

Distribución potencial y estabilidad del nicho climático de *Dasyllirion cedrosanum* Trel. ante escenarios de cambio climático en el norte de México

Potential distribution and climatic niche stability of *Dasyllirion cedrosanum* Trel. under climate change scenarios in northern Mexico

Recepción del artículo: 24/04/2026 • Aceptación para publicación: 30/04/2026 • Publicación: 01/05/2026

<https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi28.434>

Luis Miguel Toribio-Ferrer*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3497-2050>

Oscar Alberto Aguirre-Calderón

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5668-8869>

Marco Aurelio González-Tagle

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0750-9128>

Javier Jiménez-Pérez

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4246-7613>

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México.

Ana Lucía Morán-Martínez

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1750-9585>

Secretaría de Medio Ambiente, Departamento de Vida Silvestre, Saltillo, Coahuila, México.

Eulalia Edith Villavicencio-Cutiérrez

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9547-0301>

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental-Saltillo, Coahuila, México.

Emmanuel Toribio-Ferrer

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7268-2595>

TF Estudios y Proyectos S.A. de C.V. Departamento de Investigación. Saltillo, Coahuila, México.

Eduardo Alanís-Rodríguez

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6294-4275>

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México.

*Autor para correspondencia:

toryferrer@live.com

Resumen

El sotol es una especie característica de los ecosistemas áridos del norte de México con relevancia ecológica y económica por su uso en la producción de bebidas destiladas y su adaptación a ambientes de alta variabilidad térmica. El presente estudio tuvo como objetivo modelar la distribución potencial actual y futura de la especie bajo escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para el periodo 2041-2060. Se empleó el algoritmo de MaxEnt, calibrado con el paquete *kuenm* en R, utilizando 107 registros de presencia y variables bioclimáticas de WorldClim v2.1. El modelo óptimo presentó una tasa de omisión del 4 %, un AICc de 4 494.07 y un ROC parcial significativo ($p < 0.05$). Los resultados indican una alta estabilidad espacial del nicho climático de *D. cedrosanum*, con un 54 % de áreas idóneas no vulnerables y menos del 3 % de pérdida potencial de hábitat bajo ambos escenarios. Se concluye que la especie presenta elevada estabilidad climática y conservará gran parte de su distribución potencial dentro del Desierto Chihuahuense, manteniendo su papel ecológico y potencial productivo en ecosistemas áridos del norte de México.

Palabras clave: Distribución potencial, especies xerófitas, MaxEnt, sotol, zonas áridas.

Abstract

The sotol is a characteristic species of the arid ecosystems of northern Mexico, with ecological and economic relevance due to its use in the production of distilled beverages and its adaptation to environments with high thermal variability. This study aimed to model the current and future potential distribution of the species under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios for the period 2041-2060. The MaxEnt algorithm was used, calibrated with the *kuenm* package in R, based on 107 occurrence records and bioclimatic variables from WorldClim v2.1. The optimal model showed an omission rate of 4 %, an AICc of 4 494.07, and a significant partial ROC ($p < 0.05$). The results indicate a high spatial stability of the climatic niche of *D. cedrosanum*, with 54 % of non-vulnerable suitable areas and less than 3 % of potential habitat loss under both scenarios. It is concluded that the species exhibits high climatic stability and will likely retain a large proportion of its potential distribution within the Chihuahuan Desert, preserving its ecological role and productive potential in the arid ecosystems of northern Mexico.

Keywords: Potential distribution, xerophytic species, MaxEnt, sotol, arid zones.

Introducción

El sotol (*Dasyllirion cedrosanum* Trel.) es una especie característica de los ecosistemas áridos y semiáridos del norte de México, donde forma parte dominante de los matorrales rosetófilos del Desierto Chihuahuense (Encina-Domínguez *et al.*, 2013). Su presencia abarca los estados de Coahuila, Durango, Zacatecas, Nuevo León y San Luis Potosí, en altitudes comprendidas entre 900 y 2 600 m s.n.m. (Ruiz-Flores y Castro-Castro, 2024), sobre suelos calcáreos y de escaso contenido nutrimental (Serafin-Higuera *et al.*, 2023). Por su alta tolerancia a condiciones de sequía y temperatura extrema, *D. cedrosanum* constituye un elemento estructural clave en la dinámica ecológica de los ecosistemas áridos, contribuyendo al control de la erosión, la retención de materia orgánica y la estabilidad edáfica (Ruiz-Flores y Castro-Castro, 2024).

Desde una perspectiva socioeconómica y cultural, el sotol posee un valor histórico arraigado en las comunidades del norte del país. Su aprovechamiento tradicional incluye la elaboración de bebidas destiladas, forraje, cercas, techumbres y materiales artesanales (Olhagaray-Rivera *et al.*, 2005; Becerra-López *et al.*, 2020). Actualmente, la especie representa un recurso económico relevante debido a su uso industrial en la producción del destilado regional denominado “sotol”, cuya demanda ha incrementado en los últimos años tanto en el mercado nacional como en el internacional (Olhagaray-Rivera *et al.*, 2005). Sin embargo, el precio de la materia prima continúa siendo bajo: el kilogramo de piña de sotol se comercializa en promedio a 2 pesos mexicanos, lo que contrasta con los costos de producción y los impactos ecológicos derivados de la extracción de ejemplares silvestres (Toribio-Ferrer *et al.*, 2025). Esta situación ha generado presiones crecientes sobre las poblaciones naturales, en particular en Coahuila y Durango, donde se reportan signos de sobreexplotación y disminución de la densidad poblacional (Serafin-Higuera *et al.*, 2023; Reyes-Valdés *et al.*, 2017).

En este contexto, el cambio climático se perfila como un factor adicional que podría modificar la distribución geográfica y la idoneidad climática de la especie. Las proyecciones del IPCC (2021) indican que, bajo escenarios intermedios y severos (SSP2-4.5 y SSP5-8.5), se espera un incremento de la temperatura media global entre 1.5 y 2.4 °C hacia mediados del siglo XXI, acompañado de una mayor estacionalidad térmica y de reducciones en la precipitación efectiva en regiones áridas. El modelado de nicho ecológico se ha consolidado como una herramienta robusta para comprender y proyectar los patrones de distribución potencial de especies frente a cambios ambientales (Elith *et al.*, 2006; Cobos *et al.*, 2019).

A través de algoritmos de aprendizaje estadístico como MaxEnt, es posible identificar las variables bioclimáticas que mejor explican la presencia de una especie y proyectar su distribución bajo condiciones climáticas futuras. Para especies xerófitas como *Dasyllirion*, estos modelos son fundamentales para anticipar áreas de persistencia, pérdida o expansión de hábitat, así como para orientar estrategias de manejo sostenible y restauración (Soberón y Peterson, 2005; Barve *et al.*, 2011).

El presente estudio tuvo como objetivo modelar la distribución potencial actual y futura de *Dasyllirion cedrosanum* bajo escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (2041-2060), mediante el algoritmo MaxEnt calibrado con el paquete kuenm en R. Específicamente, se buscó: (i) identificar las variables bioclimáticas de mayor influencia en su nicho ecológico, (ii) estimar su distribución potencial actual en el norte de México y (iii) analizar los posibles cambios espaciales de idoneidad climática bajo escenarios futuros. Los resultados permitirán generar información estratégica para la conservación, manejo sustentable y aprovechamiento racional del sotol, fortaleciendo las bases científicas para el establecimiento de unidades productoras y áreas prioritarias de restauración en ecosistemas áridos.

Materiales y métodos

Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo dentro del área de distribución actual de *D. cedrosanum*, localizada en el norte de México y que abarca los estados de Coahuila, Durango, Zacatecas, Nuevo León y San Luis Potosí (Ruiz-Flores y Castro-Castro, 2024). La vegetación predominante corresponde principalmente a matorrales desérticos rosetófilos y micrófilos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2018), característicos de regiones áridas y semiáridas del altiplano mexicano. El clima es de tipo árido a semiárido, con temperatura media anual que oscila entre 20 y 33 °C y una precipitación promedio anual de 100 a 700 mm, concentrada principalmente durante el verano (INEGI, 2008). La especie se distribuye en un gradiente altitudinal comprendido entre 900 y 2 600 m s.n.m. (Encina-Domínguez *et al.*, 2013), asociada con suelos de naturaleza alcalina y calcárea, de baja salinidad y reducido contenido nutrimental (Serafin-Higuera *et al.*, 2023).

Datos de presencia

Los registros de presencia de *D. cedrosanum* se obtuvieron de la base de datos de Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2025) y de colectas propias. Los datos fueron depurados eliminando registros duplicados, erróneos o con coordenadas imprecisas, así como aquellos ubicados fuera del rango altitudinal y geográfico conocido para la especie. Con el fin de reducir el efecto de la autocorrelación

espacial y el sobreajuste de los modelos, los registros se filtraron mediante un proceso de adelgazamiento espacial (spatial thinning) en el software R versión 4.5.0, utilizando el paquete spThin (Aiello-Lammens et al., 2015) y estableciendo una distancia mínima de 5 km entre puntos. Este procedimiento permitió reducir la autocorrelación espacial entre registros y evitar sobreestimación en áreas similares. Después del proceso de depuración y filtrado espacial, se obtuvieron 107 registros válidos de presencia para *D. cedrosanum*, los cuales se emplearon para la calibración, validación y proyección de los modelos de distribución potencial bajo las condiciones climáticas actuales y futuras.

Área de calibración (M)

La delimitación del área de calibración (M) se realizó conforme al enfoque propuesto por Soberón y Peterson (2005), que define M como el espacio geográfico accesible para la especie en función de su capacidad de dispersión y las barreras ambientales. Se generó un búfer de 70 km de radio alrededor de cada registro depurado de *D. cedrosanum*, con el fin de abarcar la variabilidad climática y ambiental de su distribución. Las variables bioclimáticas se recortaron dentro de este límite, asegurando que la calibración del modelo se realizara exclusivamente en el espacio ambiental accesible, lo cual reduce la extrapolación hacia condiciones no observadas y mejora la robustez ecológica del modelo (Barve et al., 2011; Soberón et al., 2017).

Variables bioclimáticas

Las variables bioclimáticas empleadas para la modelación se obtuvieron de la base de datos WorldClim versión 2.1 (Fick y Hijmans, 2017), con una resolución espacial de 30 segundos de arco (~1 km²). Se consideraron 15 variables bioclimáticas estandarizadas (excluyendo Bio8, Bio9, Bio18 y Bio19 por combinar temperatura y precipitación en el mismo ráster) (Escobar et al., 2014; Jiménez-Salazar y Méndez-González, 2021). Estas variables se emplearon para representar el espacio ambiental disponible en el área de estudio y evaluar la influencia de los gradientes climáticos sobre la distribución de *D. cedrosanum*.

Para delimitar el conjunto de predictores climáticos más adecuados, se generaron 10 000 puntos de fondo distribuidos aleatoriamente dentro del área M definida para la especie, siguiendo las recomendaciones metodológicas de Barve et al. (2011) y Soberón y Peterson (2005), quienes enfatizan la importancia de restringir los modelos al espacio ambiental accesible. Estos puntos se emplearon para caracterizar el ambiente disponible y contrastar las condiciones climáticas observadas en los sitios de presencia (Phillips et al., 2006; Cobos et al., 2019). Posteriormente, se extrajeron los valores de las 15 variables bioclimáticas tanto en los puntos de presencia como en los de fondo mediante el paquete ráster en R, con el fin de realizar un análisis estadístico comparativo.

Para evitar la multicolinealidad entre predictores, se efectuó un análisis de correlación de Pearson, eliminando las variables altamente correlacionadas ($|r| \geq 0.8$), conservando aquellas que aportaban información ambiental complementaria (Dormann et al., 2013; Elith et al., 2006). Posteriormente, con las variables seleccionadas se realizó un análisis de componentes principales (ACP), con el propósito de sintetizar los principales gradientes ambientales asociados con la distribución de *D. cedrosanum* dentro del área M. Este procedimiento permitió identificar la estructura térmica e hídrica del espacio ambiental utilizado en la calibración del modelo.

Calibración y evaluación del modelo

La calibración y evaluación del modelo de nicho ecológico se efectuó mediante el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt), implementado con el paquete *kuenm* en R versión 4.5.0 (Cobos et al., 2019; R Core Team, 2025). Se evaluaron diferentes combinaciones de multiplicadores de regularización y clases de características, incluyendo modelos lineales, cuadráticos, hinge, producto y threshold, así como combinaciones entre ellas. La selección del modelo óptimo se realizó considerando de manera conjunta la significancia estadística del ROC parcial ($p \leq 0.05$), una tasa de omisión $\leq 5\%$, el menor AICc y la complejidad del modelo, siguiendo criterios de parsimonia y desempeño predictivo (Phillips et al., 2006; Warren & Seifert, 2011). La evaluación del ajuste se realizó mediante ROC parcial y la prueba de Jackknife, con el propósito de identificar las variables de mayor contribución y evitar la sobreparametrización del modelo (Peterson et al., 2008; Cobos et al., 2019). Finalmente, el modelo con menor AICc y alta capacidad predictiva fue seleccionado para representar la distribución potencial actual de *D. cedrosanum*.

Proyección futura y análisis de cambios de idoneidad

El modelo calibrado de *D. cedrosanum* se proyectó hacia escenarios climáticos futuros para el periodo 2041-2060, bajo las trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero SSP2-4.5 y SSP5-8.5, utilizando las capas bioclimáticas del modelo de circulación general MIROC6 disponibles en *WorldClim* versión 2.1 (Fick y Hijmans, 2017). Las proyecciones se realizaron en formato cloglog, generando mapas continuos de idoneidad con valores de 0 (baja) a 1 (alta).

Los modelos futuros se compararon con el escenario actual mediante álgebra de rásteres en el entorno R 4.5.0 (R Core Team, 2025), empleando el umbral de 10 % de entrenamiento (Phillips et al., 2006) para generar mapas binarios de presencia-ausencia.

A partir de esta comparación espacial se identificaron tres categorías de cambio en la distribución potencial: (i) nuevas áreas idóneas (NAI), que representan zonas nuevas con condiciones futuras favorables; (ii) áreas idóneas no vulnerables (AINV), que mantienen condiciones adecuadas en ambos periodos; y (iii) áreas idóneas vulnerables (AIV), donde se prevé una disminución de idoneidad bajo escenarios de cambio climático.

Resultados

Modelo de nicho de *Dasyllirion cedrosanum* Trel.

Se generaron 930 modelos candidatos, el modelo seleccionado fue de un regularizador de 2.8 y una clase de características threshold (t), con un ROC parcial de 1.22, significancia estadística ($p < 0.05$), tasa de omisión del 4 % y un AICc de 4 494.07 (Cuadro 1). Aunque las funciones threshold pueden generar respuestas más abruptas que otras clases de características, su selección se justificó por su menor complejidad relativa y por cumplir simultáneamente con los criterios de significancia, omisión y parsimonia del modelo. Las variables que cumplieron con el criterio de independencia ($|r| \leq 0.8$) y que mejor explicaron la distribución actual de *D. cedrosanum* fueron: Bio2 (intervalo de temperatura media diurna), Bio4 (estacionalidad de la temperatura), Bio7 (intervalo de temperatura anual), Bio12 (precipitación anual), Bio14 (precipitación del mes más seco) y Bio15 (estacionalidad de la precipitación). En el espacio ambiental ocupado por *D. cedrosanum*, la especie se asoció con rangos térmicos entre 18 y 35.6 °C (Bio7) y con precipitaciones anuales entre 176 y 1 212 mm (Bio12). La temperatura mostró una influencia predominante sobre la distribución del nicho, con una contribución relativa del 33.82 % de la Bio7, mientras que la precipitación anual aportó solo 13.04 %. Esto sugiere una mayor importancia predictiva de los gradientes térmicos respecto a los hídricos en la distribución potencial de la especie.

Cuadro 1. Resumen de criterios de selección y desempeño de los modelos candidatos para la distribución potencial de *Dasyllirion cedrosanum* Trel.

Criterio	Número de modelos
Total, de modelos candidatos	930
Modelos estadísticamente significativos (mES)	930
Modelos que cumplen con el criterio tasa de omisión (mTO)	1
Modelos que cumplen con el criterio AICc (mAIC)	1
Número de mES y mTO	1
Número de mES y mAIC	1
Número de mES, mTO y mAIC	1

Componentes principales del modelo

El ACP, realizado con las variables bioclimáticas seleccionadas después del análisis de correlación, permitió sintetizar la variabilidad ambiental dentro del área M. Los dos primeros componentes explicaron el 73.2 % de la varianza total. El PC1 (38.6 %) representó un gradiente térmico, determinado principalmente por el Bio7, Bio4 y Bio2, mientras que el PC2 (34.6 %) describió un gradiente hídrico, influido por la Bio12, Bio14 y Bio15. La distribución de los registros de presencia (Figura 1) mostró una concentración en valores intermedios de ambos ejes, lo que indica una preferencia de la especie por ambientes con variabilidad térmica moderada y disponibilidad hídrica media, características típicas de los matorrales desérticos del norte de México, confirmando que los gradientes térmico e hídrico constituyen los principales factores que estructuran su nicho climático actual.

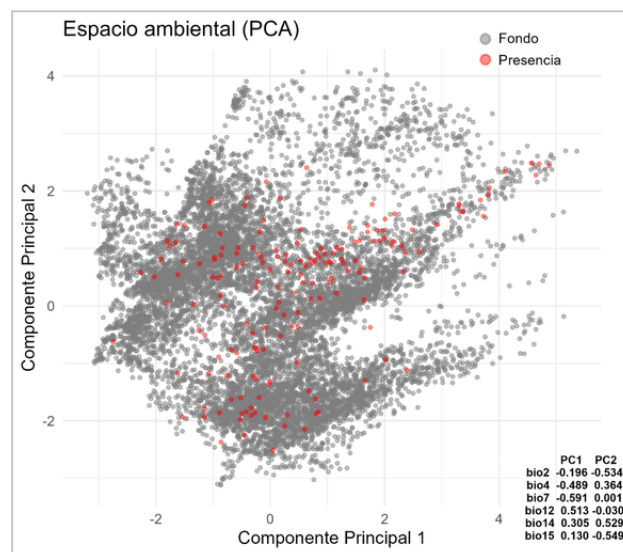


Figura 1. Distribución de las ocurrencias de *D. cedrosanum* Trel. (puntos rojos) en el espacio ambiental del área M, definido por los dos primeros componentes principales (PC1: gradiente térmico, PC2: gradiente hídrico).

Distribución potencial actual de *Dasyllirion cedrosanum* Trel.

En México la especie de *D. cedrosanum* presentó una superficie de 76 037 km² con alta idoneidad ambiental, distribuida principalmente en cinco estados; el estado de Coahuila concentro la mayor extensión con 37 316 km² (49 %), seguido por Nuevo León con 12 880 km² (17 %), San Luis Potosí con 7 591 km² (10 %), Durango con 7 167 km² (9 %) y Zacatecas con 6 089 km² (8 %). En conjunto, estos cinco estados representaron el 93 % de la superficie total clasificada con alta idoneidad ambiental para la especie bajo las condiciones climáticas actuales (Figura 2).

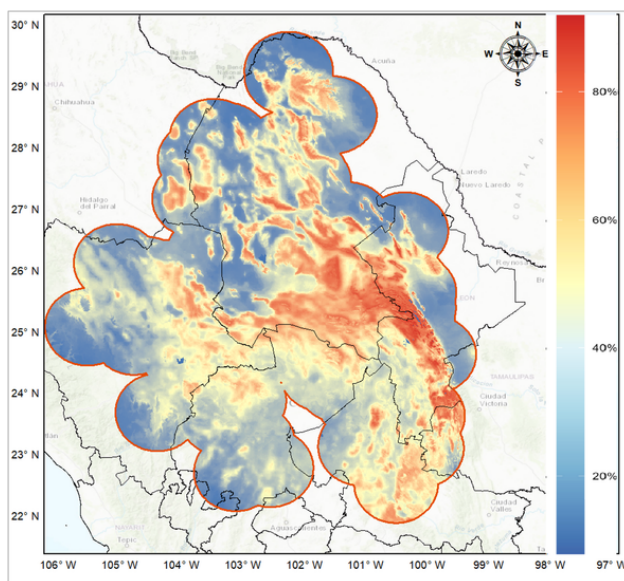


Figura 2. Áreas de idoneidad actual de *Dasyllirion cedrosanum* Trel. representado con un gradiente que va de mayor idoneidad (rojo) a menor idoneidad (azul) y con una escala de 0 a 1.

En el estado de Coahuila, la idoneidad alta se concentró principalmente en la porción sureste del territorio estatal. El municipio de Parras presentó la mayor superficie con condiciones óptimas, con 5 507 km², seguido de Ramos Arizpe con 4 799 km². Los municipios de Saltillo, General Cepeda y Arteaga registraron en conjunto una extensión de 7 645 km² clasificadas como altamente idóneas para la especie. Por su parte, las zonas de idoneidad media se distribuyeron principalmente en los estados de San Luis Potosí y Zacatecas, donde la expansión agrícola ha modificado parte del hábitat original y las condiciones de idoneidad coinciden con áreas de transición entre el matorral xerófilo y los bosques de coníferas-encino, representando gradientes ecológicos de adaptación potencial para la especie.

Transferencia del modelo a escenarios futuros

El modelo calibrado bajo las condiciones climáticas actuales se proyectó hacia los escenarios futuros de cambio climático para el periodo 2041-2060, utilizando el modelo de circulación general MIROC6 bajo las trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Los resultados indican que la distribución potencial de *D. cedrosanum* mantendrá una alta estabilidad espacial, sin modificaciones drásticas en la extensión total del nicho climático, aunque con redistribuciones locales de la idoneidad ambiental (Figura 3). Las proyecciones evidencian una consolidación de las zonas de idoneidad alta en las regiones previamente estimadas como óptimas, particularmente en el sureste de Coahuila y áreas adyacentes del noreste de Zacatecas y norte de San Luis Potosí. Sin embargo, bajo ambos escenarios se observó un incremento en la idoneidad climática del sector sur del área M, donde áreas clasificadas actualmente como de idoneidad media evolucionan a categorías de alta idoneidad, ampliando la superficie favorable para la especie.

De manera destacada, se identificó un aumento de la idoneidad alta en los estados de San Luis Potosí y Nuevo León, lo que sugiere una transición de hábitats intermedios hacia condiciones óptimas en respuesta a las variaciones térmicas y de precipitación proyectadas. Estos patrones indican que, aunque la distribución general de la especie permanecería relativamente estable, las condiciones climáticas futuras podrían favorecer una expansión local de su nicho climático en regiones actualmente marginales.

Asimismo, se analizaron los cambios en las variables bioclimáticas más influyentes en el modelo (Bio4, Bio2 y Bio7) bajo los escenarios futuros SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (Figura 4). Los resultados mostraron que las tres variables mantienen una distribución similar a la actual, aunque con ligeros desplazamientos hacia valores mayores de

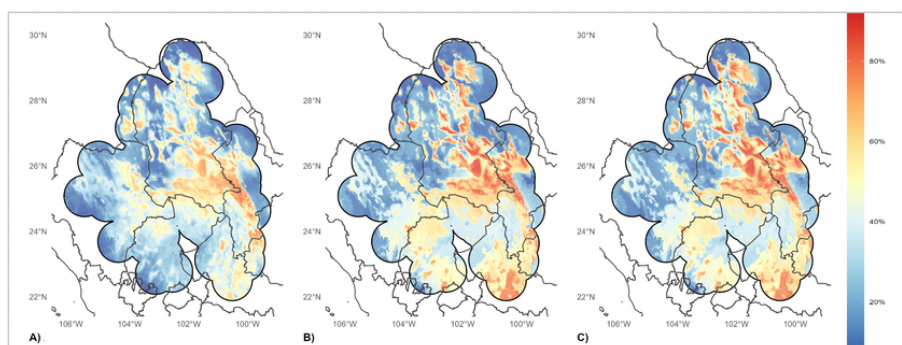


Figura 3. Distribución potencial actual y futura de *Dasyllirion cedrosanum* Trel. bajo escenarios climáticos de cambio global. A) Condiciones actuales; B) Escenario intermedio SSP2-4.5; C) Escenario extremo SSP5-8.5, generados con el modelo de circulación general MIROC6. Los valores se expresan en formato cloglog, representando la probabilidad de idoneidad ambiental (0 = baja, 1 = alta).

temperatura, particularmente en Bio7 y Bio2, lo cual refleja un aumento proyectado en la variabilidad térmica. Por su parte, la Bio4 mostró una tendencia estable en ambos escenarios, sugiriendo que la estacionalidad no sufriría alteraciones drásticas dentro del área de distribución potencial de *D. cedrosanum*. Estos resultados respaldan la estabilidad general del modelo bajo escenarios de cambio climático moderado y severo, aunque anticipan un incremento en la amplitud térmica que podría influir en la fisiología y dinámica poblacional de la especie.

En el escenario SSP5-8.5, la estabilidad general del nicho se mantuvo con una proporción similar de AINV (52 %), aunque se observa una ligera disminución en las NAI (37.9 %) y las AIV a 2.3 %, concentrándose en zonas áridas de Chihuahua y centro de Durango. En conjunto, los resultados indican que, aunque *D. cedrosanum* podría experimentar ajustes espaciales en su distribución, su nicho climático muestra estabilidad moderada bajo escenarios futuros, manteniendo una proporción elevada de hábitat potencialmente adecuado en el norte de México.

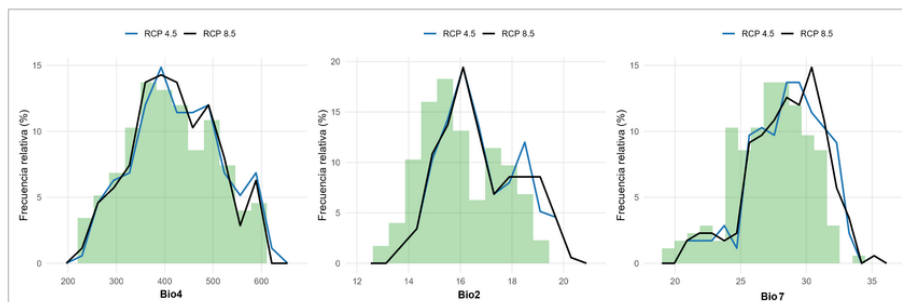


Figura 4. Histogramas de frecuencia relativa de las variables bioclimáticas de mayor contribución al modelo de distribución de *Dasyliiron cedrosanum* Trel. Se muestran las variables Bio4, Bio2 y Bio7 bajo los escenarios climáticos futuros SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (2041-2060) del modelo de circulación general MIROC6. Las líneas representan las proyecciones futuras y las barras sombreadas las condiciones actuales.

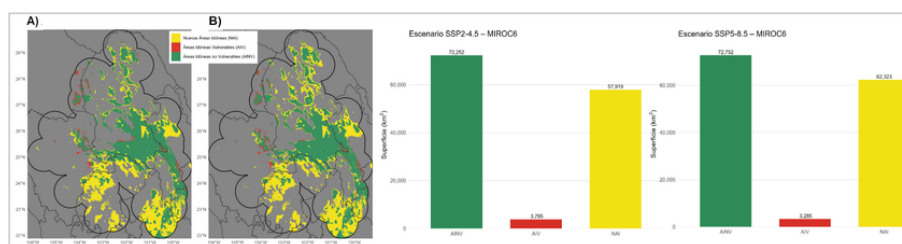


Figura 5. Cambios en la idoneidad ambiental de *Dasyliiron cedrosanum* Trel. bajo escenarios futuros de cambio climático según el modelo MIROC6. A) Escenario SSP2-4.5 (2041-2060) y B) Escenario SSP5-8.5 (2041-2060). Las áreas en verde representan áreas idóneas no vulnerables (AINV), en amarillo las nuevas áreas idóneas (NAI) y en rojo las áreas idóneas vulnerables (AIV). Los gráficos de barras muestran la superficie total (km²) de cada categoría bajo ambos escenarios.

Análisis de cambios de idoneidad

El análisis espacial de cambios en la idoneidad ambiental entre el escenario actual y las proyecciones futuras mostró una alta estabilidad del nicho climático de *D. cedrosanum* (Figura 5). Bajo el escenario SSP2-4.5, las AINV representaron el 54 % de la superficie total, indicando una notable persistencia de condiciones adecuadas en gran parte del rango actual de la especie. Las NAI abarcaron aproximadamente el 43 % y se localizaron principalmente hacia el sureste, en los estados de San Luis Potosí y Zacatecas. No obstante, estas áreas deben interpretarse como zonas con incremento potencial de idoneidad climática, y no necesariamente como áreas de expansión real, ya que el modelo no incorpora restricciones de dispersión, disponibilidad de hábitat ni cambios de uso de suelo.

Discusión

Los resultados obtenidos indican que *D. cedrosanum* posee una distribución ecológica estrechamente vinculada con los gradientes térmicos, lo cual concuerda con su carácter xerófito y su presencia dominante en el Desierto Chihuahuense. Las variables de temperatura explicaron más del 80 % de la contribución total del modelo, destacando la Bio7, Bio4 y Bio2, con contribuciones de 33.8 %, 29.1 % y 18.9 %, respectivamente. Este patrón ha sido reportado también para otras especies del género *Dasyliiron*, donde la temperatura representa el principal factor limitante del nicho (Becerra-López *et al.*, 2020; Ruiz-Flores y Castro-Castro, 2024).

El rango térmico actual estimado (18.3-35.6 °C) coincide con las condiciones ambientales registradas para poblaciones naturales de *D. cedrosanum* en el norte de

Coahuila y Durango, donde los matorrales rosetófilos se desarrollan sobre suelos calcáreos con escasa humedad (Encina-Domínguez *et al.*, 2013; Serafin-Higuera *et al.*, 2023). En contraste, las variables hídricas (Bio12, Bio14 y Bio15) aportaron menos del 20 % de la explicación del modelo, confirmando que la especie es más sensible a la variación térmica que a los gradientes de precipitación. Reyes-Valdés *et al.* (2017) reportaron que esta estabilidad térmica se refleja también en la estructura reproductiva equilibrada de la especie, la cual mantiene una proporción sexual 1:1 incluso en ambientes áridos, evidencia de una adaptación fisiológica y demográfica consolidada al estrés térmico del desierto.

Los modelos de proyección climática muestran que, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, los valores de Bio2 aumentan ligeramente de 11.5-20.9 °C a 12.4-21.7 °C, al igual que la Bio7, que pasa de 18.3-35.6 °C a 19.5-36.0 °C (Cuadro 2). Estos incrementos indican una tendencia hacia condiciones más cálidas y con mayor oscilación térmica, las cuales no parecen afectar negativamente la distribución de la especie, ya que se observó una alta estabilidad espacial del nicho (54 % AINV) y una baja AIV de hábitat (< 3 %). Resultados semejantes fueron reportados por Becerra-López *et al.* (2020), quienes modelaron tres especies de sotol (*D. cedrosanum*, *D. durangense* Trel. y *D. wheeleri* S. Watson) bajo escenarios climáticos futuros y también encontraron estabilidad para *D. cedrosanum*, aunque sin aparición de nuevas áreas idóneas.

Figura 2. Áreas de idoneidad actual de *Dasyllirion cedrosanum* Trel. representado con un gradiente que va de mayor idoneidad (rojo) a menor idoneidad (azul) y con una escala de 0 a 1.

Variable	Contribución (%)	SD*	Perfil climático mínimo y máximo		
			Actual	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Bio2	18.95	6.27	11.54 - 20.88	12.40 - 21.70	12.40 - 21.70
Bio4	29.14	10.19	204.47 - 777.24	215.40 - 795.50	212.50 - 776.60
Bio7	33.82	9.81	18.30 - 35.60	19.50 - 36.60	19.60 - 35.90
Bio12	13.04	6.83	176.00 - 1 212.00	177.00 - 1 244.00	182.00 - 1 233.00
Bio14	0.36	0.82	1.00 - 25.00	1.00 - 23.00	1.00 - 23.00
Bio15	4.69	4.34	39.76 - 122.17	44.20 - 124.00	44.40 - 124.10

*SD = Desviación estándar. Bio4 = estacionalidad de la temperatura, expresada como desviación estándar $\times 100$, conforme al formato de WorldClim v2.1.

En el presente estudio, sin embargo, se detectó una expansión localizada de la idoneidad climática en el sureste de Coahuila y norte de San Luis Potosí, posiblemente atribuible a la actualización de los modelos de circulación global MIROC6, que ofrecen mayor resolución y sensibilidad en la estimación de gradientes térmicos y pluviométricos (Fick y Hijmans, 2017). La discrepancia con el modelo de Becerra-López *et al.* (2020) también puede deberse a diferencias metodológicas, como la delimitación del área M y la reducción de la autocorrelación espacial, factores que influyen significativamente en la predicción de nuevas áreas de idoneidad (Soberón y Peterson, 2005; Cobos *et al.*, 2019).

La predominancia de variables térmicas sobre las hídricas en el modelado de *D. cedrosanum* coincide con lo observado en candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.), que comparten nichos ecológicos similares y muestran estabilidad ante la variabilidad climática (Martínez-Sifuentes *et al.* 2023). Asimismo, la estabilidad del nicho observada se asocia con una diversidad genética moderada en las poblaciones naturales (Pinales-Quero *et al.*, 2017), lo que sugiere que la especie mantiene flujo génico suficiente para enfrentar condiciones ambientales cambiantes.

Los incrementos proyectados de Bio4 reflejan cambios en la estacionalidad térmica dentro del área de distribución potencial de *D. cedrosanum*. Este patrón sugiere una mayor variabilidad anual de la temperatura bajo escenarios futuros, la cual podría influir en procesos fenológicos como la floración y el crecimiento foliar. No obstante, la persistencia de áreas idóneas bajo ambos escenarios indica que la especie podría mantener estabilidad funcional frente a fluctuaciones térmicas amplias, posiblemente asociada con sus mecanismos adaptativos a ambientes áridos (Pinales-Quero *et al.*, 2017; Serafin-Higuera *et al.*, 2023).

De manera general, los resultados obtenidos en este trabajo confirman que *D. cedrosanum* presenta un nicho climático conservador, térmicamente dependiente y espacialmente estable, lo que sugiere una alta estabilidad ante escenarios futuros de cambio climático. Estas evidencias respaldan la hipótesis de que la especie mantendrá su distribución actual dentro del Desierto Chihuahuense, reforzando su papel como indicador bioclimático de estabilidad ecológica en ecosistemas áridos del norte de México (Ruiz-Flores y Castro-Castro, 2024; Becerra-López *et al.*, 2020).

Conclusiones

Los resultados obtenidos demostraron que la distribución potencial de *Dasyllirion cedrosanum* estuvo principalmente determinada por variables térmicas, particularmente por el intervalo anual de temperatura (Bio7), la estacionalidad térmica (Bio4) y el intervalo medio diurno (Bio2), lo que confirmó el carácter xerófito y la dependencia climática de la especie en ecosistemas áridos del norte de México. El modelo calibrado mediante MaxEnt presentó un desempeño estadísticamente robusto, con baja tasa de omisión y alta capacidad predictiva.

Las proyecciones bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 indicaron una elevada estabilidad espacial del nicho climático de la especie hacia el periodo 2041-2060, manteniéndose una amplia proporción de áreas ambientalmente adecuadas dentro del Desierto Chihuahuense. Asimismo, se indentificaron zonas con

incremento potencial de idoneidad en sectores del sureste de Coahuila, Zacatecas y San Luis Potosí, lo que sugiere una posible redistribución local del hábitat favorable bajo condiciones climáticas futuras.

En conjunto, los resultados sugieren que *D. cedrosanum* presenta estabilidad moderada frente al cambio climático, manteniendo condiciones adecuadas para su persistencia ecológica y aprovechamiento productivo. No obstante, la presión derivada de la extracción de poblaciones silvestres y las modificaciones del hábitat podrían representar amenazas más inmediatas que los cambios climáticos proyectados, por lo que se recomienda fortalecer estrategias de manejo sustentable, conservación genética y restauración en áreas prioritarias de distribución de la especie.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Consultoría Ambiental, Forestal y de Vida Silvestre (TF Estudio y Proyectos, S.A. de C.V.), por el apoyo logístico y técnico brindado durante la realización del presente estudio. Asimismo, reconozco la valiosa orientación académica y científica de mis asesores del programa de Doctorado de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Literatura citada

- Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., y Anderson, R. P. (2015). spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, 38(5), 541-545. <https://doi.org/10.1111/ecog.01132>
- Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S. P., Peterson, A. T., Soberón, J., y Villalobos, F. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*, 222(11), 1810-1819. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.02.011>
- Becerra-López, J. L., Rosales-Serna, R., Ehsan, M., Becerra-López, J. S., Czaja, A., Estrada-Rodríguez, J. L., Romero-Méndez, U., Santana-Espinosa, S., Reyes-Rodríguez, C. M., Ríos-Saucedo, J. C., y Domínguez-Martínez, P. A. (2020). Climatic Change and Habitat Availability for Three Sotol Species in México: A Vision towards Their Sustainable Use. *Sustainability*, 12(8), 3455. <https://doi.org/10.3390/su12083455>
- Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N., y Osorio-Olvera, L. (2019). kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7, e6281. <https://doi.org/10.7717/peerj.6281>
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J.R.G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D. y Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27-46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson R. P., Dudík, M., Ferrier S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick F., Leathwick J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. M., Peterson, A. T., Phillips, S. J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberon J., Williams, S., Wisz, M. S., y Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- Encina-Domínguez, J. A., Meave, J. A., y Zárate-Lupercio, A. (2013). Structure and woody species diversity of the *Dasyliroon cedrosanum* (Nolinaceae) rosette scrub of central and southern Coahuila state, Mexico. *Botanical Sciences*, 91(3), 335-347. <https://doi.org/10.17129/botsci.12>
- Escobar, L. E., Lira-Noriega, A., Medina-Vogel, G., y Townsend, A. P. (2014). Potential for spread of the white-nose fungus (*Pseudogymnoascus destructans*) in the Americas: use of Maxent and NicheA to assure strict model transference. *Geospatial Health*, 9(1), 221-229. <https://doi.org/10.4081/gh.2014.19>
- Fick, S. E., y Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Global Biodiversity Information Facility (GBIF). (2025, octubre 24). GBIF occurrence download [Dataset]. <https://doi.org/10.15468/dl.8kfadn>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jiménez-Salazar, M. Á., y Méndez-González, J. (2021). Distribución actual y potencial de *Pinus engelmannii* Carrière bajo escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques*, 27(3), e2732117. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732117>
- Martínez-Sifuentes, A. R., Estrada-Ávalos, J., Trucíos-Caciano, R., Villanueva-Díaz, J., López-Hernández, N. A., y López-Favela, J. d. D. (2023). Predicting Climate Change Impacts on Candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.) for Mexico: An Approach for Mexico's Primary Harvest Area. *Sustainability*, 15(10), 7737. <https://doi.org/10.3390/su15107737>
- Olhagaray-Rivera, E. C., Esparza-Chávez, G., y Vega-Sotelo, F. (2005). Producción y comercialización de licores de sotol (*Dasyliroon cedrosanum* Trel.) en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 29(95), 83-89. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/878>
- Peterson, A. T., Papeş, M., y Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1), 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>

- Phillips, S. J., Anderson, R. P., y Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Pinales-Quero, I., González-Vázquez, V. M., Castillo-Reyes, F., Aguilar-Cristóbal, N., Reyes-Valdés, M. H., y Rodríguez-Herrera, R. (2017). Genetic diversity of sotol (*Dasyliirion cedrosanum* Trel.) at different elevations. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 4(11), 201-211. <https://doi.org/10.19136/era.a4n11.941>
- R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.5.0) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/old/4.5.0/>
- Reyes-Valdés, M. H., Hernández-Quintero, J. D., Morales-Reyes, Y. A., Mendoza-Rodríguez, D. V., González-Urbe, D. U., Ramírez-Godina, F., y Villarreal-Quintanilla, J. A. (2017). Sex ratio and spatial distribution of pistillate and staminate plants of *Dasyliirion cedrosanum*. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 86, 171-180. <https://doi.org/10.32604/phyton.2017.86.171>
- Ruiz-Flores, S. I., y Castro-Castro, A. (2024). Distribución, riqueza, endemismo y conservación del género *Dasyliirion* (Asparagaceae, Convallarioideae). *Acta Botánica Mexicana*, 131, e2367. <https://doi.org/10.21829/abm131.2024.2367>
- Serafin-Higuera, E. L., Reyes-Valdés, M. H., Morales-Díaz, A. B., Villarreal-Quintanilla, J. A., y Benavides-Mendoza, A. (2023). Association between soil and plant elemental composition and morphology of *Dasyliirion cedrosanum* Trel. *Botanical Sciences*, 101(3), 837-853. <https://doi.org/10.17129/botsci.3224>
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., y Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 437-441. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>
- Soberón, J., y Peterson, A. T. (2005). Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1-10. <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Toribio-Ferrer, L. M., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Morán-Martínez, A. L., Toribio-Ferrer, E., y Rascón-Solano, J. (2025). Redistribución del valor bruto de producción como estrategia para estabilizar los ingresos comunitarios en zonas áridas: estudio de caso en el NCPE Nuevo San Pedro, Coahuila. *E-CUCBA*, 12(26), 61-68. <https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi26.404>
- Warren, D. L., y Seifert, S. N. (2011). Ecological niche modeling in Maxent: The importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications*, 21(2), 335-342. <https://doi.org/10.1890/10-1171.1>