



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS Y FORESTALES

**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS:
“FISIOLOGÍA Y GENÉTICA VEGETAL”**

Tesis:

**“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”**

Presenta:

Esmeralda Navarro Miranda

Como requisito para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias Biológicas

Director de tesis:

Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero

Co- Director:

Dr. Arnulfo Blanco García

Morelia Michoacán, Febrero 2020





UNIVERSIDAD MICHUACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS Y FORESTALES

**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS:
“FISIOLOGÍA Y GENÉTICA VEGETAL”**

Tesis:

**“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”**

Presenta:

Esmeralda Navarro Miranda

Como requisito para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias Biológicas

Director de tesis:

Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero

Co- Director:

Dr. Arnulfo Blanco García

Morelia Michoacán, febrero 2020



AGRADECIMIENTOS

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyt) por la beca 704062 otorgada.

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

A mi asesor, Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero por confiar en mi desde un principio, por su paciencia, apoyo, sus conocimientos transmitidos, su tutoría y por estar siempre al pendiente del avance del proyecto.

Al Dr. Arnulfo Blanco García, por su apoyo, ya sea con personal o vehículo para que las salidas de campo fueran posibles, y por sus valiosas aportaciones al proyecto.

Al Dr. Roberto Lindig Cisneros y Dr. Leonel López Toledo, por su disponibilidad en ayudarme cuando me surgía alguna duda y por sus correcciones al manuscrito.

A la Dra. Mariela Gómez Romero por todo el apoyo, tus palabras de aliento, por estar siempre pendiente de mis avances, por las observaciones y sugerencias que ayudaron a enriquecer el manuscrito. Pero principalmente, gracias por tu amistad.

Al Dr. Philippe Lobit por sus valiosas contribuciones al trabajo y por todo su apoyo para que el capítulo dos fuera posible.

A Don Panchito y Doña Petra, sin ustedes nada de nuestro trabajo fuera posible, por su gran corazón y por enseñarme tanto.

Al Dr. Christian Anton Wehenkel y al M.C. Eduardo Mendoza por recibirnos durante nuestra estancia en Durango.

A la M.C. Aglaen Carbajal Navarro por tu ayuda al inicio de este proyecto y por permitirme seguir con las mediciones de Las Palomas.

A todas las personas que me han apoyado en cada salida de campo (Cecy, Ana, Erika, Nancy Gera, Sinaí, David, Esteban, Adolfo, Agla).

A mi familia y mi compañero de vida por estar ahí en cada paso.

DEDICATORIA

Son muchas las personas a las cuales podría dedicar esto, podría hacerlo de la manera tradicional (lo cual tal vez sería más fácil), sin embargo, decidí escribir algo muy general y espero que algún día cuando lo lean encuentren algo de ustedes en las siguientes líneas.....

A dos de las personas que me enseñaron que el amor va más allá de la vida. A la mujer que me enseñó a ser fuerte, valiente y a luchar en cada momento. A la persona que me dio su mano para juntas aprender a crecer, que me enseñó mucho más que yo a ella y que me ha dado la dicha verla convertirse en la gran mujer que es hoy. Al hombre que nunca cuestiono ni una sola de mis decisiones. A las personas que, con una llamada, un mensaje, están ahí para apoyarte y demostrarte que la amistad es uno de los lazos más fuertes que existen. A la gente valiente que se levanta cada día a luchar, a reír, a amar, a seguir. A las personas que me enseñaron a ser humilde, honesta y a no tener miedo de ser yo. A las personas que me hicieron enamorarme de la ciencia, a tener el gusto de aprender por el simple gusto de hacerlo, más allá de las reglas de memorizar. A las personas que me han enseñado que lo que le da sentido a la vida es el amor.

¡Esto es por ustedes y para ustedes!

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	1
ÍNDICE DE CUADROS	3
I. RESUMEN GENERAL	4
II. SUMMARY	6
III. INTRODUCCIÓN GENERAL	8
IV. HIPÓTESIS	10
V. OBJETIVOS	11
VI. RESULTADOS	12
Capítulo I	12
RESUMEN	12
ABSTRACT.....	13
1.1 INTRODUCCIÓN	14
1.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
1.2.1 Paraje Las Palomas.....	16
1.2.2 Paraje los Ailes.....	18
1.2.3 Evaluaciones en campo	21
1.2.4 Análisis estadísticos	21
1.3 RESULTADOS	22
1.3.1 Supervivencia	22
1.3.2 Incremento en altura.....	25
1.3.3 Incremento en diámetro.....	28
1.3.4 Índice de estrés	31
1.4 DISCUSIÓN	36
1.5 CONCLUSIONES	38
1.6 LITERATURA CITADA	39
Capítulo II	42
RESUMEN	42
ABSTRACT.....	43
2.1 INTRODUCCIÓN	44
2.2 MATERIALES Y MÉTODOS	45
2.2.1 Caracterización del microclima.....	45
2.2.2 Contenido de humedad en el suelo.....	46

2.2.3 Análisis estadístico	47
2.3 RESULTADOS	48
2.3.1 Caracterización del microclima.....	48
2.3.2 Contenido de humedad en el suelo.....	52
2.4 DISCUSIÓN	54
2.5 CONCLUSIONES	56
2.6 LITERATURA CITADA	57
VI. DISCUSIÓN GENERAL	59
VII. BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	61
ANEXOS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del sitio de colecta a lo largo del Cerro de San Andrés (cumbre indicada con símbolo verde) de las diez procedencias ensayadas (símbolos rojos).....	17
Figura 2. Plántula de regeneración natural (fuente: Cruzado-Vargas, 2017).....	18
Figura 3. Mapa del sitio de establecimiento de los ensayos de procedencias (círculos amarillos: Paraje Los Ailes 3360 msnm y Paraje las Palomas 3440 msnm, Ejido la Mesa, Estado de México, área núcleo RBMM) y sitios de colecta de las procedencias ensayadas para el sitio de Los Ailes (símbolos rojos).....	20
Figura 4. Ensayo de procedencias en campo (50 bloques con planta nodriza y 20 sin nodriza): (a) tratamiento con nodriza (arbustos de regeneración natural, círculos naranjas para resaltar el acomodo de las plántulas bajo el dosel del arbusto), (b) tratamiento sin planta nodriza (círculos naranjas para resaltar el acomodo de las plántulas de oyamel).	20
Figura 5. Porcentaje de supervivencia (promedio entre procedencias) entre tratamientos. Sitio Los Ailes.....	22
Figura 6. Porcentaje de supervivencia (promedio entre procedencias) entre tratamientos. Sitio las Palomas	23
Figura 7. Porcentaje de supervivencia por procedencias para el sitio de los Ailes: (a) tratamiento con nodriza; (b) tratamiento sin nodriza.....	24
Figura 8. Porcentaje de supervivencia por procedencias para el sitio de Las Palomas: (a) tratamiento con nodriza; (b) tratamiento sin nodriza.....	25
Figura 9. Incremento promedio en altura en cada tratamiento. Los Ailes. 2 años, 5 meses de la plantación.	26
Figura 10. Incremento promedio en altura en cada tratamiento. Las Palomas a los 4 años, 6 meses de la plantación	26
Figura 11. Incremento en altura con respecto a la altitud de origen de la plántula: (a) Los Ailes; (b) Las Palomas. Eje x representa la diferencia entre la altitud del sitio de ensayo menos la altitud del sitio de origen de la plántula. Valores negativos representan disminución en altitud con respecto al sitio de origen (transferencia hacia sitios más cálidos que el origen), valores positivos un aumento en altitud respecto al sitio de origen (transferencia hacia sitios más fríos que el origen)	28
Figura 12. Incremento promedio en diámetro en cada tratamiento. Sitio Los Ailes.....	29
Figura 13. Incremento promedio en diámetro en cada tratamiento. Sitio Las Palomas.....	29
Figura 14. Incremento en diámetro con respecto a la altitud de origen de la plántula: (a) Los Ailes; (b) Las Palomas. Eje x representa la diferencia altitudinal entre el sitio de ensayo menos el sitio de origen de la plántula. Valores negativos representan una disminución en altitud con respecto al sitio de origen (trasferencia a sitios más cálidos); valores positivos un aumento en altitud respecto al sitio de origen (trasnsferencia a sitios más fríos).	31
Figura 15. Índice promedio de estrés para cada uno de los tratamientos. Sitio Los Ailes. Valores más altos del índice indican un mayor estrés.	32
Figura 16. Índice promedio de estrés para cada uno de los tratamientos. Sitio Las Palomas. Valores más altos del índice indican un mayor estrés.	32

Figura 17. Índice de vigor/estrés para cada procedencia en los diferentes tratamientos. Sitio Los Ailes. Líneas continuas: con nodriza; líneas punteadas: sin nodriza. Valores más altos del índice indican un mayor estrés.	34
Figura 18. Índice de vigor/estrés para cada procedencia en los diferentes tratamientos. Sitio Las Palomas. Líneas continuas: con nodriza, líneas punteadas: sin nodriza.....	35
Figura 19. Dispositivo para medir las fluctuaciones de temperaturas: (a) sensores de radiación infrarrojo colocados en una placa de poliestireno expandido, (b) Arduino y (c) pila portátil...	45
Figura 20. Dispositivos en cada uno de los tratamientos: (a) tratamiento con nodriza, (b) tratamiento sin nodriza	46
Figura 21. Toma de muestras de suelo en campo.....	46
Figura 22. Secado de muestras de suelo.	47
Figura 23. Comparación de temperaturas para cielo, suelo y el aire a 40 cm del suelo (plántula) entre los dos tratamientos en dos épocas del año: (a) temperaturas correspondientes al mes de enero, (b) temperaturas correspondientes al mes de abril	50
Figura 24. Comparación de temperaturas para cielo, suelo y el aire a 40 cm del suelo (plántula) entre los dos tratamientos. Temperaturas correspondientes al mes de agosto (temporada de lluvias).	51
Figura 25. Porcentaje de humedad gravimétrica en diferentes meses del año para cada uno de los tratamientos. Línea continua negra tratamiento con nodriza, línea punteada negra tratamiento sin nodriza, línea punteada azul precipitación mensual	53

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Coordenadas geográficas, elevación, media anual de temperatura (MAT) y media anual de precipitación (MAP) para cada una de las procedencias y el sitio de ensayo. Las variables climáticas de las procedencias corresponden al periodo 1961-1990 y para el sitio del ensayo, corresponden al periodo 2001-2010 (obtenidos de ClimateNa_v5.60).....	17
Cuadro 2. Coordenadas geográficas, elevación, media anual de temperatura (MAT) y media anual de precipitación (MAP) para cada una de las procedencias y el sitio de ensayo. Las variables climáticas de las procedencias corresponden al periodo 1961-1990 y para el sitio del ensayo, corresponden al periodo 2001-2010 (obtenidos de ClimateNa_v5.60).....	19
Cuadro 3. Análisis de varianza para la variable supervivencia entre tratamientos en cada uno de los sitios de ensayo. Análisis por distribución binomial.....	23
Cuadro 4. Análisis de varianza de supervivencia por tratamiento. Sitio Los Ailes.	24
Cuadro 5. Análisis de varianza de supervivencia por tratamiento. Sitio Las Palomas.	25
Cuadro 6. Análisis general de varianza entre tratamientos en cada una de los sitios de ensayo para la variable incremento en altura.....	27
Cuadro 7. Análisis de varianza entre tratamientos en cada uno de los sitios de ensayo para la variable incremento en diámetro.	30
Cuadro 8. Análisis de varianza entre tratamientos en cada una de los sitios de ensayo para la variable índice de estrés.....	33
Cuadro 9. Análisis de varianza por tratamiento, variable índice de estrés. Sitio de Los Ailes.	34
Cuadro 10. Análisis de varianza mediante GLM por tratamiento, variable índice de estrés. Sitio de Las Palomas.	35
Cuadro 11. Temperaturas durante un ciclo diurno (máximas=Tmax; mínimas=Tmin; rango=Tmax-Tmin) del cielo, suelo y aire cercano a la plántula de oyamel en enero (temporada fría-seca), abril (temporada cálida-seca), y agosto (temporada de lluvias).	49
Cuadro 12. ANOVAs para el porcentaje de humedad gravimétrica entre tratamientos en diferentes meses del año	52

I. RESUMEN GENERAL

En el presente trabajo se evaluó la supervivencia, crecimiento y estrés de plántulas de *Abies religiosa* (oyamel), originadas de un gradiente altitudinal, y plantadas (en general) a una altitud mayor que el origen de la semilla. Fueron establecidos dos ensayos de procedencias de dicha especie dentro del área núcleo de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM, Las Palomas a 3440 m de altitud, en junio 2015 y en Los Ailes a 3360 m, en julio 2017; Ambos en el ejido La Mesa, Mpio., de San José del Rincón, Edo. De México). El diseño experimental constó de bloques completos al azar, con y sin plantas nodriza (arbustos locales bajo cuya sombra se plantó *A. religiosa*). Durante el inicio de la temporada de secas del 2019 se instalaron dos dispositivos (uno en cada tratamiento) para medir las fluctuaciones de temperatura en detalle (cada 3 minutos). Se monitoreó el contenido de humedad del suelo, bajo y fuera de la sombra de los arbustos que servían de plantas nodriza.

En ambos sitios se obtuvo una mayor supervivencia cuando las plántulas de oyamel son plantadas bajo el dosel de la planta nodriza (67% a los 4 años 6 meses de la plantación en Las Palomas y 93% 2 años 5 meses, en Los Ailes), que sin el uso de éstas (11% y 6% respectivamente). Las plántulas de *Abies religiosa* en el tratamiento con nodriza presentaron un menor estrés (valor promedio del índice: 1.4 en los Ailes y 2.9 Las Palomas; índice con valores del 1 al 6, en donde valores mayores indican más estrés), que aquellas fuera de la protección de la nodriza (5.5 para ambos sitios) y un mayor incremento en altura.

Tanto para el sitio de Las Palomas como para Los Ailes, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (con y sin nodriza) para las variables supervivencia e índice de estrés. En Los Ailes se encontraron diferencias entre procedencias, siendo la procedencia más cercana en altitud de origen al sitio, la que muestra una clara adaptación local.

Bajo la copa de la planta nodriza se crean gradientes de temperatura menos extremos que a cielo abierto, siendo durante la temporada de secas cuando la diferencias es mayor. Bajo la copa de arbustos se presentó una disminución de hasta 4.4°C del aire cercano a la plántula durante el día y un aumento de 2°C durante la noche, en comparación con las temperaturas registradas sin la protección de la nodriza. Cuando el contenido de agua en el suelo es escaso (temporada seca) la

planta nodriza favorece una mayor retención de humedad en el suelo (%W= 25.5) comparado con la humedad que se registró a cielo abierto (%W=12.61).

Se concluye que los arbustos que sirven como planta nodriza, proveen de un microhábitat favorable para el establecimiento y crecimiento de plántulas de *Abies religiosa* bajo su dosel. Por ello, sería recomendable producir plántulas de especies arbustivas en los viveros forestales de la RBMM, y plantarlas con dos años de anticipación a las reforestaciones de oyamel, en aquellos sitios a reforestar que carezcan de arbustos. Cuando sí existan éstos, se recomienda plantar el oyamel bajo la sombra de los arbustos, tales como *Baccharis conferta*.

Palabras clave: cambio climático, reforestación, oyamel, microclima, migración asistida

II. ABSTRACT

The survival, growth and stress of *Abies religiosa* (Sacred fir) seedlings, originating from an altitude gradient, and planted (in general) at an altitude higher than the seed's provenance, was evaluated. Two provenance tests of this species were established within the core area of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR, at Las Palomas at 3440 m, in June 2015, and Los Ailes, 3360 m altitude, in July 2017; Municipality of san José del Rincón, México State). The experimental design consisted of a randomized complete block design, with and without nurse plants (local shrubs under whose shade *A. religiosa* seedlings were planted). During the start of the 2019 dry season, two devices (one in each treatment) were installed to measure in detail (every 3 min) the daily temperature fluctuations. The moisture content of the soil was monitored, under and out of the shadow of the shrubs that served as nurse plants.

In both test sites a greater survival was obtained when the oyamel seedlings were planted under the canopy of the nurse plant (67% at 4 years 6 months of planting in Las Palomas and 93% at 2 years 5 months, in Los Ailes), than without the use of those (11% and 6%, respectively). The seedlings of *Abies religiosa* in the treatment with nurse plant presented a lower average stress index values (index value: 1.4 in the Ailes and 2.9 at Las Palomas; values from 1 to 6, where higher values indicate more stress), than those outside the protection of the nurse plant (5.5 for both sites) and a greater increase in height.

For the Las Palomas test sites and Los Ailes, statistically significant differences were found between treatments (with and without nurse plants) for survival and stress index. At Los Ailes there were differences between provenances, where the closest provenance to the altitude of the tests site, which shows a clear local adaptation.

Under the canopy of the nurse plant are created less extreme temperature gradients than in the open areas, being during the dry season when the differences are greater. Under the canopy of shrubs there was a decrease of up to 4.4°C of air temperature near the seedling during the day and an increase of 2°C overnight, in comparison with the temperatures experimented without the nurse plant canopies. When the water content in the soil is scarce (dry season) the nurse plant facilitate a greater retention of soil moisture content (%W= 25.5) compared to the humidity that was recorded in the open areas (%W=12.61).

It is concluded that the shrubs that serve as a nurse plant, provide favorable microhabitat conditions for the establishment and growth of *Abies religiosa* seedlings under their canopy. Therefore, it would be advisable to produce seedlings of shrub species in the forest nurseries of the MBBR, and plant them two years in advance of the oyamel reforestations, in those reforest test sites that lack shrubs. When those do exist, it is recommended to plant the oyamel seedlings under the shade of the shrubs, such as *Baccharis conferta*.

Keywords: climate change, reforestation, oyamel, microclimate, assisted migration.

III. INTRODUCCIÓN GENERAL

Los bosques del mundo en los últimos años se han visto amenazados debido al aumento de eventos de sequías y de temperaturas, trayendo como consecuencias que las tasas de mortalidad de las poblaciones de especies forestales incrementen (Allen *et al.*, 2010). La velocidad a la cual está ocurriendo el cambio climático antropogénico supera la capacidad natural de las especies forestales de migrar para lograr mantenerse acopladas al clima que están adaptadas (Lenoir *et al.*, 2008; Hansel *et al.*, 2012).

En el caso particular de México, el cambio climático (en base a algunas proyecciones) traerá como consecuencias un incremento de 3.7°C y una disminución de la precipitación de 18.2% para finales de siglo (Sáenz-Romero *et al.*, 2010), provocando entonces que el país se vuelva más árido y, por consiguiente, es muy probable que ocurra una declinación forestal, debido al desacoplamiento del hábitat para el que las especies forestales están adaptadas (Sáenz- Romero *et al.*, 2016).

Mover las poblaciones de especies forestales mediante intervención humana hacia los sitios en los cuales se predice ocurrirá el clima adecuado para ellas, se le conoce como “migración asistida” (Hewitt *et al.*, 2011). Dicha estrategia puede ser muy conveniente para aquellas especies donde su capacidad de migrar por medios naturales está siendo superada por la velocidad a la que está ocurriendo el cambio climático. Al movernos en altitud se puede correr el riesgo de que las especies sufran daños (principalmente por heladas) debido a que las condiciones que existen en el sitio aun no son las adecuadas (Viveros-Viveros *et al.*, 2009).

Una alternativa para evitar los daños al mover las especies en altitud, es mediante el uso de plantas nodrizas (Carbajal-Navarro *et al.*, 2019). Estas plantas crean bajo su dosel condiciones microclimáticas favorables para la especie protegida, favoreciendo de esta manera su desarrollo y supervivencia (Alday *et al.*, 2016).

Abies religiosa es una conífera de gran importancia tanto ecológica como económica para el país, además de ser el hábitat de la mariposa monarca durante el invierno. Sin embargo, de acuerdo algunas proyecciones, se predice una disminución del hábitat propicio para el *A. religiosa* a nivel nacional en un 96.5%, y una desaparición completa dentro de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) para finales de siglo (Sáenz- Romero *et al.*, 2012).

Por lo anterior, en el presente trabajo se continuó (a partir del trabajo previo de Carbajal-Navarro, 2018) la evaluación de la plantación de dos ensayos de procedencias de *Abies religiosa*, dentro del área núcleo de la RBMM. Las procedencias fueron originadas de un gradiente altitudinal; en ambos ensayos se usaron arbustos locales a manera de planta nodriza. Los resultados se abordan en dos capítulos: en el capítulo I se describe el crecimiento, supervivencia y el estrés de las procedencias al ser movidas en altitud de su sitio de origen. El capítulo II se hace una caracterización de las condiciones microclimáticas que la planta nodriza crea bajo su copa.

IV. HIPÓTESIS

Se sabe que las poblaciones se diferencian a lo largo de un gradiente altitudinal, por lo tanto, se espera encontrar diferencias genéticas para caracteres cuantitativos entre poblaciones *Abies religiosa* procedentes de un gradiente altitudinal. También, se espera que las plántulas de *A. religiosa* bajo el dosel de los arbustos utilizados a manera de planta nodriza estén sometidas a temperaturas menos extremas y a un mayor contenido de humedad en el suelo, que aquellas que se encuentran fuera de la protección de arbustos (sin planta nodriza). Por lo tanto, se espera que el efecto del uso de plantas nodrizas sobre las plántulas de oyamel sea positivo, aumentando la supervivencia y disminuyendo el estrés ambiental.

V. OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar si existen diferencias genéticas entre procedencias de *Abies religiosa* colectadas a lo largo de un gradiente altitudinal y evaluar la supervivencia y crecimiento de las plántulas cuando son plantadas bajo y fuera de la protección de arbustos locales que sirven como plantas nodriza.

Objetivos particulares

- Determinar diferencias genéticas entre procedencias de *A. religiosa* mediante la evaluación de caracteres cuantitativos .
- Evaluar la viabilidad del uso de arbustos locales a manera de planta nodriza en la supervivencia y crecimiento de plántulas de oyamel.
- Caracterizar el microclima presente bajo plantas nodriza y fuera de ellas (a cielo abierto), a lo largo de las estaciones del año.

VI. RESULTADOS

Capítulo I

“Efecto del uso de plantas nodrizas en dos reforestaciones con *Abies religiosa* dentro de la Reserva de Biósfera Mariposa Monarca”

RESUMEN

Considerando las predicciones de la disminución del hábitat propicio debido al cambio climático para *Abies religiosa*, se establecieron dos ensayos de procedencias de dicha especie con fines de restauración (Las Palomas a 3440 m de altitud, en junio 2015 y Los Ailes a 3360 m, en julio 2017), con planta (2 años de edad) colectadas a lo largo de un gradiente altitudinal, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar, con y sin la protección de plantas nodriza (arbustos locales), dentro del área núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. En los dos sitios se obtuvo un mayor porcentaje de supervivencia utilizando plantas nodrizas (67% a los 4 años 6 meses de la plantación en Las Palomas y 93% 2 años 5 meses, en Los Ailes), que sin el uso de éstas (11% y 6% respectivamente) ($P < 0.0001$). Las plántulas bajo el dosel de los arbustos presentan un índice significativamente menor de estrés (1.4 en los Ailes y 2.9 Las Palomas) que aquellas que se encuentran fuera de estos (5.5 para ambos sitios) (Las Palomas: $P = 0.0006$; Ailes: $P < 0.001$) y un mayor incremento en altura. En el sitio de los Ailes se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre procedencias para las variables de incremento en diámetro, supervivencia, incremento en altura e índice de estrés. En este estudio mostramos que el uso de plantas nodrizas en reforestaciones con *A. religiosa* es una buena estrategia que aumenta la supervivencia además de disminuir el estrés, creando condiciones favorables bajo su dosel, lo cual será muy relevante, valorando los impactos proyectados del cambio climático.

ABSTRACT

Considering predictions of the reduction in suitable climatic habitat for *Abies religiosa*, two provenance field test of this species were established for restoration purposes (Las Palomas at 3440 m, in June 2015, and Los Ailes at 3360 m altitude, in July 2017), with seedlings (2 years old) originated from seed collected along an altitude gradient, under an randomized complete block design, with and without nurse plants (local shrubs), within the core area of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR). In both test sites a higher percentage of survival was obtained using nurse plants (67% at 4 years 6 months after field planting in Las Palomas and 93% 2 years 5 months, in Los Ailes), than without the use of these (11% and 6% respectively) ($P < 0.0001$). Seedlings under the canopy of shrubs have a lower stress index (1.4 in the Ailes and 2.9 Las Palomas) than those outside them (5.5 for both test sites) (Las Palomas: $P = 0.0006$; Ailes: $P < 0.001$) and a greater increase in seedling height. Statistically significant differences between sources for the variables of increase in diameter, survival, height increase and stress index were found at the Ailes test site. In this study we show that the use of nurse plants in reforestations with *A. religiosa* is a good strategy that increases survival in addition to reducing stress, creating favorable conditions under its canopy, which will be very relevant, considering the projected impacts of climate change.

1.1 INTRODUCCIÓN

Abies religiosa comúnmente conocido como oyamel es una especie que se distribuye a elevada altitud, entre los 2400 y 3600 msnm a lo largo del Eje Neovolcánico Transversal (Sánchez-Velásquez *et al.*, 1991; Rzedowski, 2006). Los bosques de *Abies religiosa* tienen una variedad de importancias ecológicas, económicas y culturales, entre ellas destaca su importancia en la absorción de agua de lluvia, captación de dióxido de carbono (Bolaños- González *et al.*, 2017), utilidad de su madera en la obtención de pulpa para papel y la fabricación de diferentes artículos (Benavides-Meza *et al.*, 2011). Las poblaciones de oyamel dentro de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) ubicadas a una altitud de 2900 a 3400 msnm son el hábitat en donde las poblaciones migratorias de mariposa monarca (*Danaus plexippus*) pasan el invierno (Anderson y Brower, 1996; Oberhauser y Peterson, 2003).

Por otro lado, según algunas estimaciones, el cambio climático significará para México un incremento de la temperatura media anual de 3.7° C y una disminución de la precipitación de 18.2% para el 2090, la combinación de ambos provocará que el país tenga un clima más árido (Sáenz-Romero *et al.*, 2010). Lo anterior causará un desacoplamiento del hábitat para el que las especies de coníferas están adaptadas. El desacoplamiento entre las poblaciones naturales y el clima para el cual están adaptadas provocará probablemente una mayor declinación forestal (Sáenz- Romero *et al.*, 2016). En particular para el caso del hábitat adecuado de *A. religiosa* se predice una disminución (a nivel nacional) del 69.2 % para 2030, 87.6 % para 2060 y de 96.5% para 2090 (Sáenz- Romero *et al.*, 2012).

Ante estos escenarios de pérdida forestal, los ensayos de procedencia nos permiten evaluar las diferencias genéticas mediante la medición de caracteres cuantitativos. Las variaciones genéticas entre poblaciones de una misma especie les permiten sobrevivir, crecer, competir y reproducirse en un ambiente determinado. Mediante la cuantificación de esas variaciones podemos determinar que poblaciones son las más propicias a utilizar en programas de reforestación y migración asistida teniendo en cuenta los climas futuros (Soto-Correa *et al.*, 2012; Ortiz- Bibian *et al.*, 2017)

Aunado a esto, las plantas nodrizas tienen un papel muy importante como una estrategia eficaz de reforestación y restauración (Encino-Ruiz *et al.*, 2013; Costa *et al.*, 2017). Se ha documentado que al menos para los primeros años de vida de los oyameles, las plantas nodrizas

son importantes para su supervivencia (Blanco-García *et al.*, 2011; Carbajal-Navarro, 2018). Estas plantas, que en su gran mayoría son arbustos, crean condiciones favorables bajo sus copas, reduciendo la temperatura y evaporación del agua del suelo, es así como ofrecen la oportunidad de acelerar la recuperación de hábitat, al permitir el restablecimiento adecuado de árboles en zonas degradadas (Nepote *et al.*, 2010-2011; Alday *et al.*, 2016). Otra estrategia eficaz de restauración es el uso de plantas de regeneración natural, estas además de ser una buena estrategia nos permite disminuir costos en plantaciones forestales (Castro *et al.*, 2004).

1.2 MARIALES Y MÉTODOS

Fueron establecidos dos ensayos de procedencias, el primero de ellos en junio del 2015 en el paraje Las Palomas a 3440 m de altitud (Carbajal-Navarro, 2018) y el segundo en julio del 2017 en el paraje Los Ailes a una altitud de 3360 m. Ambos ensayos se encuentran dentro del área núcleo de la Reserva de Biósfera Mariposa Monarca, Ejido La Mesa, Municipio de San José del Rincón, Estado de México. Los detalles del establecimiento de cada uno de los ensayos se describen a continuación:

1.2.1 Paraje Las Palomas

Como parte de un proyecto previo de Maestría (Ortiz-Bibian, 2017), fueron colectadas semillas de polinización abierta de 11 árboles seleccionados al azar a lo largo de un gradiente altitudinal en el Cerro de San Andrés, Michoacán, México, obteniéndose un total de 12 procedencias, las cuales fueron sembradas en un vivero forestal en la ciudad de Morelia Michoacán, permaneciendo ahí por un año. Posteriormente las plántulas fueron trasladadas a un vivero comunal (Ejido Los Remedios a 3000 msnm) dentro de la Reserva de Biósfera Mariposa Monarca, en el cual permanecieron durante su segundo año de vida como tratamiento de endurecimiento. Para el ensayo de procedencias en campo (parte de un proyecto previo de maestría por Carbajal-Navarro, 2018) fueron utilizadas 10 de las 12 procedencias debido a la alta mortalidad de algunas de ellas.

Las plántulas correspondientes a las 10 procedencias (Fig. 1; Cuadro 1) fueron plantadas en junio del 2015 (Carbajal-Navarro *et al*, 2018), en el paraje Las Palomas a 3440 msnm, ubicado dentro de la zona núcleo de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, en el Ejido la Mesa, Municipio de San José del Rincón, Estado de México

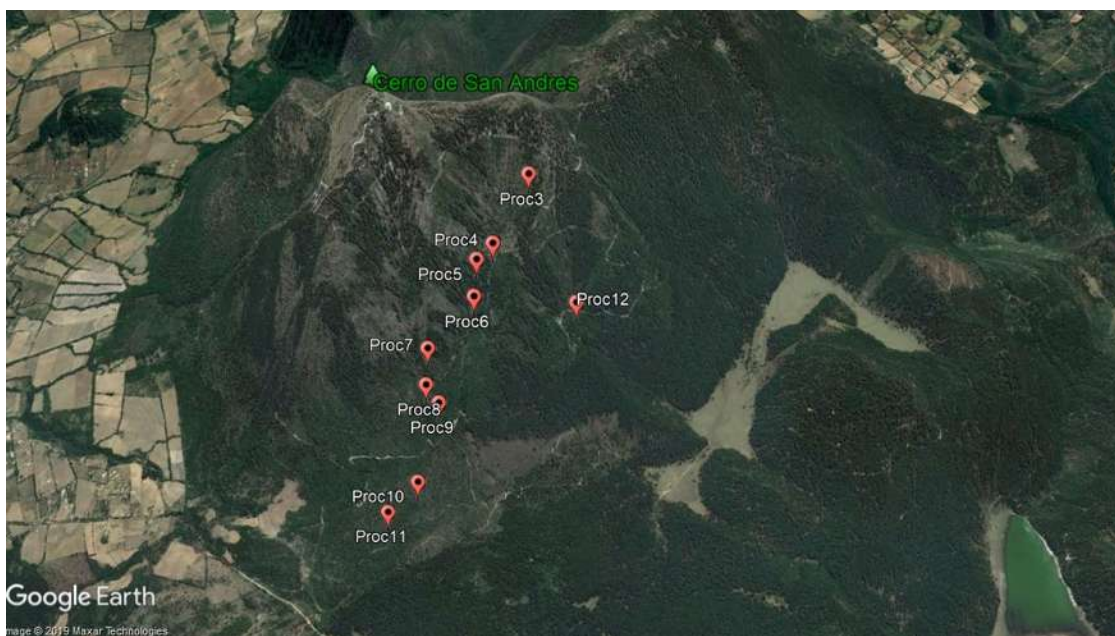


Figura 1. Mapa del sitio de colecta a lo largo del Cerro de San Andrés (cumbre indicada con símbolo verde) de las diez procedencias ensayadas (símbolos rojos).

Cuadro 1. Coordenadas geográficas, elevación, media anual de temperatura (MAT) y media anual de precipitación (MAP) para cada una de las procedencias y el sitio de ensayo. Las variables climáticas de las procedencias corresponden al periodo 1961-1990 y para el sitio del ensayo, corresponden al periodo 2001-2010 (obtenidos de ClimateNa_v5.60).

Población	Altitud (msnm)	Latitud (N)	Longitud (W)	MAT (°C)	MAP (mm)
3	3,450	19° 48' 06.3"	100° 36' 10.3"	9.3	1384
4	3,400	19° 48' 19.0"	100° 36' 13.5"	9.5	1376
5	3,350	19° 48' 20.2"	100° 36' 13.8"	9.8	1368
6	3,300	19° 48' 23.8"	100° 36' 18.6"	10	1361
7	3,250	19° 48' 36.1"	100° 36' 16.3"	10.1	1395
8	3,200	19° 48' 38.0"	100° 36' 20.6"	10.4	1364
9	3,150	19° 48' 40.9"	100° 36' 26.4"	10.7	1355
10	3,100	19° 48' 49.0"	100° 36' 31.2"	10.9	1345
11	3,050	19° 48' 58.7"	100° 36' 30.6"	11.2	1335
12	3,000	19° 49' 10.1"	100° 36' 28.4"	11.5	1311
Sitio del ensayo de procedencias					
Las Palomas	3,440	19° 34' 21.4''	100° 14' 18.2''	9.8	1056

El diseño experimental consistió de 10 bloques completos al azar, cada bloque tiene 12 parcelas (cada parcela presenta tres individuos por procedencia). Los bloques tienen un arreglo cuadrangular de 1.5 x 1.5 metros y se establecieron bajo dos tratamientos; 1. Cinco bajo arbustos

de regeneración natural (a manera de planta nodriza; *Baccharis conferta*, *Ribes ciliolata*, *Salix paradoxa* y *Senecio cinerarioides*) 2. Cinco sin planta nodriza.

1.2.2 Paraje los Ailes

Plántulas de *A. religiosa* recién emergidas fueron obtenidas (periodo de lluvias 2015) mediante rescate de regeneración natural a lo largo de un gradiente altitudinal, dentro de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) (Fig. 2). Cada individuo fue identificado en campo de acuerdo a su procedencia altitudinal, obteniendo un total de seis procedencias (3450, 3350, 3239, 3157, 3052 y 2960 msnm) (Cuadro 2).

Posteriormente las plántulas etiquetadas de acuerdo a su procedencia fueron trasplantadas, en un vivero comunitario en el Ejido La Mesa, Municipio de San José del Rincón, Estado de México, donde permanecieron los primeros dos años de vida (Cruzado-Vargas *et al.*, 2020).



Figura 2. Plántula de regeneración natural (fuente: Cruzado-Vargas, 2017)

Cuadro 2. Coordenadas geográficas, elevación, media anual de temperatura (MAT) y media anual de precipitación (MAP) para cada una de las procedencias y el sitio de ensayo. Las variables climáticas de las procedencias corresponden al periodo 1961-1990 y para el sitio del ensayo, corresponden al periodo 2001-2010 (obtenidos de ClimateNa_v5.60).

Población	Altitud (msnm)	Latitud (N)	Longitud (W)	MAT (°C)	MAP (mm)
1	3,450	19° 34' 05.4"	100° 13' 53.0"	9.3	1066
2	3,350	19° 34' 28.0"	100° 13' 05.5"	9.8	1043
3	3,239	19° 34' 44.2"	100° 12' 51.6"	10.3	1024
4	3,157	19° 35' 24.0"	100° 12' 31.2"	10.7	1005
5	3,052	19° 35' 44.5"	100° 12' 06.9"	11.2	991
6	2,960	19° 36' 56.0"	100° 11' 13.3"	11.6	971
Sitio del ensayo de procedencias					
Los Ailes	3,360	19° 34' 30.0"	100° 14' 31.2"	10.3	1090

La siembra de las plántulas se llevó a cabo durante el mes de julio del 2017, en el paraje Los Ailes, Ejido la Mesa, Estado de México, a 3360 msnm (Fig. 3). El diseño experimental consistió en un total de 70 bloques completos al azar, con una planta por procedencia en cada bloque; 50 bloques fueron colocados bajo planta nodriza (arbustos de regeneración natural: *Baccharis conferta*, *Ribes ciliatum*, *Juniperus monticola*, *Salix paradoxa*) (Fig. 4a), y 20 bloques adicionales sin planta nodriza (fuera del dosel de arbustos). Cada uno de los bloques se plantaron con una forma circular; en el tratamiento con nodriza, estos fueron colocados alrededor del tallo del arbusto nodriza, bajo el dosel del mismo, y alrededor de un punto imaginario para aquellos bloques sin planta nodriza (Fig. 4b). El acomodo circular de los bloques fue con la intención de poder asegurar que cada plántula de oyamel bajo el dosel de la planta nodriza pudiera recibir aproximadamente la misma sombra.

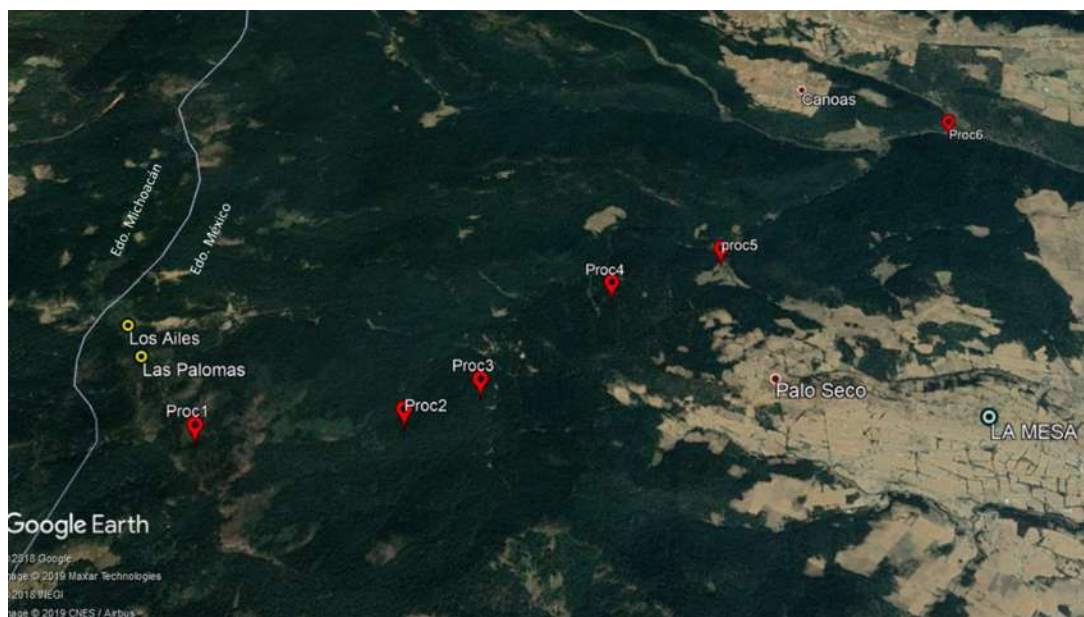


Figura 3. Mapa del sitio de establecimiento de los ensayos de procedencias (círculos amarillos: Paraje Los Ailes 3360 msnm y Paraje las Palomas 3440 msnm, Ejido la Mesa, Estado de México, área núcleo RBMM) y sitios de colecta de las procedencias ensayadas para el sitio de Los Ailes (símbolos rojos).

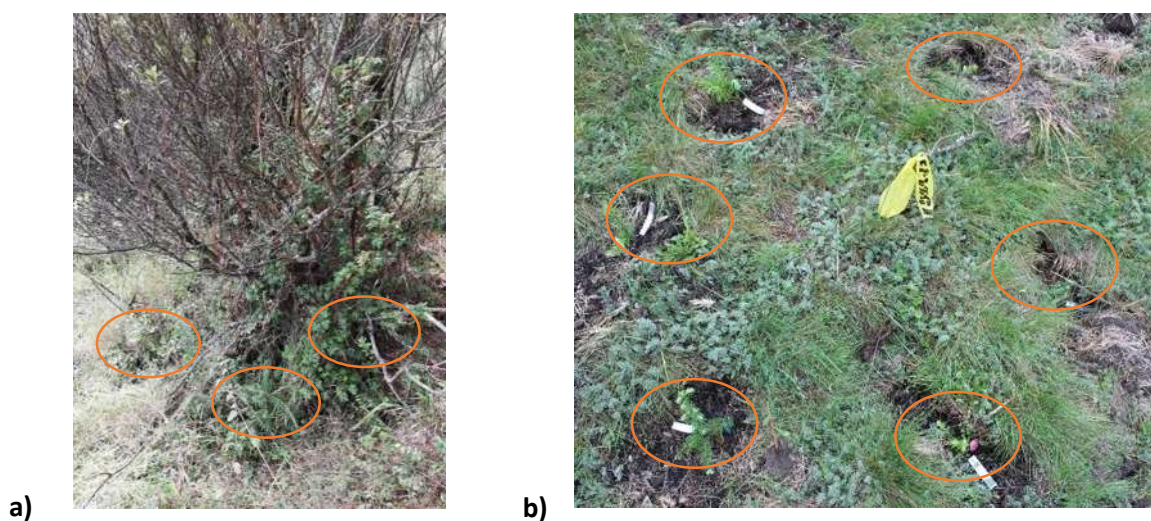


Figura 4. Ensayo de procedencias en campo (50 bloques con planta nodriza y 20 sin nodriza): (a) tratamiento con nodriza (arbustos de regeneración natural, círculos naranjas para resaltar el acomodo de las plántulas bajo el dosel del arbusto), (b) tratamiento sin planta nodriza (círculos naranjas para resaltar el acomodo de las plántulas de oyamel).

1.2.3 Evaluaciones en campo

En ambos sitios las variables evaluadas fueron: bimestralmente supervivencia, altura de la planta y semestralmente diámetro basal. Durante el comienzo de la época de secas después de la plantación (marzo) y posteriormente (cada dos meses aproximadamente) se evaluó el estrés con el índice desarrollado por Carbajal-Navarro, 2018 y colaboradores (anexo). Para el caso de los Ailes las evaluaciones comenzaron un mes después de su plantación (agosto 2017) concluyendo en diciembre 2019. En el sitio de las Palomas dichas evaluaciones comenzaron en agosto 2015 y cesaron en noviembre 2017, posteriormente fueron retomadas a principios de diciembre del 2018 concluyendo en diciembre 2019.

1.2.4 Análisis estadísticos

Para determinar diferencias estadísticas significativas entre tratamientos y procedencias se realizó un análisis de varianza mediante Modelos Lineales Generalizados (GLM). Para el caso particular de la supervivencia (considerando que esta variable presenta una distribución binomial), se realizó un GLM mediante distribución binomial en el paquete estadístico R versión 3.6.1. Las variables de incremento en altura, vigor e incremento en diámetro fueron analizadas mediante el paquete estadístico SAS versión 9.3 utilizando Proc GLM (Sas Institute, 2004).

1.3 RESULTADOS

1.3.1 Supervivencia

En ambos sitios se obtuvo un porcentaje mucho mayor de supervivencia bajo el tratamiento con nodriza (93% para el sitio de los Ailes a los 2 años, 5 meses de plantación y un 67% para Las Palomas a los 4 años, 6 meses de plantación). En contraste, supervivencia fue mucho menor cuando las plántulas son plantadas fuera de la protección de los arbustos, es decir, en el tratamiento sin nodriza (6% Los Ailes y 11% Las Palomas) (Fig. 5 y 6). Se encontró una diferencia significativa entre tratamientos ($P < 0.0001$ en cada sitio) (Cuadro 3).

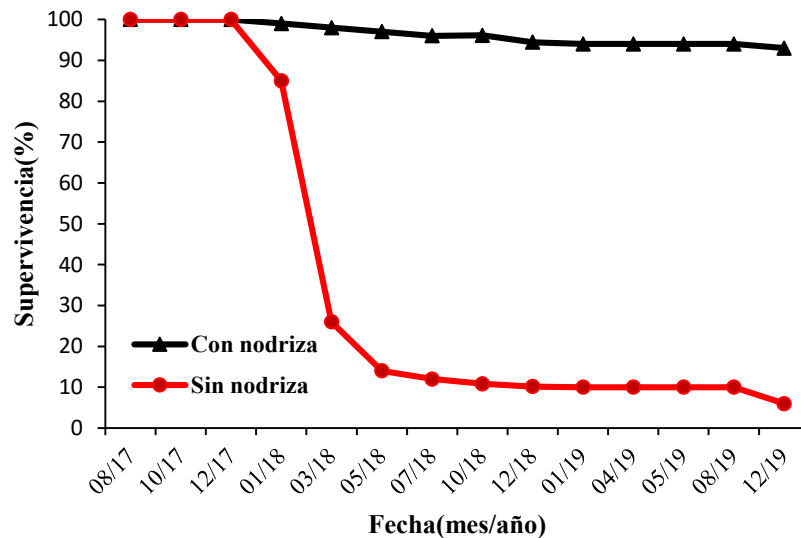


Figura 5. Porcentaje de supervivencia (promedio entre procedencias) entre tratamientos. Sitio Los Ailes

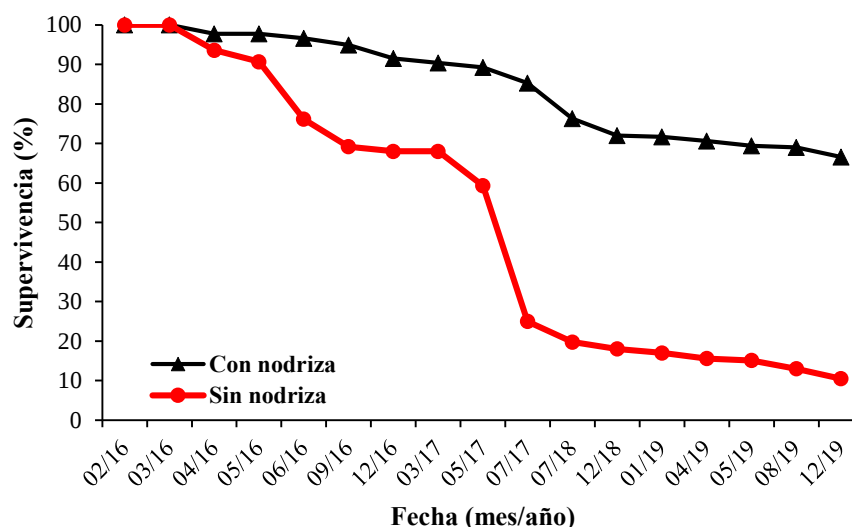


Figura 6. Porcentaje de supervivencia (promedio entre procedencias) entre tratamientos. Sitio las Palomas

Cuadro 3. Análisis de varianza para la variable supervivencia entre tratamientos en cada uno de los sitios de ensayo. Análisis por distribución binomial.

<i>FV</i>	<i>g.l</i>	χ^2	<i>P</i>
Los Ailes			
<i>Tratamientos</i>	1	329.4	<0.0001
<i>Procedencias</i>	5	15.8	0.0073
<i>Bloque (tratamiento)</i>	69	86.1	0.0793
<i>Error</i>	344	-----	-----
Las Palomas			
<i>Tratamiento</i>	1	123.1	<0.0001
<i>Procedencias</i>	9	6.4	0.6998
<i>Bloque (tratamiento)</i>	8	44.9	<0.0001
<i>Tratamiento*Procedencia</i>	9	20.4	0.0157
<i>Procedencia*Bloque (tratamiento)</i>	70	-4628.0	1.0000
<i>Error</i>	251	-----	-----

Como se mencionó con anterioridad, los promedios por procedencia en el tratamiento con planta nodriza presentaron valores más altos de supervivencia, los cuales van de un 98% a 86% para el caso de los Ailes (Fig. 7a) y de un 87% a 44% para Las Palomas (Fig. 8a), mientras que, en el tratamiento sin nodriza, para ambos sitios los valores van de 20% a 0% (Fig. 7b y 8b).

Realizando el análisis de varianza separadamente por tratamiento (con y sin nodriza), para ambos sitios no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre procedencias en el tratamiento con nodriza (Ailes: $P=0.1589$; Las Palomas: $P=0.2570$) (Cuadro 4 y 5).

Para el tratamiento sin planta nodriza, el sitio de los Ailes mostró diferencias estadísticamente significativas entre procedencias ($P=0.0044$) (Cuadro 4), siendo la procedencia originada a mayor altitud (3450 msnm) y, por lo tanto, cercana en altitud al sitio de plantación la que mostró una media más alta en porcentaje de supervivencia con respecto a las demás.

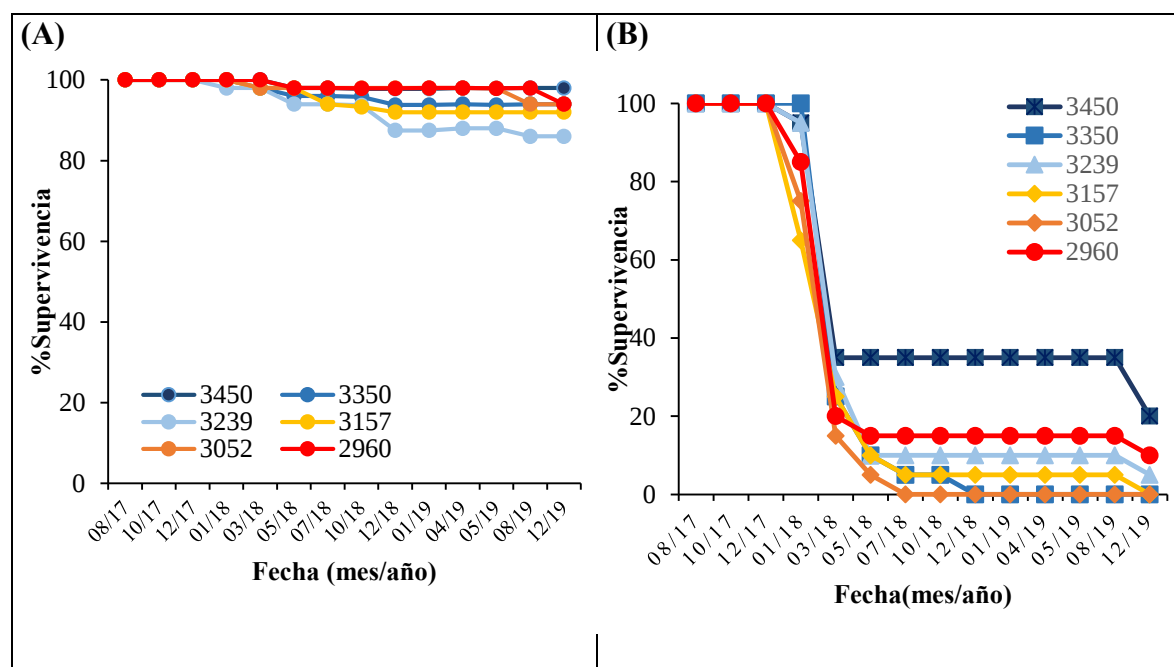


Figura 7. Porcentaje de supervivencia por procedencias para el sitio de los Ailes: (a) tratamiento con nodriza; (b) tratamiento sin nodriza.

Cuadro 4. Análisis de varianza de supervivencia por tratamiento. Sitio Los Ailes.

FV	Con nodriza			Sin nodriza		
	<i>g.l</i>	χ^2	P	<i>g.l</i>	χ^2	P
Procedencias	5	7.9	0.1589	5	17.0	0.0044
Bloque	49	62.8	0.0885	19	26.4	0.1175
Error	245	-----	-----	95	-----	-----

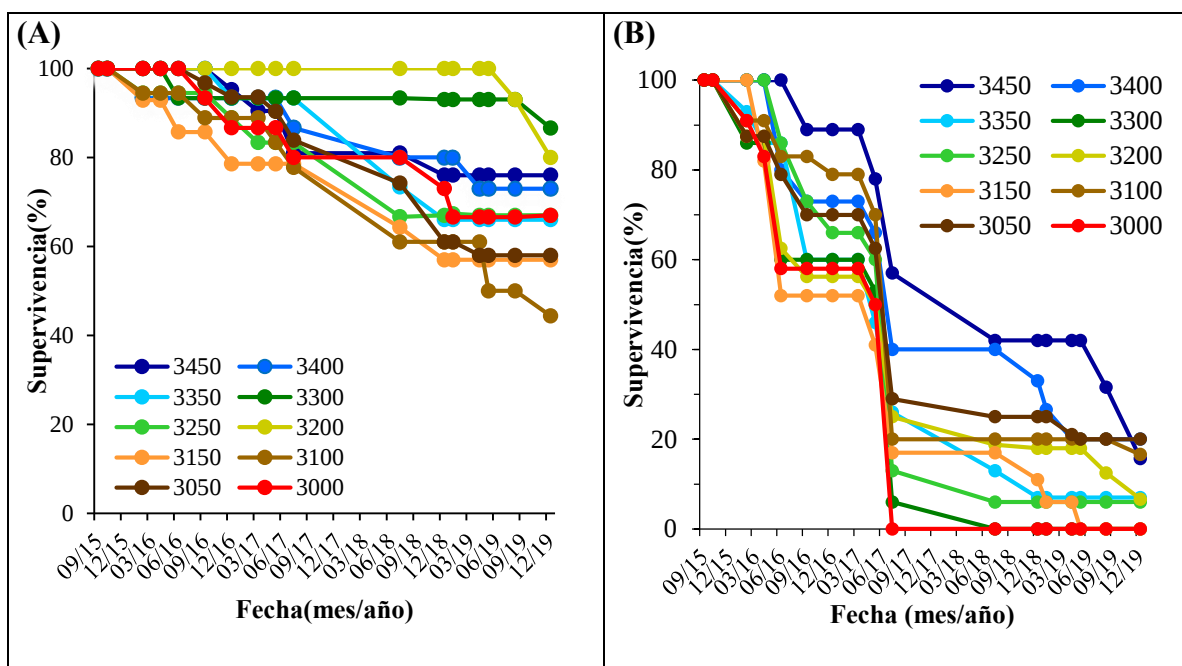


Figura 8. Porcentaje de supervivencia por procedencias para el sitio de Las Palomas: (a) tratamiento con nodriza; (b) tratamiento sin nodriza.

Cuadro 5. Análisis de varianza de supervivencia por tratamiento. Sitio Las Palomas.

FV	Con nodriza			Sin nodriza		
	<i>g.l</i>	χ^2	P	<i>g.l</i>	χ^2	P
<i>Procedencias</i>	9	11.2	0.2570	9	15.4	0.0781
<i>Bloque</i>	4	20.2	<0.0001	4	24.6	<0.0001
<i>Procedencia*Bloque</i>	36	49.2	0.0699	34	19.4	0.9785
<i>Error</i>	127	-----	-----	124	-----	-----

1.3.2 Incremento en altura

En general, tanto para el sitio de las Palomas como Los Ailes, las procedencias bajo el tratamiento con planta nodriza presentaron un mayor incremento en altura (Fig. 9 y 10). En el sitio de Los Ailes (2 años, 5 meses de la plantación) las plántulas en el tratamiento con nodriza mostraron en promedio un incremento en altura de 26.3 cm, mientras que las plántulas sin planta nodriza presentaron en promedio un incremento de 16.4 cm (Fig. 9). De manera similar, para el sitio de Las Palomas el incremento promedio (4 años, 6 meses de la plantación) fue de 71.4 cm (con planta nodriza) y 57.8 cm (sin planta nodriza). Sin embargo, no se encontraron diferencias

estadísticamente significativas entre tratamientos para ninguno de los dos sitios (Los Ailes $P=0.0683$; Las Palomas: $P=0.7769$) (Cuadro 6). El número de plantas vivas en cada uno de los tratamientos en ambos sitios (Con nodriza: $N=279$, 118 Los Ailes y Las Palomas respectivamente; sin nodriza: $N=7$, 19 Los Ailes y Las Palomas respectivamente) podría estar disminuyendo la robustez del análisis estadístico.

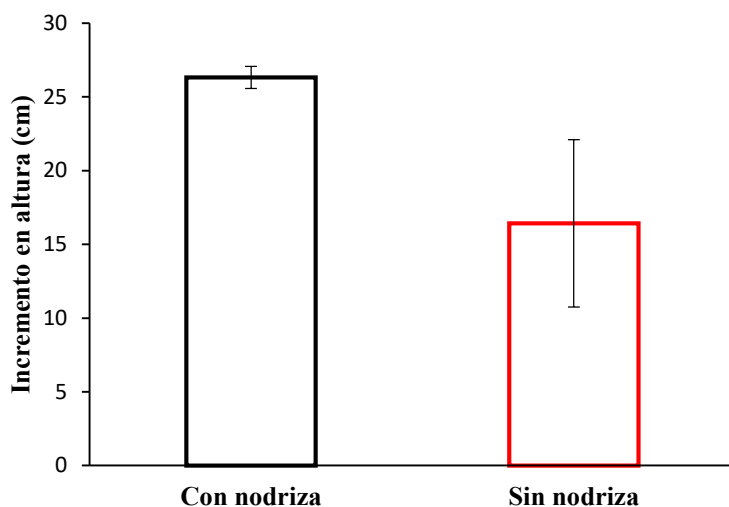


Figura 9. Incremento promedio en altura en cada tratamiento. Los Ailes. 2 años, 5 meses de la plantación.

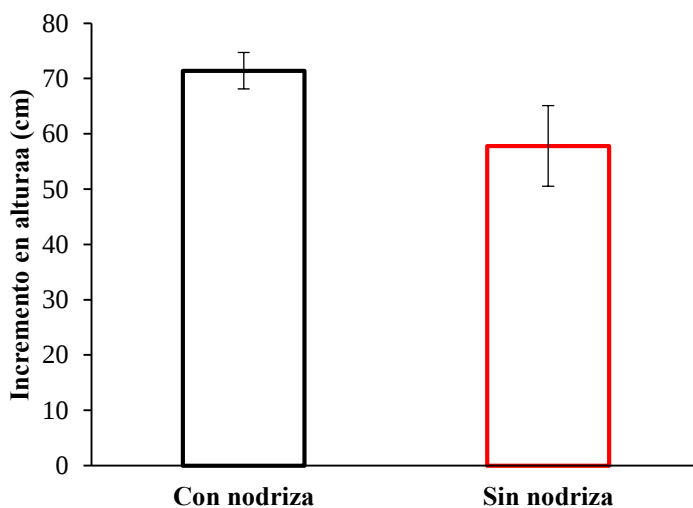


Figura 10. Incremento promedio en altura en cada tratamiento. Las Palomas a los 4 años, 6 meses de la plantación.

Cuadro 6. Análisis general de varianza entre tratamientos en cada una de los sitios de ensayo para la variable incremento en altura.

<i>FV</i>	<i>g.l</i>	<i>CM</i>	<i>P</i>
<i>Los Ailes</i>			
<i>Tratamientos</i>	1	552.6	0.0683
<i>Procedencias</i>	5	298.2	0.0245
<i>Bloque (tratamiento)</i>	53	320.0	<0.0001
<i>Error</i>	226	113.2	-----
<i>Las Palomas</i>			
<i>Tratamiento</i>	1	133.8	0.7769
<i>Procedencias</i>	9	1759.0	0.5485
<i>Bloque (tratamiento)</i>	7	3844.6	0.0031
<i>Tratamiento*Procedencia</i>	5	701.3	0.6712
<i>Procedencia*Bloque (tratamiento)</i>	36	1138.3	0.2491
<i>Error</i>	77	948.4	-----

De los dos sitios de ensayo, sólo Los Ailes presentó diferencias estadísticamente significativas entre procedencias ($P=0.0245$) (Cuadro 6), siendo la procedencia más cercana al sitio (3350 msnm) la que muestra un mayor incremento en altura, seguida de la procedencia originada a una menor altitud (2960 msnm) (Fig. 11a).

Tanto para el sitio de Las Palomas como para Los Ailes no se encontró una correlación estadísticamente significativa entre la transferencia altitudinal (altitud del sitio de ensayo menos la altitud de origen), y el incremento en altura (Los Ailes: $P=0.4545$, $R^2=0.1369$; Las Palomas: $P=0.2927$, $R^2=0.1369$). Sin embargo, ambos sitios tienen una ligera tendencia a presentar un mayor incremento en altura en aquellas procedencias originadas a una mayor altitud (y por lo tanto cercanas al sitio de ensayo). Este incremento en altura de planta disminuye conforme disminuye la altitud de origen; es decir, las procedencias originadas a una menor altitud tienden a presentar un menor incremento en altura (Fig. 11).

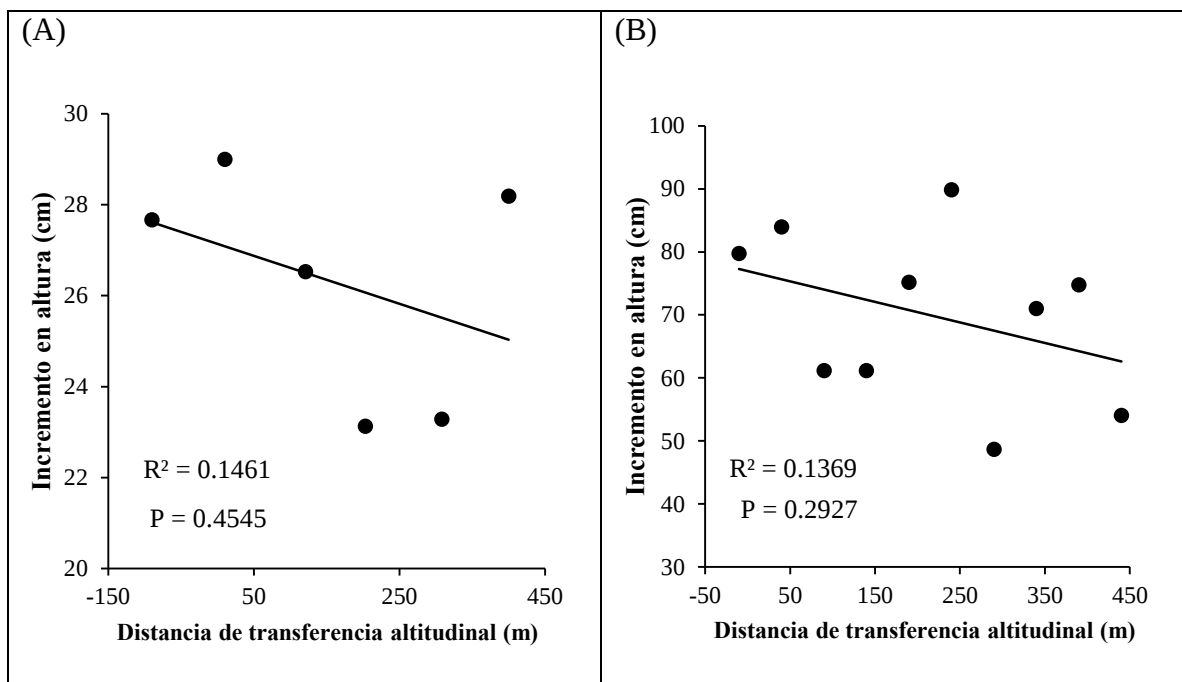


Figura 11. Incremento en altura con respecto a la altitud de origen de la plántula: (a) Los Ailes; (b) Las Palomas. Eje x representa la diferencia entre la altitud del sitio de ensayo menos la altitud del sitio de origen de la plántula. Valores negativos representan disminución en altitud con respecto al sitio de origen (transferencia hacia sitios más cálidos que el origen), valores positivos un aumento en altitud respecto al sitio de origen (transferencia hacia sitios más fríos que el origen) .

1.3.3 Incremento en diámetro

Para ambos sitios se registró un mayor incremento en diámetro en aquellas plántulas fuera del dosel de arbustos; es decir, en el tratamiento sin nodriza (Fig. 12 y 13). Los Ailes presentó un incremento de 6.1 mm y las Palomas de 11.1 mm. En contraste en el tratamiento con nodriza dicho incremento fue de 3.4 mm y 9.8 (Los Ailes y Las Palomas, respectivamente). Sin embargo, solo el sitio de los Ailes mostró una diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos ($P = <0.0001$) (Cuadro 7).

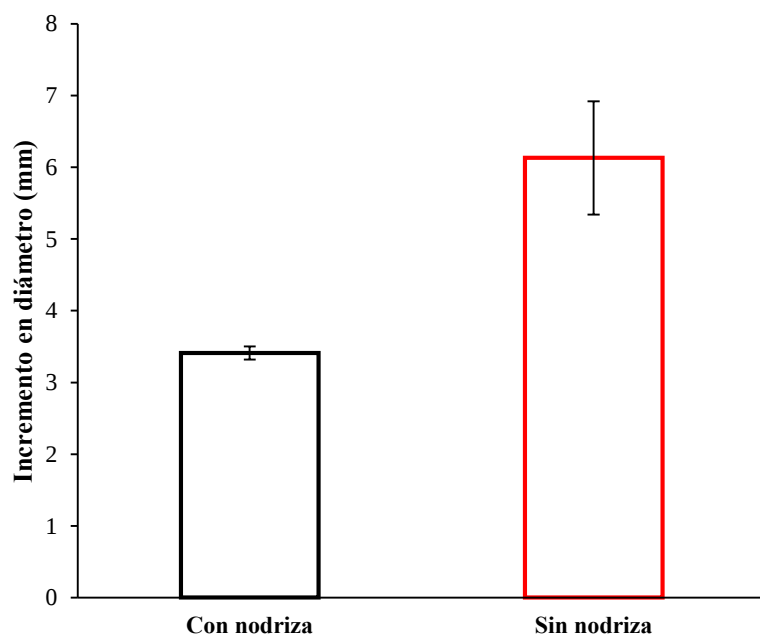


Figura 12. Incremento promedio en diámetro en cada tratamiento. Sitio Los Ailes.

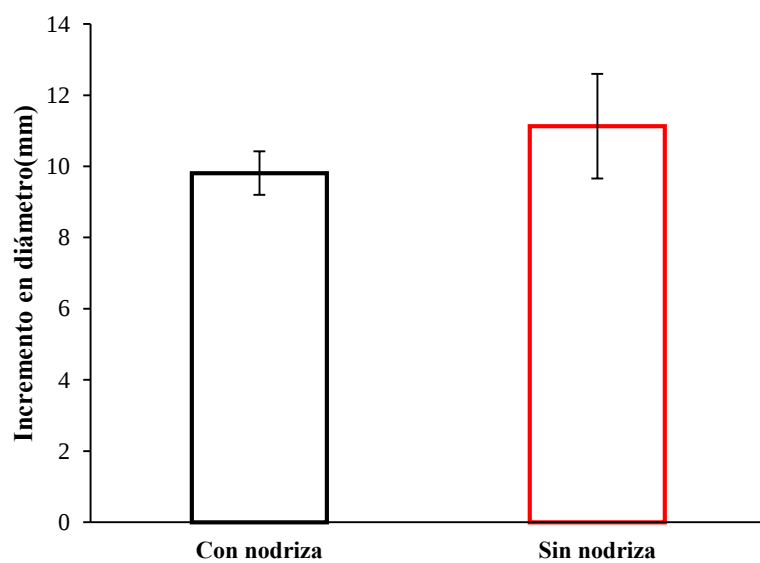


Figura 13. Incremento promedio en diámetro en cada tratamiento. Sitio Las Palomas.

Cuadro 7. Análisis de varianza entre tratamientos en cada uno de los sitios de ensayo para la variable incremento en diámetro.

<i>FV</i>	<i>g.l</i>	<i>CM</i>	<i>P</i>
<i>Los Ailes</i>			
<i>Tratamientos</i>	1	72.3	<0.0001
<i>Procedencias</i>	5	3.86	0.0438
<i>Bloque (tratamiento)</i>	55	5.46	<0.0001
<i>Error</i>	227	1.66	-----
<i>Las Palomas</i>			
<i>Tratamiento</i>	1	111.18	0.1562
<i>Procedencias</i>	9	61.52	0.4760
<i>Bloque (tratamiento)</i>	7	89.78	0.0841
<i>Tratamiento*Procedencia</i>	5	34.97	0.5877
<i>Procedencia*Bloque (tratamiento)</i>	37	51.54	0.0287
<i>Error</i>	84	31.01	-----

En el sitio de Las Palomas no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre procedencias ($P=0.4760$) (Cuadro 7), mientras que en el sitio de Los Ailes sí se encontraron dichas diferencias ($P=0.0438$), siendo la procedencia más cercana al sitio de plantación (procedencia local, altitud de 3350 m) la que mostró un mayor incremento en diámetro.

De acuerdo a los resultados del análisis de correlación, no se encontró una correlación significativa entre el origen de la planta y el incremento en diámetro (Los Ailes: $R^2= 0.5692$, $P=0.0831$; Las Palomas: $R^2= 1033$, $P= 0.3651$). Sin embargo, las procedencias originadas a una mayor altitud muestran una ligera tendencia de un mayor incremento en diámetro (Fig. 14), comparado con las originadas a una menor altitud. Dicha tendencia es más pronunciada para el sitio de los Ailes (Fig. 14 a). Además, en este sitio se puede observar cómo la procedencia más cercana al sitio de ensayo (3350 msnm) presenta una mayor adaptación; esta adaptación se ve reflejada en un mayor incremento en diámetro.

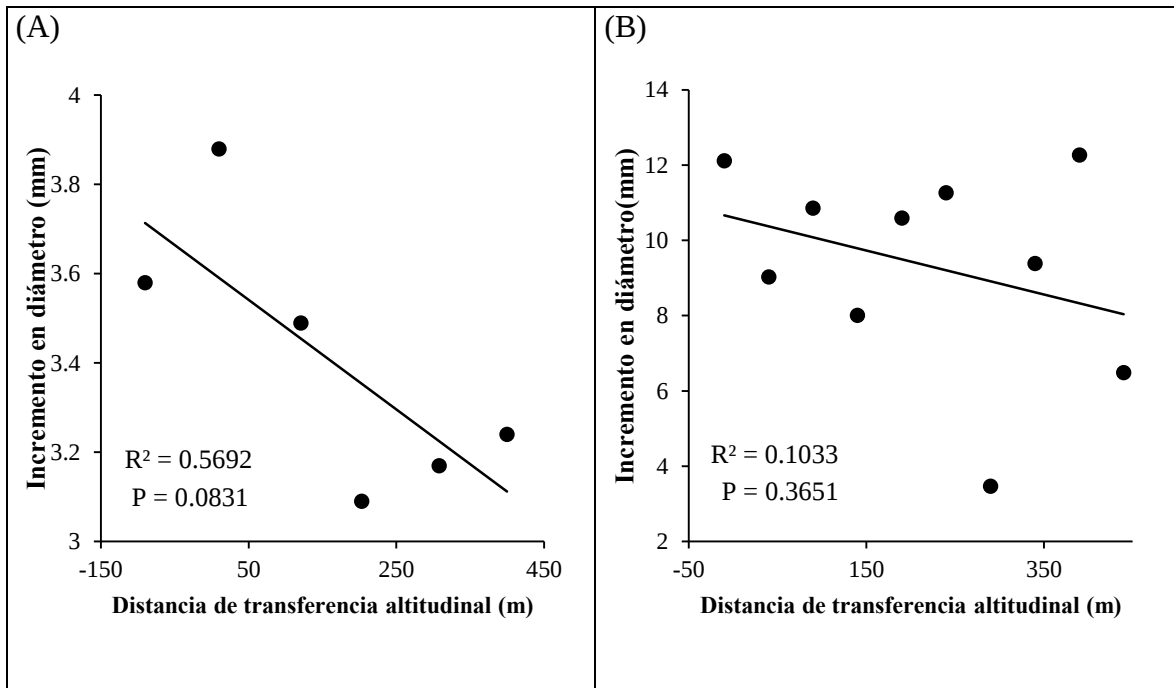


Figura 14. Incremento en diámetro con respecto a la altitud de origen de la plántula: (a) Los Ailes; (b) Las Palomas. Eje x representa la diferencia altitudinal entre el sitio de ensayo menos el sitio de origen de la plántula. Valores negativos representan una disminución en altitud con respecto al sitio de origen (trasferencia a sitios más cálidos); valores positivos un aumento en altitud respecto al sitio de origen (trasnsferencia a sitios más fríos).

1.3.4 Índice de estrés

Las plántulas bajo planta nodriza presentaron una media de 1.4 (Los Ailes; valores bajos del índice indican poco estrés) y 2.9 (Las Palomas), mientras que aquellas sin planta nodriza presentaron una media de 5.7 (Los Ailes; valores elevados del índice indican mayor estrés) y 5.5 (Las Palomas). Por lo tanto, podemos decir que las plántulas bajo la protección de las nodrizas se encuentran menos estresadas en comparación con las que se encuentran fuera de los arbustos (tratamiento sin nodriza) (Fig. 15 y 16). En ambos sitios se entraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (Los Ailes: $P < 0.0001$; Las Palomas $P = 0.0006$) (Cuadro 8).

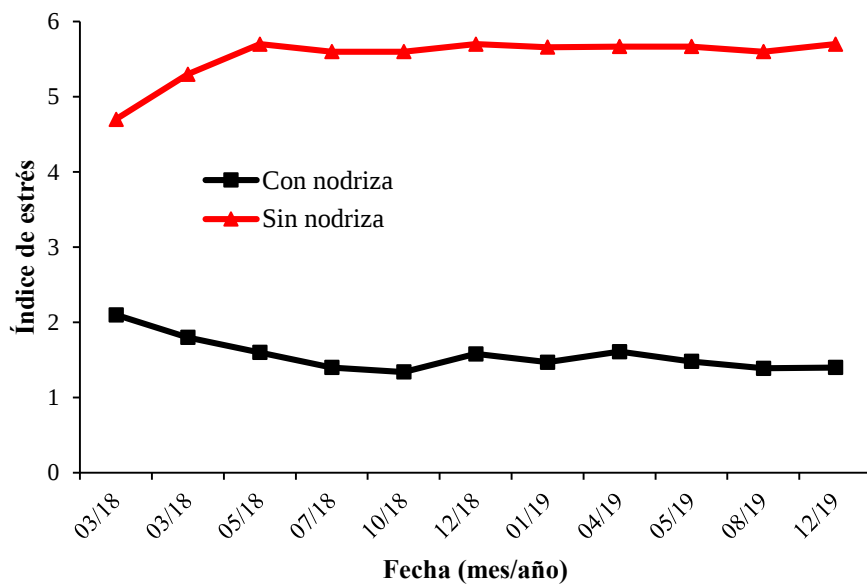


Figura 15. Índice promedio de estrés para cada uno de los tratamientos. Sitio Los Ailes. Valores más altos del índice indican un mayor estrés.

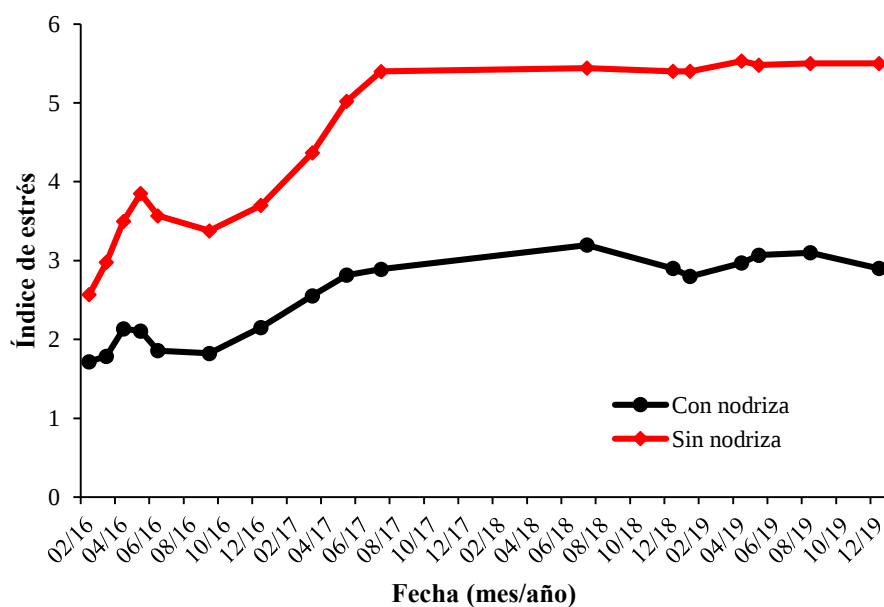


Figura 16. Índice promedio de estrés para cada uno de los tratamientos. Sitio Las Palomas. Valores más altos del índice indican un mayor estrés.

Cuadro 8. Análisis de varianza entre tratamientos en cada una de los sitios de ensayo para la variable índice de estrés.

<i>FV</i>	<i>g.l</i>	<i>CM</i>	<i>P</i>
<i>Los Ailes</i>			
<i>Tratamientos</i>	1	1553.6	<0.0001
<i>Procedencias</i>	5	3.3	0.0152
<i>Bloque (tratamiento)</i>	69	1.8	0.0257
<i>Error</i>	342	1.3	-----
<i>Las Palomas</i>			
<i>Tratamiento</i>	1	508.4	0.0006
<i>Procedencias</i>	9	2.8	0.8389
<i>Bloque (tratamiento)</i>	8	17.9	<0.0001
<i>Tratamiento*Procedencia</i>	9	5.6	0.0865
<i>Procedencia*Bloque (tratamiento)</i>	70	3.1	0.4167
<i>Error</i>	250	3.0	-----

Las procedencias bajo planta nodriza muestran medias similares con respecto al índice de estrés, que oscilan entre 1.4 a 1.8 para los Ailes y de 2.6 a 3 para Las Palomas; dichos valores indican un menor estrés. En contraste, aquellas plántulas de oyamel sin la protección de la planta nodriza, muestran un mayor estrés, presentando valores que van de 4.8 a 6 para Los Ailes y 5.4 a 6 para las Palomas (Fig. 17 y 18).

Al realizar el análisis de varianza separadamente por cada tratamiento (con nodriza y sin nodriza), no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre procedencias para el índice de estrés en el tratamiento con nodriza en ninguno de los dos sitios (Cuadro 9 y 10). Para el caso de los Ailes, en el tratamiento sin nodriza sí se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre procedencias ($P=0.0218$) (Cuadro 9), siendo una vez más, la procedencia de mayor altitud (3450 msnm) la que mostró una media diferente con respecto a las demás. Se puede decir que dicha procedencia presenta un índice menor (índice de estrés de 4.8), lo cual indica que esta menos estresada, y por lo tanto, mejor adaptada.

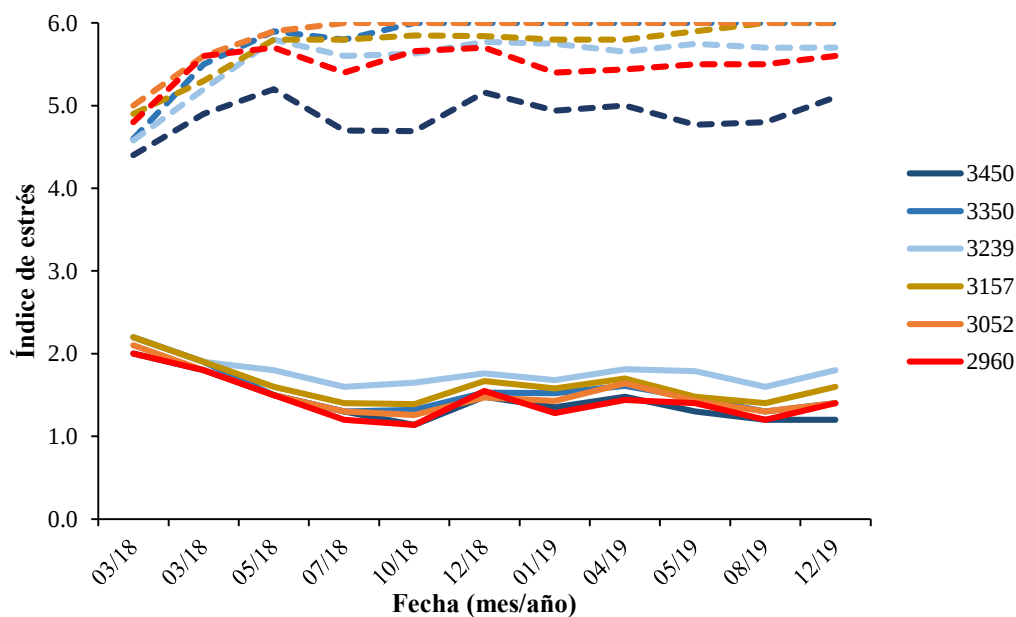


Figura 17. Índice de vigor/estrés para cada procedencia en los diferentes tratamientos. Sitio Los Ailes. Líneas continuas: con nodriza; líneas punteadas: sin nodriza. Valores más altos del índice indican un mayor estrés.

Cuadro 9. Análisis de varianza por tratamiento, variable índice de estrés. Sitio de Los Ailes.

	<i>Con nodriza</i>			<i>Sin nodriza</i>		
<i>FV</i>	g.l	CM	P	g.l	CM	P
<i>Procedencias</i>	5	2.2	0.1863	5	2.5	0.0218
<i>Bloque</i>	49	2.1	0.0364	19	1.4	0.0878
<i>Error</i>	242	1.4	-----	95	0.9	-----

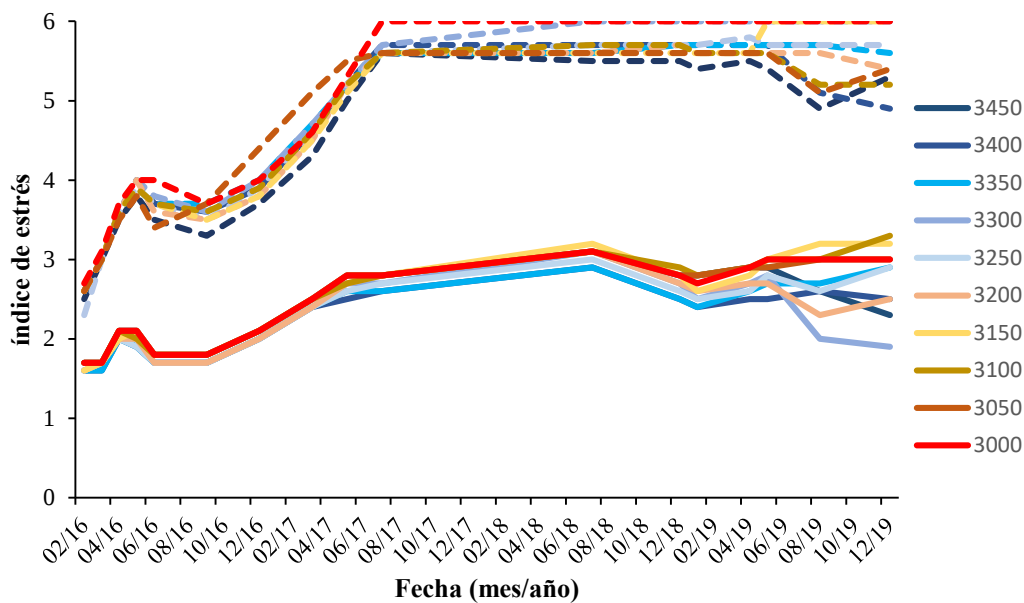


Figura 18. Índice de vigor/estrés para cada procedencia en los diferentes tratamientos. Sitio Las Palomas. Líneas continuas: con nodriza, líneas punteadas: sin nodriza.

Cuadro 10. Análisis de varianza mediante GLM por tratamiento, variable índice de estrés. Sitio de Las Palomas.

<i>FV</i>	<i>Con nodriza</i>			<i>Sin nodriza</i>		
	<i>g.l</i>	<i>CM</i>	<i>P</i>	<i>g.l</i>	<i>CM</i>	<i>P</i>
<i>Procedencias</i>	9	5.9	0.2716	9	2.5	0.1994
<i>Bloque</i>	4	24.0	0.0016	4	11.9	0.0002
<i>Procedencia*Bloque</i>	36	4.6	0.3809	34	1.7	0.5885
<i>Error</i>	127	4.3	-----	123	1.8	-----

1.4 DISCUSIÓN

Nuestros resultados muestran una supervivencia significativamente mayor cuando las plántulas de *Abies religiosa* (oyamel) son plantadas bajo el dosel de arbustos locales (con una cobertura y altura promedio de 68% y 1.5 m), que sirven como plantas nodriza, un menor índice de estrés y un mayor incremento en altura en comparación con aquellas que se plantaron a cielo abierto (sin planta nodriza). Estos resultados concuerdan con las evaluaciones previas obtenidas por Carbajal-Navarro, 2018.

Se esperaba encontrar diferencias genéticas entre procedencias, ya que como se ha documentado las poblaciones se diferencian genéticamente a lo largo de un gradiente altitudinal (Rehfeldt, 1998). Si bien, sólo el sitio de los Ailes presentó dichas diferencias, siendo la procedencia más cercana en altitud de origen al sitio de ensayo la que muestra una clara adaptación local, dicha adaptación se ve reflejada en un mayor incremento en diámetro y altura. Las poblaciones tienen a presentar una adaptación a su sitio de origen, siendo el clima en el cual se han desarrollado uno de los principales factores que moldea esta adaptación (Rehfeldt *et al.*, 2017).

Por otro lado, las poblaciones originadas a una mayor altitud (3450 msnm) presentan una mayor supervivencia cuando son plantadas fuera de la protección de la nodriza. Lo anterior puede deberse a que estas procedencias están mejor adaptadas a condiciones más extremas, por lo cual el daño por heladas al que pudieran estar expuestas disminuye (Viveros-Viveros *et al.*, 2009).

La mayor mortalidad de plántulas en el tratamiento sin planta nodriza se reportó durante el primer año de plantación, principalmente en los meses de enero- febrero (temporada fría seca) para el sitio de los Ailes y en marzo-mayo (temporada cálida y seca) para el sitio de Las Palomas., Blanco-García *et al.*, 2011, reporta una mortalidad similar cuando las plántulas de oyamel no están totalmente bajo la sombra de la nodriza.

Abies religiosa es una especie tolerante a la sombra (Sánchez-Velázquez *et al.*, 1991; Rzedowski, 2006), por lo cual, la alta mortalidad de esta especie cuando es plantada en sitios expuestos a radiación solar durante el día, puede deberse a que las temperaturas a las que se enfrenta son más extremas (Gordon, 1970). En contraste, bajo el dosel de la nodriza, la plántula de oyamel se beneficia de un microclima con menos fluctuación de temperaturas, que ayuda a que el establecimiento de las plántulas sea más exitoso (Castro *et al.*, 2002; Gómez *et al.*, 2004).

Como se mencionó con anterioridad, hubo un mayor incremento en altura bajo el dosel de los arbustos (27.05 cm Los Ailes y 71.4 cm Las Palomas). De manera similar, Sánchez-Velázquez *et al.*, 2011 en un experimento sometido a dos tratamientos diferentes (con nodriza y sin nodriza) encontró que las plántulas de *Abies religiosa* presentan un mayor incremento en altura bajo el dosel de *Baccharis conferta* especie de arbusto utilizada a manera de planta nodriza. En otro estudio por Costa *et al.*, (2017) para especies del género *Quercus*, reporta una tendencia similar cuando las especies son plantadas bajo el dosel de arbustos locales.

Autores como Ortiz-Bibian *et al.*, (2017), sugieren el uso de plantas nodrizas para la migración altitudinal de *Abies religiosa*. Sin embargo, al mover altitudinalmente hacia arriba, nos podemos enfrentar a que las condiciones climáticas que ahora existen en el sitio no sean todavía las adecuadas, por lo que las especies no estén adaptadas para esas condiciones ambientales (Hewitt *et al.*, 2011).

Los resultados presentados en este experimento alientan de una manera positiva el mover las procedencias hasta 400 m de una mayor altitud de su origen, siempre y cuando se utilicen plantas nodrizas. Además, considerando las predicciones de la disminución del hábitat propicio para el oyamel a finales del siglo (Sáenz- Romero *et al.*, 2012), lo anterior podría ser una alternativa para la conservación de dicha especie.

En este experimento demostramos que el usar arbustos locales como una estrategia en las reforestaciones tradicionales, es una técnica que no solo aumenta la supervivencia, sino que disminuye el estrés al que se pudieran enfrentar las plántulas al ser movidas altitudinalmente, además de que, en largo plazo, podríamos disminuir costos en reforestaciones tal como lo sugiere Castro *et al.*, (2004).

1.5 CONCLUSIONES

- El uso de arbustos locales a manera de plantas nodrizas es una técnica eficaz que aumenta la supervivencia en reforestaciones con *Abies religiosa* por lo menos durante los primeros años de vida.
- Bajo el dosel de la planta nodriza, el estrés al cual pudieran estar sometidas las plántulas de oyamel al ser migradas altitudinalmente disminuye.
- Se encontraron diferencias genéticas entre procedencias para el sitio de Los Ailes en el tratamiento con nodriza, donde la procedencia local muestra un mayor incremento en diámetro y altura.
- El sitio de Las Palomas mostró diferencias entre tratamientos para las variables de vigor y supervivencia, pero no entre procedencias.
- El uso de arbustos a manera de planta nodriza no afecta negativamente el crecimiento de las plántulas de *A. religiosa*.
- El índice de estrés desarrollarlo por Carbajal-Navarro y colaboradores es eficiente, además de ser técnicamente fácil de evaluar para medir el grado de estrés de las plántulas de oyamel.
- En restauraciones con oyamel se sugiere migrar poblaciones sin importar su origen altitudinal, siempre y cuando se utilicen plantas nodrizas, y el movimiento altitudinal no exceda los 400 m de mayor altitud respecto al sitio de origen.
- Se sugiere la producción de arbustos en los viveros ejidales y comunales, para posteriormente ser usados previamente a una reforestación.

1.6 LITERATURA CITADA

- Alday, J. G., P. Zaldívar, P. Torroba-Balmori, B. Fernández-Santos & C. Martínez-Ruiz. 2016. Natural forest expansion on reclaimed coal mines in Northern Spain: the role of native shrubs as suitable microsites. *Environmental Science and Pollution Research* 23: 13606-13616.
- Anderson J. B. & L. P. Brower. 1996. Freeze-protection of overwintering monarch butterflies in Mexico: critical role of the forest as a blanket and an umbrella. *Ecological Entomology* 21:107–116.
- Benavides-Meza, H. M., G. Guzmán, M. Oriana, S. F. López, F. Camacho-Morfín, D. Y. Fernández-Grandizo, M. P. de la Garza López de Lara & F. Nepamuceno-Martínez. 2011. Variabilidad en el crecimiento de plántulas de ocho procedencias de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schlecht. et Cham., en condiciones de vivero. *Madera y Bosques* 17: 83-102.
- Blanco-García, A., C. Sáenz-Romero, C. Martorell, P. Alvarado-Sosab & R. Linding-Cisneros. 2011. Nurse-plant and mulching effects on three conifer species in a Mexican temperate forest. *Ecological Engineering* 37: 994-998.
- Bolaños-González, Y., M. A. Bolaños-González, F. Paz-Pellat & J. I Ponce-Pulido. 2017. Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana* 35: 73-86.
- Carbajal-Navarro A. L. 2018. Efecto de plantas nodriza en un en un ensayo de procedencias de *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.
- Castro, J., R. Zamora, L. Gómez, J. M. Gómez, J. A. Hódar & E. Baraza. 2004. Uso de matorrales como plantas nodriza en ambientes mediterráneos: evaluación de una nueva técnica de repoblación forestal. *Cuadernos De La Sociedad Española De Ciencias Forestales* 17:145-150.
- Castro, J., R. Zamora, J. A. Hódar & J. M. Gómez. 2002. Use of shrubs as nurse plants: A new technique for reforestation in Mediterranean mountains. *Restoration Ecology* 10:297-305.
- Costa, A., S. Villa, P. Alonso, J. A. García-Rodríguez, F. J. Martín, C. Martínez-Ruiz & B. Fernández-Santos. 2017. Can native shrubs facilitate the early establishment of contrasted co-occurring oaks in Mediterranean grazed areas? *Journal of Vegetation Science* 28:1047-1056.
- Cruzado-Vargas A. L. 2017. Variación de caracteres cuantitativos entre procedencias de *Abies religiosa* originadas en un gradiente altitudinal en la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca: etapa de vivero. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Chapingo, Estado de México, México.

- Cruzado-Vargas, A. L., F. J. Zamudio-Sánchez, G. A. Rodríguez-Yam, A. L. Carbajal-Navarro, J. A. Blanco-García & C. Sáenz-Romero. 2020. Growth of naturally regenerated *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. seedlings in a nursery and genetic variation among provenances. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 26(1): 85-96.
- Encino-Ruiz, L., R. Lindig-Cisneros, M. Gómez-Romero & A. Blanco-García. 2013. Desempeño de tres especies arbóreas del bosque tropical caducifolio en un ensayo de restauración ecológica. *Botanical Sciences* 91 (1):107-114.
- Gómez-Aparicio, L., R. Zamora, J.M. Gómez, J. A. Hódar, J. Castro & E. Baraza. 2004. Applying plant facilitation to forest restoration: a meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants. *Ecological Applications* 14(4):1128–1138.
- Gordon D.T. 1970. Natural regeneration of white and red fir influence of several factors. Forest Service, United States Department of Agriculture. Berkeley.
- Hewitt, N., N. Klenk, A. L. Smith, D. R. Bazely, N. Yan, S. Wood & I. Henriques. 2011. Taking stock of the assisted migration debate. *Biological Conservation* 144(11): 2560-2572.
- Nepote A.C., Arnulfo B., & Lindig C. 2010-2011. Restauración ecológica de ecosistemas degradados. *Ciencia y desarrollo* 248 (3):8-14.
- Oberhauser K. & A. T. Peterson. 2003. Modeling current and future potential wintering distributions of eastern North American monarch butterflies. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100:14063–14068.
- Ortiz-Bibian M. A. 2017. Variación genética altitudinal entre poblaciones de *Abies religiosa* y zonificación altitudinal en ensayo de jardín común. Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.
- Ortiz-Bibian, M. A., A. Blanco-García, R. A. Lindig-Cisneros, M. Gómez-Romero, D. Castellanos-Acuña, Y. Herrerías-Diego, N.M. Sánchez-Vargas & C. Sáenz-Romero. 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* 66:14-23.
- Pensado-Fernández, J.A., L.R. Sánchez-Velásquez, M.R. Pineda-López & F. Días-Fleischer. 2014. Plantaciones forestales vs. regeneración natural in situ: el caso de los pinos y la rehabilitación en el Parque Nacional Cofre de Perote. *Botanical Sciences*, 92 (4): 617-622.
- Rehfeldt G. E. 1988. Ecological genetics of *Pinus contorta* from the Rocky Mountains (USA): a synthesis. *Silvae Genetica* 37:131-135.
- Rehfeldt, G. E., L. P. Leites, D. G. Joyce & A. R. Weiskittel. 2017. Role of population genetics in guiding ecological responses to climate. *Global Change Biology* 24:858–868.

- Rzedowski J. 2006. Vegetación de México. 1ª edición digital. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Sáenz-Romero, C., R. A. Lindig-Cisneros, D. G. Joyce, J. Beaulieu, J. B. St-Clair & B. C. Jaquish. 2016. Migración asistida de las poblaciones forestales para la adaptación de árboles ante el cambio climático. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22(3): 303 - 323
- Sáenz-Romero, C., G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, P. Duval, R. St-Amant, J. Beaulieu & B.A. Richardson. 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., 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.
- Sánchez-Velásquez, L.R., D. Domínguez-Hernández, M.R. Pineda-López, and R. Lara-González. 2011. Does *Baccharis conferta* shrub act as a nurse plant to the *Abies religiosa* seedling? *The Open Forest Science Journal* 4:67-70.
- Sánchez-Velásquez, L.R., M.R. Pineda-López & A. Hernández-Martínez. 1991. Distribución y estructura de la población de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. Et Cham., en el Cofre de Perote, estado de Veracruz, México. *Acta Botánica Mexicana* 16:45–55.
- Soto-Correa, J. C., C. Sáenz-Romero, R. Lindig-Cisneros, N. Sánchez-Vargas & J. Cruz-de-León. 2012. Variación genética entre procedencias de *Lupinus elegans* Kunth, zonificación altitudinal y migración asistida. *Agrociencia* 46(6): 593-608.
- Viveros-Viveros, H., C. Sáenz-Romero, J. J. Vargas-Hernández, J. López-Upton, G. Ramírez-Valverde y A. Santacruz-Varela. 2009. Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* 257:836-842.

Capítulo II

“Modificación del microclima por arbustos usados como plantas nodriza en una reforestación con *Abies religiosa*”

RESUMEN

La eliminación de arbustos previo a una reforestación es una práctica muy común, ya que éstos se consideran como competencia para los árboles. Esta práctica puede ser conveniente para algunas especies de coníferas, pero no para todas, debido a que los arbustos pueden modificar el microclima bajo sus copas, favoreciendo el establecimiento de algunas especies, particularmente aquellas tolerantes a la sombra, como es el caso de *Abies religiosa*. Por lo anterior, en este trabajo se evaluó el microhábitat presente bajo y fuera del dosel de arbustos locales usados a manera de planta nodriza, en un ensayo de procedencias de *A. religiosa*. Se construyeron dos dispositivos para medición de temperatura; cada uno con cuatro termómetros infrarrojos, que permitían medir la fluctuación de la temperatura aparente del suelo, cielo y el aire cercano a la plántula de oyamel. Los dispositivos se colocaron al inicio de la temporada de secas del 2019, un dispositivo bajo la copa de un arbusto y el otro fuera de ella. Se caracterizó el contenido de humedad en el suelo (tratando de abarcar las temporadas del año), para lo cual fueron tomadas muestras de suelo de 20 bloques al azar (10 de cada tratamiento; con y sin arbusto nodriza). Las fluctuaciones de temperatura fueron mucho más extremas a cielo abierto que bajo el dosel de los arbustos, siendo durante la temporada de secas en las cuales se registró una mayor fluctuación. Las temperaturas máximas del aire cercano a la plántula de oyamel debajo de la nodriza fueron de 21.1 °C en enero y de 25.6 °C en abril; en contraste, a cielo abierto fueron de 26 °C (enero) y 29 °C (abril). Durante la temporada de secas bajo la copa de los arbustos se registró un mayor contenido de humedad en el suelo (%W= 25.5) que fuera de ellos (%W= 12.6). En conclusión, los arbustos crean condiciones microclimáticas óptimas bajo sus copas que favorecen el establecimiento de las plántulas de oyamel, amortiguando las temperaturas extremas que ocurren en la oscilación día/noche y entre estaciones del año, e incrementando la retención de humedad en el suelo.

ABSTRACT

The removal of shrubs prior to reforestation is a very common practice, as these are considered as competition for trees. This practice may be suitable for some species of conifers, but not for all, because shrubs can modify the microclimate under their cups, favoring the establishment of some species, particularly those tolerant to the shade, as it is the case of *Abies religiosa*. Therefore, in this work the microhabitat presents under and outside the canopy of local shrubs used as a nurse plant was evaluated, in a provenance field test of *A. religiosa*. Two temperature measurement devices were built; each with four infrared thermometers, which allowed to measure the fluctuation of apparent temperature of the soil, sky and air near the oyamel seedling. The devices were placed at the start of the 2019 dry season, one device under the top of a shrubs and the other outside it. The moisture content in the soil (trying to cover the seasons of the year) was characterized, for which soil samples of 20 random blocks (10 of each treatment; with and without nurse plants) were taken. Temperature fluctuations were much more extreme in open field than under the canopy of shrubs, being during the dry season when there were a greater fluctuation. The maximum air temperatures near the oyamel seedling below the nurse plant were 21.1°C in January and 25.6°C in April; in contrast, in open field were 26°C (January) and 29°C (April). During the dry season under the shrubs canopy, a higher moisture content was recorded in the soil (W%=25.5) than outside the soil (W%=12.6).

In conclusion, the shrubs create optimal microclimatic conditions under their canopy that favor the establishment of oyamel seedlings, buffering the extreme temperatures that occur in the day/night oscillation and between seasons, and increasing the moisture retention of the soil.

2.1 INTRODUCCIÓN

México cuenta con una superficie forestal de aproximadamente 66 millones de hectáreas (FAO, 2015; CONAFOR, 2017). Sin embargo, el aprovechamiento excesivo de los recursos forestales llevó al país a una pérdida considerable de ellos (Aguirre-Calderon, 2015), la tasa de deforestación va de un -0.30 a -0.14 % de 1993 a 2011, teniendo entonces para el periodo de 2007-2011 un total de 89,517 hectáreas/año deforestadas (CONAFOR, 2017).

Los esfuerzos para mitigar los impactos de la pérdida forestal están principalmente encaminados a los trabajos de reforestación (Wightman y Santiago, 2003), desafortunadamente, los resultados en términos de supervivencia no han sido del todo alentadores. Una de las principales causas de la baja supervivencia es la mala selección de especies. A esto podemos añadir que las condiciones ecológicas en las cuales se está llevando la reforestación no son las adecuadas para la o las especies plantadas (Sáenz-Romero y Lindig-Cisneros, 2004; Burney *et al.*, 2015).

Por lo tanto, cambiar el método tradicional de las reforestaciones se está volviendo una necesidad, siendo la restauración ecológica una de las mejores alternativas, ya que esta tiene como objetivo general la recuperación de ecosistemas degradados (y/o perturbados) (Gómez-Ruiz, 2017 y Lindig-Cisneros, 2017). Para ese fin, el uso de plantas nodrizas ayuda a superar barreras ecológicas, específicamente a la persistencia.

El nodricismo es una interacción entre dos plantas, donde una planta (la nodriza) proporciona condiciones favorables bajo su dosel las cuales favorecen la supervivencia y crecimiento de la otra especie (la protegida) (Lindig-Cisneros, 2017; Padilla y Pugnaire, 2006). En ambientes degradados y/o perturbados, su principal función es la modificación de microclima, haciendo que las temperaturas tanto del aire cercano a la planta protegida como del suelo sean menos extremas que a cielo abierto (Del Pozo *et al.*, 1989).

2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1 Caracterización del microclima

Para poder medir las fluctuaciones de temperaturas a las cuales se encontraban las plántulas de *Abies religiosa* presentes en cada uno de los tratamientos (con nodriza: arbusto local con una cobertura promedio de 77%, altura de 1 m, y sin nodriza). Se construyó un dispositivo utilizando cuatro sensores de temperatura infrarrojo (Melexis® MLX 90614, ángulo de visión de 40°) los sensores fueron colocados en dos placas de poliestireno expandido (Fig.19 a). El sistema estaba conectado a un registrador de datos (Arduino®) (Fig. 15 b), y funcionaba mediante una pila portátil (Power S105®) (Fig. 19 c).

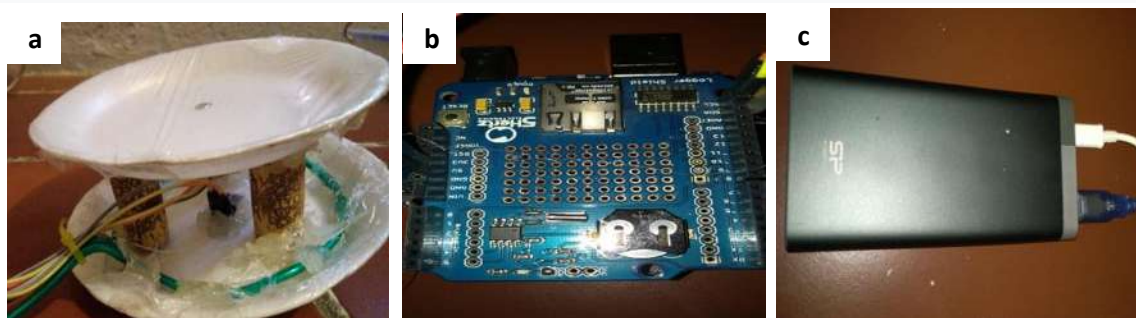


Figura 19. Dispositivo para medir las fluctuaciones de temperaturas: (a) sensores de radiación infrarrojo colocados en una placa de poliestireno expandido, (b) Arduino y (c) pila portátil.

Cada uno de los sensores nos permite obtener diferentes temperaturas: el sensor superior registra las temperaturas aparentes del cielo (rayos infrarrojos de onda larga emitidos por el cielo), el inferior las del suelo y los dos sensores de la parte media del dispositivo registraban la temperatura del aire a 40 cm del suelo (aire cercano a las plántulas de oyamel). Se colocó un dispositivo en el tratamiento con nodriza (bajo el dosel de arbusto) (Fig. 20 a) y otro en el tratamiento sin nodriza (cielo abierto) (Fig. 20 b). Los dispositivos estaban programados para tomar medidas cada tres minutos por veinticuatro horas, fueron colocados en diferentes meses del año (abarcando la temporada seca y de lluvias).

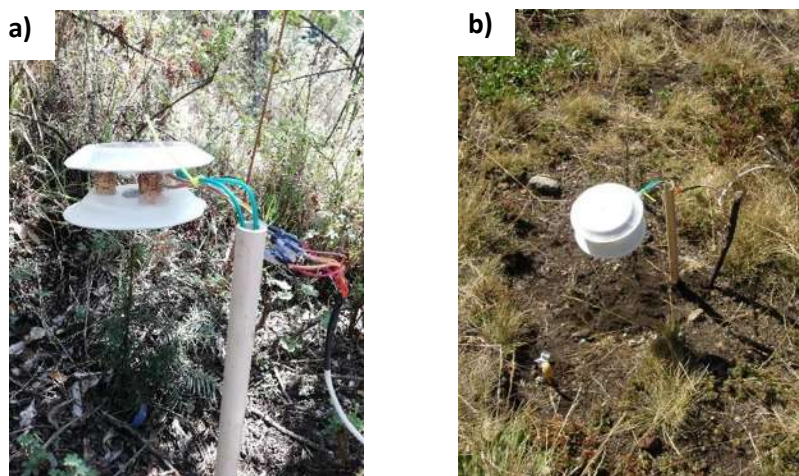


Figura 20. Dispositivos en cada uno de los tratamientos: (a) tratamiento con nodriza, (b) tratamiento sin nodriza.

2.2.2 Contenido de humedad en el suelo

Fueron colectadas 20 muestras de suelo de 20 bloques al azar (10 de cada tratamiento; con y sin planta nodriza), durante diferentes meses del año, comenzando en la temporada fría- seca (enero 2019) y posteriormente cada dos meses, finalizando en noviembre del 2019. Cada muestra de suelo tomada en campo fue colocada en bolsas herméticas (Ziploc®), pesadas y marcadas con el número del bloque y tratamiento para su posterior secado en laboratorio (Fig. 21).



Figura 21. Toma de muestras de suelo en campo.

Para el secado se colocaron 200 gramos de suelo por muestra en bolsas de papel y colocadas en un horno de secado (SL SHEL LAB®) por 48 horas a una temperatura de 65 °C. Cuando las muestras estaban demasiado húmedas, el tiempo de secado se aumentó hasta 55 horas para lograr un secado total (Fig. 22).



Figura 22. Secado de muestras de suelo.

El contenido de humedad fue obtenido mediante el porcentaje de humedad gravimétrica, aplicando la siguiente formula (Gardner, 1986):

$$\%W = [(PSH - PSS) / PSS] * 100$$

Donde:

%W= Porcentaje de humedad gravimétrica

PSH= Peso húmedo de la muestra

PSS= Peso seco de la muestra

2.2.3 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) entre tratamientos para calcular diferencias estadísticamente significativas en el contenido de humedad del suelo en cada uno de los meses que se llevó a cabo la toma de muestras, mediante el paquete estadístico SAS versión 9.3 (SAS Institute 2004). Los datos de las variaciones de temperatura fueron procesados en el paquete estadístico R versión 3.6.1.

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Caracterización del microclima

De los datos obtenidos de cada uno de los sensores se puede observar una gran diferencia de temperatura entre los tratamientos, en general, las fluctuaciones de temperatura fueron mucho menos extremas bajo el dosel de los arbustos (tratamiento nodriza) que a cielo abierto (tratamiento sin nodriza) (Fig. 15 a y b). Esta fluctuación de temperaturas está mucho más marcada durante la temporada de secas (meses de enero, abril). En enero (temporada fría-seca), la temperatura máxima y mínima del aire cercano a la plántula (40 cm del suelo) en el tratamiento sin nodriza fue de 26.2 °C y 0.2 °C respectivamente, dando como resultado un rango de temperatura diaria de 26 °C. En contrastaste, en el tratamiento con nodriza, la temperatura máxima fue de 21.1 °C y la mínima de 0.9 °C con un rango 20.2 °C (Cuadro 11). En abril (temporada cálida-seca) el patrón es similar, teniendo temperaturas más altas durante el día en el tratamiento sin nodriza y mucho más bajas bajo el dosel de los arbustos (nodriza). A cielo abierto (fuera de la cobertura de la planta nodriza), la temperatura promedio fue de aproximadamente 2 °C más alta que en enero, con temperaturas máximas y mínimas de 29.7 °C y 1.5 °C respectivamente (Cuadro 11).

Por otro lado, a cielo abierto (sin la cobertura de la planta nodriza), con lo que respecta a las temperaturas aparentes del cielo (rayos infrarrojos emitidos por gases de efecto invernadero y nubes, principalmente) y suelo (rayos infrarrojos emitidos por el suelo). Las temperaturas máximas del suelo fueron de 48.2 °C en el mes de enero y 47.2 °C en abril, con una mínima (durante la parte más fría de la noche) de -1.7 y -1.0 respectivamente (Cuadro 11). En ambos meses las temperaturas del suelo fueron aproximadamente 20°C más altas y 2.5 °C más baja que las temperaturas del aire cercano a la plántula de oyamel. Las temperaturas emitidas por el cielo se mantuvieron bajas la mayor parte del ciclo diurno para ambos meses, presentando temperaturas máximas de 4.7 °C y 4.9° (enero y abril, respectivamente) y unas mínimas de -26.5 °C en enero y -24.6 °C para abril (Cuadro 11).

Cuadro 11. Temperaturas durante un ciclo diurno (máximas=Tmax; mínimas=Tmin; rango=Tmax-Tmin) del cielo, suelo y aire cercano a la plántula de oyamel en enero (temporada fría-seca), abril (temporada cálida-seca), y agosto (temporada de lluvias).

<i>Temperaturas durante un ciclo de 24 hrs (°C)</i>						
	Max		Min		Rango	
	Nodriz	Sin nodriz	Nodriz	Sin nodriz	Nodriz	Sin nodriz
enero						
<i>Suelo</i>	20.7	48.2	1.0	-1.7	19.7	49.9
<i>Cielo</i>	13.0	4.5	-4.8	-26.5	17.8	31
<i>Plántula</i>	21.1	26.2	0.9	0.2	20.2	26
abril						
<i>Suelo</i>	29.4	47.2	3.2	-1.0	26.2	48.2
<i>Cielo</i>	19.4	4.9	-0.3	-24.6	19.7	29.5
<i>Plántula</i>	25.6	29.7	3.5	1.5	22.1	28.2
agosto						
<i>Suelo</i>	12.2	20.4	5.9	4.4	6.3	16
<i>Cielo</i>	14.2	21.3	4.8	-2.1	9.4	23.4
<i>Plántula</i>	22.9	24.7	5.6	4.4	17.3	20.3

Bajo el dosel de la planta nodriza (arbustos locales), la energía térmica emitida por el cielo (en forma de rayos infrarrojos) incluye tanto la emitida del cielo y no interceptado por el dosel, como la emitida por el dosel de la propia planta nodriza, lo que nos da como resultado temperaturas mucho menos bruscas que a cielo abierto (sin planta nodriza) (Fig. 23), teniendo entonces para ambos periodos (enero y abril) temperaturas del suelo y cielo muy cercanas a las emitidas por el aire a 40 cm del suelo (aire cercano a la plántula). En enero, las temperaturas máximas del cielo fueron de 13°C y las mínimas y -4.8 °C, mientras que en abril fueron de 19.4°C y -0.3°C. Las temperaturas máximas del suelo para enero y abril fueron de 20.7 y 29.4 (0.4°C y 3.8°C diferentes a los del aire) siendo aproximadamente 23°C más bajas que las temperaturas máximas registradas a cielo abierto (Fig. 23).

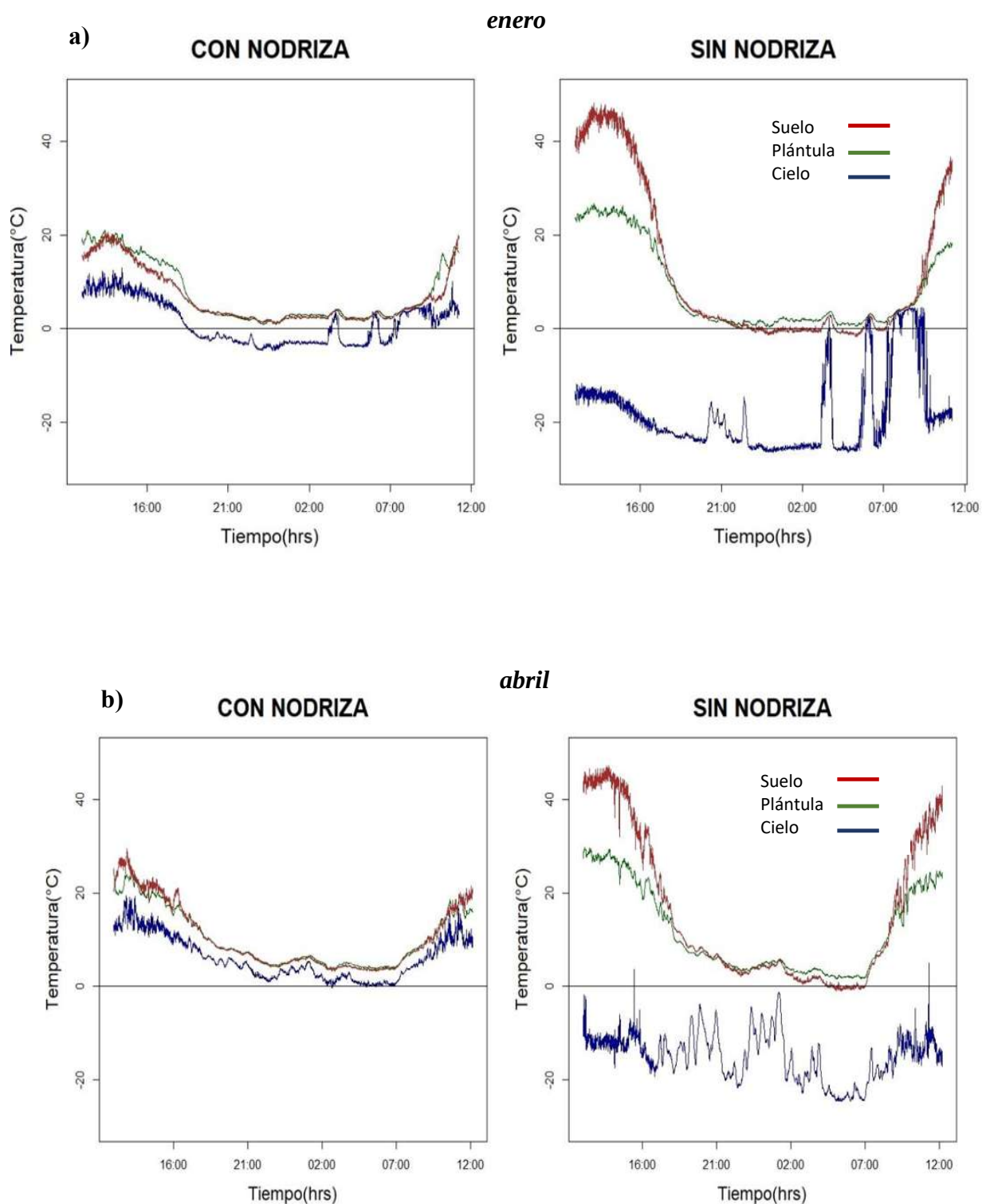


Figura 23. Comparación de temperaturas para cielo, suelo y el aire a 40 cm del suelo (plántula) entre los dos tratamientos en dos épocas del año: (a) temperaturas correspondientes al mes de enero, (b) temperaturas correspondientes al mes de abril.

Durante la temporada de lluvias, las temperaturas tanto a cielo abierto como bajo el dosel de los arbustos se empiezan a mantener más estables (la fluctuación de temperaturas disminuye) (Fig. 24). En el mes de agosto en el tratamiento sin nodriza (cielo abierto) se tienen temperaturas máximas del suelo, cielo y aire de 20.4°C, 21.3°C y 24.7°C respectivamente, mientras que, en el tratamiento con nodriza las temperaturas fueron de 12.2 °C, 14.1°C y 22.9°C (Cuadro 11), teniendo una diferencia de temperaturas para el aire cercano a la plántula de oyamel de solo 1.8°C. Las temperaturas mínimas a cielo abierto fueron de 4.4 °C, -2.1°C y 4.4°C (suelo, cielo, aire cercano a la plántula), en contraste con las encontradas bajo planta nodriza que fueron de 5.9 °C (suelo), 4.8 °C (cielo) y 5.6 °C (aire cercano a la plántula).

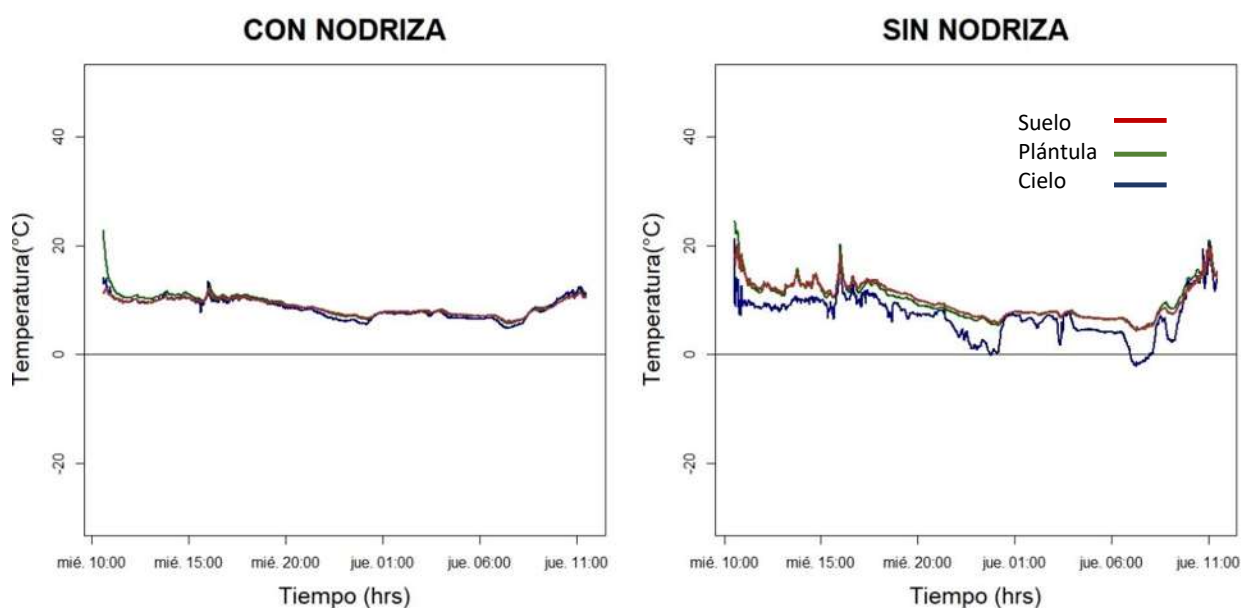


Figura 24. Comparación de temperaturas para cielo, suelo y el aire a 40 cm del suelo (plántula) entre los dos tratamientos. Temperaturas correspondientes al mes de agosto (temporada de lluvias).

2.3.2 Contenido de humedad en el suelo

El menor contenido de humedad en el suelo (% humedad gravimétrica) se encontró para los meses de abril (precipitación mensual= 7.5 mm) y mayo (precipitación mensual=13 mm) (temporada cálida-seca). Para el mes de abril, el porcentaje de humedad en el tratamiento con nodriza fue de 26.8%, mientras que, en el tratamiento sin nodriza fue de 10.6%; en mayo, los porcentajes de humedad encontrados en cada tratamiento fueron de 22.9% bajo dosel de arbustos (nodriza) y 14.7% a cielo abierto (sin nodriza) (Fig. 25). En ambos meses se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos (abril: $P < 0.0001$; mayo: $P = 0.0002$) (Cuadro 12).

Cuadro 12. ANOVAs para el porcentaje de humedad gravimétrica entre tratamientos en diferentes meses del año

<i>FV</i>	<i>gl</i>	<i>CM</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
enero				
<i>Tratamientos</i>	1	51.4	2.1	0.1609
<i>Error</i>	18	24.1	----	-----
abril				
<i>Tratamientos</i>	1	1318.6	73.5	<0.0001
<i>Error</i>	18	17.9	----	-----
mayo				
<i>Tratamiento</i>	1	336.6	12.8	0.0002
<i>Error</i>	18	26.3	----	-----
junio				
<i>Tratamiento</i>	1	380.4	8.4	0.0096
<i>Error</i>	18	45.3	----	-----
agosto				
<i>Tratamientos</i>	1	23.4	0.9	0.3589
<i>Error</i>	18	26.4	----	-----
septiembre				
<i>Tratamientos</i>	1	38.7	1.0	0.3288
<i>Error</i>	18	38.4	----	-----
diciembre				
<i>Tratamiento</i>	1	6.7	0.1	0.7177
<i>Error</i>	18	49.4	----	-----

Durante el mes de junio, que es el inicio de la temporada de lluvias (precipitación mensual= 102.3 mm), el contenido de humedad para el tratamiento sin nodriza aumenta de manera considerable (34.2 %). En el tratamiento con nodriza la humedad se mantiene similar a los dos meses anteriores (25.5%), encontrándose diferencias estadísticamente significativas entre

tratamientos ($P=0.0096$) (Cuadro 10). Posteriormente, conforme aumenta la precipitación, el contenido de humedad entre tratamientos se mantiene con porcentajes muy similares, teniendo para agosto (precipitación mensual = 241.7 mm) un 65.3 % y 67.4% con nodriza y sin nodriza, respectivamente. Para noviembre, la precipitación comienza a disminuir (precipitación mensual = 52.9 mm) al igual que el porcentaje de humedad en el suelo para ambos tratamientos (57.7 % con nodriza, 56.5% sin nodriza), siendo el tratamiento con nodriza el que presenta ligeramente un mayor contenido de humedad (Fig. 25).

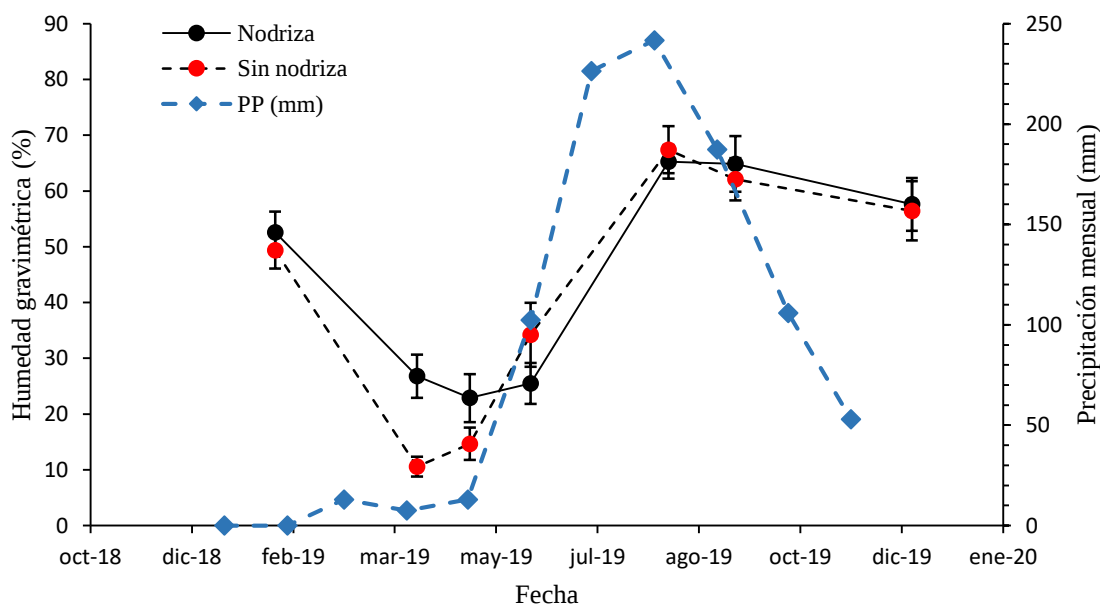


Figura 25. Porcentaje de humedad gravimétrica en diferentes meses del año para cada uno de los tratamientos. Línea continua negra tratamiento con nodriza, línea punteada negra tratamiento sin nodriza, línea punteada azul precipitación mensual. Las barras verticales en cada punto representan el intervalo de confianza (IC) al 95%; cuando las barras no se traslapan hay diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos al 0.05.

2.4 DISCUSIÓN

Los resultados del presente estudio muestran que bajo el dosel de arbustos usados a manera de planta nodriza en una reforestación con *Abies religiosa* los gradientes de temperatura son menos adversos que a cielo abierto, ya que la nodriza crea un microclima favorable para las plántulas de oyamel. En las reforestaciones tradicionales, la eliminación de arbustos antes de la plantación es una práctica frecuente, denominada “preparación de sitio”. Sin embargo, no son adecuadas para todas las especies de coníferas; tal es el caso de *Abies religiosa* (Blanco-García *et al.*, 2011 y Carbajal- Navarro *et al.*, 2019).

La mayor fluctuación de temperaturas se presentó durante la temporada de secas, fuera del dosel de los arbustos. En contraste, bajo la copa de arbustos se presentó una disminución de hasta 4.4°C del aire cercano a la plántula durante el día y un aumento de 2°C durante la noche, respecto al tratamiento sin nodriza. El resultado del microclima creado bajo la copa de la nodriza para la plántula de oyamel, aparentemente es una disminución del estrés por alta radiación solar durante el día y muy probablemente una disminución de daño por heladas durante la noche. Por ello, durante la temporada de secas es donde la protección de la planta nodriza juega un papel crucial, concordando con lo encontrado por Gómez- Aparicio *et al* (2005). En un experimento llevado a cabo en dos montañas del Mediterráneo, donde se encontró que el microclima creado bajo las copas de los arbustos durante la temporada más seca favorece tanto el establecimiento como la supervivencia de plántulas de *Pinus* y *Quercus*.

Por otro lado, con lo que respecta al contenido de humedad en el suelo, el menor porcentaje para ambos tratamientos se registró durante los meses de abril-mayo que corresponden a la temporada cálida-seca. Durante ese periodo, bajo el dosel de la planta nodriza la disponibilidad de agua es escasa (precipitación mensual = 7.5mm y 12mm, abril y mayo, respectivamente). El contenido de humedad en el suelo bajo la nodriza es mayor (humedad gravimétrica= 25 %), comparado con los resultados obtenidos a cielo abierto (sin nodriza; 12.61%). Dicha diferencia de contenido humedad puede deberse a las altas temperaturas del suelo a cielo abierto, dando como resultado una mayor evaporación. En contraste bajo el dosel del arbusto la radiación es menor, por lo tanto, las temperaturas del suelo y la evaporación disminuyen (Del Pozo *et al.*, 1989). Además, el contenido de materia orgánica es mayor bajo sus copas, aumentando la capacidad de retención de agua (Costa *et al.*, 2017).

Ortiz-Bibian *et al.*, (no publicado), consideran como umbral crítico un 15% de humedad en el suelo para las plántulas de *Abies religiosa*. Debajo de este umbral, el daño por defoliación y la mortalidad comienza a aumentar. En base a los resultados del presente estudio, podemos concordar con lo anterior, ya que la mayor mortalidad de plántulas fue registrada durante la temporada seca con una humedad en el suelo menor al 15%.

El uso de arbustos a manera de planta nodriza para la restauración de sitios degradados es una técnica que en los últimos años ha ido en aumento (Castro *et al.*, 2002; Callaway *et al.*, 2002; Encino-Ruiz *et al.*, 2013; Alday *et al.*, 2015). Nuestros resultados alientan de manera significativa el uso de éstos, ya que se comprobó una mejora del microclima proporcionado bajo sus copas, permitiendo a las plántulas de oyamel mejores condiciones para su establecimiento y supervivencia, lo cual permitirá a mediano y largo plazo, mejorar el éxito de las reforestaciones para *Abies religiosa* u otras especies forestales. Además, subrayamos la importancia de investigaciones sobre especies que puedan funcionar como planta nodriza (reproducción, forma de vida, distribución, biología, etc.) para que, en base a lo anterior, tomar decisiones sobre qué especie o especies sean más convenientes a utilizar, dependiendo de las condiciones del sitio en que se planea reforestar, tomando en cuenta la especie a proteger.

2.5 CONCLUSIONES

- Bajo la copa de los arbustos se crean gradientes de temperatura menos extremos que a cielo abierto.
- Los arbustos mejoran el microclima debajo de sus copas, reduciendo las temperaturas extremas y aumentando la humedad en las temporadas más críticas, creando condiciones favorables para el establecimiento de las plántulas de oyamel.
- La mayor fluctuación de temperaturas se registró durante la temporada de secas, fuera del dosel de los arbustos
- Debajo de la copa de la nodriza se presentó una disminución de hasta 4.4°C del aire cercano a la plántula durante el día y un aumento de 2°C durante la noche, respecto al tratamiento en lo abierto (sin nodriza).
- El menor porcentaje de humedad en el suelo se registró en los meses de abril- mayo, durante la temporada cálida-seca.
- Durante la temporada seca la planta nodriza logra retener un mayor contenido de humedad (humedad gravimétrica = 25 %), comparada con la que se registró a cielo abierto (sin nodriza; 12.61%).

2.6 LITERATURA CITADA

- Aguirre-Calderón O A. 2015. Manejo forestal en el siglo XXI. *Madera y Bosques* 21:17-28.
- Alday, J.G., P. Zaldívar, P. Torroba-Balmori, B. Fernández-Santos & C. Martínez-Ruiz. 2016. Natural forest expansion on reclaimed coal mines in Northern Spain: the role of native shrubs as suitable microsites. *Environmental Science and Pollution Research* 23: 13606-13616.
- Blanco-García, A., C. Sáenz-Romero, C. Martorell, P. Alvarado-Sosab & R. Linding-Cisneros. 2011. Nurse-plant and mulching effects on three conifer species in a Mexican temperate forest. *Ecological Engineering* 37:994-998.
- Burney O., A. Aldrete, R. Alvares-Reyes, J.A. Prieto-Ruiz, J. R., Sánchez-Velásquez & J.G. Mexal. 2015. México-Addressing challenges to reforestation. *Journal of Forestry* 13(4):404–413.
- Callaway, R., R. Brooker, P. Choler, Z. Kikvidze, C. Lortie, R. Michalet, L. Paolini, F. Pugnaire, B. Newingham, E. Aschehoug, C. Armas, D. Kikodze and B. Cook. 2002. Positive interactions among alpine plants increase with stress. *Nature* 417:844-848.
- Carbajal-Navarro, A., E. Navarro-Miranda, A. Blanco-García, A.L. Cruzado-Vargas, E. Gómez-Pineda, C. Zamora-Sánchez, F. Pineda-García, G. O'Neill, M. Gómez-Romero, R. Linding-Cisneros, K.H. Johnsen, Philippe Lobit., L. Lopez-Toledo, Y. Herrerías-Diego & C. Sáenz-Romero. 2019. Ecological restoration of *Abies religiosa* forests using nurse plants and assisted migration in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Frontiers in Ecology and Evolution* 7:421.
- Castro, J., R. Zamora, J. A. Hódar & J.M. Gómez. 2002. Use of shrubs as nurse plants: A new technique for reforestation in Mediterranean Mountains. *Restoration Ecology* 10 (2):297–305.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2017. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe de Resultados 2009-2014. Zapopan, Jalisco, México. 200 pp.
- Costa, A., S. Villa, P. Alonso, J.A. García-Rodríguez, F.J. Martín, C. Martínez-Ruiz & B. Fernández-Santos. 2017. Can native shrubs facilitate the early establishment of contrasted co-occurring oaks in Mediterranean grazed areas? *Journal of Vegetation Science* 28: 1047-1056.
- Del Pozo, A.H., E.R. Fuentes, E. R. Hajek & J. D. Molina. 1989. Zonación microclimática por efecto de los manchones de arbustos en el matorral de Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural* 62:85-94.

- Encino-Ruiz, L., R. Lindig-Cisneros, M. Gómez-Romero & A. Blanco-García. 2013. Desempeño de tres especies arbóreas del bosque tropical caducifolio en un ensayo de restauración ecológica. *Botanical Sciences* 91 (1): 107-114.
- Gardner W.H. 1986. Water content, en: Klute, A., Campbell, G. S., Jacson, R. D., Mortland, M. M., Nielsen, D. R (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part I*, ASA and SSSA, Madison, WI, USA. 493–544 pp.
- Gómez-Aparicio, L., J.M. Gomez, R. Zamora & J. L. Boettinger. 2005. Canopy vs. soil effects of shrubs facilitating tree seedlings in Mediterranean montane ecosystems. *Journal of Vegetation Science* 16: 191-198.
- Gómez-Ruiz P.A & R. Lindig-Cisneros. 2017. La restauración ecológica clásica y los retos de la actualidad: La migración asistida como estrategia de la adaptación al cambio climático. *Revista de Ciencias Ambientales Tropical Journal of Environmental Sciences* 51(2): 31-51.
- Lindig-Cisneros R. 2017. *Ecología de la restauración y restauración ambiental*. Ciudad de México, Estado de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México. 321 pp.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2017. *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015*. Roma 2015.
- Ortiz-Bibian M., R. Lindig-Cisneros, C. Sáenz-Romero, A. Blanco-García, V. Osuna-Vallejo & C. Wehenkel. “en prensa”. *Abies religiosa* response to rainfall exclusion in a common garden test: soil moisture 3 thresholds and altitudinal genetic differentiation for drought resistance. *Botanical Sciences*.
- Padilla F.M. & F.I. Pugnaire. 2006. The role of nurse plants in the restoration of degraded environments. *Frontiers in Ecology and the Environment* 4: 196–202.
- Sáenz-Romero C. y R. Lindig-Cisneros. 2004. Evaluación y propuestas para el programa de reforestación en Michoacán. *Ciencia Nicolaita* 37: 107-122.
- Wightman K.E y S. Cruz-Blas. 2003. La cadena de la reforestación y la importancia en la calidad de las plantas. *Foresta Veracruzana* 5: 45-51.

VI. DISCUSIÓN GENERAL

Los resultados del presente trabajo muestran que el uso de arbustos locales a manera de planta nodriza en reforestaciones con *Abies religiosa*, es una técnica que aumenta significativamente la supervivencia, disminuyendo el estrés al cual podrían estar sometidas las plántulas de oyamel al ser movidas altitudinalmente desde el sitio de origen de la semilla al sitio de plantación. Lo anterior es una buena estrategia para la conservación de *Abies religiosa*, y los sitios de estancia invernal de la Mariposa Monarca, teniendo en cuenta la disminución del hábitat propicio para el oyamel a finales de siglo (Sáenz- Romero *et al.*, 2012).

Además, el uso de arbustos locales no afecta negativamente el crecimiento de las plántulas de oyamel, ya que en ambos sitios se registró un mayor incremento en altura, concordando con lo obtenido por Carbajal-Navarro, 2018.

Por otro lado, la mayor mortalidad se registró cuando las plántulas son plantadas a cielo abierto, es decir, fuera de la protección de la sombra de la planta nodriza, principalmente durante los meses más secos, enero- febrero (temporada fría seca) para el sitio de Los Ailes y en marzo-abril (temporada cálida y seca) en Las Palomas. Durante esta temporada, las temperaturas registradas son más extremas y la disponibilidad del agua en el suelo es escasa. Es durante esas dos estaciones del año cuando la nodriza juega un papel crucial, ya que bajo su dosel se crea un microclima favorable para las plántulas de oyamel.

Bajo el dosel de los arbustos durante la temporada cálida-seca, los gradientes de temperaturas son menos adversos que a cielo abierto. Bajo la copa de arbustos se presentó una disminución de hasta 4.4 °C de la temperatura promedio del aire cercano a la plántula durante el día y se registró un aumento de 2°C durante la noche. La disminución de las temperaturas durante el día favorece una disminución del estrés y el aumento de la temperatura durante la noche muy probablemente disminuye el daño por heladas. Además, bajo sus copas tanto las temperaturas del suelo y la evaporación del mismo disminuyen, registrándose un mayor porcentaje de humedad, comparado con la humedad registrada a cielo abierto (sin planta nodriza).

Considerando la necesidad de migrar especies para lograr adaptarlas a los climas futuros, en base a nuestros resultados, proponemos el mover las procedencias de *Abies religiosa* hasta 400m de una mayor altitud de su origen, siempre y cuando se utilicen plantas nodrizas. Si bien

encontramos una clara adaptación al sitio local por parte de las procedencias más cercanas en altitud de origen al sitio de ensayo (específicamente en Los Ailes), en general las procedencias bajo planta nodriza no mostraron repercusiones negativas ni en su crecimiento, ni en la supervivencia. Es decir, la planta nodriza no parece representar una competencia negativa.

Este trabajo subraya la necesidad de modificar las prácticas tradicionales en la cual se llevan a cabo las reforestaciones, por lo cual reiteramos la importancia del uso de arbustos locales a manera de planta nodriza. Sugerimos la producción de arbustos en viveros forestales ejidales y comunales, para posteriormente ser plantados previamente en una reforestación, principalmente en los sitios donde no se encuentren presenten arbustos o la cantidad de estos no sea la suficiente. El modificar las prácticas tradicionales de reforestación a largo plazo, podrían traer ventajas económicas al disminuir los costos y, por otro lado, considerando los impactos proyectados del cambio climático, permitiría lograr seguir manteniendo árboles sanos de *Abies religiosa*.

VII. BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

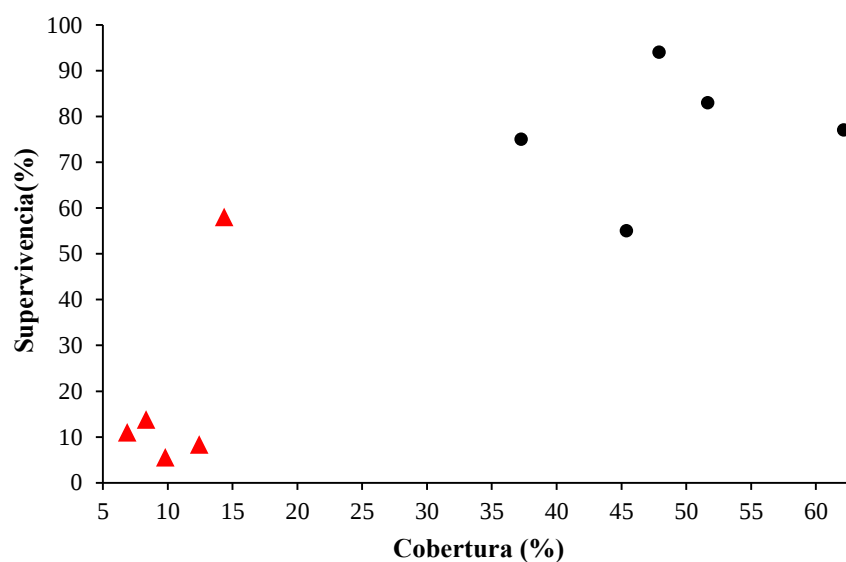
- Allen, C. D., A. K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier, T. Kitzberger, A. Rigling, D. D. Breshears, E. H. Hogg, P. Gonzalez, R. Fensham, Z. Zhang, J. Castro, N. Demidova, L. Jong-Hwan, G. Allard, W. S. Running, A. Semerci, y N. Cobb. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259:660-684.
- Lenoir, J., J. C. Gégout, P. A. Marquet, P de Ruffray & H. Brisse. 2008. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science* 320:1768-1771.
- Hansen, J., Sato M., & R. Ruedy. 2012. Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America*.
doi:10.1073/pnas.1205276109.

ANEXOS

Índice 1  Follaje verde oscuro (aspecto de una plántula sana).	Índice 2  Follaje verde-amarillento	Índice 3  Follaje amarillo-verdoso
Índice 4  Follaje café- amarilloso	Índice 5  Follaje café-rojizo. Acículas secas (aspecto de una plántula casi muerta)	Índice 6  Follaje café-oscuro. Acículas completamente secas (aspecto de una plántula muerta)

Cuadro 1. Índice de estrés de la plántula desde plántulas sanas normales no estresadas (valor 1) hasta casi muertas (valor 5) o plántulas muertas (valor 6). Desarrollado por Carbajal-Navarro y colaboradores.

A)



B)

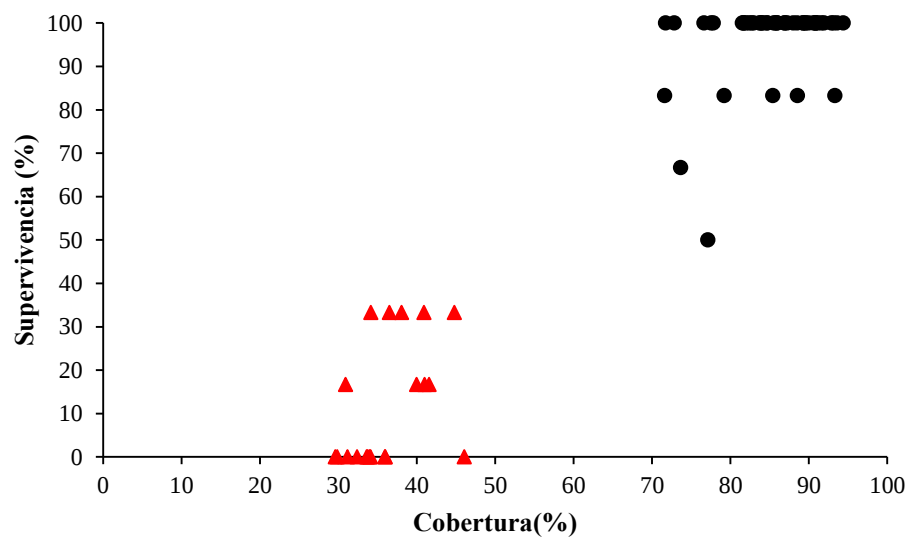


Figura 1. Cobertura de dosel y supervivencia por bloque. Símbolos rojos: tratamiento sin nodriza, símbolos negros: tratamiento con nodriza; (a) sitio Las Palomas, (b) sitio Los Ailes. La cobertura de dosel se obtuvo con una cámara hemisférica desde el centro de cada bloque y analizadas con Winscanopy (2014).



Ecological Restoration of *Abies religiosa* Forests Using Nurse Plants and Assisted Migration in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2019.00421/full>

Aglaen Carbajal-Navarro¹, Esmeralda Navarro-Miranda², Arnulfo Blanco-García¹, Ana Laura Cruzado-Vargas², Erika Gómez-Pineda², Cecilia Zamora-Sánchez², Fernando Pineda-García³, Greg O'Neill⁴, Mariela Gómez-Romero^{1,5}, Roberto Lindig-Cisneros⁶, Kurt H. Johnsen⁷, Philippe Lobit², Leonel Lopez-Toledo⁸, Yvonne Herreras-Diego¹ and Cuauhtémoc Sáenz-Romero^{8*}

Increasing disturbance events (forest fires, windstorms, pest outbreaks) associated with climate change are creating new ecological restoration challenges. Here, we examine the utility of assisted migration in combination with naturally established nurse plants in order to improve the success of afforestation with *Abies religiosa* (sacred fir), the overwintering host of the Monarch butterfly (*Danaus plexippus*). We established high-elevation assisted migration *A. religiosa* provenance field tests at two sites (Las Palomas and Los Ailes) in the core overwintering areas of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR), central Mexico. At each site, 2-year-old seedlings were planted either in the open or under existing nurse plants. Three and a half years after planting at the Las Palomas site (5.5 years from germination), *A. religiosa* seedling survival was 72% under the shade of nurse plants but only 18% in open areas (without shade). At the Los Ailes site, 1 year and a half after planting in the field (3.5 years from germination), survival was 94% and 10%, respectively. There were not significant differences in seedling height increment among populations at either site. The results of our study and those published elsewhere suggest that *A. religiosa* benefits from shade protection of nurse plants and that population transfer 400 m upward in elevation (i.e., assisted migration) to compensate for future warmer climates does not appear to have any negative impacts on the seedlings, while potentially conferring closer alignment to future climates. If absent in planting sites, we recommend growing nurse shrub species (such as *Baccharis conferta*) alongside tree seedlings in forest nurseries so that these shrubs can be transplanted to the reforestation site 2 years before planting the tree seedlings.

Keywords: *Abies religiosa*, assisted migration, climatic change, nurse plants, reforestation, Monarch butterfly,

Figura 2. Portada de la publicación en la revista Frontiers in Ecology and Evolution con parte de los datos obtenidos de este manuscrito. DOI: 10.3389/fevo.2019.00421.