivencia y establecimiento de las plántulas.

Una estrategia que ha presentado influencia positiva en la restauración y las reforestaciones y que puede ser de gran utilidad en los ensayos de procedencias y en la aplicación de migración asistida, es el uso de plantas nodriza. Las plantas nodriza dan protección o recursos a plántulas de otras especies en un ambiente difícil, mientras estas últimas crecen lo suficiente para enfrentar las condiciones del medio (Gómez-Aparicio *et al.*, 2004; Tewksbury y Lloyd 2001). Bajo la sombra de una planta nodriza, incluyendo árboles, las temperaturas del aire y del suelo son menos extremas, y la humedad de las

capas superficiales del suelo tiende a permanecer a menor profundidad (Ramírez-Contreras y Rodríguez-Trejo 2009) esto, en muchas ocasiones no sólo favorece a la supervivencia de las plántulas; también influye en el crecimiento, desarrollo y fisiología (Padilla y Pugnaire, 2006).

Proyecciones del hábitat climático propicio para los biomas de México, indican que las mayores afectaciones debido al cambio climático ocurrirán en las especies de coníferas que se encuentran a lo largo del Eje Neovolcánico Transversal (dónde se encuentran las montañas más altas de México, Rehfeld *et al.*, 2012). Proyecciones realizadas por Sáenz-Romero *et al.*, (2012), estiman que habrá una reducción del nicho climático de *Abies religiosa* (oyamel) del 87.6% para el año 2060.

Abies religiosa es una conífera nativa de México que forma grandes masas boscosas entre los 2800 y los 3300 msnm dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (Rzedowski 2006). Una de las mayores extensiones de bosque de oyamel en México se ubica en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMM), entre los límites del estado de México y Michoacán (Sánchez-González *et al.*, 2005), donde además de cumplir con diversas funciones ecológicas, económicas y culturales, se presenta como un foco rojo de gran importancia para diversos países del mundo por formar parte del proceso migratorio de la Mariposa Monarca (Brower *et al.*, 2008). Por lo que la reducción de estos bosques, por cuestiones antropogénicas (Vidal *et al.*, 2014) y de cambio climático implicará fuertes consecuencias negativas tanto para la especie como para los pobladores que dependen de los beneficios que proveen los bosques de oyamel, además de ser un gran problema para la mariposa monarca y sus sitios de hibernación en la zona de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Una de las principales estrategias para la recuperación de bosques degradados son los programas de reforestación (Carabias *et al.*, 2007) y los resultados que producen dichas acciones pueden ser muy contrastantes como producto de varios factores que afectan directamente la supervivencia y el éxito de las plantas establecidas: falta de acoplamiento entre los propagulos y el nivel de degradación de los sitios, deficiente organización comunitaria, etc. (Venegas *et al.*, 2011; Jaramillo *et al.*, 2015). Estos aspectos son muy relevantes a considerar ya que está documentado de que al menos en Michoacán, en algunos años existe un 37% de supervivencia al año siguiente de la reforestación; lo que

indica que se requiere de nuevas estrategias y técnicas de reforestación para incrementar el éxito de éstas acciones (Sáenz-Romero y Lindig-Cisneros 2004).

Por este motivo es que en el presente estudio se realizó una reforestación utilizando plántulas de *Abies religiosa* de diferentes procedencias altitudinales para documentar el desempeño en cuanto a supervivencia, crecimiento y fisionomía al ser transferidas entre 50 hasta 450 metros en altitud (respecto a su origen) como medida de compensación ante el cambio del nicho climático de la especie en escenarios futuros de cambio climático. Sin embargo, es bien sabido que *Abies religiosa* es una especie que necesita de condiciones especiales, de sitios muy húmedos y sombreados para su establecimiento y desarrollo (Blanco-García *et al.*, 2011; Rzedowski, 2006). Por lo que se incluyó el uso de plantas nodrizas para observar la influencia de estas en las distintas poblaciones y en el desempeño de la reforestación.

7.3 MATERIALES Y MÉTODOS

En junio del 2015, se realizó una reforestación experimental con planta de *Abies religiosa* de doce procedencias tomadas cada 50 metros a lo largo de un gradiente altitudinal, de los 3000 a los 3450 msnm. El sitio seleccionado fue el paraje Las Palomas (19° 34.357' N y 100° 14.302' O; a 3440 msnm), dentro de la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, en el Ejido La Mesa, Municipio de San José del Rincón, Estado de México. Se establecieron diez bloques con doce parcelas cada uno (cada parcela presenta 3 individuos por procedencia), cinco de los bloques se encontraban bajo el efecto de plantas nodriza (arbustos nativos que ya se encontraban en el sitio al momento de la reforestación: *Baccharis conferta*, *Ribes ciliolata*, *Salix paradoxa* y *Senecio cinerarioides*) y cinco bloques sin plantas nodriza.

En cada uno de los bloques se tomaron datos de cobertura vegetal con un analizador digital de imágenes para las copas de los árboles que se procesaron con el programa Winscanopy (2014^a), esto con la intención de cuantificar las diferencias que existen en la cobertura del dosel arbustivo. Se colocó un datalogger (Hobo® H01-001-01 Onset Computer Corporation, EUA) por bloque para registrar la temperatura ambiental de dos temporadas; la primera del 20 de enero al 31 de mayo del 2016 y la segunda del 03 de diciembre de 2016 al 13 de febrero de 2017. Se realizaron mediciones bimestrales de altura de cada una de las plantas, así como una medición inicial y una final del diámetro para determinar la respuesta de crecimiento y supervivencia de las plantas y verificar si existe diferencia entre los tratamientos (con y sin nodriza) y entre las procedencias de las plantas.

Se creó un índice visual de estrés para evaluar el estado físico de las plantas basado en el índice propuesto por Carbajal *et al.*, (Capítulo II). 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 a las plantas).

Se realizó una función de transferencia climática (regresión entre el desempeño de las plantas contra la diferencia entre el clima del sitio de plantación y el clima de origen de la semilla, expresada en 21 variables climáticas de temperatura y precipitación) para conocer el impacto del movimiento altitudinal en las plántulas de *Abies religiosa* usando datos climáticos obtenidos del programa ClimateNA versión 5.4. Este programa extrae y reduce las escalas de datos normales climáticos mensuales de 1981-2010 y datos normales de radiación solar mensual desde una resolución espacial moderada; obteniendo un total de

21 variables climáticas que fueron relacionadas con los datos de índice de estrés y supervivencia final (julio de 2017).

7.3.1 Análisis estadístico

Se utilizaron las herramientas del análisis de supervivencia para evaluar el desempeño de *Abies religiosa*. Se usó sólo la función de supervivencia (estimador de Kaplan Mier) para conocer si el tiempo de supervivencia de cada procedencia difiere entre dos condiciones: con y sin nodriza, así como entre procedencias sujetas al mismo tratamiento de dosel. Para evaluar el crecimiento en altura y diámetro por tratamiento y por procedencia se realizó un análisis de varianza mediante modelos lineales generalizados (GLM). Los análisis fueron realizados con el paquete estadístico JMP 8.

Para evaluar la significancia de la función de transferencia climática se hicieron regresiones de la media del desempeño de las procedencias contra la distancia de transferencia climática (clima del sitio de plantación menos el clima de la procedencia).

7.4 RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación provienen de datos que fueron tomados en un periodo de dos años (julio 2015-julio 2017). En todos los gráficos el color amarillo representa los bloques sin plantas nodriza mientras que el verde bloques con nodriza.

7.4.1 Efecto del nodricismo en la temperatura ambiental

Los bloques con plantas nodrizas presentaron un porcentaje de cobertura promedio de 48.8% (37.8-62.1%), mientras que los bloques sin plantas nodrizas la cobertura promedio fue 10.3% (6.9-14.3%). La presencia de cobertura en bloques sin plantas nodriza obedeció al efecto en el borde de los arbustos y árboles adyacentes de cada bloque. La diferencia en la cobertura de ambos tratamientos ocasionó que se presentaran diferencias de 5°C en la temperatura promedio para la primer temporada y 6°C para la segunda ($P < 0.0001$, Figura 1 y 2), siendo los bloques sin plantas nodriza los que presentan temperaturas mayores; sin embargo, cuando se presentan eventos extremos de bajas temperaturas como heladas o nevadas, la temperatura en los bloques sin plantas nodriza es similar a la de los bloques con nodriza y también se reduce la variación en la temperatura diaria entre ambos tratamientos. Se aprecia también en ambas figuras que la oscilación es mayor en primavera que en invierno.

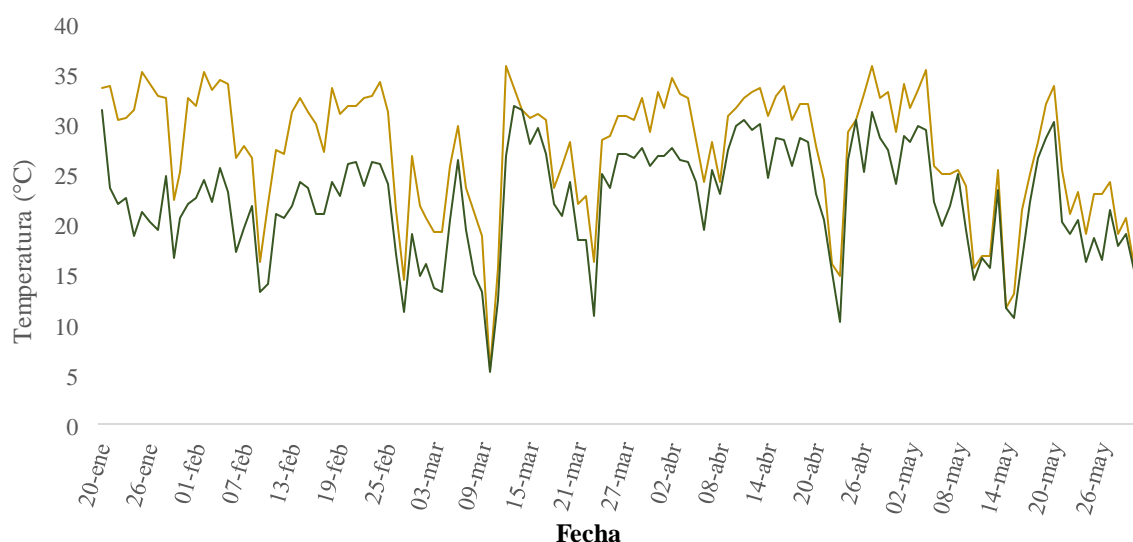


Figura 1.-Rango diario de variación de la temperatura ambiental en ambos tratamientos durante la época seca de 2016. (Amarillo= sin nodriza, Verde= con nodriza)

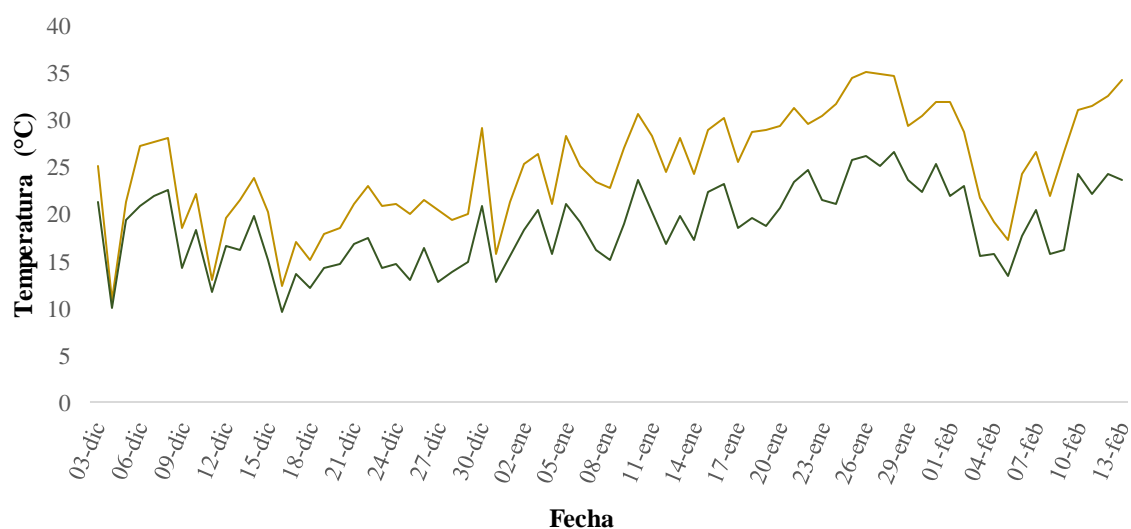


Figura 2.- Rango diario de variación de la temperatura ambiental en ambos tratamientos durante el invierno 2016-2017. (Amarillo= sin nodriza, Verde= con nodriza)

Esta diferencia de temperatura entre los tratamientos con y sin plantas nodriza ocasiona efectos en cuanto a supervivencia, crecimiento y estado físico de las plantas de oyamel.

7.4.2 Supervivencia

La supervivencia general final del ensayo de procedencias fue del 54.7%. Para los bloques con plantas nodriza se presentó una supervivencia del 85% mientras que para los bloques sin plantas nodriza es del 23%. Se detectó una notoria reducción en la supervivencia durante la época seca (marzo-mayo) de ambos años, especialmente en 2017 (Figura 3, $P = <0.0001$). Dentro de los bloques la supervivencia se relaciona con la cantidad de cobertura que se presenta ($P=0.0014$), es decir, entre mayor es el porcentaje de cobertura mayor es el porcentaje de supervivencia (Figura 4). Es importante mencionar que el bloque sin nodriza que presentó mayor supervivencia contaba con la presencia de rocas grandes y troncos tirados de árboles muertos, los cuales proporcionaron cierta protección a las plantas; lo que llamaríamos un efecto marginal de nodrizas abióticas.

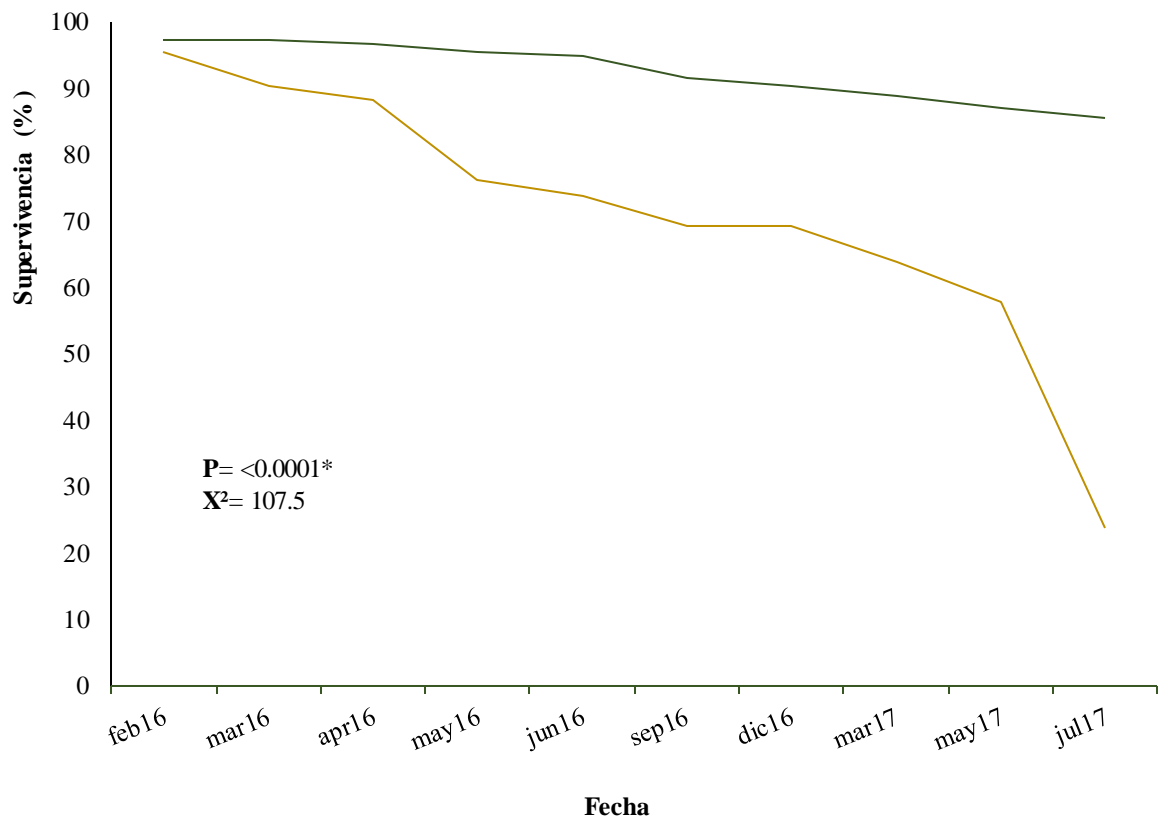


Figura 3.- Porcentaje de supervivencia a lo largo del tiempo por tratamiento.

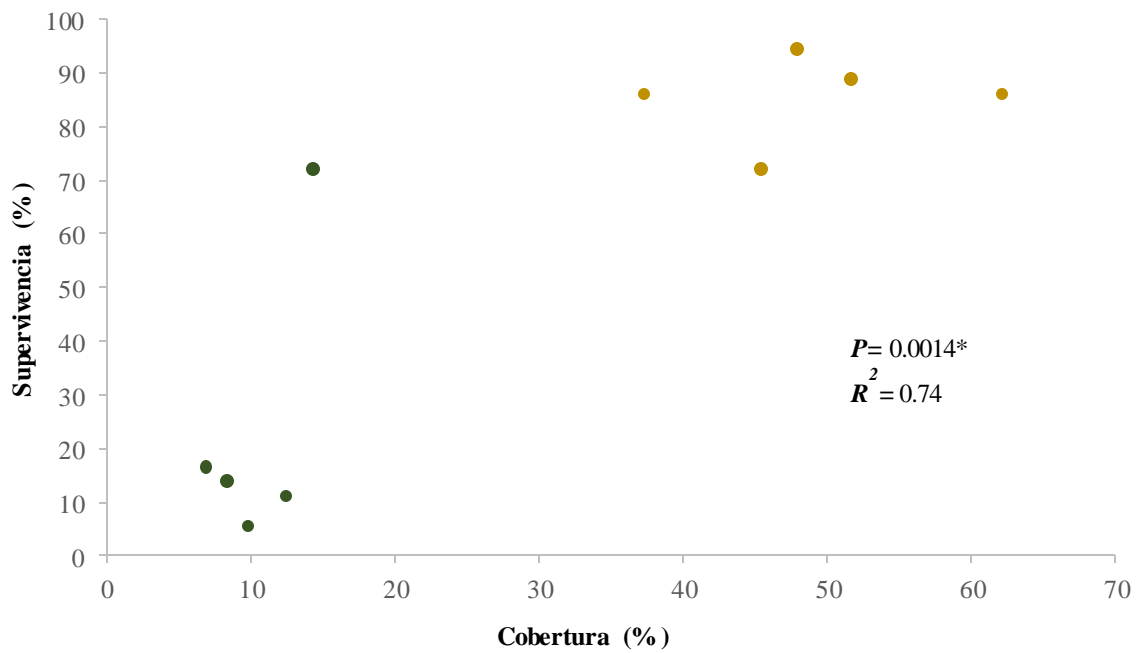


Figura 4.- Relación entre cobertura del dosel y supervivencia por bloque

La supervivencia por procedencia altitudinal no presentó diferencias significativas en ninguno de los tratamientos ($P=0.14$ sin nodriza, $P=0.73$ con nodriza). Sin embargo, podemos observar que las plantas de la procedencia localizada a 3450 msnm (plantas locales altitudinalmente), presentan mayor supervivencia en los bloques sin nodriza (Figura 5), lo que indica que las plantas locales son mejores para la reforestación de sitios muy abiertos sin presencia de arbustos, ya que están mejor adaptadas a la radiación directa y a los eventos de heladas. Por otro lado, el uso de plantas nodriza asegura una alta supervivencia de todas las procedencias altitudinales de *Abies religiosa* (sin importar la altitud de donde proceda la semilla que dio origen a la planta, por más baja que esta pueda ser), lo cual es un dato importante en pro del desplazamiento altitudinal de la especie hacia arriba de la montaña; es decir, si se quiere implementar la migración asistida (Figura 6).

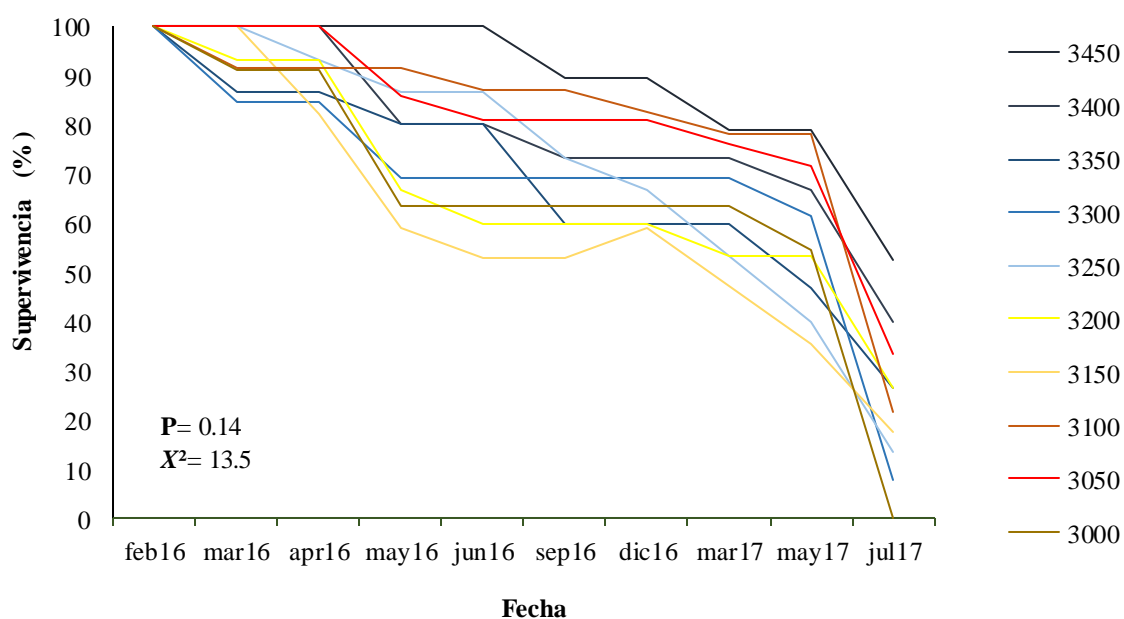


Figura 5.- Porcentaje de supervivencia por procedencia a lo largo del tiempo en bloques sin nodriza.

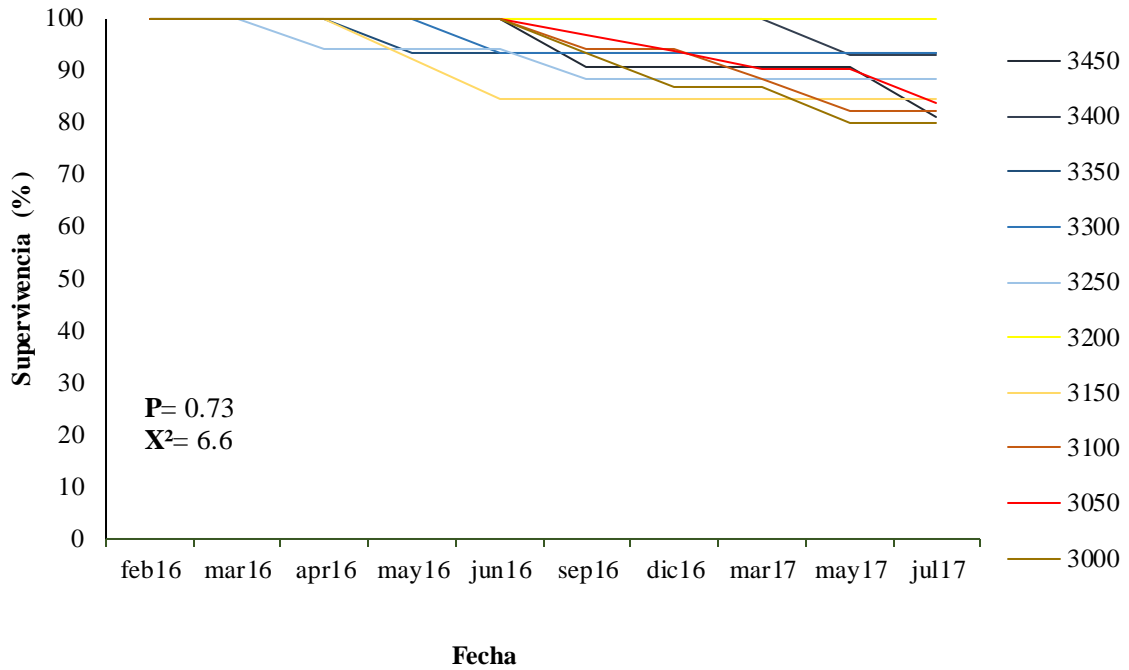


Figura 6.- Porcentaje de supervivencia por procedencia a lo largo del tiempo en bloques con nodriza.

7.4.3 Crecimiento

Para realizar los análisis estadísticos para el crecimiento en altura y diámetro de los individuos se tomaron en cuenta las mediciones hasta el mes de mayo de 2017, debido a que para el mes de julio de 2017 el 77% de los individuos habían muerto en los bloques sin nodriza y era inviable realizar una comparación robusta entre los tratamientos y entre las procedencias.

En cuanto al crecimiento por tratamiento, se presentaron diferencias significativas para el crecimiento en altura ($P=0.03$) pero no para el crecimiento en diámetro ($P=0.35$), (Figura 7). En los bloques de nodriza existe en promedio un incremento en altura de 16.8 centímetros con 1.8 milímetros de diámetro, mientras que en los bloques sin nodriza es de 13.0 centímetros con 1.3 milímetros de diámetro, esto señala que las nodrizas no sólo favorecen la supervivencia de las plantas en las reforestaciones al protegerlas de temperaturas extremas, ya sea por calor o heladas, sino que además ayudan a que adquieran un mayor crecimiento en altura.

La procedencia altitudinal de las plantas no influye en el crecimiento de éstas. Es decir las procedencias mostraron valores no significativamente diferentes de incremento en altura y diámetro.

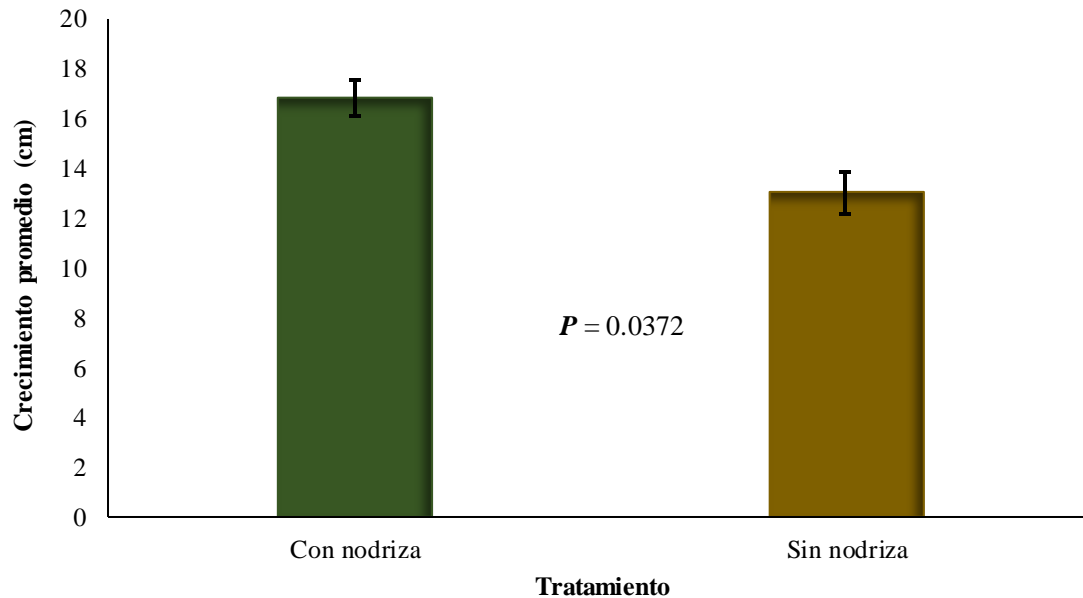


Figura 7.- Crecimiento en altura por tipo de tratamiento.

7.4.4 Índice visual de estrés

El uso de plantas nodriza, asegura también un mejor estado físico y fisiológico de las plantas de *Abies religiosa*; en la Figura 8 se puede observar que las plantas que se encuentran bajo el efecto de plantas nodriza presentan un menor estado de estrés (valor promedio de 2.8) que las plantas que se encuentran sin el efecto de nodriza (valor promedio de 5.6), recordando que el valor 1, es el mejor estado físico de la planta y el valor 6 representa el daño mayor (muerte de la planta). Se presenta una alta diferencia significativa entre el grado de estrés de ambos tratamientos ($P= 0.0001$); sin embargo, no se presentan diferencias significativas entre las poblaciones.

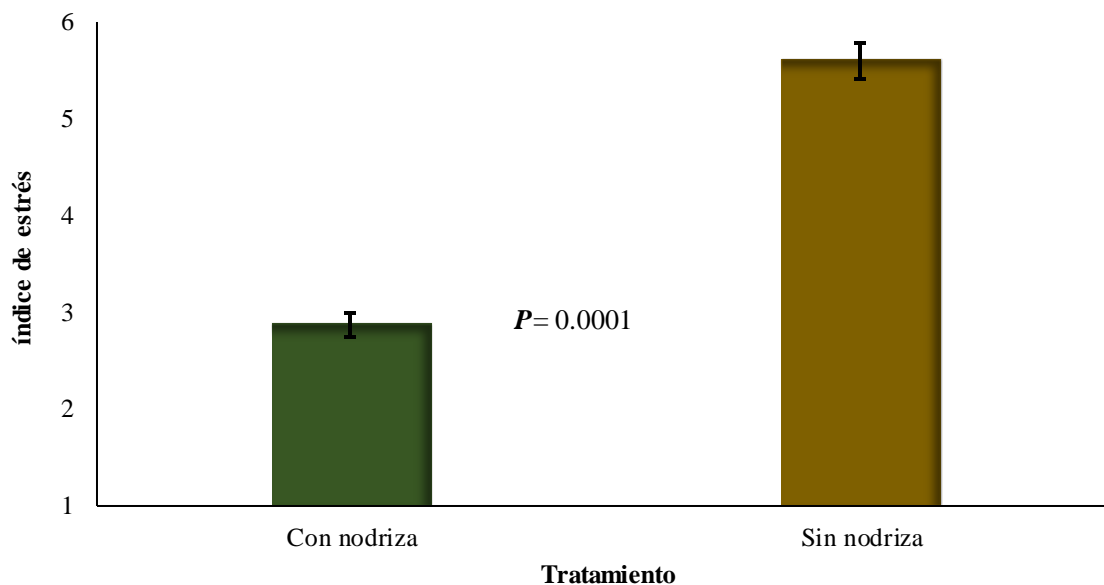


Figura 8.- Estrés de las plantas por tratamiento, (un valor mayor del índice de estrés implica mayor estrés de las plantas).

7.4.5 Función de transferencia climática

Las variables climáticas (expresadas como distancia de transferencia climática) que se asociaron significativamente con la supervivencia y estrés de las plántulas de oyamel fueron: grados días por debajo de 0°C ($P = 0.0308$; $P = 0.0265$), número de días libres de heladas ($P = 0.0426$; $P = 0.0445$) y el día del año en que termina el periodo libre de heladas ($P = 0.0434$; $P = 0.0442$). Esto sin el efecto de las plantas nodriza en los bloques.

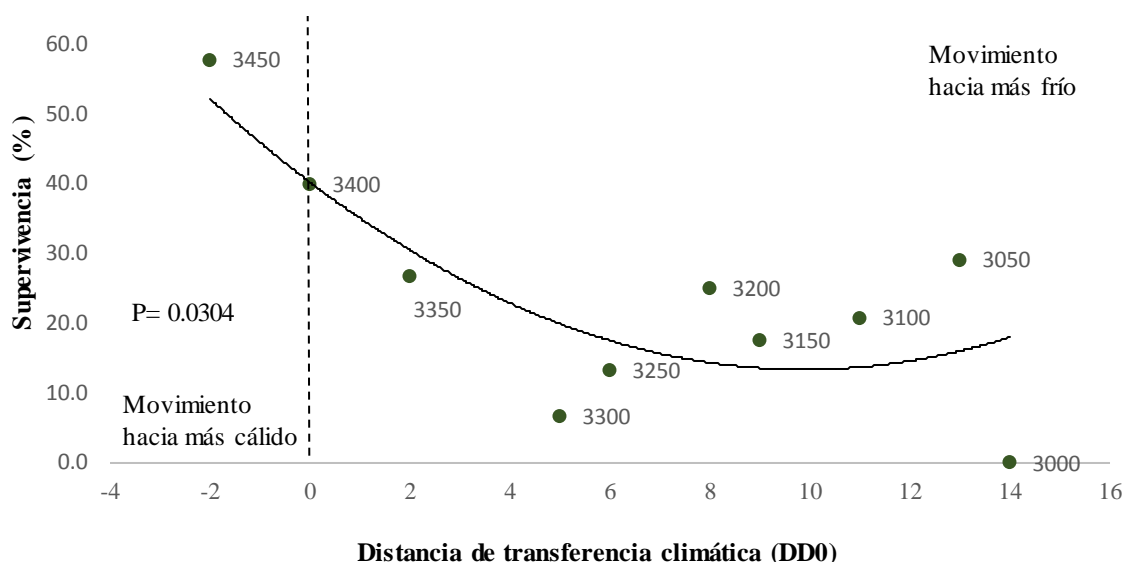


Figura 9.- Porcentaje de supervivencia con relación a la variable ambiental DD_0 (grados días por debajo de 0°C) en los bloques sin nodrizas valores negativos del eje “x” representar un movimiento de las procedencias hacia un sitio más cálido que de su origen (debido a que la variable es grados día por debajo de cero grados). Valores positivos mayores hacia sitios más fríos que su origen. En bloques con nodriza los resultados son: $P= 0.4961$, $R^2 = 0.1815$.

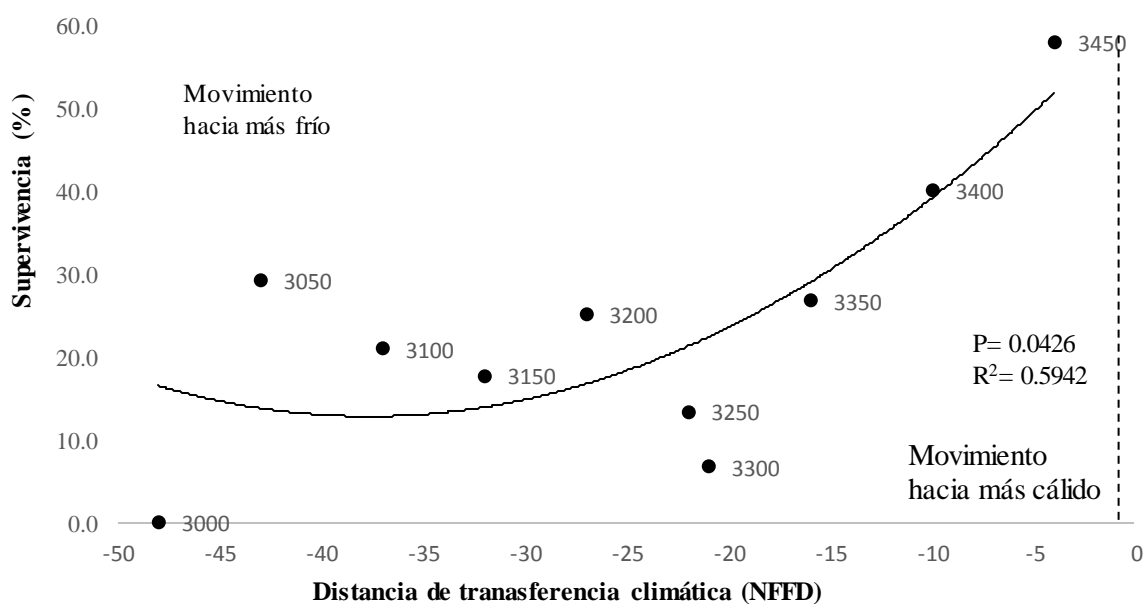


Figura 10.- Porcentaje de supervivencia con relación a la variable ambiental NFFD (número de días libres de heladas). En los bloques sin nodrizas valores negativos del eje “x” representar un movimiento de las procedencias hacia un sitio más frío que de su

origen. Valores positivos mayores hacia sitios más cálidos que su origen. En bloques con nodriza los resultados son: $P= 0.5125$, $R^2= 0.1739$.

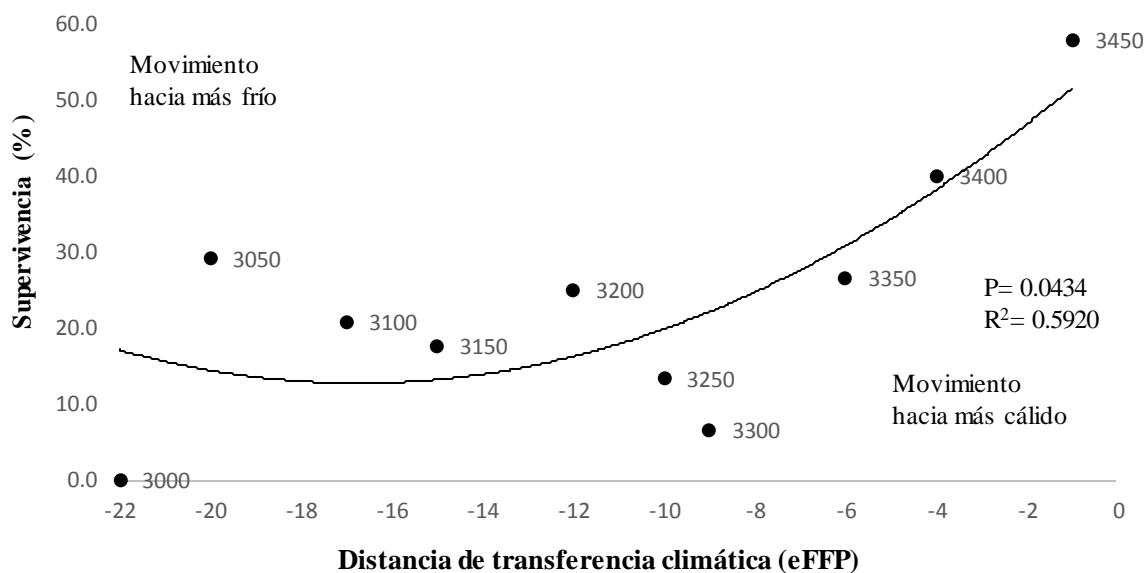


Figura 11.- Porcentaje de supervivencia con relación a la variable ambiental eFFP (día del año en que termina el periodo libre de heladas). En los bloques sin nodrizas valores negativos del eje “x” representar un movimiento de las procedencias hacia un sitio más frío que de su origen. Valores positivos mayores hacia sitios más cálidos que su origen. En bloques con nodriza los resultados son: $P= 0.4636$, $R^2= 0.1972$.

7.5 DISCUSIÓN

La migración asistida es una estrategia de mitigación para las especies forestales ante el cambio climático mediante las reforestaciones (Williams y Dumroese 2013), sin embargo este movimiento implica el riesgo de que las especies no estén adaptadas a las condiciones ambientales del nuevo sitio (Hewitt *et al.*, 2011), usualmente porque éstos presentan temperaturas menores a las del sitio de origen de las poblaciones. En el presente estudio se brindan argumentos a favor del uso de plantas nodriza como estrategia de protección para favorecer el desempeño de las reforestaciones tradicionales así como las reforestaciones experimentales de migración asistida de *A. religiosa*.

Sin considerar el uso de plantas nodriza en el movimiento altitudinal de *Abies religiosa*, se esperaba que las poblaciones locales al sitio de reforestación en términos de altitud fuesen las que presentaran mayor supervivencia, crecimiento y menor estrés; ya que se ha demostrado que las poblaciones de especies forestales muestran diferenciación genética a lo largo de gradientes altitudinales (Rehfeldt 1988). Así mismo se esperaba que este patrón se fuese comportando gradualmente de acuerdo a la distancia altitudinal del sitio de origen y el sitio de la reforestación, y que las poblaciones de altitudes menores presentarían mayor daño por bajas temperaturas como lo reporta Sáenz-Romero y Tapia-Olivares, 2008. Si bien, no existen diferencias significativas. Sin embargo las poblaciones locales al sitio de plantación son las que presentan mayor supervivencia.

Bajo el dosel de las plantas nodriza se presentan microhábitats que favorecen el reclutamiento de las plántulas (Ren *et al.*, 2008). En nuestro experimento los bloques con nodrizas presentaron una diferencia en el rango diario de temperatura de hasta 5°C menos con respecto a los bloques sin plantas nodriza, lo que indica claramente que las plantas nodriza brindan mejor protección contra variaciones extremas en el clima a lo largo del día. Estas diferencias en la temperatura en los bloques con nodriza proveen condiciones favorables para *Abies religiosa* ya que requiere de sitios húmedos y sombreados para su desarrollo (Rzedowski, 1978).

Otros beneficios obtenidos del uso de plantas nodriza en reforestaciones con *A. religiosa* están documentados por Blanco-García *et al.*, 2011 y Sánchez-Velázquez *et al.*, 2011. Blanco-García reportó que bajo el dosel de *Lupinus elegans*, *A. religiosa* presentó un efecto positivo en supervivencia y crecimiento. Además, al utilizar plantas nodriza que se encuentran ya establecidas en el sitio de la reforestación, se presentan ventajas en cuanto al

gasto económico y de tiempo de la colecta, germinación y siembra de las semillas de las nodrizas. En el estudio de Blanco-García la mayor mortalidad de las plántulas de oyamel (61%) se presentó durante el primer año de la reforestación, cuando aún no estaban completamente desarrolladas las plantas de *L. elegans*; obteniendo una supervivencia final del 17%. Así mismo Sánchez-Velázquez utilizó a *Baccharis conferta* como planta nodriza y documentó que esta especie no influye en la supervivencia de *A. religiosa* pero sí en el crecimiento. *Baccharis conferta* es una de las especies más abundantes en nuestro sitio de estudio y por lo tanto de mayor influencia en los resultados.

En este experimento, el uso de plantas nodrizas no leguminosas tuvo una alta influencia positiva en cuanto a supervivencia, crecimiento (en altura) y disminución del estrés, por lo que dependiendo de las condiciones del sitio al que se va a reforestar, es importante considerar el tipo de nodriza a utilizar.

Al utilizar plantas nodriza no se presenta afectación negativa en la supervivencia, crecimiento y estrés de las plántulas de *A. religiosa*. En cuanto a los análisis de la función de transferencia climática (respuesta de las plantas a diversas variables ambientales en relación a la diferencia entre sus procedencias y el sitio de la plantación, Wang *et al.*, 2010); sin el uso de nodrizas las variables climáticas asociadas a la baja supervivencia y mayor estrés fueron: grados días por debajo de 0°C, números de días libres de heladas y día del año en que termina el periodo libre de heladas, donde las poblaciones con menor supervivencia son las poblaciones más alejadas al sitio de la reforestación: es decir, las poblaciones de menores altitudes. Estas variables indican que las temperaturas frías son un factor decisivo en la adaptación de las plantas a los sitios de reforestación. Esto es consistente con Ortíz-Bibián *et al.*, 2017, que encontró que la temperatura del mes más frío es la que más explica la diferenciación genética entre poblaciones de *Abies religiosa* a lo largo del gradiente altitudinal.

Al conocer las implicaciones en la supervivencia y estrés de las plántulas al realizar una función de transferencia y conocer las ventajas de utilizar plantas nodriza en las reforestaciones y la implementación de migración asistida, es indudable concluir que si se quiere hacer migración asistida es indispensable el uso de plantas nodriza para que las reforestaciones sean más exitosas, así como el establecimiento de plántulas de las diferentes procedencias altitudinales.

7.6 CONCLUSIONES

- El porcentaje de cobertura del dosel provisto por la presencia o ausencia de arbustos como plantas nodriza influye en las condiciones microambientales como la temperatura presente en cada bloque.
- Se presentaron diferencias en la supervivencia de *Abies religiosa* entre los tratamientos (con y sin nodriza), pero no entre las poblaciones.
- Las plantas nodriza influyen de forma positiva en el crecimiento de las plántulas de oyamel.
- Bajo el efecto de plantas nodriza se presenta un menor estrés en las plántulas de *Abies religiosa*.
- El porcentaje de cobertura (ya sea, por arbustos o por rocas o troncos presentes) influye en el porcentaje de supervivencia de cada bloque.
- La función de transferencia climática indica que las variables climáticas relacionadas con las bajas temperaturas influyen de manera negativa en la supervivencia y estrés de las plántulas de oyamel cuando no se utilizan plantas nodriza.
- Al asegurar una mayor supervivencia, mejor crecimiento y menor estrés en las plántulas de oyamel después de dos años de la plantación, se recomienda que si se quiere hacer migración asistida es importante el uso de plantas nodriza para el establecimiento de las plántulas durante los primeros años de la transferencia.

7.7 LITERATURA

- Brower, L. P., Williams, E. H., Fink, L. S., Zubieta, R. R., & Ramirez, M. I. (2008). Monarch butterfly clusters provide microclimatic advantages during the overwintering season in Mexico. *Journal of the Lepidopterists' Society*, 62(4), 177-188.
- 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.
- Hewitt, N., Klenk, N., Smith, A. L., Bazely, D. R., Yan, N., Wood, S., & Henriques, I. (2011). Taking stock of the assisted migration debate. *Biological Conservation*, 144(11), 2560-2572.
- Jaramillo-López, P. F., Ramírez, M. I., & Pérez-Salicrup, D. R. (2015). Impacts of Bokashi on survival and growth rates of *Pinus pseudostrobus* in community reforestation projects. *Journal of environmental management*, 150, 48-56.
- Leech, S. M., Almuedo, P. L., & O'Neill, G. (2011). Assisted migration: adapting forest management to a changing climate. *Journal of Ecosystems and Management*, 12(3).
- O'Neill, G. (2017). Proposed climate-based seed transfer system for British Columbia. *Technical report (British Columbia. Forest Science Program); 099*.
- Ortiz-Bibian, M. A., Blanco-García, A., Lindig-Cisneros, R. A., Gómez-Romero, M., Castellanos-Acuña, D., Herrerías-Diego, Y., & Sáenz-Romero, C. (2017). Genetic Variation in *Abies religiosa* for Quantitative Traits and Delineation of Elevational and Climatic Zoning for Maintaining Monarch Butterfly Overwintering Sites in Mexico, considering Climatic Change. *Silvae Genetica*.
- 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.
- 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.
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504.

- Sáenz-Romero, C., & Lindig-Cisneros, R. (2004). Evaluación y propuestas para el programa de reforestación en Michoacán, México. *Ciencia Nicolaita*, 37, 107-122.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., & Beaulieu, J. (2009). Estimaciones de cambio climático para Michoacán. *Implicaciones para el sector agropecuario y forestal y para la conservación de la Mariposa Monarca. Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Michoacán, México.*
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P., & Lindig-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., Lindig-Cisneros, R. A., Joyce, D. G., Beaulieu, J., Clair, J. B. S., & Jaquish, B. C. (2016). Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 303-323.
- Sánchez-González, A., López-Mata, L., & Granados-Sánchez, D. (2005). Semejanza florística entre los bosques de Abies religiosa (HBK) Cham. & Schltdl. de la Faja Volcánica Transmexicana. *Investigaciones geográficas*, (56), 62-76.
- Tewksbury, J. J., & Lloyd, J. D. (2001). Positive interactions under nurse-plants: spatial scale, stress gradients and benefactor size. *Oecologia*, 127(3), 425-434.
- Venegas Pérez, Y., S. Rodríguez, D.T. López. (2011). Análisis Base para el diseño de la Estrategia de Reforestación de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Michoacán, México. Monarch Butterfly Fund – Dirección de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.
- Vidal, O., LÓPEZ- GARCÍA, JOSÉ., & RENDÓN- SALINAS, EDUARDO. (2014). Trends in deforestation and forest degradation after a decade of monitoring in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Mexico. *Conservation Biology*, 28(1), 177-186.
- 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(1), 18-27.
- Wang, T., O'Neill, G. A., & Aitken, S. N. (2010). Integrating environmental and genetic effects to predict responses of tree populations to climate. *Ecological applications*, 20(1), 153-163.

Wang T, Hamann A, Spittlehouse D, Carroll C (2016) Locally Downscaled and Spatially Customizable Climate Data for Historical and Future Periods for North America. PLoS ONE 11(6): e0156720. doi:10.1371/journal.pone.0156720.

8 CAPÍTULO II

“Una propuesta para la evaluación de la respuesta al estrés ambiental de *Abies religiosa*”.

8.1 RESUMEN

Evaluar la respuesta que experimentan las plantas de las reforestaciones al ambiente, resulta crucial para entender los procesos de recuperación de las comunidades vegetales y poder implementar estrategias que incrementen la supervivencia y crecimiento de las plantas tanto en las reforestaciones para restauración ecológica como en plantaciones comerciales. Sin embargo, la evaluación fisiológica de las plantas en ocasiones requiere de equipos tecnológicos complejos y costosos que normalmente son manejados por investigadores en instituciones con financiamiento suficiente, pero que no suelen estar al alcance de muchos evaluadores. Por este motivo, en el presente estudio se diseñó un índice de estrés visual, de fácil aplicación para evaluar la respuesta al estrés ambiental de plántulas de *Abies religiosa* en una reforestación; así mismo, se evaluó su replicabilidad entre varios observadores. Por último, se exploró la relación entre el índice de estrés y la concentración de clorofila en las hojas. Se obtuvo un acuerdo significativo entre varios observadores al realizar la evaluación de las plantas con el índice de estrés ($W=0.95$; $p<0.0001$), así como, una alta relación entre el índice y la concentración de clorofila ($p<0.0001$). Lo que indica que el índice de estrés visual no sólo representa el estado físico de las plantas si no que a su vez es el reflejo su estado fisiológico y puede ser adoptado por cualquier persona adecuadamente entrenada, para realizar evaluaciones fisiológicas de *Abies religiosa* y tal vez otras especies usadas en las reforestaciones.

Palabras clave: *Abies religiosa*, Índice de estrés, Clorofila, Reforestación, Ecofisiología.

8.2 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 60 años se ha perdido cerca del 50% de la superficie forestal en México (Wightman y Santiago, 2003). Los incendios, las plagas y enfermedades, el cambio de uso de suelo y la tala clandestina son los principales factores de degradación de los bosques. A pesar de que existe una disminución en la pérdida anual de cobertura forestal (de 0.5% para el periodo de 1990-2000 a 0.4% para el periodo de 2000-2005), las tasas de degradación siguen siendo alarmantes (Sáenz *et al.*, 2013).

Una de las principales acciones de rehabilitación y restauración de los bosques son las estrategias de reforestación, forestación y restauración de suelos, entre otras (Carabias *et al.*, 2007). Se estima que se deben de reforestar 600 mil ha anualmente para poder reemplazar las pérdidas de cobertura vegetal (Wightman y Santiago, 2003). La Comisión Nacional Forestal reporta que de 2013 a 2016 se reforestaron 581 mil 665 hectáreas con cerca de 561.2 millones de árboles en los diferentes ecosistemas y regiones del país, con una tasa anual de supervivencia (al término del primer año después de plantar) del 57% para el 2014 (CONAFOR, 2016). Sin embargo, suponiendo que estas cifras reflejan lo que ocurre en la realidad, se debe tomar en cuenta que la supervivencia por sí misma puede ser un dato no tan confiable ya que el estado físico o fisiológico de las plantas puede estar lejos del óptimo.

Para dar seguimiento a las reforestaciones, algunas de las evaluaciones que se realizan son dasométricas y biológicas, estas últimas están orientadas a cuantificar fundamentalmente la respuesta de la plantación desde el punto de vista de volúmenes acumulados, crecimiento, sanidad, conformación, efecto del ambiente, conservación de suelo, topografía, entre otras (Sáenz *et al.*, 2013). Por otra parte, en la ecofisiología de plantas, un método recurrente para evaluar las respuestas de las plantas al estrés es a través de la fluorescencia variable de clorofila, ya que proporciona información rápida y precisa acerca de la resistencia/vulnerabilidad que presenta el aparato fotosintético y la planta ante el estrés ambiental (Binder y Fielder, 1996). Sin embargo, el equipo para cuantificar este atributo (fluorómetro), en general es muy costoso y el manejo de estos resulta complicado. Por lo tanto, es necesario implementar técnicas más simples, confiables y que se realicen en poco tiempo, mismas que sean indicadoras del daño al aparato fotosintético para evaluar las plantas durante su crecimiento en las reforestaciones.

Debido a que el seguimiento de las plantas en las reforestaciones no ha sido una prioridad en el manejo y las metodologías empleadas, actualmente no reflejan el desempeño fisiológico de las plantas ante la variación del ambiente, es necesario generar metodologías de evaluación indicadoras del “estado de la planta” que puedan ser implementadas tanto por investigadores como por técnicos y profesionistas de la silvicultura, y eventualmente, por los dueños y poseedores de los bosques. Esto contribuiría a la toma de decisiones y la generación de estrategias encaminadas a garantizar un mayor éxito de las reforestaciones. Por lo tanto, en el presente estudio se presenta una propuesta de evaluación visual del desempeño de las plántulas en campo y se prueba la relación que tiene con la fisiología del aparato fotosintético.

8.3 MATERIALES Y MÉTODOS

En junio de 2015 se realizó una reforestación con 360 plantas de *Abies religiosa* Kunth Schldl. et Cham. en el Ejido de La Mesa, Municipio de San José del Rincón, Estado de México (19° 34.357' N y 100° 14.302' O; a 3432msnm), sitio localizado dentro de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Después de un año y medio, al inicio de la temporada seca, se evaluó mensualmente el estado de las plantas con un “índice de estrés visual”. El índice de estrés se construyó en función de la coloración y el estado de las plantas, y sus valores van de uno a seis (figura 1): el nivel 1 representa el mejor estado de la planta, con acículas verdes oscuras, completas y lustrosas. En el nivel 2, la planta presenta una coloración semejante al 1, sin embargo comienza a exhibir algunas ligeras decoloraciones (en tonos amarillentos) de forma circular en un 80% de sus hojas. En el nivel 3 la planta presenta un follaje amarillo-verdoso. En el nivel 4 la planta tiene acículas entre un 50 y 40% de tono amarillo y entre un 50 y 60% de color marrón. En el nivel 5 el 98% del follaje es marrón-rojizo, dando la apariencia de estar secas. Por último, el nivel 6 representa el daño máximo y las plantas están desprovistas de acículas y muy probablemente muertas (completamente secas).

Así mismo, se pretende que este índice de estrés, sea un método de evaluación visual, confiable y fácil de aplicar. Por lo tanto, se probó su replicabilidad de manera independiente entre cuatro observadores independientes. En conjunto y con el apoyo de imágenes se explicó cada categoría del índice de estrés y posteriormente, a cada uno se le pidió que asignara de manera independiente un nivel de estrés a cada una de las 360 plantas de la parcela.

Adicionalmente, a la par de la determinación del índice de estrés se midió la concentración de clorofila en las acículas con un medidor portátil del contenido de clorofila, especial para acículas (CCM-300, Opti-Sciences, New Hampshire, USA). Dicho aparato es un fluorómetro modulado que utiliza la relación de emisión de la fluorescencia de la clorofila roja a 700nm con el valor de fluorescencia de la emisión de rojo distante a 735 nm y puede evaluar la concentración de clorofila de las acículas en un rango de 41 mg m⁻² y 675 mg m⁻². La concentración de clorofila se midió en cinco acículas por planta y se tomó de 10:00 am a 13:00 pm, debido a que durante este horario existe una menor variación en la temperatura ambiental.

8.3.1 Análisis estadístico

Para comprobar la replicabilidad del índice de estrés, se realizó un análisis de concordancia de Kendall, una prueba no paramétrica que calcula acuerdos entre tres o más evaluadores de variables categóricas. Por otra parte, se obtuvo un valor promedio por planta de la concentración de clorofila, y la relación entre el índice de estrés y la concentración se exploró a través de un Modelo Lineal Generalizado (GLM) con distribución de Poisson y una función de enlace tipo log. Debido a que las plantas del nivel 6 del índice del estrés no presentaban acículas no se incluyeron en el análisis de la relación entre el índice y la concentración de clorofila.

8.4.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al evaluar la replicabilidad entre los cuatro observadores, el índice de concordancia de Kendall indica que existe un acuerdo significativo entre éstos ($W=0.95$; $p<0.0001$); es decir, observadores independientes llegaron a la misma conclusión acerca del estado de la planta. Por lo tanto, la propuesta de índice de estrés puede ser replicada y adoptada por cualquier persona capacitada en realizar evaluaciones del desempeño de plantas de *Abies religiosa* en campo.

La asociación entre el índice de estrés y la concentración de clorofila de las hojas fue altamente significativa ($p<0.0001$; Figura 2), es decir, plantas que visualmente se encuentran más estresadas presentan un menor contenido de clorofila en sus hojas debido a que el estrés presentado causa generalmente una reducción considerable en el contenido de los pigmentos fotosintéticos. Esta reducción puede ocurrir por el deterioro inducido por el estrés en las vías de biosíntesis del pigmento o en la degradación del pigmento (Ashraf y Harris, 2013).

La evaluación de la respuesta de las plantas al ambiente mediante un índice visual, resulta ser un método poco común; sin embargo, la aplicación de éstos, provee información importante del estado fisiológico de las plantas, de forma fácil y económica para la toma de decisiones de futuros programas de restauración y conservación de los bosques. Por ejemplo, en términos de cambio climático y migración asistida de las especies, estudios como los de Viveros-Viveros *et al.*, (2006) y Martínez *et al.*, (2005), donde se evaluó el daño por heladas en función al porcentaje de necrosis que presentaban las plantas, se pudieron definir cuáles son las mejores procedencias o genotipos para el movimiento altitudinal de las especies.

En la presente propuesta, el índice de estrés está fundamentado en el cambio de coloración de las hojas como una respuesta de la planta al estrés ambiental, por lo que, al comprobar la relación que existe entre la coloración (índice de estrés) y la concentración de clorofila producida de las plantas de *Abies religiosa*, se puede confirmar que el índice de estrés refleja el estado fisiológico de las plantas. Por lo tanto, puede ser una alternativa confiable para la evaluación de la respuesta de las plantas a los diferentes tipos de estrés, cuando no se cuente con el equipo necesario para este tipo de evaluación.

8.5.-ANEXOS



Figura 1.- Representación de los valores del índice de estrés, nivel 1, 2, 3, 4, 5 y 6 (descritos anteriormente).

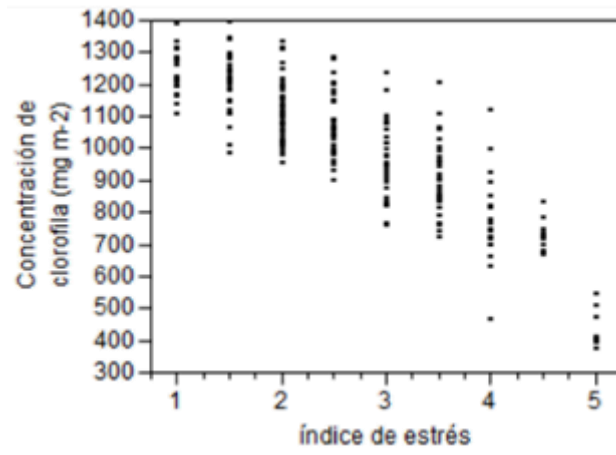


Figura 2.- Relación entre la concentración de clorofila (mg m^{-2}) y el índice de estrés.

8.6.-LITERATURA CITADA

Ashraf M and P J C Harris (2013), Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica* 51:163-190

Binder W D y P Fielder (1996) Chlorophyll fluorescence as an indicator of frost hardiness in white spruce seedlings from different latitudes. *New Forests*, 11: 233-253

Carabias J, V Arriaga, V Cervantes (2007) Las políticas públicas de la restauración ambiental en México: Limitantes, avances, rezagos y retos. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 80:85-100

CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2016)

<https://www.gob.mx/conafor/prensa/alcanza-conafor-58-1-por-ciento-de-la-meta-sexenal-en-reforestacion> (junio 2017)

Martínez M A, V Mondino, L Gallo (2005), Evaluación de daños por heladas tardías en ensayos de procedencias de pino oregón introducidos en el norte de la Región Andino Patagónica Argentina. *Bosque* 26:113-120

Sáenz R T, F J Villaseñor, H J Muñoz; A Rueda y J A Prieto (2013) Evaluación de plantaciones de restauración en tres municipios del estado de Michoacán. *Folleto Técnico Núm. 32. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC*. 24 p.

StatsToDo: Concordance (Agreements) Explained (2014)

https://www.statstodo.com/Concordance_Exp.php (junio 2017)

Viveros-Viveros H, C Sáenz-Romero, J J Vargas-Hernández, y J López-Upton (2006) Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios en Michoacán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29: 121-126

Wightman K E y C Blas (2003) La cadena de la reforestación y la importancia en la calidad de las plantas. *Foresta Veracruzana*, 5: 45-51

9.-DISCUSIÓN GENERAL

Las ventajas de utilizar nodrizas en este estudio se reflejan en la supervivencia, crecimiento en altura y en el bajo estrés de las plántulas de oyamel al ser transferidas altitudinalmente entre 50 y 450 metros hacia arriba de la montaña. Blanco-García *et al.*, 2011 y Sánchez-Velázquez *et al.*, 2011 también documentaron ventajas al usar plantas nodriza en reforestaciones de *A. religiosa*. Sin embargo, a diferencia de Sánchez-Velázquez, en nuestro estudio se presentó influencia positiva del arbusto *Baccharis conferta* en cuanto a la supervivencia. Al ser *A. religiosa* una especie que requiere de sitios húmedos y sombreados para su desarrollo (Rzedowski, 1978), las condiciones microambientales que se presentaron en los bloques con nodriza (menor variación diaria de la temperatura y porcentaje de cobertura arbustiva) beneficiaron al oyamel en su desarrollo.

Otra de las ventajas de este estudio fue el uso de nodrizas que se encontraban ya establecidas en el sitio de la reforestación debido a que Blanco-García *et al.*, 2011 reportó una mortalidad de 61% en el primer año de la plantación, cuando las nodrizas (*L. elegans*) no se habían desarrollado por completo además de presentar un mayor gasto económico y de tiempo en la colecta, germinación y siembra de las semillas en el sitio. La supervivencia final para Blanco-García *et al.*, 2011, fue del 17% mientras que para nosotros fue del 86% y sin el uso de una especie leguminosa que aporta nutrientes al suelo. Sin embargo, es importante enfatizar que la mortalidad de *Abies religiosa* reportada por Blanco-García *et al.*, 2011 prácticamente se detuvo, una vez que *L. elegans* cubrió con su sombra al oyamel (desde esa perspectiva la supervivencia bajo el dosel de *L. elegans* fue de 43.5%). Esto indica que dependiendo de las condiciones del sitio al que se va a reforestar, es importante considerar el tipo de nodriza a utilizar y el endurecimiento de las plántulas en un vivero que presente condiciones ambientales similares al sitio de plantación.

En cuanto a la transferencia altitudinal, las variables climáticas que se encontraron asociadas a la supervivencia y estrés, son variables relacionadas con las bajas temperaturas a las que no están adaptadas las plantas de oyamel de altitudes menores esto sin la presencia de nodrizas.

Tanto en las reforestaciones tradicionales como las de migración asistida el uso de plantas nodriza favorece la supervivencia y desarrollo de las plántulas de oyamel. Sin

embargo, es importante la evaluación en campo de la respuesta de las plantas al ambiente (con y sin nodriza en los diferentes sitios). Por ello el índice visual de estrés que se describe en el capítulo dos resulta ser un método muy útil para obtener información importante del estado fisiológico de las plantas, de forma fácil y económica, además de ser un método que puede ser utilizado por cualquier persona interesada en la evaluación de reforestaciones de *A. religiosa*.

Los resultados de ambos capítulos indican la importancia de considerar varios aspectos y técnicas cuando se trata de obtener un mayor éxito en la conservación de los bosques que presentan un alto deterioro, tanto por cuestiones antropogénicas como de cambio climático (en este caso los bosques de *A. religiosa*). La migración asistida como estrategia de mitigación ante el cambio climático puede presentar riesgos de acoplamiento entre las poblaciones y el nuevo sitio. Sin embargo, al utilizar plantas nodriza, estos riesgos disminuyen, ya que les proporcionan mejores condiciones microambientales para el desarrollo de las plántulas en los primeros años de la transferencia. No obstante, es importante el monitoreo de la aclimatación y respuesta de las plántulas a las nuevas condiciones ambientales mediante un método que represente la fisiología de éstas, tal como lo representa el índice visual de estrés que se desarrolló.

10.-LITERATURA GENERAL

Blanco-García, A., Sáenz-Romero, C., Martorell, C., Alvarado-Sosa, P., & Lindig-Cisneros, R. (2011). Nurse-plant and mulching effects on three conifer species in a Mexican temperate forest. *Ecological Engineering*, 37(6), 994-998.

Carbajal-Navarro A. L., 2015, Evaluación de la regeneración natural de *Abies religiosa* bajo diferentes condiciones de apertura de dosel y a lo largo de un gradiente altitudinal en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia Michoacán, 65pp.

Carter, K. K. (1996). Provenance tests as indicators of growth response to climate change in 10 north temperate tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 26(6), 1089-1095.

CONAFOR Comisión Nacional Forestal, Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad CONABIO, SIRE-Paquetes Tecnológicos. Ficha Técnica de *Abies religiosa*.

<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies%20religiosa.pdf>

(Accesada febrero 2018).

Isaac- Renton, M. G., Roberts, D. R., Hamann, A., & Spiecker, H. (2014). Douglas- fir plantations in Europe: a retrospective test of assisted migration to address climate change. *Global change biology*, 20(8), 2607-2617.

Navarro-Sandoval, J. L., Vargas-Hernández, J. J., Gómez-Guerrero, A., Ruíz-Posadas, L. D. M., & Sánchez-García, P. (2013). Morfología, biomasa y contenido nutrimental en *Abies religiosa* con regímenes diferentes de fertilización en vivero. *Agrociencia*, 47(7), 707-721.

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.

Rehfeldt, G. E. (1988). Ecological genetics of *Pinus contorta* from the Rocky Mountains (USA): a synthesis. *Silvae Genetica* 37(3-4):131-135.

Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. 1ra. *Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*, México, 504.

Sáenz-Romero, C. (2004). Zonificación estatal y altitudinal para la colecta y movimiento de semillas de coníferas en México. En: Vargas-Hernández, Basilio Bermejo V. y F. Thomas Ledig. *Manejo de Recursos Genéticos Forestales*, CONAFOR, pp 72-86.

Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., & Beaulieu, J. (2009). *Estimaciones de cambio climático para Michoacán. Implicaciones para el sector agropecuario y forestal y para la conservación de la Mariposa Monarca. Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Michoacán, México*, 22.

Sáenz-Romero, C., & Tapia-Olivares, B. L. (2008). Genetic variation in frost damage and seed zone delineation within an altitudinal transect of *Pinus devoniana* (*P. michoacana*) in Mexico. *Silvae Genetica*, 57(1-6): 165-170.

Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P., & Lindig-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.

Wang, T., O'Neill, G. A., & Aitken, S. N. (2010). Integrating environmental and genetic effects to predict responses of tree populations to climate. *Ecological Applications*, 20(1): 153-163.

Williams, M. I., & Dumroese, R. K. (2013). Preparing for climate change: forestry and assisted migration. *Journal of Forestry*, 111(4): 287-297.

o