

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Evaluación de la Supervivencia de Especies Nativas Reforestadas en Zonas Semiáridas de
Aguascalientes, Jalisco, San Luis Potosí y Zacatecas

Por:

RUBEN ANTONIO CONTRERAS VARELA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México.

Junio, 2025.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Evaluación de la Supervivencia de Especies Nativas Reforestadas en Zonas Semiáridas de
Aguascalientes, Jalisco, San Luis Potosí y Zacatecas.

Por:

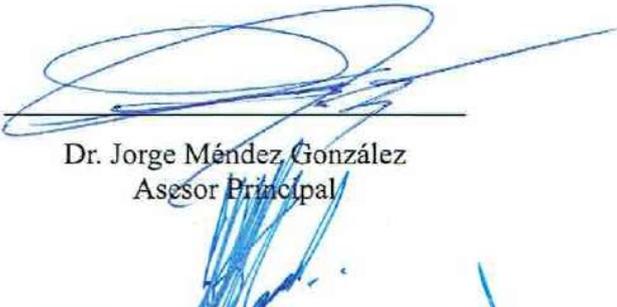
RUBEN ANTONIO CONTRERAS VARELA

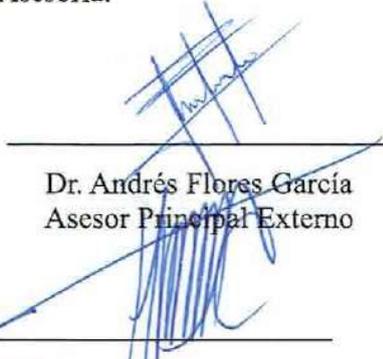
TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Jorge Méndez González
Asesor Principal


Dr. Andrés Flores García
Asesor Principal Externo


Dr. Genaro Esteban García Mosqueda
Coasesor


Dr. Celestino Flores López
Coasesor


Dr. Alberto Sandoval Pangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México.

Mayo, 2025.

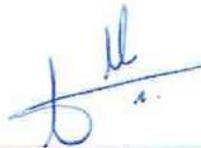
Declaración de no plagio.

El autor principal, quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (autoplagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Autor principal.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'C. Ruben Antonio Contreras Varela', written over a horizontal line.

C. Ruben Antonio Contreras Varela.

Dedicatoria.

Dedico este trabajo a mi hijo, el cual me dio la fuerza y perseverancia para terminar esta carrera y así poder darle algo mejor de lo que yo tuve.

Para mi madre, padre, abuelos y tíos, por su amor incondicional y por ser mi fuente de inspiración y que nunca me dejaron atrás apoyándome cada uno a su manera.

A mis amigos, que nunca me abandonaron a lo largo de toda la carrera; que cuando me veían en el piso me levantaban, que hasta el final están aquí.

Agradecimientos.

Agradezco profundamente a la familia Briones, por su orientación, paciencia y apoyo durante estos últimos 5 años donde, de no haber sido por ellos, yo muy probablemente no estaría aquí.

Un agradecimiento especial a Javier Alejandro Briones, Verónica Michelle Escudero Pérez, María de la Luz Martínez Silva, Luz Elena Soto Vargas, Emilio Santiago Pérez, Hortencia Galindo y Lucía Guadalupe Contreras Vigil. Por ser mis apoyos, mis sonrisas y mis confidentes.

A mi familia que desde la distancia me apoyo en muchas cosas para poder llegar a donde estoy. Y a mí Asesor principal Dr. Jorge Méndez González y coasesores Dr. Genaro Esteban García Mosqueda, Dr. Celestino Flores López y Dr. Andrés Flores García; por tenerme paciencia, por corregirme cuando era necesario y bríndame sus conocimientos sin ningún tipo de restricción.

Índice general de contenido.

Resumen.....	7
Resumen.....	8
1 Introducción.....	9
1.1 Objetivo general.....	11
1.1.1 Objetivos particulares.....	11
1.2 Hipótesis general.....	11
1.2.1 Hipótesis específicas.....	11
2 Revisión de Literatura.....	12
2.1 Estudios afines.....	12
2.2 La reforestación con especies nativas en zonas áridas y semiáridas de México: problemática y estrategias para la restauración.....	16
2.3 Modelos para la evaluación estadística de la supervivencia.....	19
2.4 Calidad de la planta y prácticas de producción.....	20
2.5 Enfoques para la evaluación de la reforestación.....	20
2.6 Descripción técnica y contramedidas.....	21
2.7 Descripción de las especies estudiadas.....	21
3 Materiales y Métodos.....	26
3.1 Ubicación del área de estudio.....	26
3.2 Descripción general de las especies y área de estudio.....	26
3.3 Muestreo de supervivencia.....	27
3.4 Estimación de supervivencia.....	28
3.5 Datos climáticos de los sitios de muestreo.....	30
3.6 Comparación de supervivencia.....	31
3.7 Modelado de supervivencia mediante GAM.....	32

4	Resultados y Discusión.....	34
4.1	Análisis de supervivencia: varios grupos.....	35
4.2	Análisis de supervivencia entre especies.	41
4.3	Variables del clima y la supervivencia de las especies.	41
4.4	Factores determinantes en la supervivencia: protección, producción y manejo.	43
5	Conclusiones.....	46
6	Literatura Citada.	47
7	Anexos.	56

Índice de cuadros.

Cuadro 1. Características climáticas, edáficas y morfológicas de las siete especies analizadas en zonas semiáridas de México.	34
Cuadro 2. Supervivencia de especies en distintos tipos de suelo y clima en zonas semiáridas de México, analizadas con la prueba de Kruskal-Wallis.	35
Cuadro 3 Supervivencia de especies por localidad evaluadas con la prueba de Kruskal-Wallis y agrupación múltiple de Bonferroni, en zonas semiáridas de México.	37
Cuadro 4. Supervivencia de especies por tipos de suelo evaluada con la prueba de Kruskal-Wallis y agrupación múltiple Bonferroni, en zonas semiáridas de México.....	38
Cuadro 5. Supervivencia de especies en distintos tipos de clima en zonas semiáridas de México, analizadas con la prueba de Kruskal-Wallis.	40
Cuadro 6. Resultados del modelo estadístico para la predicción de la supervivencia de especies en zonas semiáridas de México con base en variables climáticas, ecológicas y geográficas.	42

Índice de figuras.

FIGURA 1. Mapa de localización de áreas de muestreo en el contexto global y local.....	29
FIGURA 2 Mapa de localización de áreas de muestreo en el contexto local.	30
FIGURA 3. Supervivencia de diferentes especies en distintos tipos de suelo en zonas semiáridas de México.	39
FIGURA 4. Supervivencia de diferentes especies en distintos tipos de clima en zonas semiáridas de México.	40
FIGURA 5. Comparación de la supervivencia de siete especies en México, utilizando la prueba de Kruskal-Wallis.....	41

Anexo 1 Nota sobre nomenclatura taxonómica:.....	56
Anexo 2. Importancia relativa de las variables en el modelo GAM para predecir la supervivencia de <i>Agave salmiana</i> en México.	56
Anexo 3. Efectos de las variables climáticas en la predicción de la supervivencia de <i>Agave salmiana</i> en México según el modelo GAM.....	57
Anexo 4. Diagnóstico para evaluar el ajuste del modelo GAM de <i>Agave salmiana</i> en México.	57
Anexo 5. Importancia relativa de las variables en el modelo GAM para predecir la supervivencia de <i>Atriplex canescens</i> en México.	58
Anexo 6. Efectos de las variables climáticas en la predicción de la supervivencia de <i>Atriplex canescens</i> en México según el modelo GAM.....	58
Anexo 7. Diagnóstico para evaluar el ajuste del modelo GAM de <i>Atriplex canescens</i> en México.	59
Anexo 8. Importancia relativa de las variables en el modelo GAM para predecir la supervivencia de <i>Eysenhardtia polystachya</i> en México.	59
Anexo 9. Efectos de las variables climáticas en la predicción de la supervivencia de <i>Eysenhardtia polystachya</i> en México según el modelo GAM.....	60
Anexo 10. Diagnóstico para evaluar el ajuste del modelo GAM de <i>Eysenhardtia polystachya</i> en México.	60
Anexo 11. Importancia relativa de las variables en el modelo GAM para predecir la supervivencia de <i>Opuntia robusta</i> en México.....	61
Anexo 12. Efectos de las variables climáticas en la predicción de la supervivencia de <i>Opuntia robusta</i> en México según el modelo GAM.....	61
Anexo 13. Diagnóstico para evaluar el ajuste del modelo GAM de <i>Opuntia robusta</i> en México.	62
Anexo 14. Importancia relativa de las variables en el modelo GAM para predecir la supervivencia de <i>Opuntia streptacantha</i> en México.	62
Anexo 15. Efectos de las variables climáticas en la predicción de la supervivencia de <i>Opuntia streptacantha</i> en México según el modelo GAM.....	63
Anexo 16. Diagnóstico para evaluar el ajuste del modelo GAM de <i>Opuntia streptacantha</i> en México.	63

Anexo 17. Importancia relativa de las variables en el modelo GAM para predecir la supervivencia de <i>Pinus cembroides</i> en México.	64
Anexo 18. Efectos de las variables climáticas en la predicción de la supervivencia de <i>Pinus cembroides</i> en México según el modelo GAM.	64
Anexo 19. Diagnóstico para evaluar el ajuste del modelo GAM de <i>Pinus cembroides</i> en México.	65
Anexo 20. Importancia relativa de las variables en el modelo GAM para predecir la supervivencia de <i>Prosopis laevigata</i> en México.	65
Anexo 21. Efectos de las variables climáticas en la predicción de la supervivencia de <i>Prosopis laevigata</i> en México según el modelo GAM.	66
Anexo 22. Diagnóstico para evaluar el ajuste del modelo GAM de <i>Prosopis laevigata</i> en México.	66

RESUMEN.

Las reforestaciones en zonas semiáridas del centro-norte de México suelen presentar baja supervivencia (SV), a pesar de los esfuerzos institucionales. El objetivo de este estudio fue evaluar la SV de siete especies nativas utilizadas en reforestaciones *Agave salmiana* (*Asal*), *Atriplex canescens* (*Acan*), *Eysenhardtia polystachya* (*Epol*), *Opuntia robusta* (*Orob*), *Opuntia streptacantha* (*Ostr*), *Pinus cembroides* (*Pcem*), *Prosopis laevigata* (*Plae*), bajo condiciones reales de campo, en 11 localidades distribuidas en Aguascalientes, Jalisco, San Luis Potosí y Zacatecas. Entre 2021 y 2024 se aplicó un muestreo sistemático mediante transectos lineales de 100 metros, registrando la tasa de SV y recolectando variables climáticas de cada localidad. Las diferencias estadísticas de SV entre localidades, suelos y tipos de clima, se evaluaron con la prueba de Kruskal-Wallis (KW), mientras que la relación entre la SV y las variables climáticas se analizó mediante Modelos Aditivos Generalizados (GAM). En total se evaluaron 687 sitios y la SV promedio fue del 85 %. La prueba de KW no mostró diferencias significativas en la SV entre especies ($p > 0.05$), pero sí entre localidades, tipos de suelo y tipos de clima ($p < 0.05$). El modelo GAM explicó hasta un 63.4 % de la devianza, mientras que las variables climáticas pueden explicar entre 11 % y 46 % de la varianza de la SV, siendo la temperatura la variable más importante, según el modelo de Random Forest. Con base al modelo GAM, los efectos de temperatura y precipitación no son lineales y pueden ser tanto positivos como negativos con relación a la SV. En conclusión, las especies evaluadas presentaron altos valores de supervivencia (SV), determinados en gran medida por las condiciones climáticas, edáficas y particulares de cada localidad. Acciones iniciales como la instalación de cercos, construcción de bordos, roturación en curvas a nivel y apertura de brechas corta fuego resultan fundamentales para incrementar la tasa de supervivencia en estas especies. Estos resultados aportan evidencia útil para optimizar estrategias de reforestación en zonas semiáridas, priorizando la selección de especies y el diseño de tratamientos según las condiciones locales. Se recomienda fortalecer el monitoreo postestablecimiento y adaptar las prácticas de manejo con base en escenarios climáticos específicos.

Palabras clave: clima, GAM (Modelos Aditivos Generalizados), supervivencia, variabilidad ambiental.

RESUMEN.

Reforestation efforts in semi-arid regions of north-central Mexico often exhibit low survival rates (SV), despite institutional efforts. The objective of this study was to evaluate the SV of seven native species commonly used in reforestation: *Agave salmiana* (Asal), *Atriplex canescens* (Acan), *Eysenhardtia polystachya* (Epol), *Opuntia robusta* (Orob), *Opuntia streptacantha* (Ostr), *Pinus cembroides* (Pcem), and *Prosopis laevigata* (Plae), under real field conditions across 11 locations distributed in the states of Aguascalientes, Jalisco, San Luis Potosí, and Zacatecas. From 2021 to 2024, systematic sampling was conducted using 100-meter linear transects to record SV and collect climatic variables for each site. Statistical differences in SV among locations, soil types, and climate types were assessed using the Kruskal-Wallis test (KW), while the relationship between SV and climatic variables was analyzed using Generalized Additive Models (GAM). A total of 687 sites were evaluated, with an average SV of 85%. The KW test showed no significant differences in SV among species ($p > 0.05$), but revealed significant differences among locations, soil types, and climate types ($p < 0.05$). The GAM explained up to 63.4% of the deviance, while climatic variables explained between 11% and 46% of the variance in SV, with temperature being the most influential variable according to the Random Forest model. Based on the GAM, the effects of temperature and precipitation on SV are nonlinear and can be either positive or negative. In conclusion, the evaluated species showed high survival rates, largely determined by the climatic, edaphic, and site-specific conditions. Preliminary actions such as fencing, construction of contour bunds, contour plowing, and firebreak creation are essential for improving the survival rate of these species. These findings provide practical insights to improve reforestation strategies in semi-arid areas, emphasizing species selection and treatment design based on local conditions. Strengthening post-establishment monitoring and adapting management practices to specific climatic scenarios is recommended.

Key words: climate, Generalized Additive Models (GAM), survival, environmental variability.

1 INTRODUCCIÓN.

Las plantaciones forestales han adquirido mayor relevancia a escala global en el marco de una estrategia de producción para la obtención de productos tanto maderables como no maderables, la captura de carbono y la restauración de ecosistemas perturbados (FAO, 2021). En el caso de México, programas tales como el de Plantaciones Forestales Comerciales (SEMARNAT, 2025), han tratado de recuperar tierras erosionadas y de incrementar la producción forestal sustentable (Vázquez, 2016). Sin embargo, a pesar de los trabajos de las instituciones, los porcentajes de supervivencia de las plantaciones forestales han resultado ser bajos, con registros que oscilan entre el 30 y el 53% que ha propiciado grandes desafíos en la implementación de las restauraciones (Prieto *et al.*, 2018).

Los ecosistemas semiáridos, entre los que se puede identificar el matorral, son importantes para la conservación de la biodiversidad (Leal *et al.*, 2018), el control de la erosión, la regulación del ciclo hidrológico y el almacenamiento de carbono (Comisión Nacional Forestal, 2023). Sin embargo, son muy vulnerables a las actividades antropogénicas, la desertificación (INEGI, 2014), al cambio climático y la pérdida de cobertura vegetal lo que afectan el funcionamiento ecológico y la resiliencia (Alanís *et al.*, 2013).

La reforestación, como método de restauración activa, ha sido una de las estrategias de recuperación de los ecosistemas semiáridos (Barrera *et al.*, 2018); no obstante, el éxito de la reforestación está condicionado por un conjunto de factores: tipo de especie, sitio de la plantación, condiciones edafoclimáticas, calidad del material vegetativo utilizado. Por eso, el estudiar la sobrevivencia de especies forestales debería ser una prioridad no solo con la finalidad de aumentar la eficiencia de los programas de reforestación (Ceccon & Martínez, 2016), sino también para generar conocimiento que sirva de soporte en el diseño de estrategias que mejoren las condiciones del sitio local (Burney *et al.*, 2015).

Existen investigaciones que han demostrado que la supervivencia de las especies forestales está determinada por factores biofísicos, técnicos y socioambientales (Muñoz *et al.*, 2011). La calidad de planta, el tipo de suelo, la disponibilidad de agua y época de plantación son variables críticas que deben tenerse en cuenta para la reforestación (Born & Parpal, 2016). Sin embargo, muchas de las evaluaciones de reforestación realizadas en México y el mundo

han puesto el foco en indicadores de éxito (Le *et al.*, 2012), tales como la cobertura alcanzada y descuidado los factores que explican esos resultados (Sáenz, 2014).

En ese contexto es crucial ver cómo investigaciones previas evaluaron los efectos de estos factores en la supervivencia de plantaciones. Investigaciones recientes han documentado el comportamiento de diferentes especies en función de las condiciones del sitio, considerando el uso de Modelos Aditivos Generalizados (GAM) y métodos que permiten la evaluación de relaciones no lineales entre las variables ambientales y el desempeño de las especies (Taylor *et al.*, 2016). Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar los factores que permiten la supervivencia de seis especies forestales en un ecosistema semiárido, con base en el tipo de suelo, las condiciones climáticas y la ubicación geográfica.

La restauración de ecosistemas, a través de reforestaciones con especies nativas, es una estrategia que se emplea para mitigar los efectos de cambio climático (Alanís *et al.*, 2013), la pérdida de cobertura vegetal, la erosión de los suelos (INEGI, 2014) y el desplazamiento de fauna en zonas semiáridas del territorio mexicano (Leal *et al.*, 2018). A pesar de los esfuerzos institucionales hechos para restaurar ecosistemas, mediante los programas de plantaciones forestales o restauración forestal de microcuencas estratégicas (CONAFOR, 2023), la tasa de sobrevivencia es variable y en muchos casos baja (Prieto *et al.*, 2018; Sandoval *et al.*, 2022). Esto justifica un mayor hincapié en el estudio de los factores que determinan el éxito o fracaso de dichas reforestaciones o plantaciones.

Los ecosistemas semiáridos corresponden a un conjunto de condiciones de clima y suelo que limitan la sobrevivencia y el desarrollo de las plantas (Foroughbakhch *et al.*, 2017), por lo que elegir especies adecuadas y evaluar su desempeño en condiciones reales es una tarea importante (Barrera *et al.*, 2018). Un conjunto de estudios demostró que el tipo de suelo (Muñoz *et al.*, 2011), la disponibilidad de agua, la temperatura (Burney *et al.*, 2015) y la morfología inicial de plántulas son factores que determinan la sobrevivencia (Ceccon & Martínez, 2016). Breugel *et al.* (2011) aclaran que la fertilidad de suelo afecta hasta cierto punto el crecimiento temprano y la supervivencia. Esto denota la dificultad de que las especies, a pesar de ser nativas, presenten porcentajes variables (25 % a 75 %) de sobrevivencia.

Objetivos.

1.1 Objetivo general.

Analizar los factores que determinan la supervivencia de siete especies forestales en un ecosistema semiárido, con base en el tipo de suelo, las condiciones climáticas y la ubicación geográfica.

1.1.1 Objetivos particulares.

Comparar la diferencia en la supervivencia entre las siete especies, 11 localidades, tres tipos de clima y cinco tipos de suelo, mediante pruebas no paramétricas (Kruskal-Wallis), para identificar las especies con mayor viabilidad en función de cada variable.

Analizar la tasa de supervivencia de siete especies nativas reforestadas entre 2021 y 2024 en zonas semiáridas de Aguascalientes, Jalisco, San Luis Potosí y Zacatecas, mediante modelos aditivos generalizados (GAM) y algoritmos de Random Forest, considerando variables como temperatura y precipitación.

1.2 Hipótesis general.

La supervivencia de las especies forestales en ecosistemas semiáridos está influenciada significativamente por las características edáficas, climáticas y geográficas del sitio de plantación y es dependiente de la especie.

1.2.1 Hipótesis específicas.

1. La localidad, tipo de suelo y clima tienen un efecto significativo en la tasa de supervivencia de las especies nativas evaluadas.
2. La precipitación y las temperaturas influyen en la supervivencia de las especies nativas en los distintos sitios de reforestación.
3. Existen diferencias significativas en la supervivencia de las especies forestales en función de su ubicación geográfica y están determinadas por las condiciones ambientales propias de cada región.

2 REVISIÓN DE LITERATURA.

2.1 Estudios afines.

La supervivencia de una reforestación con 15 especies nativas (*Celtis pallida* Torr., *Condalia hookeri* M.C. Johnst, *Cordia boissieri* A. DC., *Diospyros texana* Scheele, *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes, *Ehretia anacua* (Terán & Berland.) I.M. Johnst., *Erythrostemon mexicanus* (A. Gray) Gagnon & G.P. Lewis, *Havardia pallens* (Benth.) Britton & Rose, *Parkinsonia aculeata* L., *Prosopis glandulosa* Torr., *Senegalia berlandieri* (Benth.) Britton & Rose, *Senegalia wrightii* (Benth.) Britton & Rose, *Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn., *Vachellia rigidula* (Benth.) Seigler & Ebinger y *Yucca filifera* Chabaud) en Los Ramones, Nuevo León. Se estableció en 15.43 ha con suelos Vertisol, Calcisol y Chernozem, clima semiárido cálido y temperaturas de 22-24 °C. Se plantaron 12,596 individuos con una densidad de 816 plantas/ha, utilizando hidrogel, enraizador y protectores. Se realizaron tres muestreos anuales con 10 líneas de muestreo y 30 plantas por línea; en ellas se midiendo altura, diámetro basal y copa. La supervivencia obtenida fue de 80.67 % en 2019, 95.34 % en 2020 y 28.7 % en 2021; las especies con mayores valores fueron *Cordia boissieri* con 16.43 %, *Prosopis glandulosa* con 10.67 % y *Ebenopsis ebano* con 07.56 %. Por los resultados obtenidos se concluyó que la selección de especies debe ajustarse al grado de degradación del sitio y el mantenimiento que debe realizarse hasta garantizar la permanencia de la reforestación (Mata et al, 2022).

Se evaluó la supervivencia y crecimiento de seis especies nativas del matorral espinoso tamaulipeco en Linares, Nuevo León. El área de estudio cubrió 10 ha con suelo Vertisol pélico, clima subtropical húmedo, 770 mm de precipitación anual y una pendiente del 7 %. Se plantaron 1,477 plántulas con hidrogel y enraizador en curvas de nivel, separadas 10 m y 5 m entre individuos. Se establecieron 15 líneas de muestreo con 12 individuos por línea y se realizaron cuatro mediciones al año (estacionales). Se midió la altura, el diámetro basal y diámetro de copa; los valores iniciales promedio fueron de 73 a 127 cm de altura y 4 a 10 mm de diámetro basal. Para análisis estadístico, se aplicó un ANOVA y Kruskal-Wallis La supervivencia promedio fue del 96 %. No hubo crecimiento significativo en altura, pero sí en diámetro basal y copa en *Havardia pallens* (Benth.) Britt. & Killip y *Cordia boissieri* A.

DC. porque mostraron mayor desarrollo. Los altos valores de alta supervivencia se atribuyeron al tamaño de plántulas (> 0.80 m) y mantenimiento adecuado (riego y control de herbáceas) (Mata *et al.*, 2024).

Por otra parte, la supervivencia y regeneración del Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) en Cadereyta Jiménez, Nuevo León, en una reforestación con especies nativas. Se analizó la supervivencia y composición florística en una reforestación de 3 años y en la regeneración natural después de 11 años de reconversión. Para muestrear, se utilizaron 10 parcelas circulares de 250 m² y con análisis de índices ecológicos (Shannon-Wiener, Margalef, Pretzsch) y pruebas estadísticas. La supervivencia promedio fue del 31.72 % para las especies *Prosopis glandulosa* Torr. (76.92 %), *Diospyros texana* Scheele (50 %), *Cordia boissieri* A. DC. (40 %), *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes (38.46 %), *Vachellia rigidula* (Benth.) Seigler & Ebinger (24.24 %) y *Havardia pallens* (Benth.) Britton & Rose (20.00 %) que fueron las más exitosas, mientras que el resto no lograron sobrevivir (0 %). Factores como sequías y heladas extremas (-5 °C en 2021) afectaron la supervivencia. Se destacó la capacidad de algunas especies para resistir condiciones adversas mediante raíces profundas, reducción de área foliar y alta retención de agua. Para futuras reforestaciones en ambientes áridos, se recomendó utilizar especies nativas adaptadas (Mata *et al.*, 2023).

En el matorral espinoso tamaulipeco se realizó una reforestación con especies nativas en áreas degradadas. Se usaron *Cordia boissieri* (A. DC.), *Caesalpinia mexicana* (A. Gray), *Eysenhardtia texana* (Scheele) y *Leucophyllum frutescens* (Berland.) I.M. Johnst. El área de estudio fue el ejido La Arena, en Pesquería, Nuevo León, con clima seco semicálido (BWhw) y suelo xerosol. Se plantaron 4,444 individuos por hectárea en febrero de 2017 y se evaluaron cada seis meses hasta cumplir 41 meses. Se aplicó el método Kaplan-Meier para analizar la supervivencia, con una tasa general de 49.40 %, y se detectó a *C. boissieri* con la menor supervivencia (37.70 %). Se midieron altura, diámetro basal y cobertura. *C. mexicana* mostró los mayores crecimientos en altura y cobertura al registrar más del 10 % de la superficie cubierta. El estudio concluyó que especies como *C. mexicana* y *L. frutescens* tienen mejor desempeño en reforestaciones (Patiño *et al.*, 2022).

El análisis de la reforestación de *Pinus cembroides* Zucc en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM) se reveló que varios factores clave influyen en la supervivencia y el

crecimiento de las especies. La precipitación anual en el área de estudio fue de 341 mm, lo que representó uno de los principales factores limitantes en la supervivencia de las plantas en el PNCM (Sandoval *et al.*, 2022). Además, el neblinómetro registró una condensación diaria de 0.8 L m³ de neblina y rocío. El tratamiento con malla atrapaniebla presentó el mejor rendimiento en términos de supervivencia, con un 92 % a los 12 meses, seguido por los tratamientos de hidrogel (60 %) y nucleación (58 %). El grupo testigo, que no recibió tratamiento, mostró solo 27 % de supervivencia. El tratamiento con malla atrapaniebla mostró diferencias significativas en sobrevivencia en comparación con otros métodos. Estos resultados sugieren que este tratamiento es viable económicamente y ofrece beneficios ecológicos a largo plazo. Se recomendó mantener este tratamiento durante al menos dos años en proyectos de restauración ecológica (Sandoval *et al.*, 2022).

El crecimiento y la supervivencia de especies nativas (*Pinus engelmannii* Parry ex Engelm y *Pinus cooperi* C.E. Blanco) en una zona semiárida con transición, el cual consideró la morfología inicial de las especies al plantarse. Se realizó un experimento en campo bajo un diseño de bloques completamente al azar. Se seleccionaron especies con base en su adaptación a condiciones áridas. El muestreo fue sistemático y se midieron la altura (promedio de 35 cm) y diámetro (promedio de 4.2 mm) de las plantas. Se utilizó la regresión lineal simple para el análisis de datos. El área de estudio tuvo suelos pobres en nutrientes y una precipitación anual de 480 mm. La densidad de plantación fue de 1,100 plantas/ha. La supervivencia general fue del 42 % y varió según el tipo de suelo: 50 % en arcillosos y 38 % en arenosos. También se encontraron diferencias según el clima, con mayor supervivencia en zonas húmedas. Se realizaron seis muestreos en el estudio. La supervivencia se evaluó mediante conteos periódicos y análisis comparativo. En conclusión, la morfología inicial influyó en la supervivencia y crecimiento de las especies (Prieto *et al.*, 2018).

En otro trabajo se tuvo como objetivo evaluar la supervivencia y crecimiento de especies nativas en la selva baja caducifolia del Ejido de Arellano, Champotón, Campeche. Para ello, se llevó a cabo la reforestación en un área degradada. El área de estudio presentó características ambientales específicas que influyeron en la supervivencia de las plantas. Se realizó un muestreo sistemático con un número determinado de parcelas (cuatro). Para evaluar la supervivencia, se midieron la tasa de mortalidad y los factores ambientales que

podieron afectar el crecimiento. Entre los sitios experimentales, la mayor mortalidad se presentó en Café del Bosque. La supervivencia promedio general a los dos años fue del 85.8 %. *Havardia reticulata* (Rose) Britton & Rose presentó la mayor supervivencia en los tres sitios (100 %), mientras que *Pinus greggii* Engelm. var. *australis* registró la menor (85.2 %). Sin embargo, el análisis de varianza mostró que no hubo diferencias estadísticas entre especies. Se registraron siete desaparecidos y 16 muertos (14.2 %). De estos, cinco murieron por daño en la base del tallo causado por ardillas, mientras que los 13 restantes sucumbieron a la sequía y las heladas. Se observaron 25 plantas trozadas (15.43 %) a un año de la plantación. Las conclusiones indicaron que ciertos factores, como el tipo de suelo y el clima, influyen significativamente en la supervivencia (López & Benavides, 2013).

Se evaluó la supervivencia de diferentes especies de pinos en función de variables ambientales y geográficas. Se utilizó un análisis de varianza ($\alpha = 0.05$) para evaluar las diferencias en supervivencia entre especies. El área de estudio se caracterizaba por condiciones específicas de suelo y clima que influyen en el crecimiento de las plantas. El muestreo consistió en la medición de varias parcelas con una densidad de plantación determinada. Se realizaron observaciones periódicas que consideraron factores como la altura y el diámetro de las plantas. Los resultados mostraron que las especies regionales *Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. tuvieron las mayores tasas de supervivencia a los 5 años (64 % y 55 %, respectivamente), mientras que *Pinus pseudostrobus* Lindl. (32 %), *Pinus halepensis* Mill. (49 %) de supervivencia, y *Pinus brutia* Ten. (14 %) presentaron menores valores. Después de 9 años, *P. cembroides* y *P. greggii* conservaron la mayor supervivencia (48 %), seguidas de *P. halepensis* (43 %), *P. pseudostrobus* (28 %) y *P. brutia* (12 %). *P. cembroides* y *P. halepensis* se consideran una buena alternativa para la reforestación en sitios degradados, con potencial para árboles de navidad y producción maderable. Se recomendó especialmente *Pinus cembroides* para la reforestación en sitios similares (Domínguez *et al.*, 2001).

El objetivo del estudio de Argüello *et al.*, (2012) fue monitorear la reforestación de once quebradas del norte de Quito para evaluar su estado e impacto del proceso. Se realizaron recorridos de campo y mapeos con GPS para ubicar y contar las plantas sembradas y sobrevivientes. El área de estudio, La Delicia, es extensa y abarca distintos ecosistemas, con

pendientes pronunciadas y elevaciones de 1200 a 4600 m.s.n.m. Se plantaron 37,152 árboles en 43 ha, aunque solo sobrevivió el 5.05 %. La densidad de plantación fue de 3x3 metros. Los factores que afectaron la supervivencia incluyeron incendios forestales, acumulación de basura, escombros, invasiones y uso agrícola de terrenos reforestados. Las conclusiones generales fueron la necesidad de mayor control en la zona, limpieza, capacitación comunitaria y fiscalización de futuros proyectos (Argüello *et al.*, 2012).

Al sur de Nuevo León se evaluó la supervivencia de *Pinus pseudostrobus* Lindl en, con los objetivos de determinar el efecto del sistema de producción y el pre acondicionamiento en la supervivencia de las plántulas, e identificar las variables morfológicas de mayor influencia para fijar patrones de selección de plantas con mejor desempeño en campo. Se evaluó la supervivencia durante 14 meses mediante el método Kaplan-Meier y la prueba Log-Rank. La supervivencia general fue del 52.9 % a los 14 meses, con mayor mortalidad en los primeros 97 días (31.2%). El sitio 2 presentó una supervivencia del 60.2 % frente al 45.4 % del sitio 1 ($p=0.014$). Las plantas del sistema 1+1 lograron las mayores supervivencias (sitio 1=66.7%; sitio 2=90.3%), seguidas por las de bolsa de polietileno (0+2). No hubo diferencias significativas en el efecto del pre acondicionamiento, salvo en plantas del sistema 0+2 con pre acondicionamiento alto (sitio 1=83.3 %; sitio 2=91.7 %). El análisis se realizó con el procedimiento LIFETEST de SAS ver. 9.2. El diámetro al cuello de la raíz fue la variable morfológica más influyente en la supervivencia, por lo que es esencial elegir sistemas de producción que proporcionen mayor robustez y volumen radicular (Sígala *et al.*, 2015).

2.2 La reforestación con especies nativas en zonas áridas y semiáridas de México: problemática y estrategias para la restauración.

La degradación ambiental en México se ha vuelto extremadamente grave y en aumento, especialmente en zonas semiáridas y áridas. Estos ecosistemas representan alrededor del 60 % del territorio del país (CONAFOR *et al.*, 2013) y se sitúan en el norte y parte de las áreas centrales del país, donde la precipitación es baja y la evaporación alta, los suelos tienen condiciones limitantes para el crecimiento de las plantas y temperaturas extremas (Andrade *et al.*, 2012; Rodríguez Alvarado *et al.*, 2017). No obstante, estos ecosistemas poseen una

biodiversidad notablemente adaptada a condiciones ecológicas extremas, por lo que estos son áreas prioritarias para la conservación y restauración. (Alexandra & Catheribe, 2020).

Uno de los principales problemas ambientales en estas regiones es la desertificación (forma de degradación de tierras donde un área de suelo seco se vuelve progresivamente más árida). Esta es un desafío para la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria en México con respecto a sus áreas rurales entre condiciones subhúmedas y semiáridas. Por ejemplo, se ha declarado que un 64 % del territorio nacional está degradado (o con grados evolutivos de degradación) como resultado de la deforestación, el sobrepastoreo, la erosión y el cambio de uso del suelo (Andrade *et al.*, 2012; Rodríguez *et al.*, 2017). . La descomposición biológica es mucho más rápida en estos ecosistemas, y ocurre a tasas muy altas en áreas áridas y semiáridas, donde son vulnerables a la degradación debido a la delicada cobertura vegetal y suelos inmaduros (Xerosol, Regosol, Calcisol).

Una de las formas vegetales más sensibles a estas presiones es el arbusto desértico micrófilo, que se piensa que cubre alrededor de 19.5 millones de hectáreas en la parte norte del país. En matorrales desérticos, como los representados por las Altiplanicies de Tamaulipas, ha sido severamente reducida su superficie debido al uso excesivo de recursos, la expansión de bordes agrícolas y el reemplazo por especies exóticas (*Schinus molle* L.) (Andrade *et al.*, 2012; González *et al.*, 2019). Asimismo, la degradación de ecosistemas –como el matorral espinoso tamaulipeco– pone en riesgo la provisión de servicios ecológicos vitales, como la recarga de acuíferos, secuestro de carbono y control de la erosión (Alexandra & Catheribe, 2020).

La reforestación con especies nativas es una de las principales soluciones para mitigar el impacto de la desertificación y restaurar los servicios ecosistémicos de tierras áridas y semiáridas. las especies nativas, que son evolutivamente capaces de adaptarse al clima, suelo y características biológicas del sitio, tienen más probabilidades de establecerse, crecer y sobrevivir (González *et al.*, 2019; Trujillo & Juárez, 2024).

Los mezquites (*Prosopis* spp.) están entre las especies más promovidas en programas de restauración, así como el huizache (*Vachellia* spp.) y *Atriplex* (spp.), especies nativas –con alta resistencia a la sequía, fijadoras de nitrógeno y raíces profundas– que alcanzan el agua

subterránea y sostienen grandes cantidades de suelo (González *et al.*, 2019; Urías *et al.*, 2023). Estas especies de plantas tienen un significado socioeconómico para la población y las comunidades y sirven como alimento, medicina, sombra, leña o productos comestibles.

No obstante, el establecimiento de proyectos de reforestación en estas regiones está sujeto al conocimiento de las condiciones ecológicas de suelo y clima, relacionadas con la supervivencia de las plantas. Estos factores determinantes incluyen características como espesor del suelo, disponibilidad de agua, temperatura (máx., mín y med), competencia por recursos, presión de herbívoros y la posible presión ejercida sobre la planta por patógenos y plagas (Andrade *et al.*, 2012; Rodríguez *et al.*, 2017). Los rasgos fisiológicos a nivel de especie deben tenerse en cuenta para elegir la especie más adecuada para cada condición.

Los sistemas de propagación y establecimiento también son de crucial importancia. Por ejemplo, plantas como *Vachellia farnesiana* tienen baja viabilidad de semillas, por lo que la micropropagación o los pretratamientos son necesarios para asegurar una germinación satisfactoria (Urías *et al.*, 2023). La aplicación de tecnologías complementarias como la inoculación con micorrizas, microorganismos, hidrogeles, vermicomposta y captadores de agua de lluvia han demostrado mejorar significativamente la supervivencia y el crecimiento inicial de las plántulas en condiciones limitantes (Rodríguez *et al.*, 2017; Mata *et al.*, 2025).

A escala regional, varios estudios han registrado experiencias de reforestación adaptadas a las condiciones particulares existentes en cada región. En la región norte de Tamaulipas, la erosión hídrica y la pérdida de la cubierta vegetal en el matorral espinoso son problemas que se están abordando con proyectos de restauración con huizache, mezquite y hojaseñ (González *et al.*, 2019). En Mapimí, Durango, se han formulado planes para introducir especies como *Atriplex* y *Larrea*, en Galeana se están utilizando modelos de restauración adecuados para abordar sequías agudas (Rodríguez *et al.*, 2017; Urías *et al.*, 2023). En algunas partes del estado de Puebla, se realizaron pruebas piloto para el establecimiento de la respuesta fisiológica y morfológica en varias especies nativas bajo condiciones de alta aridez (Mata *et al.*, 2025).

Esto es especialmente crucial ya que no todas las especies responderán a las mismas condiciones, y un solo plan puede tener consecuencias no deseadas. Por ejemplo, aunque los

programas federales reforestan más de 1,000,000 hectáreas cada año, las estadísticas de supervivencia están por debajo del 70 % (CONAFOR, 2018) debido a la falta de monitoreo técnico, selección inadecuada de especies, ausencia de preparación del sitio y falta de participación pública.

La planificación de cualquier escala requiere criterios científicos y técnicos precisos. Los esfuerzos deben comenzar desde la recolección de semillas y terminar hasta después del monitoreo del área. Por el contrario, la reforestación con especies nativas en áreas áridas y semiáridas de México no solo es ecológicamente necesaria, sino también una oportunidad para restaurar parcialmente los paisajes degradados, aumentar la resiliencia al cambio climático y renovar el proceso de numerosos servicios ecosistémicos esenciales. Para que esta posibilidad se haga realidad, el programa debería incluir la combinación del conocimiento ecológico tradicional y la participación de la población local con medios científicos modernos y políticas activas de restauración local.

2.3 Modelos para la evaluación estadística de la supervivencia.

El análisis de supervivencia en cualquier reforestación no puede realizarse sin ayuda de cálculos estadístico, por el apoyo que proporcionen al representar los resultados de manera sencilla y así obtener conclusiones concretas. Los modelos estadísticos también son un componente clave de cualquier caja de herramientas de gestión para interpretar patrones, cuantificar relaciones de causa-efecto y hacer conjeturas informadas sobre el futuro.

Un tipo popular de estos modelos es el Modelo Lineal Generalizado (GLM) que puede tener variables continuas y/o categóricas, y ajustarse a una variedad de distribuciones (binomial, Poisson, Gaussiana), lo que permite modelar la supervivencia como resultado binario (supervivencia/muerte). Rodríguez *et al.* (2017) utilizaron el modelo para evaluar la influencia del procesamiento del suelo, la aplicación de hidrogel y la dirección del suelo como prácticas para estimar la restauración del suelo.

Por otro lado, la regresión logística se ha aplicado ampliamente a la probabilidad de supervivencia basada en factores ambientales (temperatura, precipitación), edáficos (textura, profundidad), y biológicos (caracterización de plantas). En el trabajo de González *et al.*

(2019) dichos modelos les permitió generar mapas de riesgo o idoneidad para la plantación de diferentes especies.

2.4 Calidad de la planta y prácticas de producción.

La calidad de la planta antes de plantarse es uno de los factores que más influye en los resultados de la reforestación. Naturalmente, esto no sólo se caracteriza por su presencia en campo, sino también en relación con la salud fisiológica, sistema radicular y su adecuación al sitio de plantación. En el sistema radicular se requiere que no presente espirales o nudos en varias etapas de crecimiento, y que la planta tolere el estrés post trasplante (Prieto Ruíz *et al.*, 2018).

Estas características están directamente relacionadas con las prácticas en viveros. El tipo de contenedor, sustrato, el riego y la fertilización, así como la duración del endurecimiento son todos importantes para adquirir plantas vigorosas, funcionales y con mayor probabilidad de sobrevivir.

Andrade *et al.* (2012) señalan que las micorrizas y los fertilizantes de liberación lenta son técnicas que pueden promover la tolerancia de las plantas jóvenes al estrés hídrico y usar de forma eficiente los nutrientes, esto mejora en gran medida las características de las plantas de vivero.

El pre endurecimiento de plantas antes de trasplantarlas al campo, al reducir la disponibilidad de agua y aumentando la exposición a la radiación solar, lo que mejora la resistencia del tejido, lo que puede ayudar a que las plantas se aclimaten de manera más eficiente.

2.5 Enfoques para la evaluación de la reforestación.

El método de evaluación adoptado variará según el tamaño y objetivos del proyecto. La densidad total de plantas se puede estimar en áreas pequeñas, pero los conteos en el campo proporcionan una estimación robusta para grandes áreas no cultivadas, como proponen González *et al.* (2019) La periodicidad del análisis también es muy importante y es mejor realizarlo al final de la temporada seca, donde el estrés hídrico es más intenso.

2.6 Descripción técnica y contramedidas.

Los aspectos técnicos también son esenciales para mejorar la supervivencia en plantaciones. La formación, esquema de plantación y trabajos de protección deben cumplir con las condiciones edafoclimáticas del área. En áreas áridas, técnicas como el subsolado en línea, la construcción de pozos y hoyos de infiltración que dirigen el agua para ser capturada y retenida, mejoran el crecimiento de las raíces (Rodríguez *et al.*, 2017).

La adición de enmiendas orgánicas o hidrogeles a la plantación mejora la estructura del suelo y la retención de agua. Tales prácticas, complementadas con cobertura vegetal o inerte (acolchado), reducen la pérdida de agua por evaporación del suelo y mejoran el microclima de la planta. Estas demostraron ser efectivas según Rodríguez *et al.* (2017) en un análisis realizado en áreas reforestadas bajo condiciones áridas en México.

Otro aspecto significativo es la protección técnica contra factores de riesgo bióticos (por ejemplo, pastoreo y fauna silvestre). La adopción de cercas perimetrales, protecciones individuales y repelentes han disminuido significativamente la mortalidad del primer año (Mata *et al.*, 2025).

Además, el control adecuado de malezas es esencial, ya que durante los primeros meses después de la plantación pueden competir por gran parte del agua y nutrientes disponibles. Aunque el riego auxiliar durante los primeros meses es costoso, puede salvar vidas, especialmente donde no está asegurada la lluvia en el período crítico. La planificación de estas acciones debe basarse en diagnósticos previos y ser específica para cada tipo de ecosistema.

2.7 Descripción de las especies estudiadas.

***Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck (*Asal*).**

Es una especie de planta suculenta que pertenece a la familia Asparagaceae, también conocida como "maguey mezcalero". Produce hojas gruesas, carnosas y glaucosas de color verde con espinas en los márgenes y en la punta. Su inflorescencia es una espiga floral de hasta 10 m de altura. Se encuentra en zonas áridas y semiáridas de México, particularmente

en el Altiplano Central, y se ha naturalizado en otras regiones. Se utiliza para la producción de pulque, fibra, forraje y restauración ecológica (García, 2007).



Imagen 1. *Agave salmiana*, ejido El Epazote, Venado, San Luis Potosí.

***Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. (Acan).**

Es un arbusto perenne de la familia Amaranthaceae, conocido como "chamizo". Tiene hojas pequeñas cubiertas de tricomas, que le dan un aspecto algo grisáceo, y frutos con cuatro alas membranosas. Se extiende por regiones áridas de América del Norte, en partes del norte y centro de México. Se usa como forraje para el ganado y para recuperar suelos degradados y en proyectos de reforestación (Quiroz *et al.*, 2021).



Imagen 2. *Atriplex canescens*, ejido El Epazote, Venado, San Luis Potosí.

***Eysenhardtia polystachya* (Kunth) Sarg. (Epol).**

Palo dulce: es un arbusto o árbol pequeño de la familia Fabaceae. Tiene hojas palmadas, racimos de flores blancas y frutos en forma de vaina. Distribuido en regiones áridas y semiáridas de México y el sur de Estados Unidos. Se usa en medicina tradicional por sus propiedades diuréticas, en la reforestación de suelos degradados y como forraje (Lorenzo *et al.*, 2023).



Imagen 3. *Eysenhardtia polystachya*, ejido La Zacatecana, Guadalupe, Zacatecas.

***Opuntia robusta* J.C.Wendl. ex Pfeiff. (Orob).**

Llamado "nopal duraznillo", es un cactus arbustivo con cladodios gruesos, redondos y azulados de hasta 40 cm de diámetro, con espinas largas y gruesas. Su distribución es principalmente en regiones áridas y semiáridas de México, en el Altiplano Central. Se usa como forrajera, como alimento, en rehabilitación de suelos y como fuente de frutos de tuna (Ávalos *et al.*, 2013).



Imagen 4. *Opuntia robusta*, ejido Ojuelos, Ojuelos de Jalisco, Jalisco.

***Opuntia streptacantha* Lem. (Ostr).**

Nopal cardón, es un cactus con grandes cladodios verdes y espinas largas y curvas. Está muy extendido en regiones áridas y semiáridas del centro y norte de México. Sirve como planta reproductiva vital para la alimentación humana y animal a través de la producción de tunas y "nopalitos"; también es usada en reforestación y conservación de suelos (Ávalos *et al.*, 2013).



Imagen 5. *Opuntia streptacantha*, Fernando M., Salinas, San Luis Potosí.

***Pinus cembroides* Zucc. (*Pcem*).**

Pertenece a la familia Pinaceae y se le conoce como "pino piñonero". Es un árbol pequeño con hojas en forma de aguja en grupos de tres y conos leñosos que producen piñones. Se encuentra en regiones áridas y semiáridas de México y el suroeste de Estados Unidos. Su principal propósito de producción es para piñón, reforestación y leña (Madrid *et al.*, 2021).



Imagen 6. *Pinus cembroides*, ejido El Salitrillo, Ojuelos de Jalisco, Jalisco.

***Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. (*Plae*).**

Conocido como "mezquite", es un árbol o arbusto de la familia Fabaceae con un dosel amplio, espinas cortas y hojas bipinnadas. Sus frutos son vainas. Su distribución abarca regiones áridas y semiáridas de México y el sur de Estados Unidos. Se usa en reforestación, alimento para animales y humanos, principalmente para carpintería y como leña (Palacios *et al.*, 2021).



Imagen 7. *Prosopis laevigata*, Mario N., Villa de Cos, Zacatecas.

3 MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1 Ubicación del área de estudio.

El área de estudio se localiza en la región centro-norte de México, dentro de los estados de Aguascalientes (Ags), Jalisco (Jal), San Luis Potosí (SLP) y Zacatecas (Zac). Los sitios de muestreo se distribuyen dentro de un rango aproximado de: Latitud: entre 22°00' N y 24°00' N; Longitud: entre 100°00' O y 103°00' O, al norte del trópico de Cáncer, dentro de la región del Altiplano mexicano. Este altiplano es una extensa zona de mesetas y sierras intermedias, caracterizada por su clima seco y semiárido, así como por su vegetación dominada por matorral xerófilo, pastizales y zonas agrícolas.

Esta ubicación ofrece un entorno representativo de las condiciones ecológicas, climáticas y de uso del suelo típicas de esta región del país, lo cual la hace relevante para estudios ambientales, ecológicos y agrícolas.

El área de estudio presenta altitudes entre 2032 y 2285 msnm. (INEGI, 2013), precipitaciones anuales de 393 a 480 mm y temperaturas medias que oscilan entre 17 y 18 °C (Hersbach *et al.*, 2018). Los suelos predominantes son xerosoles y regosoles (INIFAP & CONABIO, 2001), climas esteparios secos y semisecos con lluvias estivales, condiciones que reflejan el carácter árido y desafiante del ecosistema donde estas especies prosperan (Andrade *et al.*, 2012).

3.2 Descripción general de las especies y área de estudio.

Se evaluaron siete especies clave de zonas áridas y semiáridas de México por su relevancia ecológica y usos potenciales. *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck (Asal) (maguey pulquero) y *Opuntia robusta* J.C.Wendl. ex Pfeiff. (Orob) (nopal duraznillo) son importantes en forraje, restauración de suelos y producción de pulque y tunas. *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. (Acan) (chamizo) y *Eysenhardtia polystachya* (Kunth) Sarg. (Epol) (palo dulce) contribuyen a la recuperación de suelos degradados; esta última es destacada también por su uso medicinal. *Opuntia streptacantha* Lem. (Ostr) (nopal cardón) es fundamental en la alimentación humana y conservación de suelos. *Pinus cembroides* Zucc. (Pcem) (pino piñonero) y *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) (Plae) M.C. Johnst. (mezquite)

se emplean en reforestación, producción de piñones, alimentación animal y como fuente de madera y leña.

3.3 Muestreo de supervivencia.

El muestreo de la supervivencia en las reforestaciones se realizó de forma sistemática para garantizar la representatividad de los datos recopilados (Mata *et al.*, 2023), llevándose a cabo de forma continua durante cuatro años (2021-2024). Estas reforestaciones se realizaron dentro de áreas apoyadas mediante “PROYECTOS DE RESTAURACIÓN FORESTAL (CONAFOR)”, donde se protegió con el cercado de cuatro hilos de alambre de púas calibre 12.5, postes de fierro cada cuatro metros y retenidas cada 100 m. Este estudio se realizó sobre la obra de conservación de suelo, con bordos y roturación en curvas a nivel, a un distanciamiento de 10 metros entre obras.

El proceso de muestreo inició desde la entrada del predio delimitado por un cerco, avanzando hasta la esquina más cercana para comenzar con la distribución de los sitios de muestreo. Se delimitó un margen de 50 metros de distancia respecto al cercado, tanto en los laterales como en el frente. El muestreo se realizó a través de transectos lineales de 100 metros (Mata *et al.*, 2024), siguiendo las curvas a nivel de la obra.

La ubicación de cada transecto se determinó con un GPS Garmin 79S. Todas las plantas encontradas en el transecto fueron cuantificadas. A un 10% de las plantas de cada transecto se registró la especie, diámetro basal (cm), altura total (cm), estado (viva o muerta) y diferencio aquellas que correspondían a la reforestación inicial de aquellas que formaban parte de un mantenimiento posterior.

Debido a la densidad de plantación (400 plantas/ha), cada transecto de 100 m debía contener 40 plantas, dado que la distancia entre cada planta era de 2.5 metros. En caso de encontrar menos de 40 plantas, las ausentes se consideraron como muertas usando la fórmula de estimación de supervivencia (CONAFOR, 2023). Una vez completado el primer transecto, se avanzaba paralelamente al cercado entre 200 y 250 metros para establecer el siguiente transecto (Mata *et al.*, 2024). Si la nueva ubicación se alejaba demasiado del cercado, se ajustaba para mantener la distancia de 50 metros respecto al cercado. El procedimiento se repitió hasta alcanzar el extremo opuesto del área de reforestación.

Al finalizar en el cerco, se realizó el mismo muestreo, pero de manera contraria, separándose 250 metros desde el último transecto hacia el lado contrario de la posición del cercado.

Este proceso permitió cumplir con el objetivo de realizar un muestreo por cada 5 hectáreas, hasta completar la totalidad del área de reforestación. La extensión del área de cada predio varió según la localidad.

3.4 Estimación de supervivencia.

La supervivencia en las áreas reforestadas se estimó a partir del registro de plantas vivas dentro de los transectos establecidos como unidades de muestreo. Estos datos fueron organizados en una hoja de cálculo en Excel, donde se consignó el número total de individuos vivos. A partir de esta información, se calculó el porcentaje de supervivencia utilizando la fórmula correspondiente.

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n ai}{\sum_{i=1}^n mi} * 100$$

Donde

$\sum_{i=1}^n$ = Sumatoria de los datos de acuerdo a la variable a o m.

p = Proporción estimada de árboles vivos.

ai = Número de plantas vivas en el sitio de muestreo i.

mi = Número de plantas vivas y muertas en el sitio de muestreo i.

Los proyectos pertenecen a ejidos y pequeños propietarios, y se localizan en los siguientes estados y localidades. A partir de este punto, se indicará entre paréntesis la abreviatura correspondiente a cada localidad:

- Ojo de Agua de Crucitas, El Llano, Aguascalientes (Agsoa)
- El Epazote, Venado, San Luis Potosí (Slpee)

- Fernando M. Salinas, San Luis Potosí (Slp_{fm})
- Illescas, Santo Domingo, San Luis Potosí (Slp_{il})
- El Salitrillo, Ojuelos de Jalisco, Jalisco (Jales)
- Los Campos, Ojuelos de Jalisco, Jalisco (Jallc)
- Ojuelos, Ojuelos de Jalisco, Jalisco (Jaloj)
- La Zacatecana, Guadalupe, Zacatecas (Zaclz)
- Noria de San Pablo, Pinos, Zacatecas (Zacnp)
- San Jerónimo, Villa Hidalgo, Zacatecas (Zacsj)
- Mario N. Villa de Cos, Zacatecas (Zacmn).

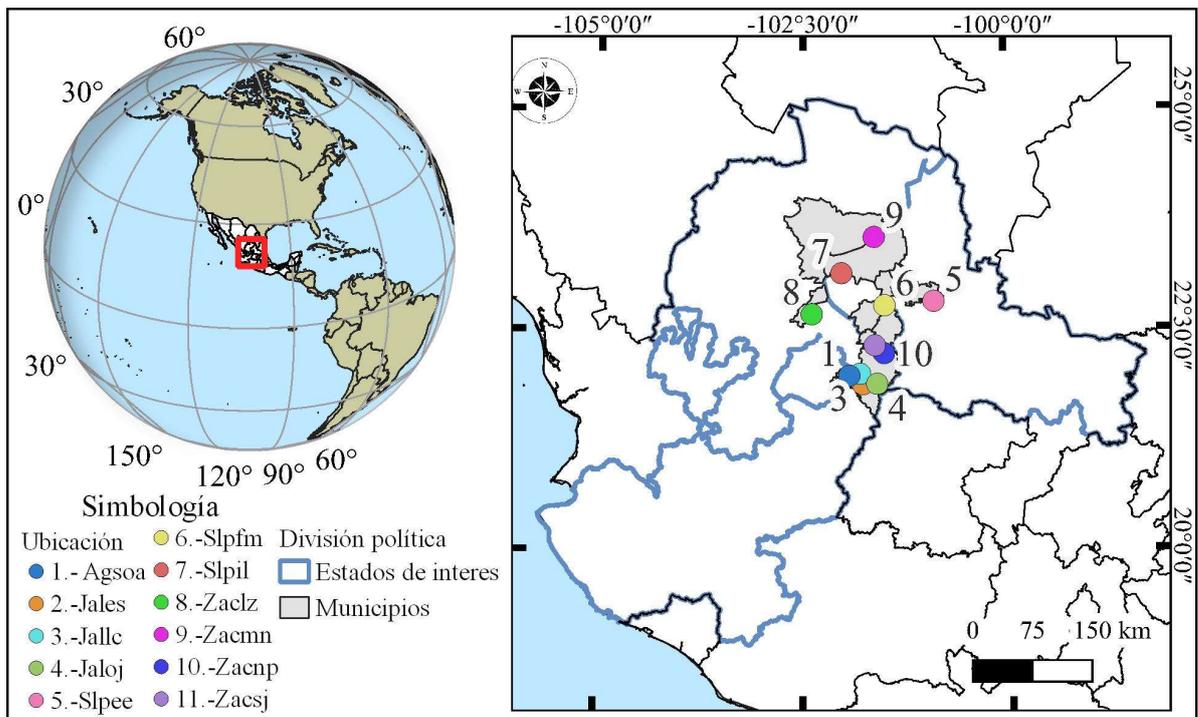


FIGURA 1. Mapa de localización de áreas de muestreo en el contexto global y local.

Agsoa = Ojo de Agua de Crucitas, El Llano, Aguascalientes, Slpee = El Epazote, Venado, San Luis Potosí, Slp_{fm} = Fernando M. Salinas, San Luis Potosí, Slp_{il} = Illescas, Santo Domingo, San Luis Potosí, Jales = El Salitrillo, Ojuelos de Jalisco, Jalisco, Jallc = Los Campos, Ojuelos de Jalisco, Jalisco, Jaloj = Ojuelos, Ojuelos de Jalisco, Jalisco, Zaclz = La Zacatecana, Guadalupe, Zacatecas, Zacnp = Noria de San Pablo, Pinos, Zacatecas, Zacsj = San Jerónimo, Villa Hidalgo, Zacatecas, Zacmn = Mario N., Villa de Cos, Zacatecas.

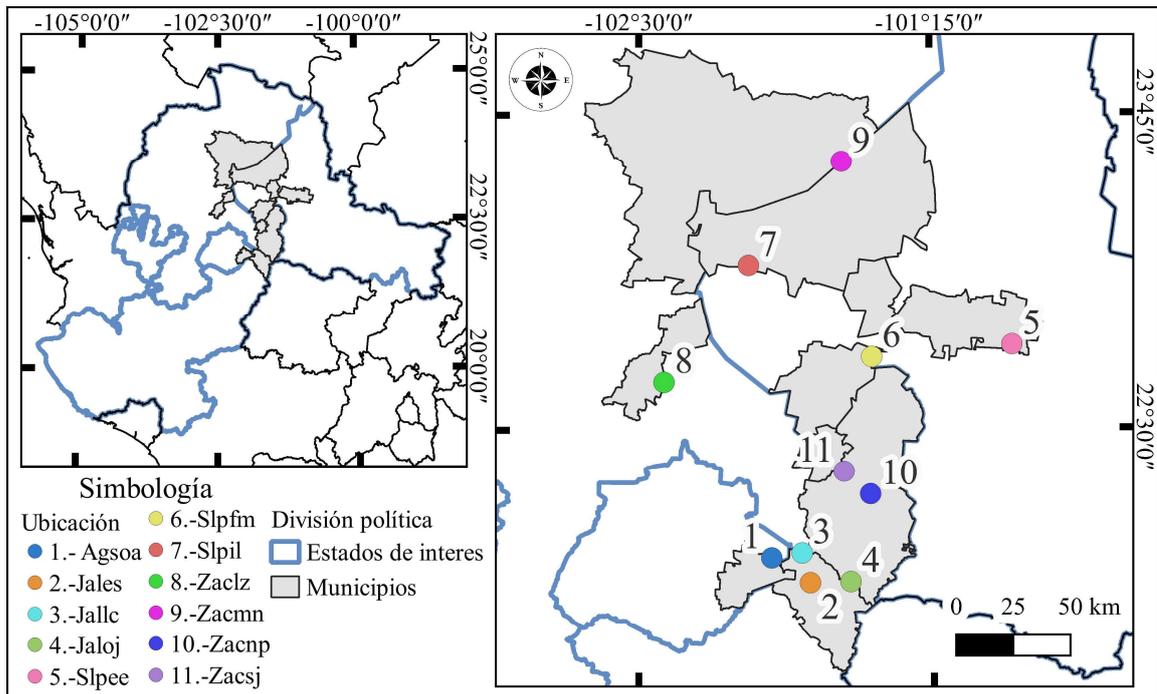


FIGURA 2 Mapa de localización de áreas de muestreo en el contexto local.

Ubicación: Agsoa = Ojo de Agua de Crucitas, El Llano, Aguascalientes, Slpee = El Epazote, Venado, San Luis Potosí, Slpfm = Fernando M. Salinas, San Luis Potosí, Slpil = Illescas, Santo Domingo, San Luis Potosí, Jales = El Salitrillo, Ojuelos de Jalisco, Jalisco, Jallc = Los Campos, Ojuelos de Jalisco, Jalisco, Jaloj = Ojuelos, Ojuelos de Jalisco, Jalisco, Zaclz = La Zacatecana, Guadalupe, Zacatecas, Zacnp = Noria de San Pablo, Pinos, Zacatecas, Zacsj = San Jerónimo, Villa Hidalgo, Zacatecas, Zacmn = Mario N., Villa de Cos, Zacatecas..

3.5 Datos climáticos de los sitios de muestreo.

Los datos de precipitación (mm) y temperatura (°C) de cada localidad fueron obtenidos del conjunto de datos ERA5, desarrollado por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF). ERA5 proporciona estimaciones climáticas globales reanalizadas con alta resolución temporal y espacial, lo que garantiza información consistente y de calidad sobre las variables meteorológicas utilizadas en este estudio (<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>).

En este estudio, se utilizaron los datos a escala mensual para realizar cálculos complementarios.

3.6 Comparación de supervivencia.

En el desarrollo de esta tesis, los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el lenguaje de programación R, a través de RStudio. Para cada tipo de análisis se emplearon librerías correspondientes y seleccionadas conforme a los requerimientos metodológicos y estadísticos del presente estudio.

Para evaluar si existían diferencias significativas en la supervivencia de cada especie, entre los distintos grupos definidos por las variables categóricas: localidad (como referencia al lugar donde se realizó la reforestación), tipo de clima y tipo de suelo, se empleó la prueba de Kruskal-Wallis, también conocida como prueba H . Esta prueba no paramétrica fue una alternativa al análisis de varianza (ANOVA) de una vía cuando no se cumplieron los supuestos de normalidad o cuando los datos fueron de naturaleza ordinal. La hipótesis nula (H_0) estableció que todas las muestras provenían de la misma población o distribución, mientras que la hipótesis alternativa (H_A) sugirió que al menos una muestra provenía de una población con una distribución distinta.

$$H = \frac{12}{N(N + 1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N + 1)$$

Donde:

N: Número total de observaciones.

K: Número de grupos.

n_i : Número de observaciones en el grupo i .

R_i : Suma de los rangos del grupo i .

Este estadístico H se comparó con la distribución chi-cuadrado (X^2) con $k-1$ grados de libertad para decidir si algo es estadísticamente significativo. Sin embargo, si el valor P calculado era menor que el nivel de significancia predeterminado ($\alpha = 0.05$), entonces se rechazaba la hipótesis nula, lo que implica diferencias significativas entre los grupos (Kruskal & Wallis, 1952).

3.7 Modelado de supervivencia mediante GAM.

Para identificar y eliminar valores atípicos en la variable porcentaje de supervivencia (P), se aplicó el método del rango intercuartílico (IQR) mediante la función `boxplot.stats()` en el programa R. Este enfoque no paramétrico detecta valores extremos que se encuentran fuera del rango definido por 1.5 veces el IQR por debajo del primer cuartil o por encima del tercer cuartil. Los datos identificados como atípicos fueron excluidos del análisis para asegurar una mayor robustez en los modelos estadísticos posteriores.

Para evitar que las proporciones adopten valores extremos de 0 o 1, lo cual puede generar problemas en modelos como la regresión beta, se aplicó el ajuste sugerido por (Cribari, N & Zeileis, 2010), consistente en la fórmula siguiente:

$$P_{aj} = \frac{P \cdot (n - 1) + 0.5}{n}$$

Posteriormente, los datos de supervivencia (P_{aj}) de cada especie, independientemente de la localidad, fueron modelados mediante un modelo aditivo generalizado (GAM). Los Modelos Aditivos Generalizados (GAM) son una extensión de los Modelos Lineales Generalizados (GLM) que permiten relaciones no lineales entre la variable de respuesta y las variables explicativas, al representar la relación funcional mediante funciones suaves. Esto resultó especialmente útil si se sospechaba que la relación entre las variables independientes y dependientes no era lineal. La expresión general de un GAM es:

$$g(\mathbb{E}[Y]) = \beta_0 + f_1(X_1) + f_2(X_2) + \dots + f_p(X_p)$$

Donde:

Y es la variable respuesta (P_{aj}).

$\mathbb{E}[Y]$ es la esperanza (valor esperado) de Y .

$g(\cdot)$ es la función de enlace (por ejemplo, logit, log, identidad).

β_0 es el intercepto.

f_1, f_2, \dots, f_p son funciones suaves (generalmente spline o kernel smoothers) aplicadas a las variables explicativas X_1, X_2, \dots, X_p .

Para ajustar dicho modelo, se generó una base de datos que incluyó: estado, localidad, coordenadas X y, temperatura media, máxima y mínima de cada estación del año (primavera, verano, otoño e invierno), altitud, tipo de clima, tipo de suelo, año, especie, número de individuos vivos, muertos, total, y porcentaje de supervivencia (P_{aj}). También se incorporaron variables anuales como temperatura media, mínima, máxima y precipitación total.

Se utilizó la variable P_{aj} como dependiente, mientras que como variables independientes se incluyeron los datos climáticos y geográficos. El modelo ajustado fue un modelo aditivo generalizado beta (beta GAM) y se especificó una familia beta con función de enlace del software RStudio `logit`. Para cada variable independiente se incorporaron funciones suavizadas, y se consideró la localidad de reforestación como efecto fijo, lo que hace del modelo una estructura mixta, al combinar efectos no lineales con un efecto fijo categórico.

Después de ajustar el modelo GAM, se verificó la significancia estadística de los coeficientes mediante pruebas de hipótesis. Para cada coeficiente β_i , se plantearon las siguientes hipótesis:

$H_0: \beta_i = 0$ (El coeficiente no tiene efecto).

$H_1: \beta_i \neq 0$ (El coeficiente tiene un efecto significativo).

Aquellas variables cuyo valor p superó el valor de 0.05 (nivel de significancia del 95%) fueron eliminadas y el modelo fue reajustado.

Una vez logrado este ajuste, se aplicó un modelo de Random Forest para evaluar la importancia relativa de las variables predictoras, con 500 árboles en el modelo. Este proceso se realizó para determinar qué variables tenían mayor impacto en la predicción de la variable dependiente. Para ello, se calculó el estadístico de importancia de las variables basado en el índice de error de la variable (%IncMSE), que medio cómo cambia el error de predicción al permutar los valores de cada variable en el modelo. La importancia relativa de cada variable fue normalizada y expresada como un porcentaje, lo que permitió identificar las variables más influyentes (Hastie, T & Tibshirani, R, 1986).

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Se evaluaron siete especies distribuidas en regiones semiáridas de México (Ags, Jal, Slp y Zac) del 2021 al 2024 con 687 sitios (Cuadro 1), las reforestaciones estudiadas se localizan en áreas degradadas con cobertura de pastizales, lo que disminuye la capacidad de contenido de humedad, según Godoy, (2024).

Cuadro 1. Características climáticas, edáficas y morfológicas de las siete especies analizadas en zonas semiáridas de México.

Especie	Est	Altitud	Pp	Tem	Altura	Clima	Suelo	NLE	Años	Sitios
<i>Asal</i>	Ags - Jal	2128	412	18	32.6±9.1	BS1kw-	R-c, X-c	10	2021-	224
	Slp - Zac					BS0hw	X-h, X-l		2024	
<i>Acan</i>	Jal - Slp	2032	406	18	37.9±16.9	BS1kw-	X-c, X-h	6	2021-	73
	Zac					BS0hw	X-l		2024	
<i>Epol</i>	Jal - Slp	2212	479	17	41.2±13.2	BS1kw-BS0hw	C-l, R-c	4	2021-	32
	Zac					BS0kw	X-h, X-l		2024	
<i>Orob</i>	Ags - Jal	2114	393	18	30.9±10.2	BS1kw	X-c, X-h	8	2021-	150
	Slp - Zac					BS0hw	X-l		2024	
<i>Ostr</i>	Jal - Slp	2180	469	18	33.4±9.1	BS1kw	C-l, X-c	5	2023-	70
	Zac					BS0kw	X-h, X-l		2024	
<i>Pcem</i>	Ags - Jal	2285	480	17	30.5±11.5	BS1kw	R-c	3	2021-	39
	Zac						X-h		2024	
<i>Plae</i>	Jal - Slp	2210	435	17	33.9±18.7	BS1kw-BS0hw	C-l, X-c	8	2021-	99
	Zac					BS0kw	X-h, X-l		2024	

Especie: *Agave salmiana* (*Asal*), *Atriplex canescens* (*Acan*), *Eysenhardtia polystachya* (*Epol*), *Opuntia robusta* (*Orob*), *Opuntia streptacantha* (*Ostr*), *Pinus cembroides* (*Pcem*) y *Prosopis laevigata* (*Plae*). Est = Estado, Altitud = Altura (msnm), Pp = Precipitación (mm), Tem = Temperatura (°C), Altura de la planta= Altura ± desviación estándar (cm), NLE = Número de localidades donde se encuentra plantada la especie, C-l = Castañozem lúvico, R-c = Regosol calcárico, X-c = Xerosol cálcico, X-h = Xerosol háplico, X-l = Xerosol lúvico, BS1kw = Estepario semiseco (semiseco templado) con régimen de lluvia en verano, BS0hw = Estepario seco (seco semicálido) con régimen de lluvia en verano, BS0kw = Estepario seco (seco templado) con régimen de lluvia en verano.

La altitud de los sitios de estudio se extendió desde los 2032 msnm (*Acan*) hasta los 2285 msnm (*Pcem*). La precipitación anual varió de 393 mm (*Orob*) a 479 mm (*Epol*) y las

temperaturas promedio fueron de 17 a 18 °C, con una altura promedio de las plantas de 30.59 ± 11.51 cm (*Pcem*) a 41.28 ± 18.32 cm (*Epol*). Las áreas de estudio se encuentran en cinco tipos de suelo y tres tipos de clima (Cuadro 1). Según Burney *et al.*, (2015), las zonas áridas y semiáridas de México reciben alrededor de 250 mm anuales, con suelos dominantes como xerosoles, leptosoles, regosoles y vertisoles, con una diversa capacidad de retención de humedad y disponibilidad de nutrientes.

4.1 Análisis de supervivencia: varios grupos.

Con la prueba de Kruskal-Wallis se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la supervivencia entre tipos de suelo para las especies: *Asal*, *Epol*, *Pcem*, *Orob*, *Ostr* y *Plae* ($p < 0.05$). También se observaron diferencias entre climas en *Asal*, *Acan* y *Ostr*. En cuanto a la ubicación, todas las especies evaluadas mostraron diferencias significativas, lo que indicó que el sitio de reforestación influyó en la supervivencia (Cuadro 2). Estos resultados destacaron el efecto del ambiente sobre el establecimiento de las especies.

Cuadro 2. Supervivencia de especies en distintos tipos de suelo y clima en zonas semiáridas de México, analizadas con la prueba de Kruskal-Wallis.

Especie	Factor	Chisq	GL	Valor P	Especie	Factor	Chisq	GL	Valor P
<i>Asal</i>	Localidad	34.54	9	0.0001	<i>Epol</i>	Localidad	10.96	3	0.011
	Suelo	12.40	3	0.006		Suelo	10.44	3	0.010
	Clima	8.04	1	0.005		Clima	4.84	2	0.080
<i>Acan</i>	Localidad	19.05	5	0.002	<i>Pcem</i>	Localidad	13.57	4	0.009
	Suelo	2.87	2	0.230		Suelo	8.04	1	0.004
	Clima	3.99	1	0.045		Clima	4.84	2	0.080
<i>Orob</i>	Localidad	37.47	7	0.0001	<i>Ostr</i>	Localidad	13.57	4	0.009
	Suelo	23.75	2	0.0001		Suelo	8.98	3	0.020
	Clima	0.97	1	0.320		Clima	10.29	1	0.001
<i>Plae</i>	Localidad	27.55	7	0.0001					
	Clima	4.60	2	0.100					
	Suelo	16.47	3	0.001					

Especie: *Agave salmiana* (*Asal*), *Atriplex canescens* (*Acan*), *Eysenhardtia polystachya* (*Epol*), *Opuntia robusta* (*Orob*), *Opuntia streptacantha* (*Ostr*), *Pinus cembroides* (*Pcem*) y *Prosopis laevigata* (*Plae*), $\alpha = 0.05$, GL = Grados de Libertad.

Localidades: En términos prácticos, la supervivencia de *Asal* fue relativamente homogénea entre las localidades evaluadas. Lo mismo ocurrió para *Acan*, con promedio de 87 %. Esta tasa supervivencia fue similar a lo encontrada por Mata *et al.*, (2024) con un 96 % con 6 especies arbóreas (Matorral Espinoso Tamaulipeco), a 12 meses de la reforestación.

La especie *Orob* indicó mayor adaptación en Zacmn, Slpfn, Slpee, Jaloj, Agsoa y Slpil (91 % promedio). *Plae* registró menor supervivencia en Slpee, Slpil, Zacmn y Zacsj (54 %) (Cuadro 3). En Escoto *et al.*, (2023) mencionan que las primeras 17 semanas de reforestación en *P. laevigata* y *C. boissieri*, son sumamente importantes en las cuales se debe tener disponibilidad de agua para mejorar la supervivencia de las especies, por lo que en esta misma especie pudo presentar esta característica en el sitio lo que pudo afectar su supervivencia.

La mayor supervivencia en el presente estudio de *Pcem* fue en Zacnp del 90 %, contrastante a lo encontrado por Sandoval-García *et al.*, (2022) quienes reportaron 27% en la misma especie en una reforestación a 1 año de su establecimiento. Algunos autores como Vega, (2024) y Fuente *et al.*, (2024) indican que *Pcem* es altamente tolerante a la sequía y a suelos con bajos nutrientes, a pesar de esto, en el presente estudio la supervivencia de esta especie se presentaron localidades con valores menores al 80 % (Cuadro 3).

Born & Parpal (2016) reportaron una alta variabilidad interanual en las tasas de supervivencia de especies nativas. Donde se entre 2004 y 2014 la supervivencia promedio nacional fue del 47 % mucho menor al promedio presentado de más del 80 %, aunque en Born & Parpal (2016) no se realizaron un diagnóstico que explicara el porqué del bajo promedio.

En este estudio, la supervivencia de *Pcem* fue superior al 80 %, que superó los valores mínimos reportados en las investigaciones de Vázquez (2016), con *Pinus greggii* y *P. oaxacana*, donde se registró tasas de entre 40.75 % y 86.36 % en sitios con 4 a 10 años de establecimiento, aunque estos resultados podrían variar por la diferencia de edad de las plantaciones y por factores como condiciones locales o densidad.

Cuadro 3 Supervivencia de especies por localidad evaluadas con la prueba de Kruskal-Wallis y agrupación múltiple de Bonferroni, en zonas semiáridas de México.

Loc	<i>Asal</i>	<i>Acan</i>	<i>Epol</i>	<i>Orob</i>	<i>Ostr</i>	<i>Pcem</i>	<i>Plae</i>
Agsoa	0.96±0.04 ^a			0.89±0.10 ^{bc}		0.76±0.06 ^b	
Jales	0.87±0.12 ^{abc}	0.93±0.06 ^a	0.84±0.12 ^b	0.81±0.09 ^c		0.75±0.15 ^b	
Jallc	0.84±0.11 ^{ac}						0.79±0.53 ^{ab}
Jaløj	0.81±0.12 ^{abc}			0.91±0.07 ^{bc}	0.83±0.12 ^{ab}		0.88±0.46 ^a
Slpee	0.95±0.09 ^a	0.84±0.04 ^{ab}	0.73±0.00 ^b	0.93±0.10 ^{ab}			0.59±0.02 ^b
Slpfm	0.79±0.07 ^{abc}	0.91±0.08 ^a		0.93±0.06 ^{ab}	0.79±0.11 ^b		0.74±0.01 ^{ab}
Slpil	0.83±0.15 ^{abc}	0.78±0.08 ^{ab}		0.88±0.05 ^{bc}			0.51±0.01 ^b
Zaclz			0.95±0.03 ^a		0.94±0.07 ^a		0.80±0.69 ^a
Zacmn	0.96±0.06 ^{abc}	0.82±0.14 ^{ab}		0.96±0.05 ^a			0.56±0.02 ^b
Zacnp	0.95±0.06 ^{abc}		0.95±0.04 ^{ab}			0.90±0.11 ^a	
Zacsj	0.80±0.12 ^{ac}	0.96±0.04 ^a		0.84±0.08 ^{bc}	0.83±0.17 ^{ab}		0.53±0.60 ^b

Loc = Localidad de la plantación, *Agave salmiana* (*Asal*), *Atriplex canescens* (*Acan*), *Eysenhardtia polystachya* (*Epol*), *Opuntia robusta* (*Orob*), *Opuntia streptacantha* (*Ostr*), *Pinus cembroides* (*Pcem*) y *Prosopis laevigata* (*Plae*). Letras iguales en una misma columna indican que no hay diferencias significativas entre grupos (prueba post hoc, $\alpha = 0.05$).

Tipo de suelo: Las supervivencias de las especies *Acan* y *Epol* fueron similares (93% promedio en ambos) en todos los tipos de suelo ($p > 0.05$). El resto de las especies (*Asal*, *Orob*, *Ostr*, *Pcem* y *Plae*) presentaron diferencias según el tipo de suelo (FIGURA 3), Según Bautista & Aguilera (2023) las propiedades del suelo como los macronutrientes, micronutrientes y pH afectan directamente a las plantas, siendo que cada tipo de suelo presenta diferencias en sus características.

La especie *Asal* se presentó con una supervivencia del 90 % con diferencia solo en el suelo “X – l” (82 %). La especie que muestra mayor supervivencia fue *Orob* con un 94 % en promedio. Por el contrario, la tasa de supervivencia más baja fue en *Ostr* (78 %) y ocurre en el suelo “X-c”. En la especie *Pcem*, la menor tasa de supervivencia (75 %) es en “X-c”. Finalmente, la mayor supervivencia en la especie *Plae* fue del 83 % en el suelo “X-h” y la menor del 55 % en el suelo “X-c” (Cuadro 4), al respecto, Patiño *et al.*, (2022) muestran porcentajes bajos de supervivencia (entre 37.7 y 49.4 %) en suelos del tipo xerosol (*Cordia*

boissieri, *Leucophyllum frutescens*, *Caesalpinia mexicana* y *Eysenhardtia texana*), que son muy bajos comparado con este estudio (>80%).

En Foroughbakhch *et al.* (2017) destacan que el tipo de suelo influye directamente en la supervivencia de las especies forestales. Su estudio, realizado en vertisoles arcillosos calcáreos del piedemonte de la Sierra Madre Oriental, México, la supervivencia de varias especies de *Eucalyptus*, a los 20 años de edad, mostraron rangos entre 53 % y 88 %, Estos fueron, más bajos que los encontrados en este estudio, indudablemente por la edad. A pesar de que el eucalipto es altamente adaptable a suelos degradados, algunas especies como *E. tereticornis* y *E. crebra* mostraron bajas tasas de supervivencia. Por otro lado, según CONAFOR (2023) señala que la supervivencia en reforestaciones disminuye considerablemente cuando hay pérdida de suelo ocasionada por procesos de erosión y degradación.

Cuadro 4. Supervivencia de especies por tipos de suelo evaluada con la prueba de Kruskal-Wallis y agrupación múltiple Bonferroni, en zonas semiáridas de México.

Spp	<i>Asal</i>	<i>Acan</i>	<i>Epol</i>	<i>Orob</i>	<i>Ostr</i>	<i>Pcem</i>	<i>Plae</i>
C-1			0.96 ± 0.04 ^{ab}		0.82 ± 0.05 ^{ab}		0.75 ± 0.41 ^{ab}
R - c	0.95 ± 0.06 ^a		0.96 ± 0.04 ^a			0.90 ± 0.11 ^a	
X - c	0.88 ± 0.12 ^{ab}	0.87 ± 0.10 ^a		0.94 ± 0.06 ^a	0.79 ± 0.11 ^b		0.55 ± 0.29 ^b
X - h	0.87 ± 0.12 ^{ab}	0.91 ± 0.07 ^a	0.83 ± 0.12 ^{ab}	0.88 ± 0.09 ^b	0.83 ± 0.13 ^{ab}	0.75 ± 0.13 ^b	0.83 ± 0.19 ^a
X - l	0.82 ± 0.12 ^b	0.96 ± 0.04 ^a	0.98 ± 0.00 ^a	0.84 ± 0.08 ^b	0.90 ± 0.14 ^a		0.59 ± 0.34 ^b

Spp = especie: Spp = Especie: *Agave salmiana* (*Asal*), *Atriplex canescens* (*Acan*), *Eysenhardtia polystachya* (*Epol*), *Opuntia robusta* (*Orob*), *Opuntia streptacantha* (*Ostr*), *Pinus cembroides* (*Pcem*) y *Prosopis laevigata* (*Plae*). C-1 = Castañozem lúvico, R-c = Regosol calcárico, X-c = Xerosol cálcico, X-h= Xerosol háplico, X-l = Xerosol lúvico. Letras iguales en una misma fila indican que no hay diferencias significativas entre grupos (prueba post hoc, $\alpha = 0.05$).

De forma gráfica en la FIGURA 3, los resultados permitieron observar contrastes claros en la supervivencia de las especies según el tipo de suelo. Se destacan diferencias importantes entre suelos como el Regosol cálcico (R-C), que presenta valores consistentemente altos de supervivencia, en comparación con el Xerosol lúvico (X-L), donde la variabilidad es mayor y los valores tienden a ser más bajos.

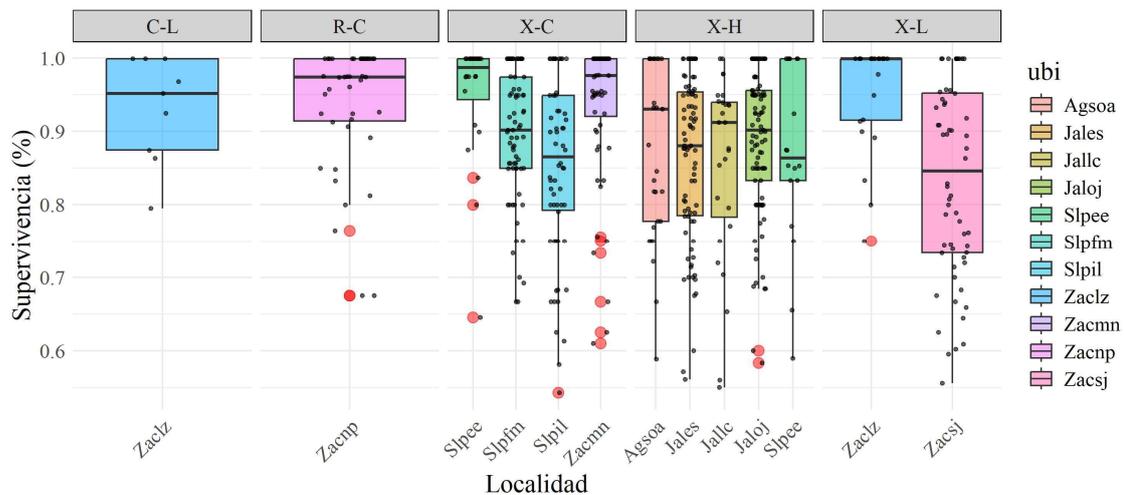


FIGURA 3. Supervivencia de diferentes especies en distintos tipos de suelo en zonas semiáridas de México.

Clima: La supervivencia de las especies *Acan*, *Epol*, *Orob* y *Plae* en los diferentes tipos de climas es similar, ya que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) porque todas formaron parte del mismo grupo de medianas (Cuadro 5). La especie *Asal* presentó la mayor supervivencia en el clima Bs1kw (95 %), pero la menor en Bs1kw (87 %), mientras que la especie *Ostr* registró su mayor supervivencia en el clima Bs0kw (94 %) y su menor en Bs1kw (82 %) (Cuadro 5) (FIGURA 4).

Los resultados obtenidos en arboretos franceses evaluados por Ducatillion *et al.* (2022) muestran que la supervivencia de las especies exóticas puede verse considerablemente afectada por las condiciones del sitio. A pesar de que los árboles tenían entre 34 y 40 años de edad al momento de la medición en 2012, los porcentajes de supervivencia fueron relativamente bajos, con valores que oscilaron entre el 10 % en Mourlanchin y el 33 % en Col des Trois Sœurs. Esta baja supervivencia podría estar relacionada con el clima mediterráneo o submediterráneo de varios sitios, así como con la limitada intervención silvícola posterior a la plantación, aunque el uso de especies exóticas pudo afectar la supervivencia, los climas de zonas áridas de México son un poco más extremistas, denotando que las especies nativas muestran mejores resultados de supervivencia (85%).

Con base en literatura científica reciente, se observa que, aunque existen numerosos estudios que relacionan variables climáticas específicas (como precipitación, temperatura y sequías)

con la supervivencia de especies vegetales, hay una escasez de investigaciones que analicen directamente la influencia del tipo de clima (según clasificaciones climáticas) en la supervivencia de las especies.

Cuadro 5. Supervivencia de especies en distintos tipos de clima en zonas semiáridas de México, analizadas con la prueba de Kruskal-Wallis.

Spp	<i>Asal</i>	<i>Acan</i>	<i>Epol</i>	<i>Orob</i>	<i>Ostr</i>	<i>Plae</i>
Bs1kw	0.87 ± 0.12 ^b	0.89 ± 0.09 ^a	0.86 ± 0.12 ^a	0.90 ± 0.08 ^a	0.82 ± 0.14 ^b	0.65 ± 0.30 ^a
Bs0hw	0.95 ± 0.09 ^a	0.84 ± 0.05 ^a	0.74 ± 0.00 ^a	0.93 ± 0.10 ^a		0.59 ± 0.00 ^a
Bs0kw			0.98 ± 0.00 ^a		0.94 ± 0.07 ^a	0.78 ± 0.36 ^a

Spp = especie: Especie: *Agave salmiana* (*Asal*), *Atriplex canescens* (*Acan*), *Eysenhardtia polystachya* (*Epol*), *Opuntia robusta* (*Orob*), *Opuntia streptacantha* (*Ostr*), *Pinus cembroides* (*Pcem*) y *Prosopis laevigata* (*Plae*). BS1kw = Estepario semiseco (semiseco templado) con régimen de lluvia en verano, BS0hw = Estepario seco (seco semicálido) con régimen de lluvia en verano, BS0kw = Estepario seco (seco templado) con régimen de lluvia en verano. Letras iguales en una misma fila indican que no hay diferencias significativas entre grupos (prueba post hoc, $\alpha = 0.05$).

En la FIGURA 4, se observó que la supervivencia de las especies presentó patrones similares entre los dos tipos de clima considerados (BS1kw y BS0Hw), lo que sugiere que el tipo climático, al menos en esta escala de análisis, tiene una influencia limitada sobre dicha variable.

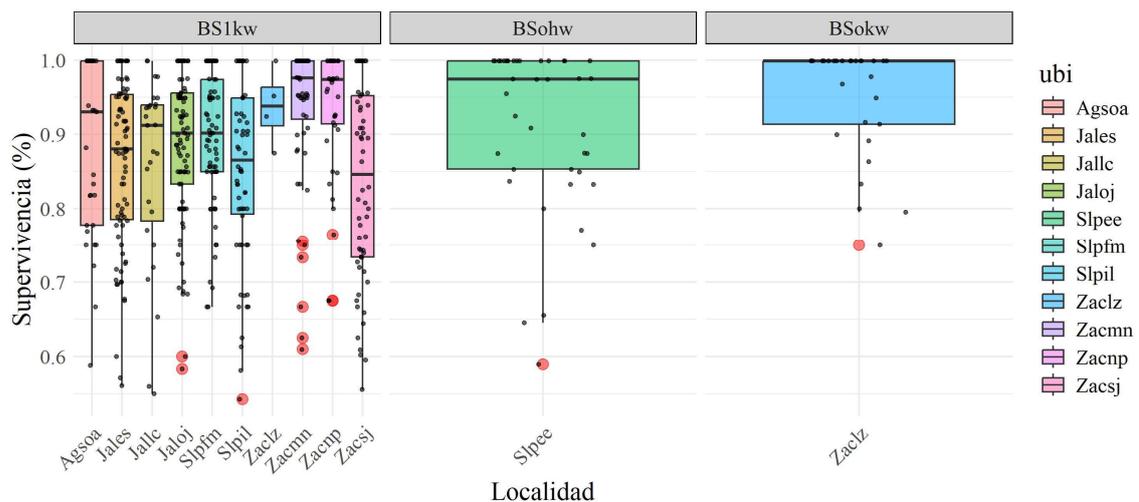


FIGURA 4. Supervivencia de diferentes especies en distintos tipos de clima en zonas semiáridas de México.

4.2 Análisis de supervivencia entre especies.

El análisis de Kruskal-Wallis no mostró diferencias estadísticamente significativas en el porcentaje de supervivencia entre las especies ($\text{Chi}^2 = 15.00$, $\text{gl} = 6$, $p > 0.05$), lo que sugiere que, desde el punto de vista estadístico, todas las especies presentan una supervivencia similar (FIGURA 5). No obstante, los rangos de supervivencia son amplios, oscilan entre el 55 % y el 100 %, en la mayoría de las especies, Esto refleja una alta variabilidad entre localidades y sugiere que, si bien las especies no difieren estadísticamente en su supervivencia promedio, las condiciones ambientales como el tipo de suelo, clima y localidad sí influyen en dicha variabilidad (Cuadro 2).

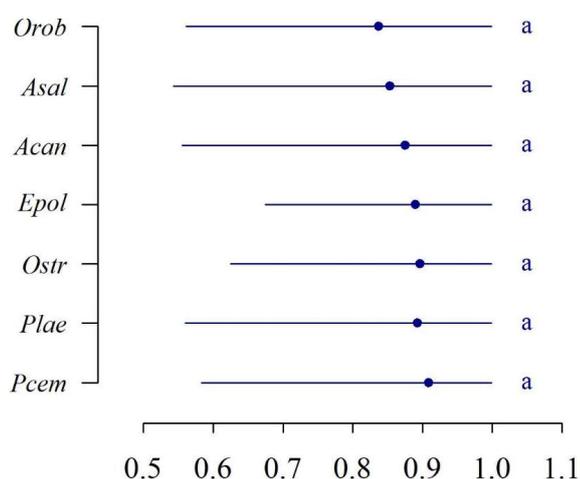


FIGURA 5. Comparación de la supervivencia de siete especies en México, utilizando la prueba de Kruskal-Wallis.

4.3 Variables del clima y la supervivencia de las especies.

Con base en el $R\text{-sq adj}$, el modelo GAM explicó entre 11 % (*Ostr*) hasta 46 % (*Pcem*) de la variación en la supervivencia, pero las devianza explicada, fueron desde el 23.20 % hasta el 63.40 % en estas mismas especies, respectivamente (Cuadro 6).

En general, la temperatura fue la variable con mayor presencia en la modelación (seis de siete especies), con valores de importancia según RF que varían entre 27 % (*Plae*) hasta 35 % (*Pcem*) (Cuadro 6). Mientras que, la precipitación, aunque menos frecuente (cuatro

repeticiones de siete) como variable dominante, mostró una influencia mayor que la temperatura, con valores que oscilan entre 30 % (*Plae*) y 37 % (*Asal*) (Cuadro 6). Esto sugiere que en algunas especies su impacto es más determinante la precipitación que la temperatura para la supervivencia (Cuadro 6). Martín *et al.*, (2023) señalan que las variables climáticas juegan un papel determinante en la supervivencia de especies nativas, como lo muestra su estudio, realizado en el Champotón, Campeche, donde se evaluaron cuatro especies (*Cedrela odorata*, *Simarouba glauca*, *Brosimum alicastrum* y *Cordia dodecandra*), bajo condiciones de temporada de lluvias y secas, con temperaturas extremas (40 °C a 13 °C). Donde encontraron supervivencias bajas (3 % a 47%), a pesar de ser especies nativas de la zona, similar a lo encontrado donde las variables de temperatura y precipitación son determinantes (Cuadro 6).

Cuadro 6. Resultados del modelo estadístico para la predicción de la supervivencia de especies en zonas semiáridas de México con base en variables climáticas, ecológicas y geográficas.

Spp	Par	Edf	F-score	P-value	Imp var	R-sq adj	Dev exp	N	Loc	
<i>Asal</i>	Pp oto	3.19	0.93	5.55e-4	***	37.11	0.40	60.30	208	Jales-Jallc-Jaloj-Zacnp-Zacsj
	T min oto	6.48	0.96	2.00e-16	***	34.89				
<i>Acan</i>	Tmin pri	1.00	0.99	0.05	*	48.61	0.18	38.30	62	Slpee-Slpil -Zacmn
<i>Epol</i>	Pp oto	1.00	0.89	0.05	*	29.87	0.29	47.30	30	Zaclz-Zacnp
<i>Orob</i>	T med oto	1.00	1.09	1.56e-05	***	36.19	0.36	52.50	145	Jales-Jaloj -Slpee -Slpfm -Zacmn-Zacsj
	Pp	3.09	1.03	1.59e-03	**	32.20				
<i>Ostr</i>	Lat	1.00	1.09	2.17e-10	***	44.05	0.11	23.20	51	Jales -Slpil -Zacsj
<i>Pcem</i>	Pp	1.02	1.21	4.38e-03	**	41.55	0.46	63.90	34	Zacnp
	Tmedmin	1.03	1.32	6.45e-06	***	29.98				
<i>Plae</i>	Tmedmax	1.00	0.85	0.04	*	30.51	0.16	24.70	99	Slpee -Slpil -Zacmn
	Pp oto	1.00	0.95	0.06	*	27.86				

Spp = Especie, Par = Parámetro, Edf = Grados de libertad efectivos, F-score = Valor f, P-value = Valor de P, Imp var = Importancia de la variable (%), R-sq adj = R cuadrada ajustada, Dev exp = Devianza explicada (%), N = Número de muestras, Loc = Localidad, Pp = Precipitación (mm), T = Temperatura (C°), Med = Media, Min = Mínima, Pri = Primavera, Oto= Otoño, Pri = Primavera, Lat= Latitud (°). $\alpha = 0.05$, Spp = Especie: *Agave salmiana* (*Asal*), *Atriplex canescens* (*Acan*), *Eysenhardtia polystachya* (*Epol*), *Opuntia robusta* (*Orob*), *Opuntia streptacantha* (*Ostr*), *Pinus cembroides* (*Pcem*) y *Prosopis laevigata* (*Plae*).

La temperatura presentó efectos diferenciados en la supervivencia de las especies estudiadas ya que se observó un efecto positivo (*Asal*, *Acan*, *Plae* y *Epol*). En contraste, algunas especies presentan efectos negativos (*Pcem* y *Orob*), lo que contradujo a los resultados de (Gimeno, 2018) en plantaciones jóvenes (3–4 años) de *Pinus*, *Acer*, *Quercus*, *Juniperus*, *Sorbus* y *Crataegus* en La Zoma, Cañizar del Olivar y Castel de Cabra (España). En estos, la supervivencia varió entre 47 % y 91 %. A pesar de que 2017 fue más húmedo (189,4 mm) que 2016 (85 mm), con temperaturas similares (≈ 28 °C máx., $\approx 12,5$ °C mín.), la mortalidad fue mayor, lo que sugirió que otros factores, además de la temperatura y la precipitación, influyeron. De manera similar, la precipitación de forma variable influye en la supervivencia. Se registra un efecto positivo en (*Asal*, *Plae* y *Orob*). Sin embargo, también se presentó un efecto negativo (*Pcem*).

En *Plae* se observó una supervivencia que estuvo fuertemente influenciada por la temperatura y la precipitación. En este estudio, se encontró que T_{medmax} contribuye en un 27% y la Pp oto en un 30%, explicando en conjunto el 24.70% de la variabilidad en la supervivencia (Cuadro 6). En Palacios *et al.*, (2021) encontraron que la temperatura como variable única proporciona 1.2 unidades de información, lo que mejora en gran medida la capacidad predictiva de su modelo, mientras que la precipitación, con un impacto de 0.6 unidades, en un modelo Jackknife.

4.4 Factores determinantes en la supervivencia: protección, producción y manejo.

La implementación de medidas de protección en las reforestaciones es fundamental para el éxito del proceso. En López & Benavides, (2011) una plantación (*Bursera fagaroides*, *Pinus cembroides*, *Pinus greggii* var. *australis* y *Pinus maximartinezii*) se registró una tasa de mortalidad del 14.2 %, atribuida en un 15.43 % a daños físicos por pisoteo, principalmente por fauna menor, y al resto por condiciones climáticas adversas. Aunque las plantaciones se realizaron bajo condiciones más controladas y protegidas, los niveles de supervivencia fueron similares a los observados en campo abierto.

Además, en el monitoreo de reforestaciones con especies nativas en las quebradas del norte de Quito, se registró una presencia del 11 % de las especies plantadas y una tasa de supervivencia de apenas el 5 % (Argüello *et al.*, 2012). Esta baja efectividad se atribuyó a

múltiples presiones antrópicas, entre ellas las invasiones ilegales, el sobrepastoreo, el uso de las quebradas como vertederos y desagües, lo que ha comprometido seriamente el éxito de las iniciativas de restauración ecológica en la zona, debido a que las reforestaciones del estudio se realizaron con consentimiento; bajo el control y cuidado de los pobladores del ejido, mostrando interés se notó su esfuerzo por el cuidado y supervisión de la reforestación de la que se encontraban a cargo.

Por otro lado, *Epol* posee una supervivencia (86 %). Este patrón contrasta con lo reportado por Rojo, (2021) quien evaluó entre 1997 y 2003 la supervivencia de hasta 30 especies de coníferas y; reportó niveles de supervivencia bajos (menor a las de este estudio); que oscilaron entre el 33 % y el 50 % y fue atribuido a la poca protección de las plantaciones en su etapa inicial, actividad que si fue realizada en las 11 localidades del estudio.

En un ensayo de reforestación con *Parkinsonia microphylla* echo por Sosa *et al.*, (2019) en Hermosillo, Sonora, se registró una supervivencia del 29.8 % en plantas sin protección al año, frente al 92 % en aquellas protegidas con palo-PET, diferencia altamente significativa ($p < 0.0001$). A partir de los 10 días, las plantas con protección tipo palo-PET apenas redujeron su altura inicial en 0.5 %, mientras que las que no tuvieron protección mostraron una pérdida del 30 %, atribuida a daños por herbivoría. A los 365 días fue del 5 % sin protección y del 60 % con protección, lo que confirma la efectividad del tratamiento frente a las presiones bióticas, los datos obtenidos en esta investigación difieren por la falta de protección individual de las especies, llegando a presentar supervivencia promedio superior al 80 %.

En un estudio realizado por Reyes Cázarez, (2017) en Morelia, Michoacán, con *Pinus pseudostrobus* y *Pinus michoacana*, la supervivencia varió ampliamente entre 0 % y 100 %. El análisis estadístico reveló que la perturbación es un factor significativo en la tasa de supervivencia ($P < 0.0001$), mientras que la pendiente y su interacción con la perturbación no mostraron efectos significativos de forma independiente ($P = 0.8556$ y $P = 0.4546$, respectivamente), dentro de estas reforestaciones se presentaron supervivencias similares en las especies aunque la perturbación externa no se presentó como un valor constante a manera visual se observaron plantas dañadas por un mal manejo de los pobladores o por invasiones de un tercero.

En una plantación de *Pinus pseudostrobus* evaluada por Sígala *et al.*, 2015) durante 14 meses, la supervivencia general fue de 52.9 %, se encontraron diferencias significativas entre sitios, con mejor resultado en el sitio 2 (60.2 %) frente al sitio 1 (45.4 %) ($\text{Chi}^2 = 6.03$, $p = 0.014$). El sistema de producción en vivero influyó significativamente ($p < 0.0001$), destacando el sistema 1+1 (años en charola y años en envase mayor) (66.7–90.3 %) y 0+2 (63.8–79.2 %) sobre el sistema 1+0, que tuvo la menor supervivencia (6.9–11.1 %). Similar a Madrid *et al.*, (2021) que realizó un ensayo con *Pinus cembroides* (14 meses en vivero y 18 meses en campo) en Durango, México, donde se evaluaron distintos tipos de contenedor. La supervivencia a los 2 meses fue alta (97.5–100 %), pero disminuyó progresivamente, alcanzando valores entre 10 % y 37.5 % a los 18 meses. Los mejores resultados finales se observaron en plantas de los contenedores T220, T310 y Ch plas-220 (37.5 %), mientras que los valores más bajos se registraron en T250 (12.5 %) y Ch plas-170 (10 %). En este estudio, si bien no se evaluó directamente el sistema de producción en vivero, se identificó que las especies utilizadas en la reforestación fueron preparadas en vivero por un máximo de un año (*Pcem*, *Plae*), mientras que otras especies tuvieron menos tiempo de preparación (*Epol* y *Acan*), lo cual podría ser un factor que determina la supervivencia y podría ser tomada en cuenta para futuros estudios.

En Barrera *et al.* (2018) la supervivencia de *P. pseudostrobus* y *P. montezumae* en El Tejamanil y Huiramo no mostró diferencias en los resultados que estuvieran relacionadas con la fecha de plantación. Se registró 70 % de supervivencia al año de evaluación en fechas tempranas y 60 % en fechas tardías, pero las fechas de reforestación en este estudio fueron realizadas dentro de la temporada de lluvias (julio).

5 CONCLUSIONES.

Se demostró que la tasa de supervivencia (%) no presentó diferencias estadísticas entre las especies estudiadas (Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 15.00$, $gl = 6$, $p > 0.05$). No obstante, factores como tipo de suelo, clima y localidad tuvieron un impacto significativo en la supervivencia ($p < 0.05$), lo que validó las hipótesis planteadas. Las variables climáticas, como la precipitación y la temperatura, desempeñan un papel importante en la supervivencia de las especies evaluadas. Según los modelos aditivos generalizados, estas variables explican entre el 11 % (*Ostr*) y el 46 % (*Pcem*) de la supervivencia, con devianza de hasta un 63 %. Además, de acuerdo con el modelo de Random Forest, la temperatura resultó ser la variable más importante para predecir la supervivencia, incluso un poco por encima de la precipitación. En general, la supervivencia se vio más influenciada por la temperatura media o máxima y la precipitación de otoño. Esto resalta la necesidad de considerar las condiciones específicas de cada localidad (incluyendo características edáficas, climatológicas y regionales), al planear y ejecutar proyectos de reforestación en zonas áridas y semiáridas. Tal enfoque permitirá mejorar significativamente la supervivencia de las especies plantadas y aumentar el éxito de las reforestaciones en estos ecosistemas frágiles.

6 LITERATURA CITADA.

- Alanís, E., Jiménez Pérez, J., Aurelio González Tagle, M., Israel, J., & Yamallel, Y. (2013). Análisis de la vegetación secundaria del matorral espinoso tamaulipeco, México. In *México Article in Phyton-International Journal of Experimental Botany*. <https://www.researchgate.net/publication/260513978>
- Alexandra Riquet, P., & Catheribe Ordoñez, I. (2020). *Reforestación de partes áridas mediante un sistema de riego por goteo* [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. <http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/co/>
- Andrade Limas, E., Belmonte Serrato, F., & Romero Díaz, A. (2012). *Erosión y degradación de suelos en ambientes semiáridos. regiones norte y altiplano de Tamaulipas (México)* (Ediciones de la universidad de Murcia, Ed.; 1st ed.).
- Argüello, A., Arboleda, D., Menoscal, J., Maldonado, D., & Urresta, S. (2012). Monitoreo de la reforestación en las quebradas en el Norte de Quito. *Enfoque UTE*, 3, 42–63.
- Ávalos-Huerta, I., Sánchez-López, D. L., & López-González, C. (2013). Nomenclatura vernácula, uso y manejo de *Opuntia* spp. en Santiago Bayacora, Durango, México. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 19(3), 367–380. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2012.09.048>
- Barrera, R., López, R., & Muñoz, H. J. (2018). Supervivencia y crecimiento de *Pinus pseudostrobus* Lindl., y *Pinus montezumae* Lamb. en diferentes fechas de plantación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.245>
- Bautista, F., & Aguilera, A. (2023). *Propiedades del suelo y procesos: hacia un conocimiento global y multidisciplinario del recurso del suelo*. <https://www.researchgate.net/publication/376685536>
- Born Schmidt, G., & Parpal, J. (2016). Manual de mejores prácticas de restauración de ecosistemas degradados, utilizando para reforestación solo especies nativas en zonas prioritarias. *CONAFOR, CONABIO, GEF-PNUD*.

- Breugel, M. van, Hall, J. S., Craven, D. J., Gregoire, T. G., Park, A., Dent, D. H., Wishnie, M. H., Mariscal, E., Deago, J., Ibarra, D., Cedeño, N., & Ashton, M. S. (2011). Early growth and survival of 49 tropical tree species across sites differing in soil fertility and rainfall in Panama. *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1580–1589. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.019>
- Burney, O., Aldrete, A., Reyes, R. A., Ruíz, J. A. P., Velazquez, J. R. S., & Mexal, J. G. (2015). México addressing challenges to reforestation. *Journal of Forestry*, 113(4), 404–413. <https://doi.org/10.5849/jof.14-007>
- Ceccon, E., & Martínez, C. (2016). Ecología de la restauración del bosque nublado en el centro de Veracruz. In F. López, J. G. García, O. Mehlreter, O. Rojas, A. Aguirre, A. Landrave, B. Ortega, K. Montes, A. Aguilar, G. Díaz, Vázquez, & S. Rojas (Eds.), *Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas* (71st ed., Vol. 13, pp. 103–129). Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma del Estado de Morelos y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Comisión Nacional Forestal. (2018, November 30). Cumple CONAFOR meta de reforestación de 1 millón de hectáreas. *Prensa*. <https://www.gob.mx/conafor/prensa/cumple-conafor-meta-de-reforestacion-de-1-millon-de-hectareas>
- Comisión Nacional Forestal. (2023). *Manual de obras y prácticas de protección, restauración y conservación de suelos forestales* (6a edición).
- CONAFOR, SEMARNAT, & UACH. (2013, November). *Informe del Medio Ambiente. Informe Final y Anexos I y II*. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap3.html#tema4>
- Cribari-Neto, F., & Zeileis, A. (2010). Beta regression in R. *Journal of Statistical Software*, 34(2), 1–24. <https://doi.org/10.18637/JSS.V034.I02>
- Domínguez Calleros, P. A., Nívar Cháidez, J. de J., & Loera Ortiz, J. A. (2001). Comparación del rendimiento de pinos en la reforestación de sitios marginales en Nuevo León. *Madera y Bosque*, 27–35.

- Ducatillion, C., Lamant, T., Bellanger, R., Bouttier, V., Bastien, J. C., Michotey, C., Gautier, L., Fady, B., & Musch, B. (2022). Survival and growth of 711 forest tree taxa in eight French arboretums from three different climate regions. *Annals of Silvicultural Research*, 47(1), 30–38. <https://doi.org/10.12899/asr-2325>
- Escoto Hernández, M. G., Sígala Rodríguez, J., Basave Villalobos, E., Alanís Rodríguez, E., & Mata Balderas, J. M. (2023). Acclimation responses of two tree species of the Tamaulipan Thornscrub under heterogeneous light environments. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 30. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2023.01.004>
- FAO. (2021). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 informe principal. In *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020*. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- Foroughbakhch, R., Carrillo-Parra, A., Hernández-Piñero, J. L., & Guzmán-Lucio, M. A. (2017). Growth and yield of an eucalyptus subtropical plantation in a northeastern Mexico defraded land soild. *Madera Bosques*, 23(3), 71–85. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331130>
- Fuente, A., Rodríguez, E. A., Díaz, M. I. Y., Silva, I. C., Himmelsbach, W., & del Campo Delgado, M. Á. M. (2024). Supervivencia y crecimiento de una reforestación Pinus cembroides Zucc. en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(86), 167–177. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i86.1466>
- García Mendoza, A. J. (2007). Los agaves de México. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, 87, 14–23. <https://revistacienciasunam.com/es/48-revistas/revista-ciencias-87/285-los-agaves-de-mexico.html>
- Gimeno, E. (2018). *Evaluation of the reforestation in La Zoma's hills (Teruel) after a wildfire* [Grado en ciencias ambientales, Escuela Politécnica Superior de Huesca]. <https://zagan.unizar.es/record/85923/files/TAZ-TFG-2018-4767.pdf>

- Godoy, S. (2024). *Efecto de la disponibilidad hídrica en la supervivencia de Celtis tala (tala) en bosques degradados del este de la provincia de Buenos Aires* [Investigación]. Universidad Nacional de la Plata.
- González, M., Foroughbakhch, R., & Rocha, L. (2019). *Árboles y arbustos de zonas áridas con potencial para restauración ecológica en dos localidades del municipio de Galeana, Nuevo León, México*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., & Simmons, A. (2018, June 14). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
- Hughes, C. E., Ringelberg, J. J., Lewis, G. P., & Catalano, S. A. (2022). Disintegration of the genus *Prosopis* L. (Leguminosae, Caesalpinioideae, mimosoid clade). *PhytoKeys*, 205, 147–189. <https://doi.org/10.3897/PHYTOKEYS.205.75379>
- INEGI. (2014, July 14). Erosión de suelos en México. *Boletín de Prensa Núm 295/14*, 1–8. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2014/especiales/especiales2014_07_1.pdf
- INEGI, I. N. de E. y G. (2013). *Continuo de elevaciones mexicano y modelos digitales de elevación*. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INIFAP, I. N. de investigaciones F. y A., & CONABIO, C. N. para el C. y U. de la B. (2001, March 10). *Edafología*. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/eda251mgw.html>
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583–621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Le, H. D., Smith, C., Herbohn, J., & Harrison, S. (2012). More than just trees: assessing reforestation success in tropical developing countries. *Journal of Rural Studies*, 28(1), 5–19. <https://doi.org/10.1016/J.JRURSTUD.2011.07.006>

- Leal Elizondo, N. A., Alanís Rodríguez, E., Mata Balderas, J. M., Treviño Garza, E. J., & Yerena Yamallel, J. I. (2018). Estructura y diversidad de especies leñosas del matorral espinoso tamaulipeco regenerado post-ganadería en el noreste de México. *Polibotánica*, 0(45). <https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.6>
- Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and Regression by randomForest. *R News*, 2(3), 18–22. <https://journal.r-project.org/articles/RN-2002-022/>
- López López, S. F., & Benavides Meza, H. M. (2013). Ensayo de seis especies arbóreas para la reforestación de la segunda. sección del bosque de Chapultepec. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(21), 25–40. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322014000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Lorenzo Barrera, N. A., Andrade Rodríguez, M., Villegas Torres, O. G., Montes de Oca, E. R., Sotelo Nava, H., Rodríguez Rojas, T. de J., & Suárez Rodríguez, R. (2023). Usos del palo dulce *Eysenhardtia polystachya* (Ort) Sarg., en cuatro municipios del estado de Morelos, México. *Polibotánica*, 55, 161–177. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.55.11>
- Madrid Aispuro, R. E., Prieto Ruíz, J. A., & Hernández Díaz, J. C. (2021). Crecimiento de *Pinus cembroides* Zucc. en vivero y campo producido en diferente tipo de contenedor. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 44(3), 435–442. <https://doi.org/https://doi.org/10.35196/rfm.2021.3.435>
- Martín Canché, B. del R., Vanoye Eligio, M., Dzib Rangel, H. A., Avilés Ramírez, G., & Alavez Góngora, J. A. (2023). Supervivencia de plantas nativas forestales para la reforestación en áreas perturbadas por actividades agropecuarias en el ejido de Arellano, Champotón, Campeche, México. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 11041–11059. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.4184
- Mata Balderas, J. M., Alanís Rodríguez, E., Sarmiento Muñoz, T. I., Rodríguez Alejandro, E. S., & Garza Pérez, A. C. (2024). Supervivencia y crecimiento de una reforestación de seis especies del matorral espinoso tamaulipeco en el noreste de México. *Polibotánica*, 0(58). <https://doi.org/10.18387/polibotanica.58.9>

- Mata Balderas, J. M., Cavada Prado, K. A., Sarmiento Muñoz, T. I., & Gonzalez Rodríguez, H. (2022). Monitoreo de la supervivencia de una reforestación con especies nativas del matorral espinoso tamaulipeco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(71), 28–52. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1229>
- Mata Balderas, J. M., González Sánchez, C. S., Cavada Prado, K. A., & Sarmiento Muñoz, T. I. (2023). Evaluación de una reforestación y regeneración del matorral espinoso tamaulipeco en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(79), 180–212. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i79.1340>
- Mata-Balderas, J. M., Sarmiento-Muñoz, T. I., & Cavada-Prado, K. A. (2025). Estudio de caso de una reforestación con especies nativas del noreste de México. *Universidad Autónoma de Nuevo León*. <https://doi.org/10.29105/cienciauanl28.131.6>
- Muñoz, J., Jesús, H., Gutiérrez, O., Avalos, C., Sánchez, G., Jesús, J., Vega, M., Yolanda, Y., & Salvador, G. (2011). Evaluación de *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Pinus greggii* Engelm. con dos densidades de plantación en Michoacán, México. *Foresta Veracruzana*, 29–35. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49719786005>
- Palacios, A., Jiménez, E., Rodríguez, R., & Razo, R. (2021). Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. en el estado de Hidalgo, México. *Revista Mexicana de ciencias forestales*, 12, 63. <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i63.812>
- Patiño Flores, A. M., Alanís Rodríguez, E., Molina Guerra, V. M., Sígala Rodríguez, J. Á., Jurado, E., González Rodríguez, H., & Aguirre Calderón, O. A. (2022). Desempeño de una reforestación con especies arbóreas nativas. *Madera y Bosques*, 28(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822342>
- Pinheiro, J., Bates, D., & Team, R. C. (2025). nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. In *CRAN (o R Project)*. R Core Team. <https://svn.r-project.org/R-packages/trunk/nlme/>
- Prieto Ruíz, J. Á., Duarte Santos, A., Goche Télles, J. R., González Orozco, M. M., & Pulgarín Gámiz, M. Á. (2018). Supervivencia y crecimiento de dos especies forestales,

- con base en la morfología inicial al plantarse. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 151–168. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.182>
- Quiroz, D. C., Luna, R. G., Flores, D. Y. Á., Reyes, F. C., & Ceja, J. E. S. (2021). *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. a multifunctional species of the semi-arid zones of north America: A review. In *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* (Vol. 12, Issue 67, pp. 4–26). National Institute of Forestry, Agricultural and Livestock Research. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i67.821>
- Reyes Cázarez, M. (2017). Afforestation with the Purpose of Restoring the Protected Natural Area “Cerro del Punhuato”, Morelia, Michoacán. *Modern Environmental Science and Engineering*, 3(9), 653–660. [https://doi.org/10.15341/mese\(2333-2581\)/09.03.2017/006](https://doi.org/10.15341/mese(2333-2581)/09.03.2017/006)
- Rodríguez Alvarado, M. M., Sánchez Cohen, I., Ecgavarría Chairez, F. G., Martínez Martín Salvador, & López Santiago, M. A. (2017). *Micro-regionalización, captación de agua de lluvia y retención de humedad edáfica en el establecimiento de especies forestales en zonas áridas*.
- Rojo, J. M. T. (2021). Environmental and physical factors affecting the survival of seven forest species in the state of Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(64). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.831>
- Sáenz, C. (2014). *Guía técnica para la planeación de la reforestación adaptada al cambio climático*. www.conafor.gob.mx
- Sandoval García, R., Jiménez Pérez, J., Yerena Yamallel, J. I., Aguirre Calderón, O. A., Alanís Rodríguez, E., & Gómez Meza, M. V. (2022). Estrategias de restauración ecológica asociadas a reforestaciones de *Pinus cembroides* Zucc., en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. *Madera y Bosques*, 28(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822298>
- SEMARNAT. (2025). *Reglas de operación 2025 del programa desarrollo forestal sustentable-para el bienestar. naturales*. [https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5750577&fecha=28/02/2025#gsc.ta
b=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5750577&fecha=28/02/2025#gsc.tab=0)

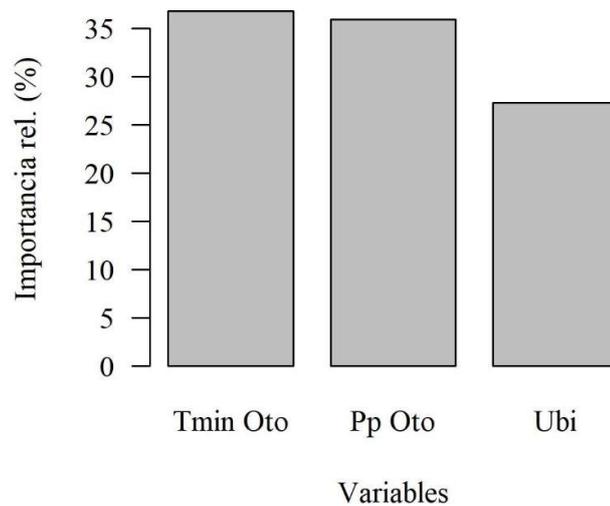
- Sígala Rodríguez, J. Á., González Tagle, M. A., & Jiménez Pérez, J. (2015). Análisis de supervivencia para una reforestación con *Pinus pseudostrobus* Lindl. en el sur de Nuevo León. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(30), 20–31. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322015000400003&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Sosa-Castañeda, J., Montiel-González, C., Hinojo-Hinojo, C., Barrera-Silva, M. Á., López-Robles, G., Osuna-Chávez, R. F., Ibarra-Zazueta, C., & Celaya-Michel, H. (2019). Protección contra herbivoría en reforestación de terreno árido degradado, con palo verde (*Parkinsonia microphylla* Torr.). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(18). <https://doi.org/10.19136/era.a6n18.2037>
- Taylor Aquino, N. E., Ramírez, N., Ramírez Marcial, N., Ferguson, B. G., & Castillo Santiago, M. Á. (2016). *Estructura y composición de bosques en paisajes manejados de Los altos de Chiapas* [Tesis para grado de maestría, El Colegio de la Frontera Sur]. <https://www.sidalc.net/search/Search2Record/KOHA-OAI-ECOSUR:10742>
- Trevor Hastie, & Robert Tibshirani. (1986). Generalized additive models on JSTOR. *Statistical Science*, 1(3), 297–310. <https://www.jstor.org/stable/2245459>
- Trujillo García, D., & Juárez Ramón, D. (2024). *Índice de escurrimiento en suelo con cinco plantas nativas, en San Pedro Zacachimalpa, Puebla*. [Tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/20571>
- Urías García, C., Pérez Álvarez, S., Escobedo Bonilla, C. M., González Vega, M. E., Flores Córdoba, M. A., Flores Córdoba, A., Guerrero Morales, S., & Palacios Monarrez, A. (2023). Micropropagación de *Vachellia* spp. como una alternativa para la reforestación de zonas desérticas en México. In *Cultivos Tropicales* (Vol. 44, Issue 2). <https://cu-id.com/2050/v44n2e10>
- Vázquez, G. (2016). Evaluación de plantaciones forestales en tres comunidades de la mixteca alta oaxaqueña. *Agro Productividad*, 9(2), 12–19. https://www.researchgate.net/publication/301541530_Evaluacion_de_plantaciones_forestales_en_tres_comunidades_de_la_Mixteca_Oaxaquena

- Vega, L. (2024). *Ordenación y clasificación de los bosques de pino piñonero del estado de Hidalgo* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/123456789/3323>
- Venables, W. N., & Ripley, B. D. (2002). *Modern Applied Statistics with S-PLUS* (B. Ripley, Ed.; Fourth, Vol. 2). Springer. <https://www.stats.ox.ac.uk/pub/MASS4/>
- Wei, T., & Simko, V. (2024). corrplot: Visualization of a Correlation Matrix. *CRAN, R Core Team*. <https://github.com/taiyun/corrplot>
- Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. In *Springer-Verlag New York* (2nd ed.). Springer Cham. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>
- Wickham, H., & Bryan, J. (2025). readxl: Read Excel Files. *CRAN: Contributed Packages*. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.readxl>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., & Vaughan, D. (2023, November 17). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package versión 1.1.4, <https://github.com/tidyverse/dplyr>. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.dplyr>
- Wood, S. N. (2011). Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 73(1), 3–36. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x>
- Xie, Y. (2025). knitr: A General-Purpose Package for Dynamic Report Generation in R (2nd ed., Vol. 2). RNews. R package versión 1.50.4, <https://yihui.org/knitr/>
- Zhu, H. (2024). kableExtra: Construct Complex Table with “kable” and Pipe Syntax. *CRAN, I*(Versión 1.4.0.). <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.kableExtra>

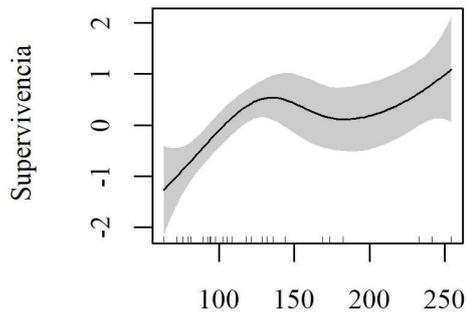
7 ANEXOS.

Anexo 1 Nota sobre nomenclatura taxonómica:

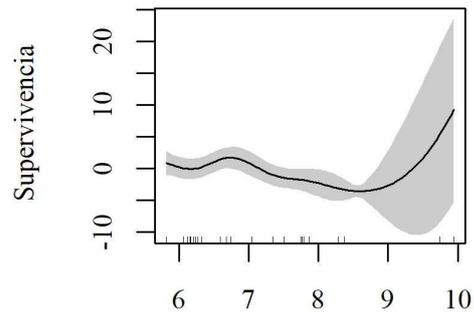
Recientemente, se propuso un cambio en la clasificación taxonómica de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C.Johnst., una especie ampliamente conocida en zonas áridas y semiáridas de México. Con base en estudios recientes, esta fue transferida del género *Prosopis* al género *Neltuma*, por lo que su nombre científico actualizado es *Neltuma laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) C.E.Hughes & J.F.Bailey (Hughes *et al.*, 2022). No obstante, debido a la amplia utilización y reconocimiento del nombre *Prosopis laevigata* en la literatura científica y técnica, y con el fin de mantener la coherencia y claridad a lo largo de este trabajo, se ha optado por conservar el nombre tradicional *Prosopis laevigata* en esta tesis.



Anexo 2. Importancia relativa de las variables en el modelo GAM para predecir la supervivencia de *Agave salmiana* en México.

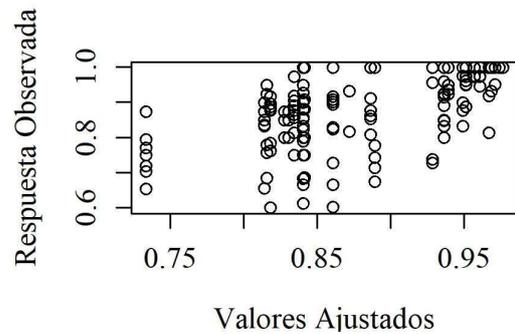
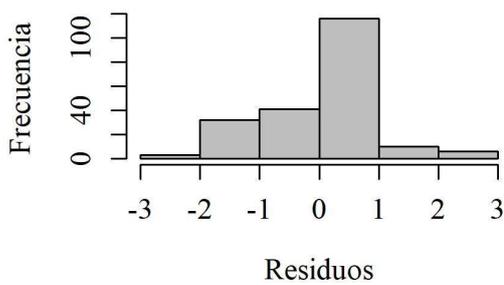
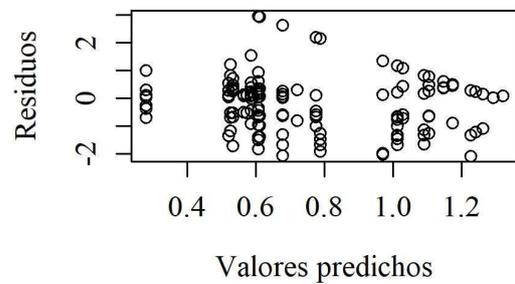
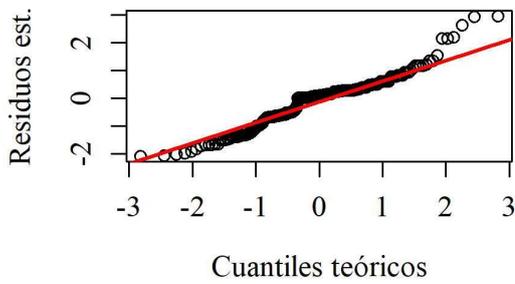


Precipitación de otoño (mm)

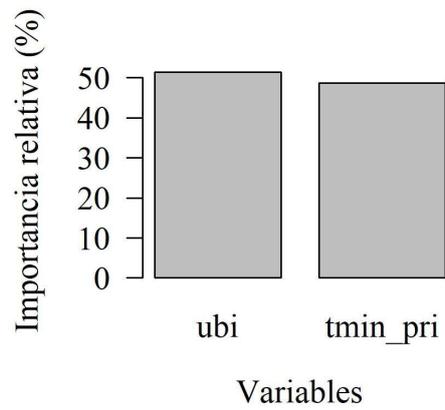


Temperatura mínima de otoño (°C)

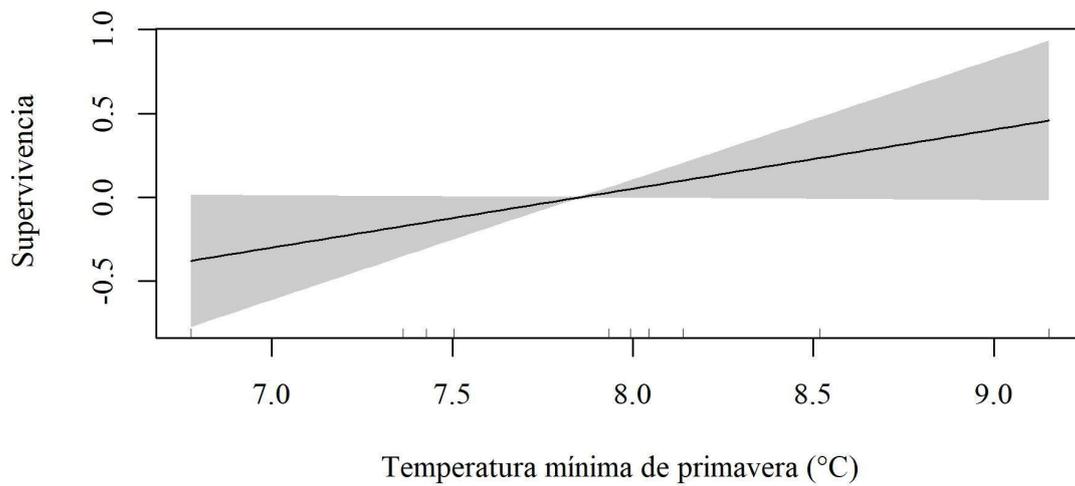
Anexo 3. Efectos de las variables climáticas en la predicción de la supervivencia de *Agave salmiana* en México según el modelo GAM.



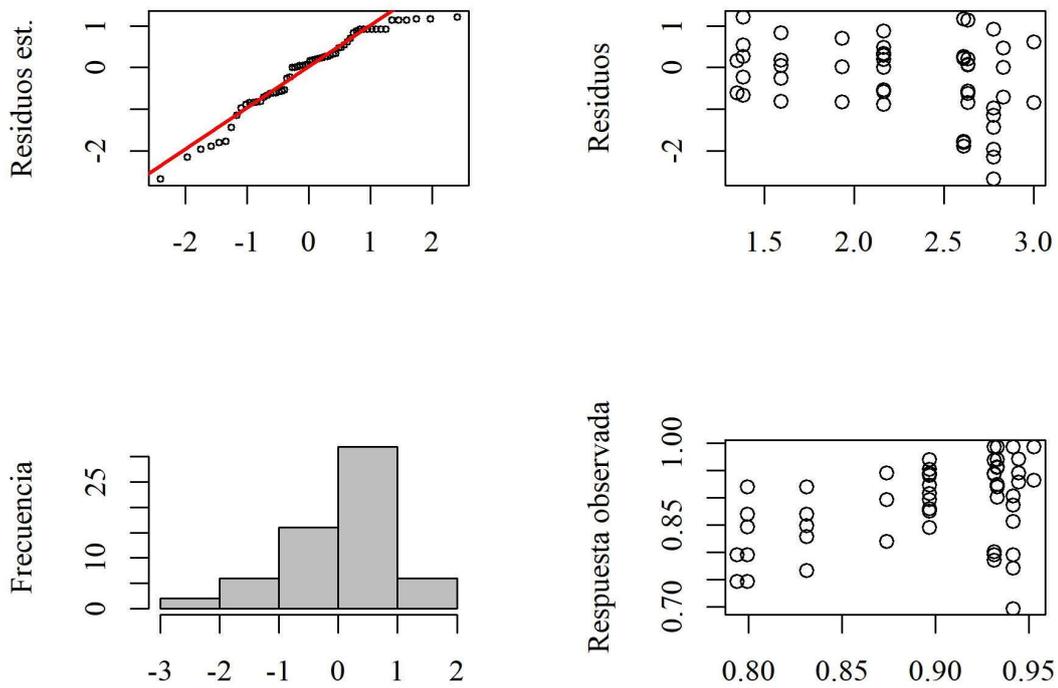
Anexo 4. Diagnóstico para evaluar el ajuste del modelo GAM de *Agave salmiana* en México.



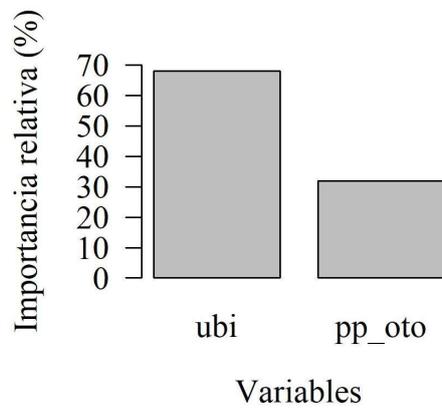
Anexo 5. Importancia relativa de las variables en el modelo GAM para predecir la supervivencia de *Atriplex canescens* en México.



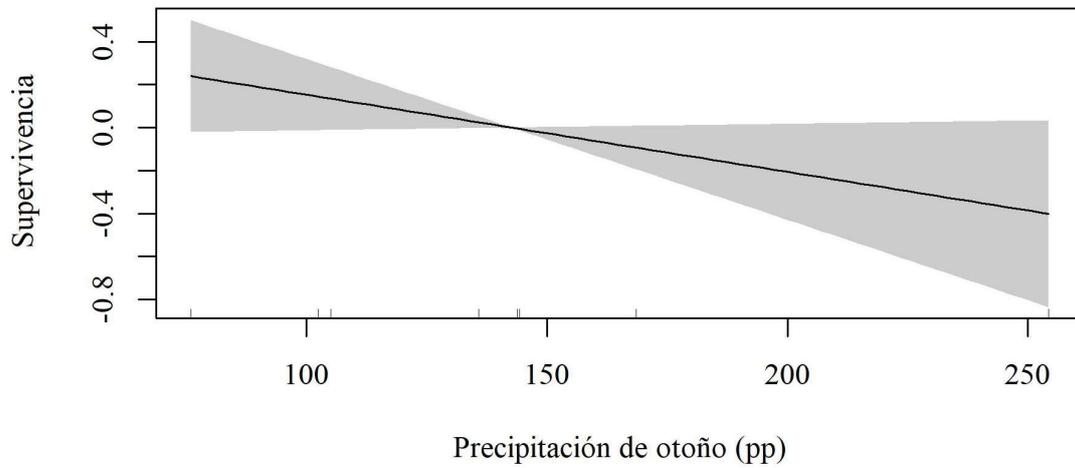
Anexo 6. Efectos de las variables climáticas en la predicción de la supervivencia de *Atriplex canescens* en México según el modelo GAM.



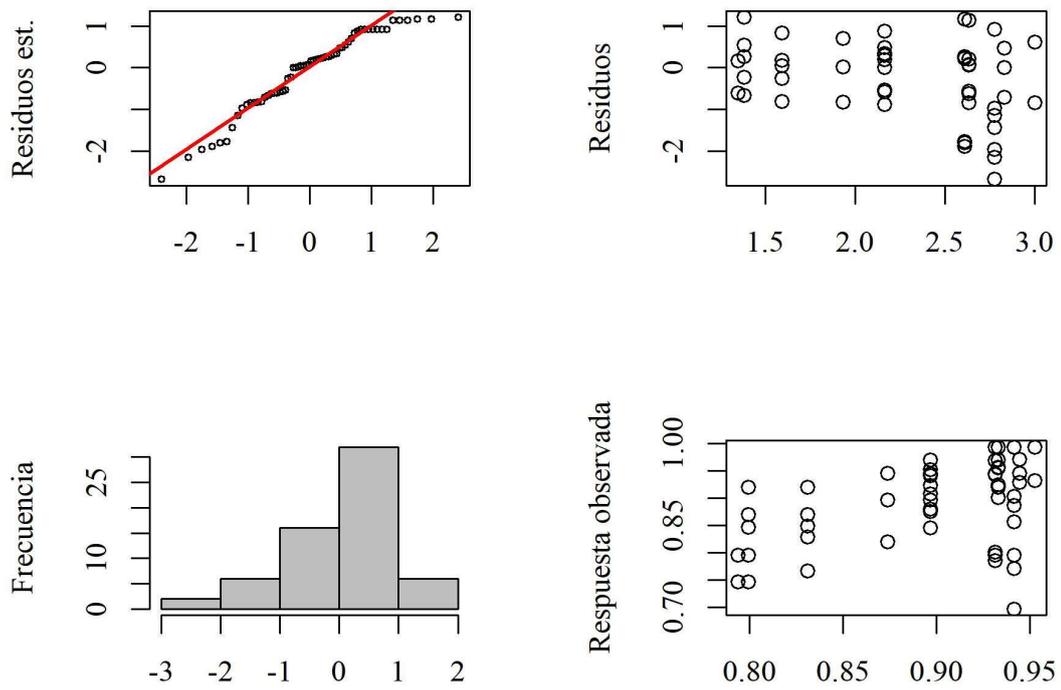
Anexo 7. Diagnóstico para evaluar el ajuste del modelo GAM de *Atriplex canescens* en México.



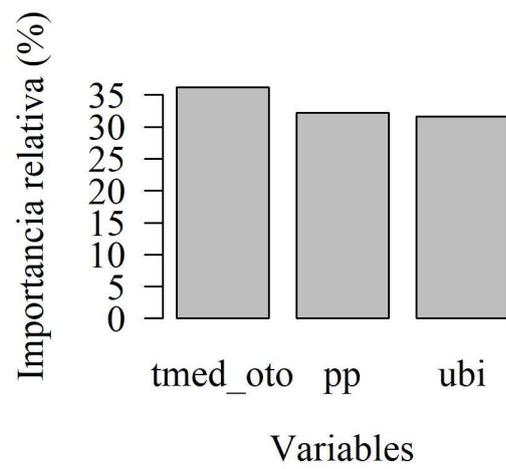
Anexo 8. Importancia relativa de las variables en el modelo GAM para predecir la supervivencia de *Eysenhardtia polystachya* en México.



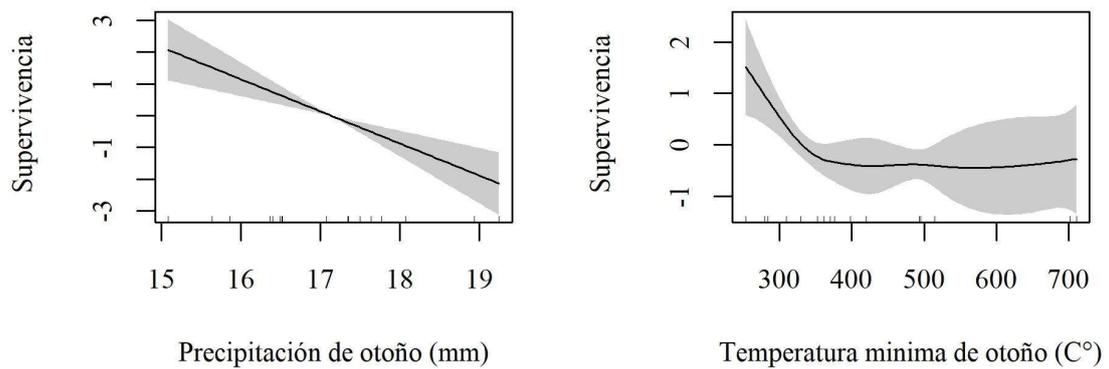
Anexo 9. Efectos de las variables climáticas en la predicción de la supervivencia de *Eysenhardtia polystachya* en México según el modelo GAM.



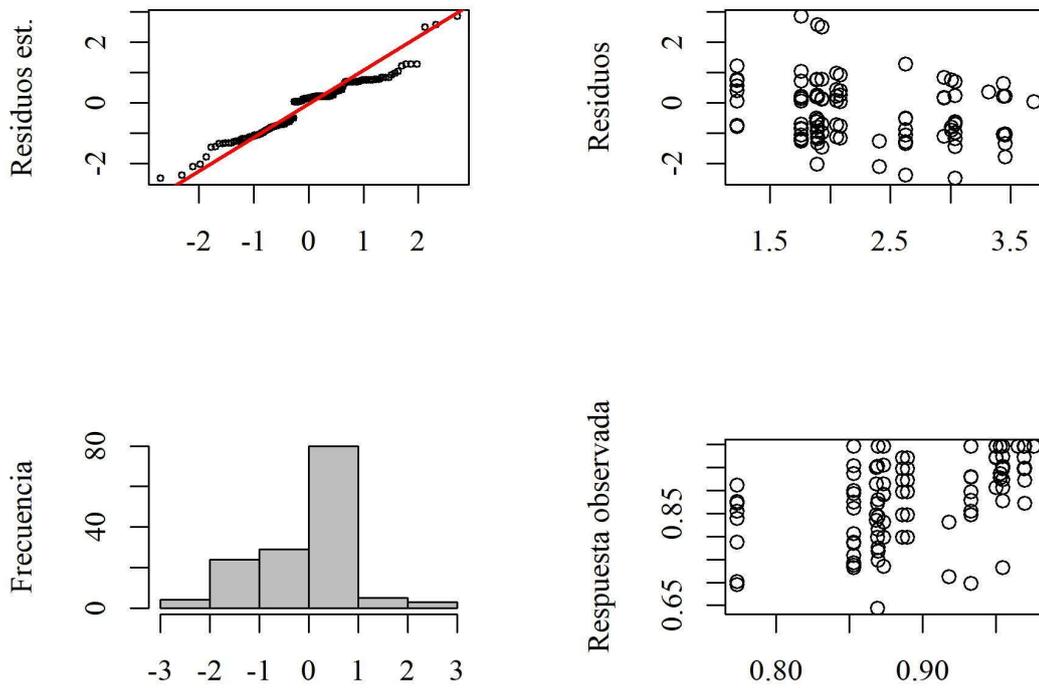
Anexo 10. Diagnóstico para evaluar el ajuste del modelo GAM de *Eysenhardtia polystachya* en México.



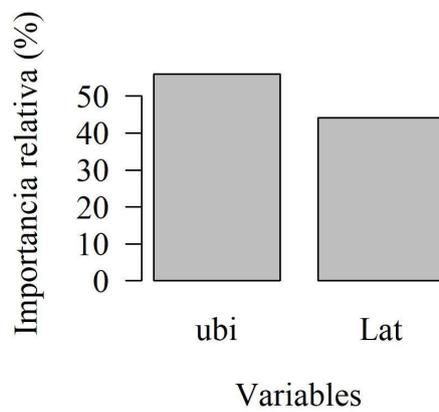
Anexo 11. Importancia relativa de las variables en el modelo GAM para predecir la supervivencia de *Opuntia robusta* en México.



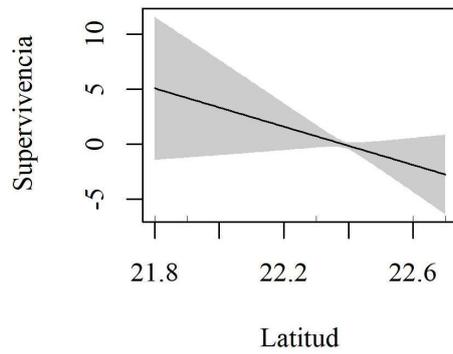
Anexo 12. Efectos de las variables climáticas en la predicción de la supervivencia de *Opuntia robusta* en México según el modelo GAM.



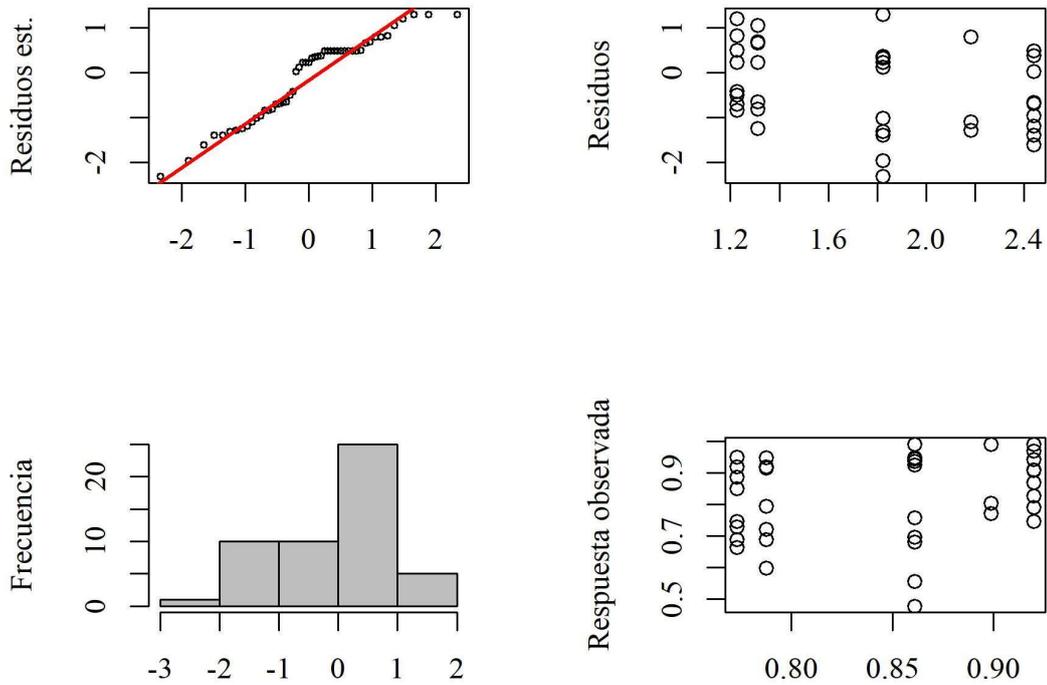
Anexo 13. Diagnóstico para evaluar el ajuste del modelo GAM de *Opuntia robusta* en México.



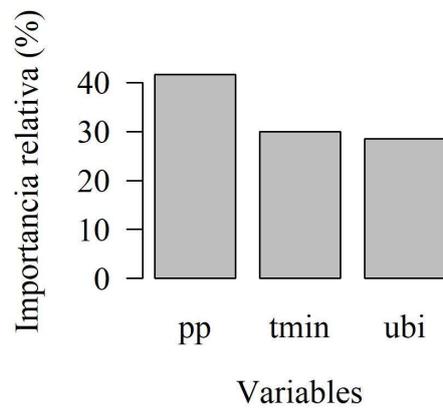
Anexo 14. Importancia relativa de las variables en el modelo GAM para predecir la supervivencia de *Opuntia streptacantha* en México.



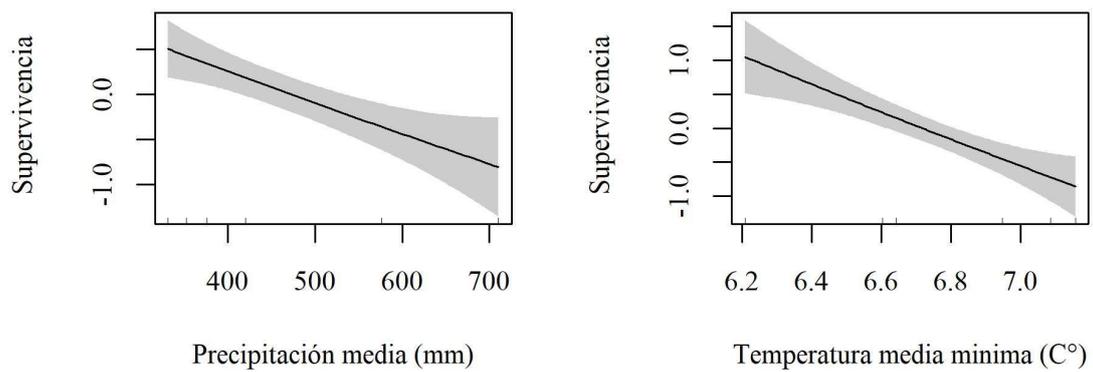
Anexo 15. Efectos de las variables climáticas en la predicción de la supervivencia de *Opuntia streptacantha* en México según el modelo GAM.



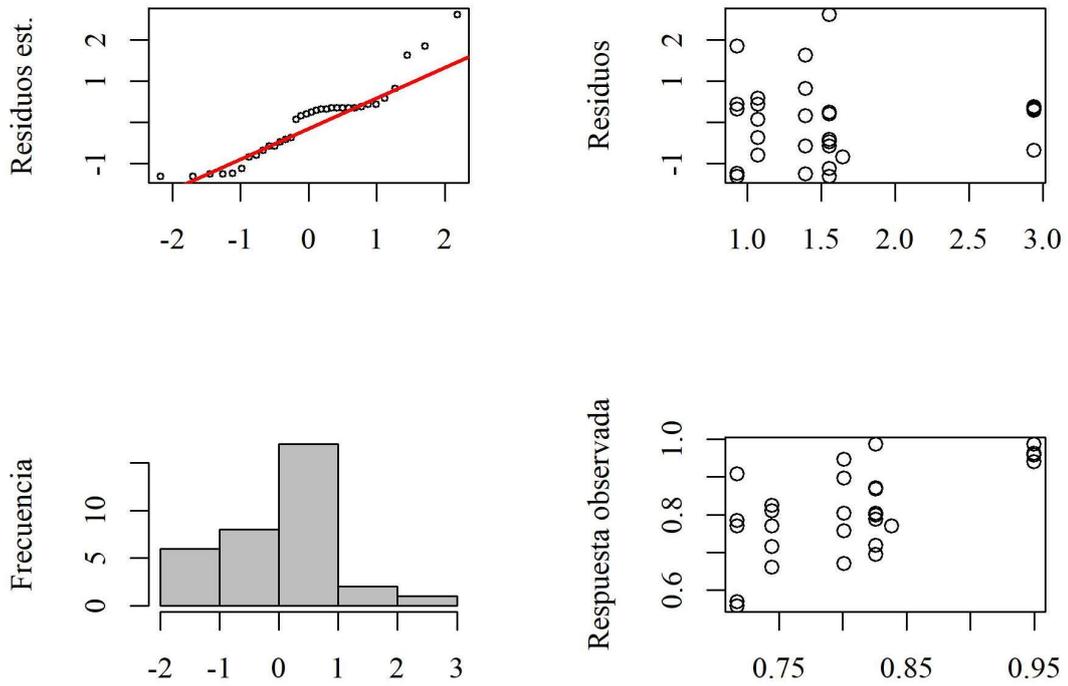
Anexo 16. Diagnóstico para evaluar el ajuste del modelo GAM de *Opuntia streptacantha* en México.



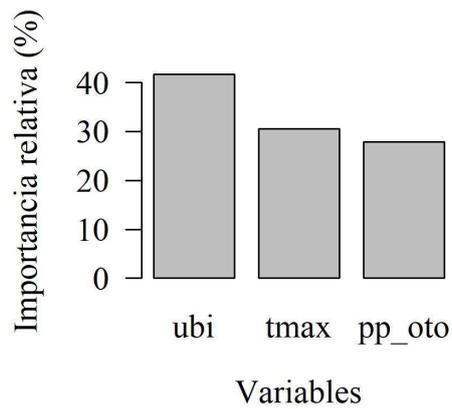
Anexo 17. Importancia relativa de las variables en el modelo GAM para predecir la supervivencia de *Pinus cembroides* en México.



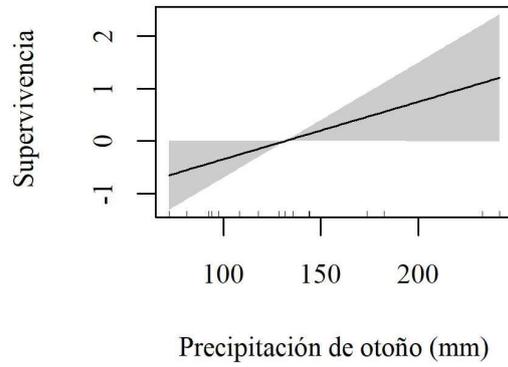
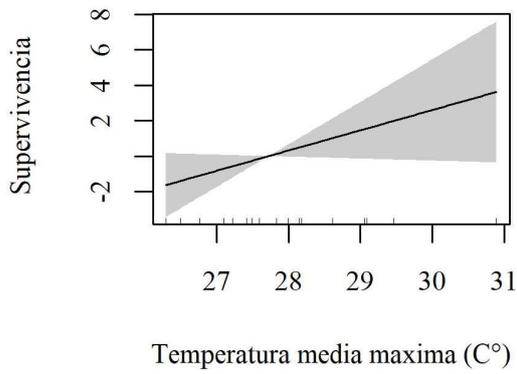
Anexo 18. Efectos de las variables climáticas en la predicción de la supervivencia de *Pinus cembroides* en México según el modelo GAM.



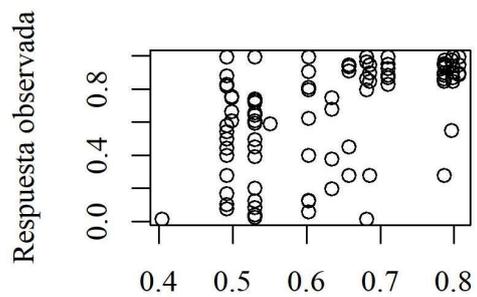
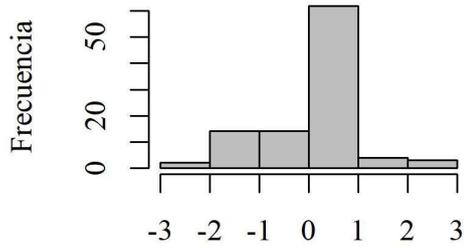
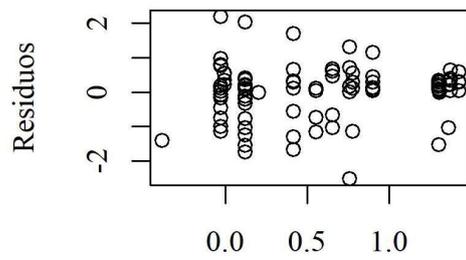
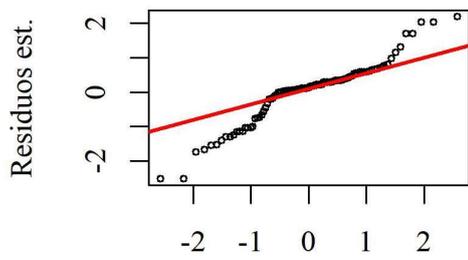
Anexo 19. Diagnóstico para evaluar el ajuste del modelo GAM de *Pinus cembroides* en México.



Anexo 20. Importancia relativa de las variables en el modelo GAM para predecir la supervivencia de *Prosopis laevigata* en México.



Anexo 21. Efectos de las variables climáticas en la predicción de la supervivencia de *Prosopis laevigata* en México según el modelo GAM.



Anexo 22. Diagnóstico para evaluar el ajuste del modelo GAM de *Prosopis laevigata* en México.