



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas

Doctorado en Ciencias en Recursos Naturales y
Medio Ambiente en Zonas Áridas

**Distribución ecológica, caracterización molecular y fitoquímica
de especies de muérdago asociadas a árboles endémicos de
zonas áridas**

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN
RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE
EN ZONAS ÁRIDAS

Presenta:

MARGARITA JURADO PÉREZ

Bajo la supervisión de: RICARDO TREJO CALZADA, Dr.



Bermejillo, Durango, México. Junio 2026



iniap
Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, agrícolas y Pecuarias

DISTRIBUCIÓN, FILOGENIA Y FITOQUÍMICA DE ESPECIES DE MUÉRDAGO ASOCIADAS A ÁRBOLES ENDÉMICOS DE ZONAS ÁRIDAS

Tesis realizada por **MARGARITA JURADO PÉREZ** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, y aprobada por el mismo como requisito parcial
para obtener el grado de

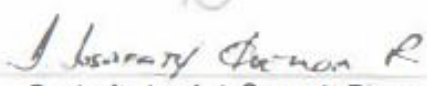
DOCTOR EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

DIRECTOR:



Dr. Ricardo Trejo Calzada

CO-DIRECTOR:



Dr. Jesús Josafath Quezada Rivera

ASESOR:



Dr. Luis Gerardo Yáñez Chávez

ASESOR:



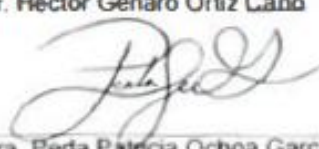
Dr. Ignacio Sánchez Cohen

ASESOR:



Dr. Héctor Genaro Ortiz Cano

LECTOR EXTERNO:



Dra. Perta Patricia Ochoa García

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ABREVIATURAS USADAS.....	v
DEDICATORIAS	viii
AGRADECIMIENTOS.....	ix
DATOS BIOGRÁFICOS.....	x
DATOS PERSONALES	x
DESARROLLO ACADÉMICO	x
RESUMEN GENERAL.....	xii
CAPÍTULO 1.....	1
I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3. HIPOTESIS	3
LITERATURA CITADA	4
CAPÍTULO 2.....	6
ABSTRACT	6
CAPÍTULO 3.....	30
RESUMEN.....	30
CAPITULO 4.....	55
ABSTRACT	55
CAPÍTULO 5.....	70

ÍNDICE DE CUADROS

Table 1. Percentage contributions to model creation of <i>Phoradendron leucarpum</i> and <i>Neltuma laevigata</i>	14
Cuadro 2. Actividad antioxidante, contenido de fenoles y flavonoides de muestras de muérdago en ocho sitios del Desierto Chihuahuense	40
Cuadro 3. Análisis de rendimiento y calidad del ADN genómico de <i>Phoradendron leucarpum</i>	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figure 1. Species distribution model of <i>Phoradendron leucarpum</i> , (B) Species distribution model of <i>Neltuma laevigata</i>	13
Figure 2. Principal component analyses of Bioclimate variables used to construct models of <i>Phoradendron leucarpum</i> , and <i>Neltuma laevigata</i>	15
Figure 3. Cluster analyses of bioclimatic variables and ecological niches associated with <i>Phoradendron leucarpum</i> and <i>Neltuma laevigata</i>	17
Figure 4. Binomial tests of presence under a 0.8 ecological suitability threshold for the climatic niches of <i>Phoradendron leucarpum</i> and <i>Neltuma laevigata</i>	19
Figure 5. Distribución espacial de la actividad antioxidante (DPPH) en sitios de muestreo de muérdago en el centro-norte de México..	42
Figure 6. Biplot del análisis de componentes principales (PCA).	45
Figure 7. Mapa predictivo de la actividad antioxidante (DPPH) en el Desierto Chihuahuense generado mediante interpolación por distancia inversa ponderada (IDW).	48
Figura 8. Gel de electroforesis del análisis de PCR utilizando ADN de <i>Phoradendron leucarpum</i> extraído con el método M3.	63

ABREVIATURAS USADAS

Abreviatura	Significado
AICc	Criterio de Información de Akaike corregido
AlCl₃	Cloruro de aluminio
ANOVA	Análisis de varianza
Bio1	Temperatura anual media
Bio3	Isotermalidad
Bio7	Rango anual de temperatura
Bio12	Precipitación anual
Bio15	Estacionalidad de la precipitación
Bio17	Precipitación del trimestre más seco
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido
C3	Ruta fotosintética C3
CIIDIR	Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CV%	Coeficiente de variación
DE	Desviación estándar
DPPH	2,2-difenil-1-picrilhidrazil
GBIF	Global Biodiversity Information Facility

Abreviatura	Significado
GAE	Equivalentes de ácido gálico
ggplot2	Paquete de visualización gráfica de R
IDW	Inverse Distance Weighting (Ponderación por distancia inversa)
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
MaxEnt	Maximum Entropy Modeling (Modelo de máxima entropía)
mg GAE/g	Miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo
mg QE/g	Miligramos de equivalentes de quercetina por gramo
mL	Mililitro
mm	Milímetros
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NTBox	Niche Tool Box
PCA	Principal Component Analysis (Análisis de Componentes Principales)
PC1	Componente principal 1
PC2	Componente principal 2
QE	Equivalentes de quercetina
R²	Coeficiente de determinación
ROS	Especies reactivas de oxígeno
rpm	Revoluciones por minuto
SDM	Species Distribution Model (Modelo de distribución de especies)

Abreviatura	Significado
SDMs	Species Distribution Models (Modelos de distribución de especies)
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
spp.	Varias especies dentro de un mismo género
URUZA-UACH	Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas – Universidad Autónoma Chapingo
UV-Vis	Ultravioleta-visible
v/v	Relación volumen/volumen
Whatman N°1	Papel filtro Whatman número 1
WorldClim	Base de datos climática global WorldClim
µg/mL	Microgramos por mililitro
µl	Microlitros
°C	Grados Celsius
km	Kilómetros
km²	Kilómetros cuadrados
p/v	Relación peso/volumen
p<0.7	Valor de correlación menor a 0.7
α	Nivel de significancia estadística

DEDICATORIAS

A los amores más grandes de mi vida, mi esposo y mi hija, su apoyo y amor incondicional, me sostienen día con día. Los amo.

A mis padres, que su vida me dure muchos años más y que esta tesis los haga sentir tan orgullosos de mí como yo lo estoy de ustedes.

A mis hermanas y sobrinas, las amo mucho, esto también es para ustedes.

A mis Perlas, gracias por existir junto conmigo en este universo lleno de magia y misterio.

"La vida no es fácil para ninguno de nosotros. Pero... ¿qué importa? Debemos tener perseverancia y, sobre todo, confianza en nosotros mismos. Debemos creer que estamos dotados para algo y que eso debe alcanzarse."

— Marie Curie 

AGRADECIMIENTOS

Al la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación** – SECITHI por el apoyo otorgado a través del Programa de Becas Nacionales, mismo que permitió la realización de este trabajo.

A la **Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas**, en conjunto con la **Universidad Autónoma Chapingo**, institución en la que se llevó a cabo el **Doctorado en Ciencias en *Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas***.

A los miembros de mi comité tutorial, en especial al **Dr. Ricardo Trejo Calzada**, por su valiosa dirección de tesis y por su enorme paciencia y conocimiento. Al **Dr. Jesús Josafath Quezada Rivera**, por aceptarme como su alumna y transmitirme su conocimiento y consejos, y al **Dr. Héctor Genaro Ortiz Cano**, por presentarme este maravilloso mundo de los modelos de nicho ecológico.

Al **Dr. Jorge Becerra López**, por ayudarme en la elaboración de los modelos de distribución.

A mi **familia**, esposo, hija, papás, y hermanas por ayudarme a no darme por vencida.

A mis **papás y suegros**, gracias por todo lo que me han dado y apoyado.

Y, por último, a mis amigos **Perla, Rubén y Arturo**, las mañanas y tardes en el laboratorio con ustedes fueron mucho más sencillas y divertidas, no me falten nunca.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Margarita Jurado Pérez

Fecha de nacimiento: 01 de julio de 1994

Lugar de nacimiento: Indé, Dgo., México

CURP: JUPM940701MDGRRR02

Profesión: Químico Farmacéutico Biólogo

Desarrollo académico

Licenciatura: Químico Farmacéutico Biólogo, Facultad de Ciencias Químicas, Campus Gómez Palacio, Universidad Juárez del Estado de Durango (2011-2016).

Maestría: Maestro en Ciencias Químicas, Facultad de Ciencias Químicas, Campus Gómez Palacio, Universidad Juárez del Estado de Durango (2017-2019).

Desarrollo científico

Química Farmacéutica Bióloga con Maestría en Ciencias Químicas y estudiante del último año del Doctorado en Recursos Naturales y Zonas Áridas. Su línea de investigación se enfoca en el estudio de metabolitos secundarios, capacidad antioxidante y modelación de nichos ecológicos de especies vegetales de zonas áridas, particularmente muérdagos asociados al mezquite en el Desierto Chihuahuense. Ha participado en proyectos relacionados con la evaluación de compuestos fenólicos y flavonoides, así como en el análisis de variables ambientales asociadas a la distribución de especies de importancia ecológica y farmacológica.

Autora y colaboradora en trabajos científicos enfocados en productos naturales, actividad antioxidante y recursos bióticos de zonas áridas. Participación como ponente en seminarios y eventos académicos relacionados con ciencias químicas, recursos naturales, innovación científica y sustentabilidad. Su formación académica integra conocimientos en química, biología, farmacología y ecología, aplicados al estudio de compuestos bioactivos con potencial terapéutico.

Interesada en el desarrollo de investigación científica orientada a la búsqueda de alternativas farmacológicas para enfermedades crónico-degenerativas, mediante el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad vegetal. Asimismo, mantiene interés en la divulgación científica y en la promoción de la participación de las mujeres en la ciencia y la investigación.

RESUMEN GENERAL

DISTRIBUCIÓN, FILOGENIA Y FITOQUÍMICA DE ESPECIES DE MUÉRDAGO ASOCIADAS A ÁRBOLES ENDÉMICOS DE ZONAS ÁRIDAS

El Desierto Chihuahuense alberga una gran diversidad de especies vegetales adaptadas a condiciones extremas, entre ellas los mezquites del género *Neltuma* y las plantas hemiparásitas del género *Phoradendron*. Sin embargo, aún existe información limitada sobre los factores ambientales que determinan su distribución y sobre el potencial fitoquímico de estas especies. El objetivo de esta investigación fue identificar las principales especies de muérdago asociadas a mezquites del Desierto Chihuahuense, evaluar su nicho ecológico y analizar la variación espacial de su actividad antioxidante y contenido fitoquímico. Asimismo, se estandarizó un protocolo para la extracción y amplificación de ADN genómico de *Phoradendron leucarpum* como base para futuros estudios filogenéticos y de diversidad genética. Se desarrollaron modelos de distribución potencial mediante MaxEnt utilizando registros geográficos y variables bioclimáticas, además de realizar análisis fitoquímicos de extractos de *Phoradendron leucarpum* recolectados en diferentes sitios del norte de México. Para la evaluación molecular se compararon tres métodos de extracción de ADN y diferentes marcadores moleculares. Los resultados mostraron que la temperatura y la precipitación fueron los principales factores que determinaron la distribución potencial de *Phoradendron leucarpum* y *Neltuma laevigata*. Las zonas con mayor probabilidad de asociación entre ambas especies se localizaron principalmente en el Desierto Chihuahuense y regiones del Desierto Sonorense. Variables como la isothermalidad y la precipitación del trimestre más cálido presentaron una alta contribución en la modelación ecológica. En el análisis fitoquímico, la actividad antioxidante presentó variación espacial entre los sitios evaluados, observándose mayores concentraciones de compuestos fenólicos y flavonoides en los sitios con mayor actividad antioxidante. Además, factores ambientales como altitud, temperatura y precipitación influyeron en la acumulación de metabolitos secundarios. En el análisis molecular, el protocolo CTAB modificado presentó el mayor rendimiento y mejor capacidad de amplificación mediante PCR. Los resultados obtenidos evidencian que las condiciones ambientales influyen tanto en la distribución ecológica como en el potencial antioxidante de *Phoradendron leucarpum*, además de proporcionar una base metodológica útil para futuros estudios filogenéticos y de diversidad genética en especies hemiparásitas de zonas áridas. **Palabras clave:** Hemiparasitismo, muérdago, distribución geográfica, principios activos.

GENERAL ABSTRACT

DISTRIBUTION, PHYLOGENY AND PHYTOCHEMISTRY OF MISTLETOE SPECIES ASSOCIATED WITH ENDEMIC TREES OF ARID ZONES

The Chihuahuan Desert harbors a great diversity of plant species adapted to extreme environmental conditions, including mesquite species of the genus *Neltuma* and hemiparasitic plants of the genus *Phoradendron*. However, information regarding the environmental factors that determine their distribution and the phytochemical potential of these species remains limited. The aim of this study was to identify the main mistletoe species associated with mesquite trees in the Chihuahuan Desert, evaluate their ecological niche, and analyze the spatial variation of antioxidant activity and phytochemical content. Additionally, a protocol for genomic DNA extraction and amplification of *Phoradendron leucarpum* was standardized as a basis for future phylogenetic and genetic diversity studies. Potential distribution models were developed using MaxEnt based on geographic occurrence records and bioclimatic variables. Phytochemical analyses were also conducted using *Phoradendron leucarpum* extracts collected from different sites in northern Mexico. For molecular evaluation, three DNA extraction methods and different molecular markers were compared. The results showed that temperature and precipitation were the main factors determining the potential distribution of *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata*. Areas with the highest probability of association between both species were mainly located within the Chihuahuan Desert and regions of the Sonoran Desert. Variables such as isothermality and precipitation during the warmest quarter showed high contributions to ecological niche modeling. Phytochemical analyses revealed spatial variation in antioxidant activity among sampling sites, with higher concentrations of phenolic compounds and flavonoids observed in sites exhibiting greater antioxidant activity. Furthermore, environmental factors such as altitude, temperature, and precipitation influenced the accumulation of secondary metabolites. In the molecular analysis, the modified CTAB protocol showed the highest yield and best PCR amplification capacity. The obtained results demonstrate that environmental conditions influence both the ecological distribution and antioxidant potential of *Phoradendron leucarpum*, while also providing a useful methodological basis for future phylogenetic and genetic diversity studies in hemiparasitic species from arid regions.

Keywords: Hemiparasitism, mistletoe, geographic distribution, bioactive compounds.

Tesis de Doctorado en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas,
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Margarita Jurado Pérez

Director de Tesis: Dr. Ricardo Trejo Calzada

CAPÍTULO 1

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

Las zonas geográficas denominadas como zonas áridas y semiáridas son áreas caracterizadas principalmente por la escasez de precipitación pluvial porque existen condiciones predominantes de sequedad extrema y cobertura vegetal reducida o casi ausente (CONAFOR, 2021). En México, las zonas áridas y semiáridas abarcan una gran parte del territorio nacional (Jurado-Guerra et al., 2021). El desierto Chihuahuense es una de las regiones secas más extensas en América, ubicado en el norte de México y sur de Estados Unidos (Sandoval-Mata et al., 2024). Este se encuentra catalogado como una de las regiones con gran diversidad y riqueza biológicas, gracias al alto grado de endemismo, resultado del cambio climático a lo largo de los siglos, del aislamiento geográfico y de la colonización de las especies. Además, esta región ecológica es el nicho de numerosas especies que se encuentran en alguna categoría de riesgo, desde especies en protección especial hasta en peligro de extinción (Zavala-Hurtado & Jiménez, 2020)

Una de las plantas predominantes en la región es el mezquite (*Neltuma* spp.), el cual presenta grandes beneficios para el medio ambiente ya que tiene la capacidad de crecer bien en zonas áridas y semiáridas, no requiere de siembras anuales y soporta temperaturas extremas, así como la alcalinidad y salinidad del suelo (Ravhuhali et al., 2021). Dentro de la medicina tradicional, algunas partes aéreas del árbol han sido utilizadas para el tratamiento alternativo de enfermedades gastrointestinales y como antioxidante exógeno (Delgado-Núñez et al., 2020).

Los árboles de mezquite tienen relevancia económica, ya que popularmente han sido empleados como recurso maderero, para la fabricación de carbón, como material de construcción, así como recurso medicinal (Valdez-Romero et al., 2025). Además de esto, se ha documentado que en las zonas áridas y semiáridas existe presencia de plantas hemiparasitarias, principalmente muérdagos del género *Psittacanthus* y *Phoradendron*, y que estos prosperan de manera predominante en árboles y arbustos de leguminosas (Suzán-Azpiri et al., 2025) como lo son los mezquites.

Los muérdagos son un gran grupo de plantas hemiparásitarias que establecen relaciones duraderas con una amplia gama de especies de árboles hospedantes alrededor del mundo (Chávez et al., 2025). Debido a las interacciones que se dan entre los muérdagos, flora y fauna de los ecosistemas, podemos considerarlos un recurso clave para el ambiente (Hernández et al., 2023). Si bien es cierto que la infección del muérdago causa en efecto negativo en el hospedero, también es verdad que los muérdagos generan un gran aporte a la riqueza y biodiversidad de flora y fauna, ya que su follaje y flores son ricas en nutrientes y fungen como alimento para una gran variedad de insectos y aves, además de brindar estructuras para anidación y refugio (Muche et al., 2022)

Algunas especies de muérdago han sido usadas ampliamente en la medicina tradicional. En Europa la especie *Viscum álbium*, es bien conocido y utilizado por sus actividades inmuno moduladoras, por lo que es recomendado a pacientes con cáncer, ya que se ha demostrado que es capaz de mejorar la calidad de vida en estos pacientes (Majeed et al., 2021). En México se ha reportado que *Phoradendron serotinum* (comúnmente llamado muérdago americano) presenta actividad citotóxica frente a células cancerígenas de humano, además de que ha sido usado en la medicina tradicional para el tratamiento de enfermedades como el cáncer, diabetes, dismenorrea, entre otras (Chávez et al., 2025).

Actualmente, son escasos los estudios enfocados en el potencial etnobotánico de las especies de muérdago asociadas a arbustos del Desierto Chihuahuense.

Asimismo, el conocimiento sobre su distribución, ecología, diversidad, potencial farmacológico y composición química en ecosistemas áridos continúa siendo limitado. Aunado a esto, en las últimas décadas ha aumentado el interés por el uso de soluciones basadas en la naturaleza mediante el aprovechamiento de plantas endémicas de las zonas áridas de México, especialmente por parte de la industria alimentaria y farmacéutica. Por ello, el objetivo del presente estudio es identificar las principales especies de muérdago asociadas a mezquites del Desierto Chihuahuense, caracterizar su perfil fitoquímico y estandarizar un protocolo de extracción y caracterización molecular como base para futuros estudios genéticos y filogenéticos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Identificar las principales especies de muérdago que se asocian a los árboles de las especies *Neltuma* spp ubicados en el Desierto Chihuahuense.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. Desarrollar un modelo de distribución geográfica para las especies hospedadoras en estudio a través de la aplicación Max Ent.
- ii. Estandarizar un protocolo de extracción de ADN adecuado para las especies de muérdago identificadas, así como elaborar el árbol filogenético de las mismas.
- iii. Realizar el perfil fotoquímico y capacidad antioxidante de las especies de muérdago identificadas en los diferentes hospederos

1.3. HIPOTESIS

- I. Existe una estrecha relación filogenética entre las diferentes especies de muérdago asociadas a las especies de mezquite y huizache.
- II. El perfil fitoquímico de los muérdagos varía en función de la propia especie hemiparásita y de la especie hospedera.

LITERATURA CITADA

- Chavez, D., Nénger, N., Bolaños-Carriel, C., Marín, J. E., Bastidas, W., & García, L. (2025). Ecological Modeling of the Potential Distribution of the Mistletoe *Phoradendron nervosum* (Viscaceae) Parasitism in Ecuador. *Agriculture*, 15(16), 1732. <https://doi.org/10.3390/agriculture15161732>
- CONAFOR. (2021). Conafor.gob.mx. [https://www.Zonas Áridas. \(2021\). Conafor.gob.mx. https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/arboles-mexicanos/Zonas-Aridas.html](https://www.Zonas Áridas. (2021). Conafor.gob.mx. https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/arboles-mexicanos/Zonas-Aridas.html)
- Delgado-Núñez, E. J., Zamilpa, A., González-Cortazar, M., Olmedo-Juárez, A., Cardoso-Taketa, A., Sánchez-Mendoza, E., Tapia-Maruri, D., Salinas-Sánchez, D. O., & Gives, P. M. (2020). Isorhamnetin: A Nematocidal Flavonoid from *Prosopis laevigata* Leaves Against *Haemonchus contortus* Eggs and Larvae. *Biomolecules*, 10(5), 773. <https://doi.org/10.3390/biom10050773>
- Hernández, C. y. P., Vásquez, E. C., & Robles, M. I. R. (2023). Muérdago: una plaga o un recurso en el bosque. *Revista Digital Universitaria*, 23(3). <https://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2023.24.3.6>
- Jurado-Guerra, P., Velázquez-Martínez, M., Sánchez-Gutiérrez, R. A., Álvarez-Holguín, A., Domínguez-Martínez, P. A., Gutiérrez-Luna, R., Garza-Cedillo, R. D., Luna-Luna, M., & Chávez-Ruiz, M. G. (2021). Los pastizales y matorrales de zonas áridas y semiáridas de México: Estatus actual, retos y perspectivas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12, 261-285. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12s3.5875>
- Majeed, M., Hakeem, K. R., & Rehman, R. U. (2021). Mistletoe lectins: From interconnecting proteins to potential tumour inhibiting agents. *Phytomedicine Plus*, 1(3), 100039. <https://doi.org/10.1016/j.phyplu.2021.100039>
- Muche, M., Muasya, A. M., & Tsegay, B. A. (2022). Biology and resource acquisition of mistletoes, and the defense responses of host plants. *Ecological Processes*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00355-9>
- Ravhuhali, K. E., Mudau, H. S., Moyo, B., Hawu, O., & Msiza, N. H. (2021). *Prosopis* Species—An Invasive Species and a Potential Source of Browse for Livestock in Semi-Arid Areas of South Africa. *Sustainability*, 13(13), 7369. <https://doi.org/10.3390/su13137369>
- Sandoval-Mata, T. N., Hernández-Sandoval, L., Munguía-Lino, G., Steinmann, V. W., & Delgado-Salinas, A. (2024). Regionalización de la provincia del

Desierto Chihuahuense con base en la distribución de especies de *Dalea* (Fabaceae). Botanical Sciences, 102(3), 975-994. <https://doi.org/10.17129/botsci.3462>

Suzán-Azpiri, H., Guevara-Escobar, A., García-González, O., Queijeiro-Bolaños, M., Cervantes-Jiménez, M., & Carrillo-Ángeles, I. (2025). ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE INFESTACIÓN POR MUÉRDAGOS (*Psittacanthus calyculatus* Y *Phoradendron brachystachyum*) CON MÉTODOS FOTOGRÁFICOS. Revista Fitotecnia Mexicana, 48(3), 293. <https://doi.org/10.35196/rfm.2025.3.293>

Valdez-Romero, E., Delgadillo-Ruiz, L., Bañuelos-Valenzuela, R., Delgadillo-Ruiz, E., Meza-López, C., Mercado-Reyes, M., Ramírez-Hernández, L. A., Echavarría-Chairez, F. G., Arias-Hernández, L. A., Valladares-Carranza, B., Flores-Garivay, R., & Valtierra-Marín, H. E. (2025). Bromatological Composition and In Vitro Ruminant Digestibility of Vines of *Neltuma* spp. in Three Regions of the State of Zacatecas, México. Veterinary Sciences, 12(2), 142. <https://doi.org/10.3390/vetsci12020142>

Zavala-Hurtado, J. A., & Jiménez, M. (2020). Diversity and Uniqueness at Its Best: Vegetation of the Chihuahuan Desert. In Cuatro ciénegas basin: an endangered hyperdiverse oasis (pp. 1-17). https://doi.org/10.1007/978-3-030-44963-6_1

CAPÍTULO 2

ABSTRACT

Species Distribution Modeling to Assess Climate Niche of *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata* Forests in Arid Regions of Northern Mexico

Phoradendron leucarpum mistletoe also known in Spanish Muérdago, are aerial hemiparasitic plant that anchors and infests mesquite tree *Neltuma laevigata*. They use parasitism as water-nutrient acquisition strategy, shelter from hot, dry climates of arid regions and regulate their C₃ photosynthesis. The parasitic relationship between *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata* parasitism it is the most-known ecological-plant association in the Chihuahuan Desert. Mesquite trees are keystone species widely distributed across different regions of Mexico, and are vulnerable to mistletoe infection. The objective of this study, using MaxEnt models of mistletoe and mesquite, was to assess their ecological niches and the key climate factors that promote the association between mesquite forests and mistletoe. We compared and evaluated the ecological niches of two species: a) mistletoe species *Phoradendron leucarpum* and b) *Neltuma laevigata* from northern Mexico. Niche models were generated using MaxEnt and analyzed with NTBox. Changes in habitat suitability were evaluated relative to climate variables, as well as geographic and ecological niche distributions. Our results highlight the endemism of mistletoe in northern Mexico, particularly in the Chihuahuan and Sonoran Deserts. Additionally, our study highlights that precipitation and temperature are the main climate variables influencing their ecological niches and geographic distribution of these two species. A new area in the Sonoran Desert, in the northern and southern regions of Baja California, showed a high probability of mistletoe occurrence in association with *Neltuma laevigata*, this are needs further research in order to continue documenting mistletoe encroaching in northern Mexico.

Keywords: Mistletoe, Mesquite, Parasitism, Maxent Modeling, Northern Mexico

Tesis de Doctorado en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Margarita Jurado Pérez

Director de Tesis: Dr. Ricardo Trejo Calzada

Enviado a: Diversity and Distributions. Status: En revisión

Species Distribution Modeling to Assess Climate Niche of *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata* Forests in Arid Regions of Northern Mexico

Margarita Jurado-Pérez¹, Ricardo Trejo-Calzada¹, Jorge L. Becerra-López², Jesús J. Quezada-Rivera², Ignacio Sánchez-Cohen³, Luis Gerardo Yáñez-Chávez¹, Hector Ortiz*

¹Universidad Autonoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Aridas, URUZA-UACH. Carretera Gómez Palacio - Ciudad Juárez, Bermejillo, 35230 km 40, Durango

²Universidad Juárez del Estado de Durango, Faculty of Biological Sciences, Campus Gómez Palacio. Av. Universidad s/n. Col. Filadelfia, C.P.35010. Gómez Palacio,

³ Instituto Nacional. Sacramento Canal, kilometer 6.5, Industrial Zone, 4th. stage. Gómez Palacio, Durango, C.P. 35140

⁴ Negaunee Institute for Plant Conservation Science and Action, Chicago Botanic Garden. 1000 Lake Cook Road, 60020, Glencoe, IL

*Corresponding author: hortiz@chicagobotanic.org

SUMMARY

Phoradendron leucarpum mistletoe also known in Spanish Muérdago, are aerial hemiparasitic plant that anchors and infests mesquite tree *Neltuma laevigata*. They use parasitism as water-nutrient acquisition strategy, shelter from hot, dry climates of arid regions and regulate their C₃ photosynthesis. The parasitic relationship between *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata* parasitism it is the most-known ecological-plant association in the Chihuahuan Desert. Mesquite trees are keystone species widely distributed across different

regions of Mexico, and are vulnerable to mistletoe infection. The objective of this study, using MaxEnt models of mistletoe and mesquite, was to assess their ecological niches and the key climate factors that promote the association between mesquite forests and mistletoe. We compared and evaluated the ecological niches of two species: a) mistletoe species *Phoradendron leucarpum* and b) *Neltuma laevigata* from northern Mexico. Niche models were generated using MaxEnt and analyzed with NTBox. Changes in habitat suitability were evaluated relative to climate variables, as well as geographic and ecological niche distributions. Our results highlight the endemism of mistletoe in northern Mexico, particularly in the Chihuahuan and Sonoran Deserts. Additionally, our study highlights that precipitation and temperature are the main climate variables influencing their ecological niches and geographic distribution of these two species. A new area in the Sonoran Desert, in the northern and southern regions of Baja California, showed a high probability of mistletoe occurrence in association with *Neltuma laevigata*, this area needs further research in order to continue documenting mistletoe encroaching in northern Mexico.

Keywords: Mistletoe, Mesquite, Parasitism, Maxent Modeling, Northern Mexico.

INTRODUCTION

American mistletoes (genus *Phoradendron*) are hemiparasitic plants that have been studied from different evolutionary and ecological approaches in the northern Mexico arid regions. Particularly, several efforts have been made to understand mistletoe ecological drivers of encroaching in mesquite forests (Tinoco-Domínguez et al., 2024). Hemiparasitic mistletoes have the characteristics of anchoring and acquiring water through hydraulic lift from mesquite plants (Scalon et al., 2024). *Phoradendron leucarpum* (American mistletoe) parasitizes several timber species in the southern United States and northern Mexico (Kuijt, 2003). The trees with which the American mistletoe interacts are the families of Fabaceae, Rosaceae and Oleaceae, but mainly

uses mesquite trees as a host plant in regions such as the Chihuahuan Desert in northern Mexico (Tinoco-Domínguez et al., 2024).

Phoradendron leucarpum co-evolved with mesquite forest *Neltuma laevigata* in the arid regions (Kuijt, 2003). However, climate change and mesquite forest uses modified their parasitism relationships. Mesquite forests, commonly known as mesquites in Mexico, have ecological-cultural importance for millenia. Today mesquite forests in northern Mexico and the US, are a of high value because its many commercial uses for food and materials, particularly at indigenous and rural communities. Amongst uses of mesquite are: wood, fodder, food, charcoal, fuel, and as traditional medicine (Morales-Domínguez et al., 2019). Mesquites are keystone species in arid regions of Mexico and North America; thermal high tolerance *Neltuma laevigata* combined with saline stress and drought, makes mesquite forests, one of the extremotolerant ecosystems to current climate; and also, one of the oldest ecosystems with the highest cultural value in north America (Rodríguez-Sauceda et al., 2018).

Little has been done to evaluate climate factors that affect in a large scale the geographic regions of mistletoe parasitism that affect mesquite forests in current climate. An alternative to assess current climate and ecological drivers of mistletoe and mesquite forest is using species distribution models (SDM's). This approach correlate environmental and ecological variables with species occurrence data to predict potential suitable habitat areas with highest probability of species occurrence. Thus SDMS can help to explain complex ecological processes, such as the presence and convergence zones of parasitic plant and host.

Mistletoe encroaching are difficult to assess from ground and using other remote sensing techniques. Ecological and climate niche models is a powerful tool with potential to evaluate suitable climate for mistletoe to mesquite forest distribution in northern Mexico. The goal of our work was to evaluate: a) create ecological niche models of mistletoe and mesquite trees, b) evaluate models overlapping in

climatic zones in northern Mexico, and c) evaluate climate niche to identify climatic ecological drivers of convergence of *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata*.

MATERIALS AND METHODS

Study area and data

Field surveys for sample collection of mistletoe *Phoradendron leucarpum* and mesquite *Neltuma laevigata*, were carried out in the South-Central part of the Chihuahuan Desert— in the south-central areas of the states of Chihuahua, Coahuila, Durango, and Zacatecas. Global Biodiversity Informatics Facility (GBIF) (GBIF.org) databases were used to screen for locations and presence-absence of the species. Using Herbarium specimens from the Center for Integral Regional Development (CIIDIR), geographic records were obtained to identify mesquite forest stands with mistletoe. Geographic points were incorporated electronically into maps to identify access to sampling areas.

Community field surveys were conducted at various localities within the study area to identify local mesquite farmers knowledgeable about invasive mistletoe. After identifying community members with mesquite expertise, they guided us to mesquite forests and mistletoe locations. They also supported sample collection and helped identify species according to regional knowledge of *Phoradendron leucarpum*.

Morphological characteristics of mistletoe were recorded in the field. Samples were transported to the University of Chapingo URUZA-UACH facilities and stored for botanical evaluation. Herbarium specimens at the Center for Integral Regional Development (CIIDIR) were used, employing dichotomous keys to visually compare morphological features of the samples and confirm their morphological and taxonomic identity.

Geographic records data preparation

Field samples and geographic records were subset, using the following criteria: a) Field data confirmed using electronic herbaria and herbarium specimens; b) data from sites less than 10 km apart, and c) data outside field sample areas. Geographic data filtering was carried out using the Tydiverse package (Lorente-Casalini et al., 2024) in the R program (Rstudio 4.4.1). To our knowledge, no previous assessment in northern Mexico to analyze climate on Mesquite forest to mistletoe invasiveness, geographic records, were thinned and adjusted to bioclim layers 2.5 arc-minute grid resolution; a total of 93 geographic occurrences for *Phoradendron leucarpum* and 186 geographic records for *Neltuma laevigata*, were obtained for the analyses.

Selection of environmental variables

The bioclimatic variables for our study were obtained from WorldClim 2.1 (WorldClim2.1.org). We used Bioclimatic layers at a resolution of 2.5 arc minutes ~ 4.63 km. The layers were clipped and adjusted to northern Mexico States in the Chihuahuan Desert, and Mexico continental extent. A Pearson correlation analysis adjusted to $p < 0.7$ to analyze collinearity the variables with the lowest correlation in the geographic space and more relevant to the mesquite and mistletoe plants in northern Mexico region. The selection process, also, was carried out considering a) effect of temperature and moisture on C_3 photosynthesis of mistletoe and parasitic habit, b) mesquite as host plant—thermal buffer effect and extremotolerance to heat and drought—, c) geographic distribution of both species within northern Mexico arid regions. We selected variables with the lowest correlation, and geographic-climate simetrical predictability to mistletoe and mesquite tree, and geographic distribution extents to northern Mexico Deserts (Becerra-López et al., 2017; Ortiz Cano et al., 2023).

Maxent modeling and evaluation

Model calibration was carried out using ENMeval package (Muscarella et al., 2014) using R studio 4.4.1 (R statistics, 2025, R Development Core Team, 2022). The standardized coefficient criteria of information Akaike AICc was used

for parameter assessment, optimization and model selection (Warren et al., 2013). MaxEnt outputs of independent variables to construct *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata* models were extracted and analyzed individually. We evaluated models based on: a) known geographic distribution from field samples combined with herbaria data geographic samples; and b) model complexity to geographic— environmental variation. We selected calibration data and models with low variation and less complexity to achieve less inflated niche suitability and contribution to model predictability.

We examined the percent contribution of variables to determine which of the climate variables contributed most to model performance. Variable response graphs were created to compare trends of *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata* species responses to main climate factors in northern Mexico, in the Chihuahuan and Sonoran Deserts. Using K-means we evaluated niche partitioning to assess the main climate factors of mesquite forest to mistletoe in northern Mexico. Niche Tool Box (Osorio et al., 2020) was used to statistically evaluate dimensionality of the main climate drivers to predicted spatial and ecological distribution of *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata*.

RESULTS

Two Maxent models were developed to evaluate the distributions and ecological niches of *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata* in northern Mexico. The potential suitability maps show areas of predicted suitable habitat within the study boundary (**Figure 1 AB**). In northern Mexico region, areas with potential suitable habitat values estimated above 0.8, or greater than 80% of suitability, were relatively high for *Phoradendron leucarpum* in the Chihuahuan Desert in central northern Mexico region (**Figure 1A**). Contrastingly, the same suitability of occurrences value 0.8, for *Neltuma laevigata* was observed towards the edges of the Chihuahuan Desert in central Mexico (**Fig.1 B**). Niche overlap of both species was observed in the edges of the Chihuahuan Desert in the eastern part

of the Sierra Madre region and coastal regions of the Sonoran Desert and Baja California Peninsula

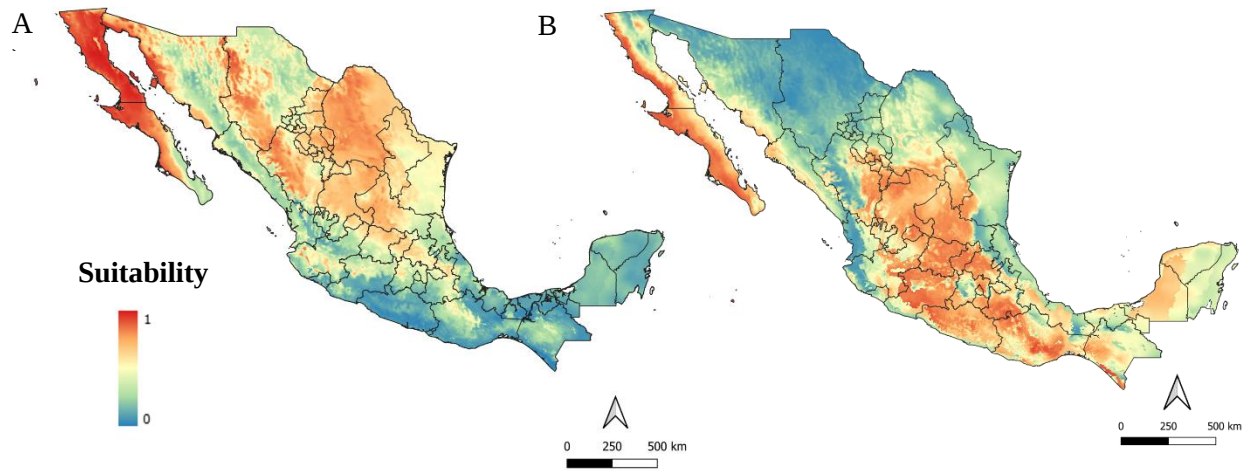


Figure 1. Species distribution model of *Phoradendron leucarpum*, (B) Species distribution model of *Neltuma laevigata*.

Table 1. Percentage contributions to model creation of *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata*.

	Bioclimatic variables	<i>Phoradendron leucarpum</i>	<i>Neltuma laevigata</i>
Bio 1	Average annual temperature	9.2	8.8
Bio3	Isothermality	11	23.75***
Bio7	Annual temperature range	17	35.55*
Bio12	Annual precipitation	4.8	0.75
Bio15	Precipitation seasonality	40.2*	1.5
Bio 17	Precipitation of the driest quarter	9.5	1.45
Bio18	Precipitation of the warmest quarter	8.3	28.2**

***Bioclimatic variables with highest model contribution; ** middle model contribution; * lowest contribution

Niche models and climate

The variables selected for modeling mistletoe *Phoradendron leucarpum* parasitism to mesquite forest *Neltuma laevigata*, were: mean annual temperature (bio1), isothermality (bio3), annual temperature range (bio7), annual precipitation (bio12), precipitation seasonality (bio15), precipitation of the driest quarter (bio17) and precipitation of the warmest quarter (bio18).

Principal component analyses showed that PC1 and PC 2 holds 82.47% of the cumulative proportion to construct the models; with the lowest variation PC1 56.388, indicating that the variables with the four Bioclimatic variables that holds the highest contribution to model construction explains the ecological niches of mistletoe and mesquite species in our study (**Figure 2**).

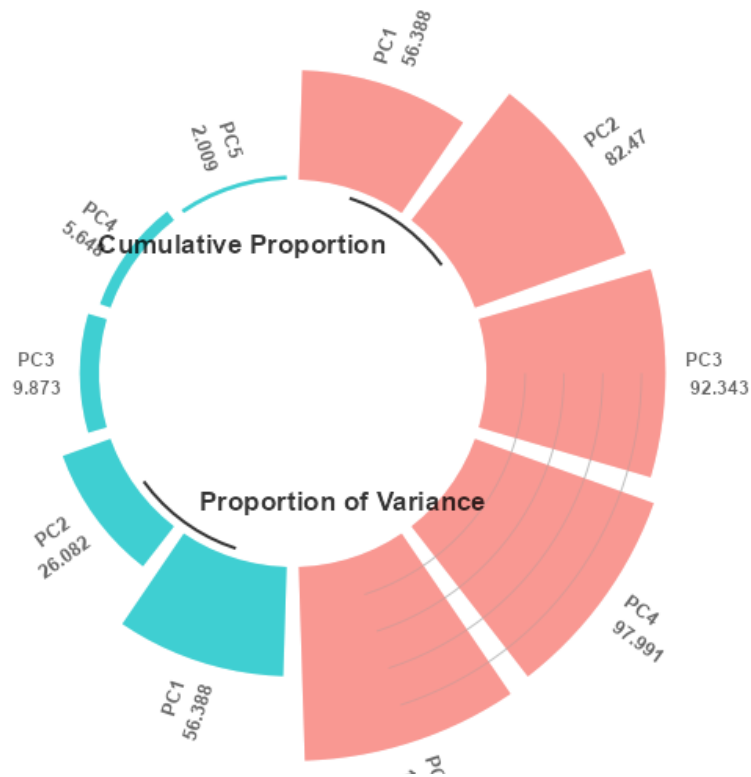


Figure 2. Principal component analyses of Bioclimate variables used to construct models of *Phoradendron leucarpum*, and *Neltuma laevigata*

From the Bioclimatic variables used to construct the niche models, both models showed that precipitation was a primary factor for the ecological niches in our study. Precipitation seasonality (Bio 15) was the variable with the greatest influence for modeling *Phoradendron leucarpum* climate niche. Summer precipitations, particularly, precipitation in the warmest quarters (Bio 17) along with isothermality (Bio 3) were highlighted for *Neltuma laevigata* niche. While for *Phoradendron leucarpum* thermal variables, annual temperature ranges and isothermality, showed lower contributions to model generation; *Neltuma laevigata* models highlighted annual temperature range (Bio 7) had significant relevance to mesquite and *Phoradendron leucarpum* ecological niche.

Model variable contribution by estimating means, expressed in the percentage contribution to permutation importance as calculated in MaxEnt (**Table 1**. Percentage contributions to model creation of *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata*.); indicating that precipitation seasonality contributes the most to the presence of *Phoradendron leucarpum*. However, the cumulative annual precipitation (Bio 7) had a lower impact on model generation; in relation to *Neltuma laevigata* niche in which precipitation in the warmest quarter (Bio 18) had higher impact on modeling mesquite niche. Suggesting *Phoradendron leucarpum* as a parasitic drylands hygric-ecological model from the Chihuahuan and Sonoran Deserts, as observed in the cluster analysis of Bioclimatic layers and mistletoe data, and the analyses of the mistletoe and mesquite niches (**Figure 3 A, B**). Precipitation-related variables contributed 62.8% to the presence of mistletoe, while temperature variables contribute 37.2%.

Neltuma laevigata was mostly conditioned by temperature variables with a contribution of 68.1%, the most relevant being the annual temperature range (Bio7) and isothermality (Bio3). Precipitation variables contribute 31.9%, of these variables, the most important was the precipitation of the warmest quarter (Bio 18) (**Figure 3**)

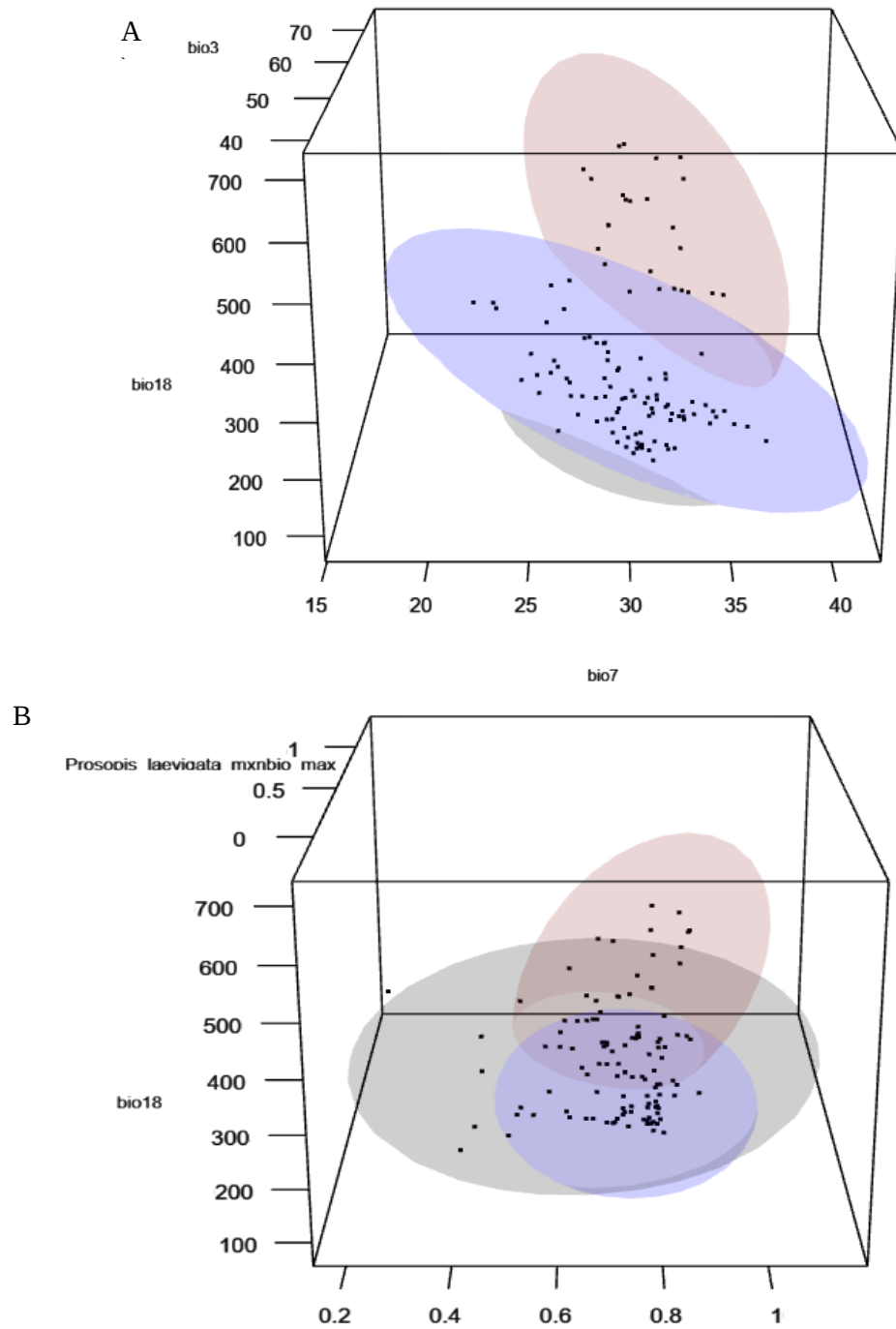
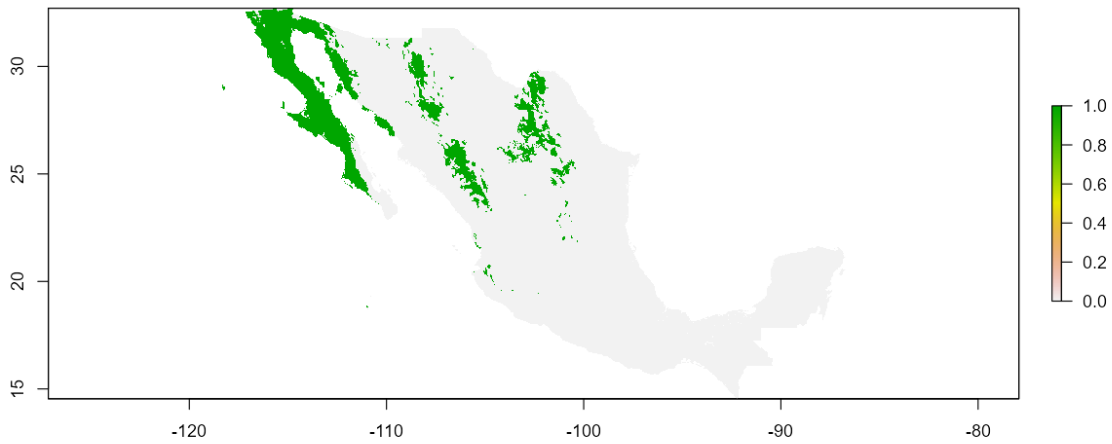


Figure 3. Cluster analyses of bioclimatic variables and ecological niches associated with *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata*. (A) Cluster analyses of bioclimatic variables used for niche modeling. (B) Cluster analysis of mistletoe and mesquite niches in relation to precipitation during the warmest

Ecological niche model and climate-ecological zones

The ecological niche model of *Phoradendron leucarpum* indicated northern Mexico environmental conditions in the Chihuahuan and Sonoran Desert are the most ecologically suitable convergence for mistletoe and mesquite forests. The binomial test for presence absence and to assess overlapping of both niches highlighted the states of northern and southern Baja California showed high environmental suitability and overlapping for mistletoe and mesquite models; particularly suggesting the relation of coastal precipitation and humidity conditions of the Pacific and Gulf of California, and arid and semi-arid temperatures of the Baja peninsula for mistletoe in mesquite forests (**Figure 4 A,B**). Three main regions with predicted ecotypes were obtained from *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata* niche models in the northern Mexico Sonoran and Chihuahuan Deserts: 1) Madrean eastern semi-arid Chihuahuan Desert borders, eastern Sierra Madre region in the states of Durango and Chihuahua; 2) Central-mixed Chihuahuan Desert, predominantly the states of Coahuila and Zacatecas, 3) Coastal-Baja-Sonoran Desert, predominantly Baja California States and upper Sonoran Desert in Sonora Mexico.

A Mistletoe and mesquite climate relationships



B

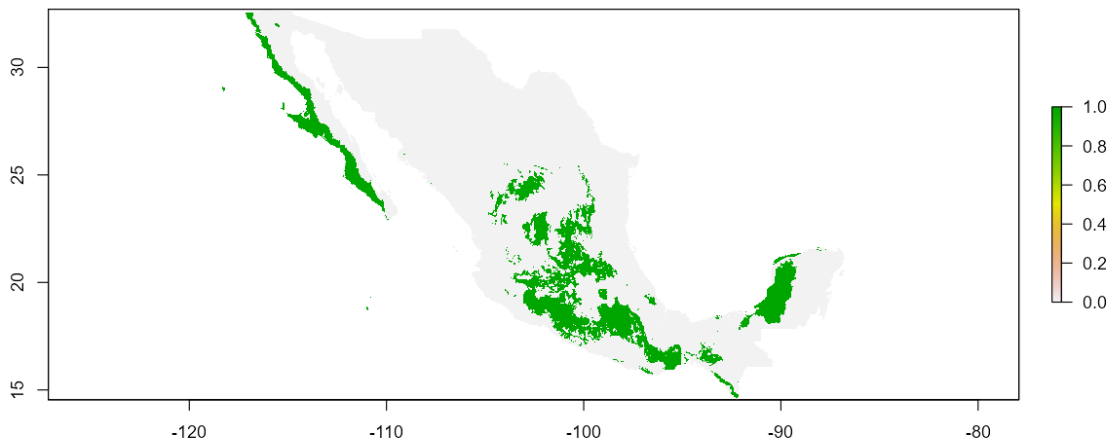


Figure 4. Binomial tests of presence under a 0.8 ecological suitability threshold for the climatic niches of *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata*. (A) Binomial test applied to the climatic niche of *Phoradendron leucarpum*. (B) Binomial test applied to the climatic niche of *Neltuma laevigata*.

Phoradendron leucarpum and *Neltuma laevigata* models, highlighted that isothermality (Bio 3), annual temperature range (Bio 7), and precipitation of the warmest quarter (Bio 18) thermal factors and moisture factors interactively contribute to mistletoe and mesquite niches and geographic distribution overlapping, principally comparing mistletoe and mesquite models.

Results of ecological niche models suggested that the effect of day-night temperature variation captured in isothermality (Bio 3) was a key factor on building the ecological niche models of *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata* and analyzing their overlapping. Results indicated that isothermality explained primarily the distribution of *Neltuma laevigata*; and geographic heterogeneous distribution of *Phoradendron leucarpum* populations relative to *Neltuma laevigata* forests.

A positive correlation was observed for the distribution of mesquite *Neltuma laevigata* in our models; the greater isothermality 60%, the more favorable the environmental conditions are for *Neltuma laevigata*. Regarding temperature ranges, low ratios of change in climate from 1% to 2.42% change annually, affect mesquite suitability when climate variation is moderated in northern arid regions in Mexico; as observed in typical increasing temperature patterns over the last 10 years of 1°C in the northern Mexico arid regions.

In the case of the average annual temperature, we observe that the maximum predictability range temperature is from approximately 18 to 22°C. Before the 18°C the growth rate is 5.95% each °C, while from 22°C it decreases 1.67% for each °C.

Annual temperature range (Bio7) was a primary factor for constructing the models of *Neltuma laevigata*; likewise, a second important factor for *Phoradendron leucarpum* models. Mesquite and mistletoe suitability models showed ideal temperature at 25°C. Above 25°C the probability of suitability decreases for both mistletoe and mesquite. However, suitability remains constant up to approximately 33°C, above this temperature the range

decreases. This indicates that when the annual temperature range is 22 to 33°C, mistletoe finds ideal conditions for parasitism. In both species, from 38°C, the probability of presence and suitability decrease drastically with respect to temperature.

Although for *Phoradendron leucarpum* precipitation of the warmest quarter (Bio 18) for model creation was only 8.3% of contribution, 20.8% lower than for precipitation seasonality (Bio 15), 40.2% it is an important factor on aerial water trapping. In addition, considering a) the parasitic-host relationship as a primary source for water acquisition of mistletoe to *Neltuma laevigata* and hydraulic lift of *Neltuma* trees in north American Deserts to allocate water up in the canopy, also, b) ratio of model contribution (Bio15/Bio 18), 75% greater for precipitation of the warmest quarter, as in (Table 1); the model results suggests that precipitation of the warmest quarter (Bio 18) with summer average rainfall 200 mm models is key for suitability modeling of mistletoe and parasitism relations with mesquite in the warmest and dryer quarter of the year, likely in high summer months. Also, indicating when precipitation increases, suitability decreases by 10% for every 100 mm of precipitation.

DISCUSSION

The niches of the species *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata* were determined. According to the models, the regions of highest suitability for both species overlap in some parts of Mexican territory, supporting the hypothesis that areas with mesquite could be potential distribution zones for the mistletoe species. Since mistletoe is an obligate hemiparasite (Randle et al., 2018), the presence of its host is essential for its development. However, besides the host, environmental factors also play a significant role in mistletoe growth (Whiteman, 2023).

The models show that the areas with ideal conditions for the development of both species are primarily the Baja California peninsula and parts of the Mexican Chihuahuan Desert, mainly in the states of Durango, Zacatecas, and San Luis

Potosí. The locations where fieldwork was conducted fall within the areas indicated for the distribution of both species. The average annual temperature in Baja California and Baja California Sur ranges from 19 to 23 °C, with the highest temperatures reaching around 30 °C (CONAGUA, 2023). These values align with the results from our models, which suggest that the optimal temperature conditions for both species fall within these ranges. Similarly, Lira-Noriega et al. (2015) studied the ecological niche of *Phoradendron californicum* and identified the Baja California peninsula as a high-suitability area for this species, matching the results of this study for the niche of *Phoradendron leucarpum*. Both species have been reported in association with various *Fabaceae*, including *Acacias* and *Neltuma* (Kuijt, 2003; Lira-Noriega & Peterson, 2014).

Various species of mesquite are evenly spread across the arid regions of the country. These include *N.glandulosa*, *N.juliflora*, *N.velutina*, *N.pubescens*, *N.reptans*, *N.articulata*, *N. tamaulipana*, *N.palmeri*, and *N.laevigata*. Collectively, these species cover approximately 3.5 million hectares (Rodríguez Saucedo et al., 2014). This represents a substantial area of land where mistletoe can be found, depending on the availability of the host. Mesquite trees play a significant role in maintaining the environmental balance in Mexican deserts by helping to conserve and nitrogenate the soil (Dávila-Rangel et al., 2024).

However, in addition to *Acacias* and *Prosopis*, American mistletoe can parasitize other tree species. According to Kuijt (2003), the host family *Fagaceae* is also included in the *Fagaceae* family, which contains several oak species (*Quercus* spp). According to INEGI (National Institute of Statistics and Geography) (2018), the distribution of *Quercus* species in the country is mainly in the Sierra Madre Occidental region. This distribution overlaps with the suitability zones shown in the *Phoradendron leucarpum* model, where the suitability exceeds 80%. Sosa et al. (2018) studied the presence of forest pests in Mexico and reported the areas of suitability for mistletoes (of various species) in the Sierra Madre Occidental. All of the above indicate that, in the aforementioned area, the likelihood of an

association between *Phoradendron leucarpum* and some *Quercus* species is high.

While it is true that parasitic plants occur less frequently in balanced environments (Watson, 2009), it is important to remember that desert systems often expose their inhabitants to stressful climatic conditions that complicate development (Dávila-Rangel et al., 2024). Watson (2009) proposes the "host quality hypothesis," stating that the infestation of the parasite (mistletoe) on the host depends on the "quality" of its host. That is, the more stressed a tree is, the more susceptible it becomes to mistletoe growth. However, in the case of mesquite, the optimal physiological conditions for its development have very broad ranges.

Trees of the genus *Neltuma* exhibit slow growth periods that depend on water availability or drought conditions, during which they enter a vegetative recess (Passera, 2000). Additionally, the temperature range for seed germination spans from 25 to 45 °C (Wan & Sosebee, 1991), which is quite broad and includes high temperatures. Regarding salinity, some *Neltuma* species are highly tolerant of saline soils (Jarrell & Virginia, 1990). Similarly, these tree species possess high photosynthetic efficiency; *Prosopis glandulosa*, for example, showed yield values of up to 41.2 mg CO₂ dm⁻² h⁻¹, surpassing the average yields of other shrub and tree species (Wan & Sosebee, 1991). All these traits contribute to extreme resistance to adverse environments such as extreme heat, prolonged droughts, high salinity, and salinity, resulting in high resilience to environmental stress.

It could then be inferred that Watson's theory (2009) does not apply to the association of mistletoe with mesquite. However, the environmental interactions of Bio 7 indicate that there are temperature ranges where mesquite's probability of development decreases (above 25°C). Despite this, these conditions still favor mesquite development. This suggests that in the relationship between mistletoe and mesquite, temperatures above 25°C and up to 32°C promote the

mechanisms by which the parasite attaches itself to mesquite, exploiting its vulnerabilities.

On the contrary, the interaction of isothermality (Bio 3) and precipitation in the warmest quarter (Bio 18) with species suggests that when environmental conditions favor mesquite (isothermality above 60), mistletoe is harmed. This situation allows us to infer that, when these environmental conditions are present, mesquite takes advantage of them to defend itself from mistletoe deploying drought tolerance physiological strategies (i.e., slowing increasing hydraulic lift, slowing sap flow-through stems).

Currently little is known about of mesquite trees in the field phytochemistry and physiological mechanisms that favor the association of mistletoes with their hosts, the present work contributes to understand the environmental and climate conditions so that interactions between species are favorable.

CONCLUSION

Ecological niche models can be interpreted as hygric climate niche models for *Phoradendron leucarpum* and *Neltuma laevigata*; niches showed a powerful tool to identify suitable areas where both species overlap in northern Mexico. These models with extended botanical knowledge and geographic distribution and occurrences also can assist in assessing the infection of *Phoradendron leucarpum* on *Neltuma laevigata* across different climate and environmental regions in the Chihuahuan and Sonoran Deserts. Variables such as isothermality, precipitation during the warmest season, and annual temperature range significantly influence the presence of both species, making them key ecological drivers for the association between mistletoe and mesquite. This insight has potential applications in future studies related to mistletoe management, on new zones with high vulnerability to climate and infection, and identification in new mesquite forest areas. Although mechanisms of association, defense, and environmental influences explaining the interactions of

parasitic plants with their hosts are still limited, ecological niche models offer a valuable tool that can enhance understanding of these plant relationships.

REFERENCES

1. Becerra-López J.L., Esparza Estrada C.E., Romero Méndez U., Sigala Rodríguez J.J., MayerGoyenechea I.G., Castillo Cero´n J.M. (2017) Evidence of niche shift and invasion potential of *Lithobates catesbeianus* in the habitat of Mexican endemic frogs. PLoS ONE 12(9): e0185086. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185086>
2. CONAGUA. Gob.mx. Retrieved November 5, 2024, retrieved from <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/TMED/2023.pdf>
3. Dávila-Rangel, I. E., Charles-Rodríguez, A. V., López-Romero, J. C., & Flores-López, M. L. (2024). Plants from arid and semi-arid zones of Mexico used to treat respiratory diseases: A review. *Plants*, 13(6), 792. <https://doi.org/10.3390/plants13060792>
4. National Institute of Statistics and Geography (INEGI). (2018). Land Use and Vegetation Vector Dataset. Scale 1:250,000. Series VII. National Ensemble. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>.
5. Jarrell, W. M., & Virginia, R. A. (1990). Response of mesquite to nitrate and salinity in a simulated phreatic environment: Water use, dry matter

and mineral nutrient accumulation. *Plant and Soil*, 125(2), 185–196.

<https://doi.org/10.1007/bf00010656>

6. Kuijt, J. (2003). Monograph of *Phoradendron* (viscaceae). *Systematic Botany Monographs: Monographic Series of the American Society of Plant Taxonomists*, 66, 1. <https://doi.org/10.2307/25011253>
7. Lira-Noriega, A., & Peterson, A. T. (2014). Range-wide ecological niche comparisons of parasite, hosts and dispersers in a vector-borne plant parasite system. *Journal of Biogeography*, 41(9), 1664–1673.
<https://doi.org/10.1111/jbi.12302>
8. Lira-Noriega, A., Toro-Núñez, O., Oaks, J. R., & Mort, M. E. (2015). The roles of history and ecology in chloroplast phylogeographic patterns of the bird-dispersed plant parasite *Phoradendron californicum* (Viscaceae) in the Sonoran Desert. *American Journal of Botany*, 102(1), 149–164.
<https://doi.org/10.3732/ajb.1400277>
9. Lorente-Casalini, O., Rodes-Blanco, M., Aguirre-Iglesias, S., Martín-Ávila, J. A., San-Segundo Molina, D., Tijerín-Triviño, J., & Astigarraga, J. (2024). Tidyverse: R package collection for data science. *Ecosystems: Scientific and Technical Journal of Ecology and the Environment*, 2745.
<https://doi.org/10.7818/ecos.2745>
10. Morales-Domínguez, J. F., de León, D. C. S.-D., Garcidueñas-Piña, C., & Pérez-Molphe-Balch, E. (2019). Germination, in vitro propagation and soil acclimatization of *Acacia farnesiana* and *Prosopis laevigata*. *Suid-*

- Afrikaanse Tydskrif Vir Plantkunde [South African Journal of Botany], 124, 345–349. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.034>
11. Muscarella, R., Galante, P. J., Soley-Guardia, M., Boria, R. A., Kass, J. M., Uriarte, M., & Anderson, R. P. (2014). ENMeval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxentecological niche models. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(11), 1198–1205. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12261>
 12. Ortiz Cano HG, Hadfield R, Gomez T, Hultine K, Mata Gonzalez R, Petersen SL, et al. (2023) Ecological-niche modeling reveals current opportunities for Agave dryland farming in Sonora, Mexico and Arizona, USA. PLoS ONE 18(1): e0279877. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0279877>
 13. Passera, C. B. (2000). Physiology of *Prosopis* spp. *Multequina*, 9(2), 53–80.
 14. Randle, C. P., Cannon, B. C., Faust, A. L., Hawkins, A. K., Cabrera, S. E., Lee, S., Lewis, M. L., Perez, A. A., Sopas, J., Verastegui, T. J., & Williams, J. K. (2018). Host cues mediate growth and establishment of oak mistletoe (*Phoradendron leucarpum*, *viscaceae*), an aerial parasitic plant. *Castanea*, 83(2), 249–262. <https://doi.org/10.2179/18-173>
 15. Rodríguez Saucedá, E. N., Rojo Martínez, G. E., Ramírez Valverde, B., Martínez Ruiz, R., Cong Hermida, M. de la C., Medina Torres, S. M., & Piña Ruiz, H. H. (2014). Technical analysis of the mesquite tree (*Prosopis*

laevigata Humb. & Bonpl. ex Willd.) in Mexico. *Ra Ximhai*, 173–194.

<https://doi.org/10.35197/rx.10.01.e.2014.13>

16. Scalon, M. C., Heilmeier, H., & Rossatto, D. R. (2024). Plant-plant parasitism: Trends in the last 50 years and a call for papers for a special issue in *Flora*. *Flora*, 310(152438), 152438.
<https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152438>
17. Ministry of Environment and Natural Resources (SEMARNAT). (2018). Environmental Report. Retrieved November 19, 2024, from
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap2.html>
18. Shaw, D. C., Teixeira-Costa, L., Watson, D. M., & Shamoun, S. F. (2024). Introduction to the special issue on parasitic flowering plants in forests. *Botany*, 102(3), 56–57. <https://doi.org/10.1139/cjb-2024-0011>
19. Sosa Díaz, L., Méndez González, J., García Aranda, M. A., Cambrón Sandoval, V. H., Villarreal Quintanilla, J. Á., Ruiz González, C. G., & Montoya Jiménez, J. C. (2018). Potential distribution of borers, defoliators, bark debarkers and mistletoes in coniferous forests of Mexico. *Mexican Journal of Forest Sciences*, 9(47), 187–208.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.159>
20. Tinoco-Domínguez, E., González-Elizondo, M. S., & Lira-Noriega, A. (2024). American mistletoes: A dataset of *Phoradendron* species and their hosts across their distribution range. *Ecology*, 105(10).
<https://doi.org/10.1002/ecy.4394>

21. Wan, C., & Sosebee, R. E. (1991). Water relations and transpiration of honey mesquite on 2 sites in west Texas. *Journal of range management*, 44(2), 156. <https://doi.org/10.2307/4002315>
22. Warren, D. L., Wright, A. N., Seifert, S. N., & Shaffer, H. B. (2013). Incorporating model complexity and spatial sampling bias into ecological niche models of climate change risks faced by 90 California vertebrate species of concern. *Diversity and Distributions*, 20(3), 334–343. <https://doi.org/10.1111/ddi.12160>
23. Watson, D. M. (2009). Determinants of parasitic plant distribution: the role of host quality. *Botany*, 87(1), 16–21. <https://doi.org/10.1139/b08-105>
24. Whiteman, N. K. (2023). Mistletoes. *Current Biology: CB*, 33(11), R467–R469. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.03.035>

CAPÍTULO 3

Variación espacial de la actividad antioxidante y compuestos fenólicos de muérdago (*Phoradendron leucarpum*) en el Desierto Chihuahuense

RESUMEN

Abstract

Secondary metabolites and the antioxidant activity of *Phoradendron leucarpum* represent a potential pharmacological alternative. However, spatial patterns and environmental determinants in arid ecosystems remain poorly understood. This study aimed to quantify the antioxidant capacity of *Phoradendron leucarpum*, the total phenolic and flavonoid contents, and their relationship with environmental variables in the Chihuahuan Desert. Leaf samples were collected from eight sites in the central region of the Chihuahuan Desert. Ethanolic extracts were obtained for phytochemical determination. Climatic variable values were obtained from the WorldClim database using the Geodata application in R, and spatial interpolation was performed using the Inverse Distance Weighting (IDW) method. Antioxidant activity ranged from 18.8% to 72.0%. Samples from sites S3 and S7 recorded the highest values. These sites also showed the highest concentrations of phenols (0.357 mg GAE/g) and flavonoids (0.193 mg QE/g). The results showed a positive association between antioxidant activity and phenolic and flavonoid compounds; however, their spatial distribution was heterogeneous. The highest values were found in the southwestern part of the study area. Overall, the results indicate that mistletoe antioxidant activity is influenced by environmental gradients and variability in the synthesis of secondary metabolites, highlighting the importance of integrating biochemical and spatial approaches to better understand the bioactive potential of plant species in arid ecosystems.

Keywords: environmental gradient, arid zones, mesquite, pharmacology, ecophysiology

Tesis de Doctorado en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Margarita Jurado Pérez

Director de Tesis: Dr. Ricardo Trejo Calzada

Enviado a: Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. En revisión

Variación espacial de la actividad antioxidante y compuestos fenólicos de muérdago (*Phoradendron leucarpum*) en el Desierto Chihuahuense

Highlights

La actividad antioxidante de muérdago está asociada a variables geográficas

El contenido fitoquímico varía ampliamente en muérdago

Es posible generar mapas predictivos de actividad antioxidante de muérdago

Abstract

Secondary metabolites and the antioxidant activity of *Phoradendron leucarpum* represent a potential pharmacological alternative. However, spatial patterns and environmental determinants in arid ecosystems remain poorly understood. This study aimed to quantify the antioxidant capacity of *Phoradendron leucarpum*, the total phenolic and flavonoid contents, and their relationship with environmental variables in the Chihuahuan Desert. Leaf samples were collected from eight sites in the central region of the Chihuahuan Desert. Ethanolic extracts were obtained for phytochemical determination. Climatic variable values were obtained from the WorldClim database using the Geodata application in R, and spatial interpolation was performed using the Inverse Distance Weighting (IDW) method. Antioxidant activity ranged from 18.8% to 72.0%. Samples from sites S3 and S7 recorded the highest values. These sites also showed the highest concentrations of phenols (0.357 mg GAE/g) and flavonoids (0.193 mg QE/g). The results showed a positive association between antioxidant activity and phenolic and flavonoid compounds; however, their spatial distribution was heterogeneous. The highest values were found in the southwestern part of the study area. Overall, the results indicate that mistletoe antioxidant activity is influenced by environmental gradients and variability in the synthesis of secondary metabolites, highlighting the importance of integrating biochemical

and spatial approaches to better understand the bioactive potential of plant species in arid ecosystems.

Keywords: environmental gradient, arid zones, mesquite, pharmacology, ecophysiology

Introducción

Phoradendron leucarpum (Raf.) Reveal & M.C. Johnst. (*Viscaceae*), conocido como muérdago americano, es una planta hemiparásita ampliamente distribuida en el sureste de Estados Unidos y el norte de México (Tennessee-Kentucky Plant Atlas, 2023). A diferencia del muérdago europeo (*Viscum album* L.), cuya farmacología ha sido extensamente estudiada, las especies del género *Phoradendron* han recibido menor atención, a pesar de su potencial como fuente de metabolitos secundarios bioactivos (Montoya-Inzunza et al., 2024).

Las plantas del género *Phoradendron* sintetizan una amplia variedad de compuestos, incluyendo fenoles, flavonoides, terpenos, alcaloides y lectinas, los cuales han mostrado diversas actividades biológicas, como efectos antioxidantes, antiinflamatorios y antimicrobianos en estudios in vitro (Montoya-Inzunza et al., 2023). En particular, los compuestos fenólicos y flavonoides son de gran relevancia debido a su capacidad para neutralizar especies reactivas de oxígeno (ROS), donar electrones y quelar metales de transición, contribuyendo a la protección frente al estrés oxidativo (Gülçin, 2020).

La actividad antioxidante de extractos vegetales se evalúa comúnmente mediante el ensayo del radical libre DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo), un método espectrofotométrico ampliamente utilizado por su simplicidad, rapidez y reproducibilidad (Munteanu & Apetrei, 2021). Este ensayo permite estimar la capacidad de los compuestos bioactivos para actuar como donadores de hidrógeno o electrones, proporcionando una medida indirecta del potencial antioxidante de matrices vegetales. Sin embargo, la composición fitoquímica de las plantas hemiparásitas no es constante, ya que depende de múltiples

factores, entre ellos el hospedero, las condiciones ambientales y la etapa fenológica (Yang et al., 2018). En el caso de *Phoradendron* spp., esta variabilidad adquiere especial relevancia debido a su dependencia fisiológica del hospedero, del cual obtiene agua, nutrientes y compuestos orgánicos a través del sistema vascular.

En este contexto, la asociación de *P. leucarpum* con especies del género *Neltuma* L. (mezquite) representa un sistema ecológico de particular interés. Los mezquites son especies características de zonas áridas y semiáridas, adaptadas a condiciones de alta radiación solar, estrés hídrico y suelos con baja disponibilidad de nutrientes, lo que favorece la síntesis de metabolitos secundarios como mecanismos de defensa (Ibarra-Berumen et al., 2023). En *Prosopis neltuma*, se han identificado compuestos fenólicos como catequina, taxifolina y ácido protocatéquico, los cuales presentan una elevada actividad antioxidante (Ibarra-Berumen et al., 2023).

Dado que el muérdago establece conexiones vasculares con su hospedero, es plausible que su perfil fitoquímico esté influenciado por los metabolitos presentes en *Neltuma* spp., así como por las condiciones ambientales del sitio. Diversos estudios han demostrado que factores abióticos como la radiación, la temperatura, la disponibilidad hídrica y la altitud modulan la biosíntesis de compuestos fenólicos y flavonoides mediante cambios en la expresión génica y la actividad enzimática (Yang et al., 2018).

Además, la distribución y establecimiento de *Phoradendron leucarpum* también están condicionados por variables ambientales. Se ha reportado que la disponibilidad de luz en el dosel y el régimen hídrico son factores determinantes en el éxito de establecimiento de esta especie, lo que sugiere que las condiciones ambientales no solo afectan su distribución geográfica, sino también su fisiología y metabolismo (Flanders et al., 2024). En conjunto, estos antecedentes indican que la actividad antioxidante y la composición fitoquímica de *Phoradendron leucarpum* pueden estar influenciadas por la interacción entre

factores ambientales y la relación con su hospedero. Sin embargo, la información disponible sobre esta especie en ecosistemas áridos, particularmente en asociación con *Neltuma* spp., sigue siendo limitada.

El presente estudio tuvo como objetivo, cuantificar el perfil de compuestos fitoquímicos presentes en los extractos de hoja de *Phoradendron leucarpum*, del mismo modo, evaluar la capacidad antioxidante y determinar la relación entre los parámetros ambientales y los parámetros fitoquímicos a través de un enfoque de distribución espacial. Este estudio aporta información relevante para comprender la variabilidad del potencial bioactivo del muérdago en ecosistemas áridos y su relación con el entorno ecológico.

Materiales y métodos

Área de estudio y sitios de muestreo

El estudio fue realizado en la zona centro- sur del Desierto Chihuahuense, específicamente en los estados de Durango, Coahuila y Chihuahua. Se incluyeron ocho sitios de muestreo (S1-S8) los cuales contaban con presencia natural de muérdago americano (*Phoradendron leucarpum*). Los sitios fueron identificados mediante recorridos de campo y revisión de registros previos. Para cada sitio se incluyeron subsitios, la cantidad de subsitios dependió de la disponibilidad del muérdago. Se registraron las coordenadas geográficas de cada punto con una precisión aproximada de 3m. Posteriormente se tomaron los datos de altura utilizando los modelos digitales de elevación (SRTM, resolución 30 m). Las variables ambientales (temperatura media anual, precipitación anual, humedad relativa) fueron tomadas de la base de datos WorldClim versión 2.1 (Fick & Hijmans, 2017) a una resolución espacial de 30 segundos (~1 km²). Los valores se extrajeron para cada punto de muestreo mediante el software R (versión 4.4.3) utilizando el paquete Geodata.

Recolección del material vegetal y preparación de extractos

De cada sitio de muestre se recolectaron hojas frescas de muérdago. Posteriormente el material vegetal se secó en estufa de circulación forzada a 40 °C durante 72 h, hasta peso constante. Las hojas secas se pulverizaron en un molino de cuchillas (Retsch SM100, Alemania) hasta obtener un polvo fino homogéneo (< 1 mm). De cada sitio se elaboró una mezcla homogénea con la harina de hoja de muérdago de los diferentes individuos recolectados en cada sitio geográfico, mismas que se usaron para la elaboración de extractos.

Para cada sitio se obtuvieron tres extractos independientes. Para cada extracto, se pesaron 0.5 g de polvo seco y se maceraron en 10 ml de etanol al 85% (v/v) durante 24 h a temperatura ambiente en agitación orbital constante (150 rpm). El extracto se filtró a través de papel Whatman N° 1 y el solvente se eliminó en un evaporador rotatorio a 45 °C. El extracto seco se resuspendió en etanol al 80% a una concentración final de 25 mg/mL y se almacenó a –20 °C hasta su análisis.

Determinación de fenoles totales

El contenido de fenoles totales fue determinado del acuerdo al método de Folin Ciocalteu (Singleton et al., 1999) con algunas modificaciones. En un tubo Ependorff de 1.5 ml se añadieron 75 µl de extracto a una concentración de 2.5 mg/mL, posteriormente se mezclaron con 150 µl de reactivo de Folin Ciocalteu. Esta mezcla se incubó durante 5 minutos a temperatura ambiente. En seguida, con el fin de neutralizar la reacción, se añadieron 1275 µl de carbonato de sodio (NaCO₃) al 4.7% p/v y se incubó a temperatura ambiente durante 2 horas. Luego se midió la absorbancia a 750 nm. Los resultados se expresaron como miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de peso seco de la muestra (mg GAE/g). Todas las mediciones se realizaron por triplicado para cada extracto. La curva de calibración se preparó con ácido gálico (0–200 µg/mL, R² > 0.995).

Determinación de flavonoides totales

Para determinar el contenido de flavonoides totales se utilizó el método descrito por Zhishen et al. (1999), el cual se basa en la formación de complejos estables entre el cloruro de aluminio (AlCl_3) y los flavonoides presentes en el extracto. En un microtubo de 1.5 ml se mezclaron 1275 μl de etanol al 85% p/v junto con 141 μl del extracto a una concentración de 2.5 mg/mL, enseguida se agregaron 85 μl del AlCl_3 al 5% (p/v) preparado en el solvente del extracto. Posteriormente se llevó a incubar en obscuridad a temperatura ambiente, durante 20 minutos. La absorbancia fue medida a 400 nm. Los resultados se expresaron como miligramos de equivalentes de quercetina por gramo de peso seco de la muestra (mg QE/g). Todas las mediciones se realizaron por triplicado para cada extracto. La curva de calibración se preparó con ácido gálico (0–100 $\mu\text{g/mL}$, $R^2 > 0.995$).

Determinación de la actividad antioxidante

La actividad antioxidante de los extractos se determinó mediante el ensayo del radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH), siguiendo el método descrito por Brand-Williams et al. (1995) con ligeras modificaciones. Para las determinaciones se prepararon soluciones de trabajo, la concentración final de los extractos, con la que se trabajó fue de 5 mg/mL. A partir de esta solución se preparó la curva de DPPH con concentraciones de 25, 75 y 150 $\mu\text{g/mL}$. Sin embargo, para el análisis de correlación y ranking, se utilizó únicamente la concentración de 150 $\mu\text{g/mL}$ (la más alta, que aseguraba una respuesta estable).

Para el análisis, se mezcló un volumen adecuado de cada dilución del extracto con una solución de DPPH recién preparada en etanol. Las mezclas se incubaron en oscuridad a temperatura ambiente durante 30 minutos, con el fin de permitir la reacción entre el radical DPPH y los compuestos antioxidantes presentes. La absorbancia se midió a una longitud de onda de 523 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis. Dentro de la curva se incluyeron los siguientes controles:

Control (Ac): solución de DPPH sin extracto, que representa la absorbancia máxima. Blanco (Ab): solución del extracto en etanol sin DPPH, utilizada para corregir la interferencia debida a la coloración propia del extracto.

La absorbancia corregida se calculó mediante la ecuación:

$$A_{\text{corr}} = A_{\text{muestra}} - A_{\text{blanco}}$$

El porcentaje de inhibición del radical DPPH se determinó mediante la siguiente expresión:

$$\% \text{inhibición} = (A_{\text{control}} - A_{\text{corr}}) / A_{\text{control}} \times 100$$

Todos los ensayos se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar (DE).

Precisión del método

La precisión del método analítico se evaluó mediante el coeficiente de variación (CV%) para cada sitio de muestreo, calculado como: **CV% = (desviación estándar / media) $\times$ 100**. Se consideró una precisión excelente para CV% < 5%, buena para CV% entre 5% y 10%, y aceptable para CV% > 10%.

Análisis estadístico

Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software R versión 4.4.3 (R Core Team, 2024). Para el procesamiento, análisis y visualización de los datos se emplearon diversos paquetes, entre ellos: *tidyverse* (Wickham et al., 2019) para el manejo y organización de datos; *ggplot2* (Wickham, 2016) para la elaboración de gráficos; *corrplot* (Wei & Simko, 2021) para la construcción de matrices de correlación; *ggpubr* (Kassambara, 2020) para la generación de gráficos con anotaciones estadísticas; *maps* y *mapdata* para la elaboración de mapas geográficos; así como *sp* y *gstat* para los análisis de interpolación espacial.

Para la estadística descriptiva, se calculó la media y desviación estándar (DE) para cada variable en cada sitio de muestreo. La relación entre variables

bioquímicas (fenoles, flavonoides, DPPH) y ambientales (temperatura, precipitación, altitud, humedad) se evaluó mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Se consideró un nivel de significación de $\alpha = 0.05$.

Para determinar diferencias significativas en la actividad antioxidante entre los ocho sitios de muestreo, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, utilizando los valores de DPPH y fenoles a nivel de extracto ($n = 3$ por sitio). Cuando el ANOVA resultó significativo, se aplicó la prueba post-hoc de Tukey para identificar qué pares de sitios diferían entre sí.

Análisis de componentes principales (PCA)

Se realizó un análisis de componentes principales (PCA) con las siete variables cuantitativas (fenoles, flavonoides, DPPH, temperatura, precipitación, altitud, humedad). Los datos se estandarizaron previamente (centrado y escalado) para evitar que variables con diferentes unidades dominaran el análisis. Se generó un biplot que muestra simultáneamente: 1) Los sitios de muestreo (como puntos), 2) Las variables originales (como vectores). En este caso, la dirección y longitud de los vectores indican la contribución y correlación de cada variable con los componentes principales.

Mapas geográficos y predictivos (IDW)

Se generó un mapa de distribución de los sitios de muestreo sobre el mapa político de México utilizando los paquetes *maps* y *mapdata*. Adicionalmente, se realizó una interpolación por distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) para generar un mapa predictivo ilustrativo de la actividad antioxidante (DPPH) en el área de estudio. El parámetro de potencia se estableció en $idp = 2$. Debido al reducido número de puntos de muestreo ($n = 8$), se adjuntó un mapa de incertidumbre que muestra la varianza de la predicción, indicando las zonas donde la estimación es menos confiable.

Resultados y discusión

Actividad antioxidante

En el **Cuadro 2** se presentan los valores de los metabolitos secundarios determinados, así como de las variables ambientales de los sitios de estudio. Se puede observar que la capacidad antioxidante, expresada como porcentaje de inhibición del radical DPPH, varió entre 18.8% y 72.0%. El valor más alto se registró en el sitio S3 ($72.0 \pm 0.02\%$), seguido de S7 ($65.3 \pm 0.08\%$), mientras que los valores más bajos correspondieron a S6 ($18.8 \pm 0.10\%$) y S8 ($20.1 \pm 0.12\%$). En cuanto al contenido de compuestos fenólicos totales, se observaron valores en un rango de 0.060 a 0.357 mg GAE/g. El sitio S3 presentó la mayor concentración (0.357 ± 0.028 mg GAE/g), seguido de S1 (0.273 ± 0.034 mg GAE/g) y S4 (0.221 ± 0.072 mg GAE/g). Por el contrario, el valor más bajo se registró en el sitio S6 (0.060 ± 0.007 mg GAE/g).

Cuadro 2. Actividad antioxidante, contenido de fenoles y flavonoides de muestras de muérdago en ocho sitios del Desierto Chihuahuense

Sitio	DPPH (%)	Fenoles (mg GAE/g)	Flavonoides (mg QE/g)	Temperatura (°C)	Precipitación (mm/año)	Altitud (msnm)	Humedad (%)
S3	72.0 ± 0.02	0.357 ± 0.028	0.193 ± 0.006	16.7	450	2200	56
S7	65.3 ± 0.08	0.195 ± 0.026	0.100 ± 0.010	18	400	1850	53
S1	48.2 ± 0.02	0.273 ± 0.034	0.176 ± 0.007	19.5	280	1180	49
S4	41.6 ± 0.17	0.221 ± 0.072	0.185 ± 0.033	20.1	250	1150	47
S2	39.8 ± 0.02	0.101 ± 0.010	0.124 ± 0.004	18.2	380	1920	52
S5	27.0 ± 0.12	0.170 ± 0.005	0.145 ± 0.001	18.5	360	1800	51
S8	20.1 ± 0.12	0.144 ± 0.005	0.115 ± 0.003	17.5	430	1950	55
S6	18.8 ± 0.10	0.060 ± 0.007	0.094 ± 0.006	21.3	260	1110	44

GAE: equivalentes de ácido gálico; **QE:** equivalentes de quercetina.

El contenido de flavonoides mostró una variación entre 0.094 y 0.193 mg QE/g. Nuevamente, el sitio S3 presentó el valor más alto (0.193 ± 0.006 mg QE/g), mientras que el sitio S6 mostró el menor contenido (0.094 ± 0.006 mg QE/g). De manera general, se observa una tendencia consistente en la cual los sitios con mayor actividad antioxidante presentan también mayores concentraciones de compuestos fenólicos y flavonoides. Este patrón es particularmente evidente en el sitio S3, que concentra simultáneamente los valores máximos en las tres variables evaluadas.

En relación con las variables ambientales, los sitios con mayor actividad antioxidante (S3 y S7) se caracterizan por presentar mayores altitudes (2200 y 1850 msnm, respectivamente) y niveles de precipitación más elevados (450 y 400 mm/año), en comparación con los sitios de menor actividad (S6 y S8), los cuales se ubicaron en altitudes más bajas y con menores niveles de precipitación. De la misma manera, se observó que los sitios con menor actividad antioxidante tendieron a presentar temperaturas más elevadas, como en el caso de S6 (21.3 °C), mientras que los sitios con mayor actividad correspondieron a temperaturas relativamente menores (16.7 °C en S3).

Con el fin de evaluar la precisión del método empleado, se calculó el coeficiente de variación promedio para las mediciones de la capacidad antioxidante. El resultado fue de 0.3%, lo cual indica una buena reproducibilidad y precisión en la técnica.

Variación espacial de actividad antioxidante

En la **Figura 5** se puede observar que la actividad antioxidante fue variable en las muestras de muérdago de acuerdo con la posición geográfica del sitio de procedencia. Los valores más altos de actividad antioxidante se ubicaron en los sitios S3 (Durango) y S7 (Chihuahua), los cuales se representan en tonos cálidos (rojo), indicando porcentajes superiores al 60%. En contraste, los sitios S6 (Coahuila) y S8 (Chihuahua) presentaron los valores más bajos, evidenciados por tonalidades frías (azul), con inhibiciones menores al 25%.

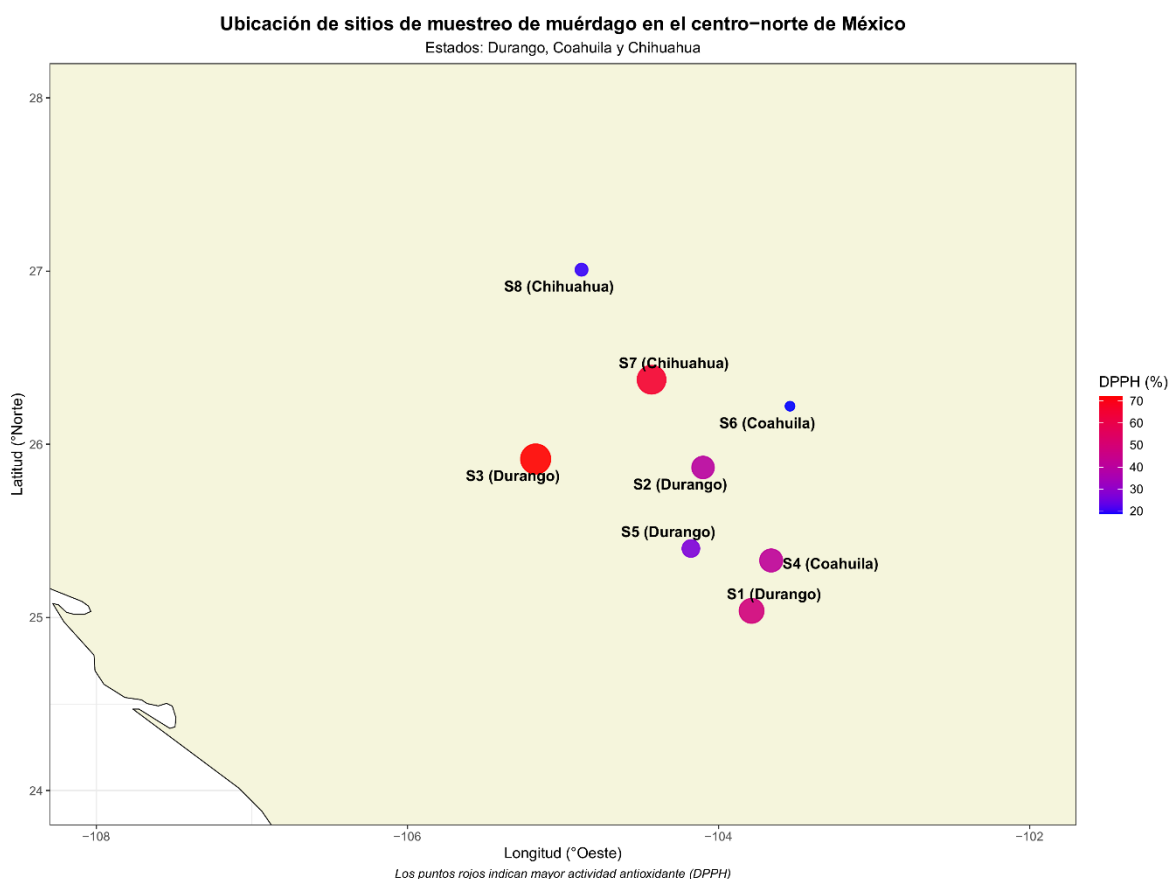


Figura 5. Distribución espacial de la actividad antioxidante (DPPH) en sitios de muestreo de muérdago en el centro-norte de México. Los puntos representan sitios georreferenciados (S1–S8) y están codificados por color de acuerdo con el porcentaje de inhibición del radical DPPH. Los tonos rojos indican mayor actividad antioxidante, mientras que los tonos azules representan menor actividad.

Además, los sitios con actividad intermedia, como S1, S2, S4 y S5, se distribuyen principalmente en la porción central del área de estudio, con valores entre 27% y 48%.

En general, se observa que los sitios con mayor actividad antioxidante se localizaron en regiones con mayor latitud norte y altitud, particularmente en las zonas correspondientes a Durango y Chihuahua, mientras que los sitios con menor actividad se ubican en áreas relativamente más bajas o con condiciones

ambientales distintas. La variabilidad en la actividad antioxidante y su agrupamiento regional sugiere la posible influencia de factores ambientales locales.

Los resultados obtenidos evidencian una variabilidad espacial significativa en la actividad antioxidante del muérdago, estrechamente asociada con el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides. Esta relación confirma el papel central de los metabolitos secundarios como principales responsables de la capacidad antioxidante en especies vegetales, particularmente a través de mecanismos de neutralización de radicales libres y quelación de metales (Mańkowska et al., 2025).

En especies del género *Phoradendron*, se ha documentado ampliamente la presencia de compuestos fenólicos, flavonoides, taninos y otros metabolitos bioactivos con potencial antioxidante. Estudios recientes han reportado que especies como *Phoradendron leucarpum* y *Phoradendron californicum* presentan perfiles fitoquímicos ricos en compuestos fenólicos, los cuales contribuyen significativamente a su actividad antioxidante y propiedades farmacológicas

(López-Martínez et al., 2022). Asimismo, se ha observado que la composición y concentración de estos metabolitos pueden variar dependiendo del hospedero y de las condiciones ambientales, lo que introduce un componente adicional de variabilidad ecológica en estas especies.

Análisis de componentes principales

Con el fin de reducir las dimensiones de las variables evaluadas, se llevo a cabo un análisis de componentes principales, el cual permitió extrapolar las explorar las relaciones entre la actividad antioxidante, los compuestos bioactivos y las variables ambientales en los distintos sitios de muestreo (Figura 2). Se observó que los dos primeros componentes explicaron el 79.5 % de la varianza total (PC1 = 51.7 %, PC2 = 27.8 %). El PC1 (51.7 %) cargó positivamente con la temperatura (+0.492) y negativamente con la altitud (-

0.441) y la precipitación (-0.446), representando un gradiente ambiental (sitios cálidos de baja altitud vs sitios fríos de alta montaña). Mientras que el PC2 (27.8 %) cargó positivamente con los flavonoides (+0.589), los fenoles (+0.491) y el DPPH (+0.316), representando un gradiente bioquímico (mayor vs menor capacidad antioxidante).

El biplot (**Figura 6**) muestra que los sitios S3 y S7 se ubican en la región donde apuntan los vectores de fenoles, flavonoides y DPPH, confirmando su superior capacidad antioxidante. En contraste, los sitios S6 y S8 se localizan en la dirección opuesta, asociados con menores concentraciones de compuestos bioactivos. El eje PC2 estuvo influenciado principalmente por variables ambientales, particularmente temperatura, precipitación, altitud y humedad, las cuales contribuyeron a la diferenciación vertical de los sitios. Se observó que variables como la temperatura tienden a oponerse a variables como altitud y precipitación, sugiriendo gradientes ambientales que podrían influir en la variabilidad observada. Los sitios intermedios (S1, S2, S4 y S5) se distribuyeron en posiciones centrales del Biplot, reflejando valores moderados tanto en actividad antioxidante como en las variables ambientales. En conjunto, el PCA evidencia una estructura en la que los sitios con mayor actividad antioxidante se agrupan y se asocian positivamente con el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides, mientras que las variables ambientales contribuyen a la diferenciación espacial de los sitios.

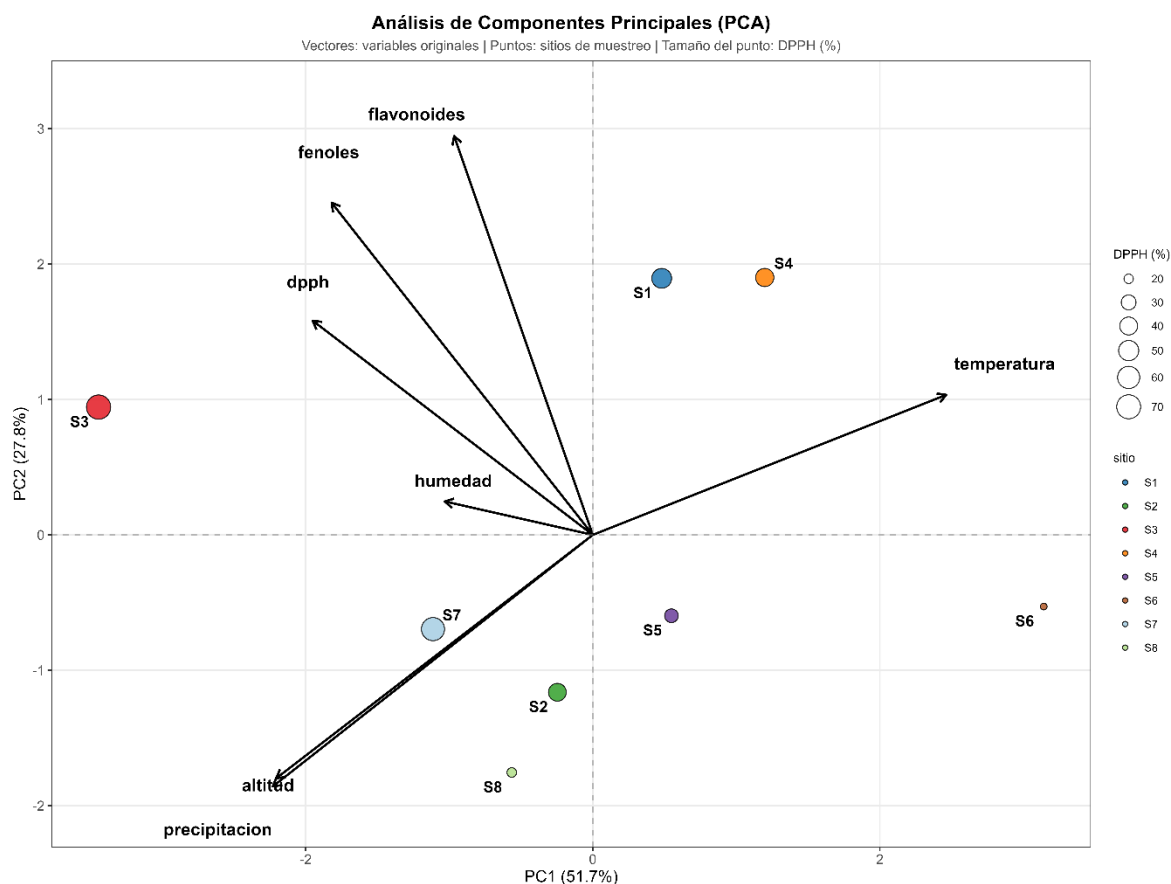


Figura 6. Biplot del análisis de componentes principales (PCA).

Se muestra la relación entre las variables bioquímicas (DPPH, fenoles y flavonoides) y ambientales (temperatura, precipitación, altitud y humedad) en los sitios de muestreo (S1–S8). Los dos primeros componentes principales explican el 79.5% de la varianza total. La dirección y longitud de los vectores indican la contribución y correlación de las variables, mientras que la posición de los sitios refleja su asociación con dichas variables.

El análisis de componentes principales (PCA) mostró una asociación positiva clara entre DPPH, fenoles y flavonoides, lo cual es consistente con la evidencia reciente que indica que estos compuestos forman parte de sistemas antioxidantes integrados en plantas, con funciones tanto protectoras como adaptativas frente al estrés ambiental (Sana et al., 2025). En este contexto, los sitios con mayor actividad antioxidante (S3 y S7) reflejan una mayor

acumulación de estos metabolitos, lo cual sugiere una respuesta metabólica activa frente a condiciones ambientales específicas.

Desde una perspectiva ecológica, los resultados sugieren que factores ambientales como la altitud, la temperatura y la disponibilidad hídrica desempeñan un papel clave en la regulación de la síntesis de metabolitos secundarios. La literatura reciente indica que condiciones de estrés moderado, como mayor radiación UV en zonas de mayor altitud o limitaciones hídricas, pueden inducir la acumulación de compuestos fenólicos como mecanismo de defensa (Rawat et al., 2025). Este comportamiento es consistente con lo observado en el presente estudio, donde los sitios con mayor actividad antioxidante se asocian con condiciones ambientales que potencialmente favorecen la biosíntesis de estos compuestos.

En el caso particular de *Phoradendron*, la interacción con el hospedero también puede influir en la disponibilidad de recursos y en la expresión metabólica. Se ha reportado que la fisiología del hospedero afecta la absorción de nutrientes y compuestos precursores, lo que a su vez puede modificar la producción de metabolitos secundarios en el muérdago (Teixeira-Costa et al., 2020). Este aspecto podría contribuir a explicar parte de la variabilidad observada entre sitios, especialmente en aquellos con valores intermedios de actividad antioxidante.

Por otro lado, los sitios con menor actividad antioxidante (S6 y S8) podrían estar asociados con condiciones ambientales menos favorables para la acumulación de metabolitos bioactivos, como temperaturas elevadas o estrés hídrico más severo. Aunque el estrés abiótico puede inducir la producción de compuestos secundarios, condiciones extremas pueden generar efectos negativos sobre el metabolismo vegetal, limitando la síntesis de estos compuestos (Liu et al., 2026).

Modelo predictivo de la actividad antioxidante en el área de estudio.

Como parte de un análisis exploratorio, se generaron modelos predictivos de la actividad antioxidante mediante interpolación por distancia inversa ponderada (IDW). La **Figura 7** muestra la distribución espacial estimada del DPPH en la región de estudio. El mapa muestra una distribución espacial heterogénea de la actividad antioxidante con valores estimados que oscilan aproximadamente entre 20% y 70%.

Las zonas con mayor actividad antioxidante se concentran en la porción suroeste del área de estudio, donde se observan valores superiores al 60%, as. Esta región coincide espacialmente con la ubicación del sitio S3, el cual presentó los valores más altos en los análisis experimentales. En contraste, las áreas con menor actividad antioxidante se distribuyen hacia la región noreste, donde predominan valores inferiores al 30%, asociados principalmente con la localización del sitio S6, el cual mostró los valores más bajos de inhibición. Los sitios intermedios, como S1, S2, S4 y S5, se encuentran en zonas de transición, donde los valores estimados de DPPH oscilan entre 30% y 50%, reflejando gradientes espaciales en la capacidad antioxidante.

Asimismo, el modelo predictivo muestra que los valores observados en campo (representados por el tamaño de los puntos) son consistentes con la tendencia espacial generada por la interpolación, lo que sugiere una adecuada correspondencia entre los datos experimentales y la superficie estimada. En general, la interpolación revela un patrón espacial continuo en el que la actividad antioxidante presenta un gradiente definido dentro del área de estudio, evidenciando zonas de mayor y menor potencial antioxidante.

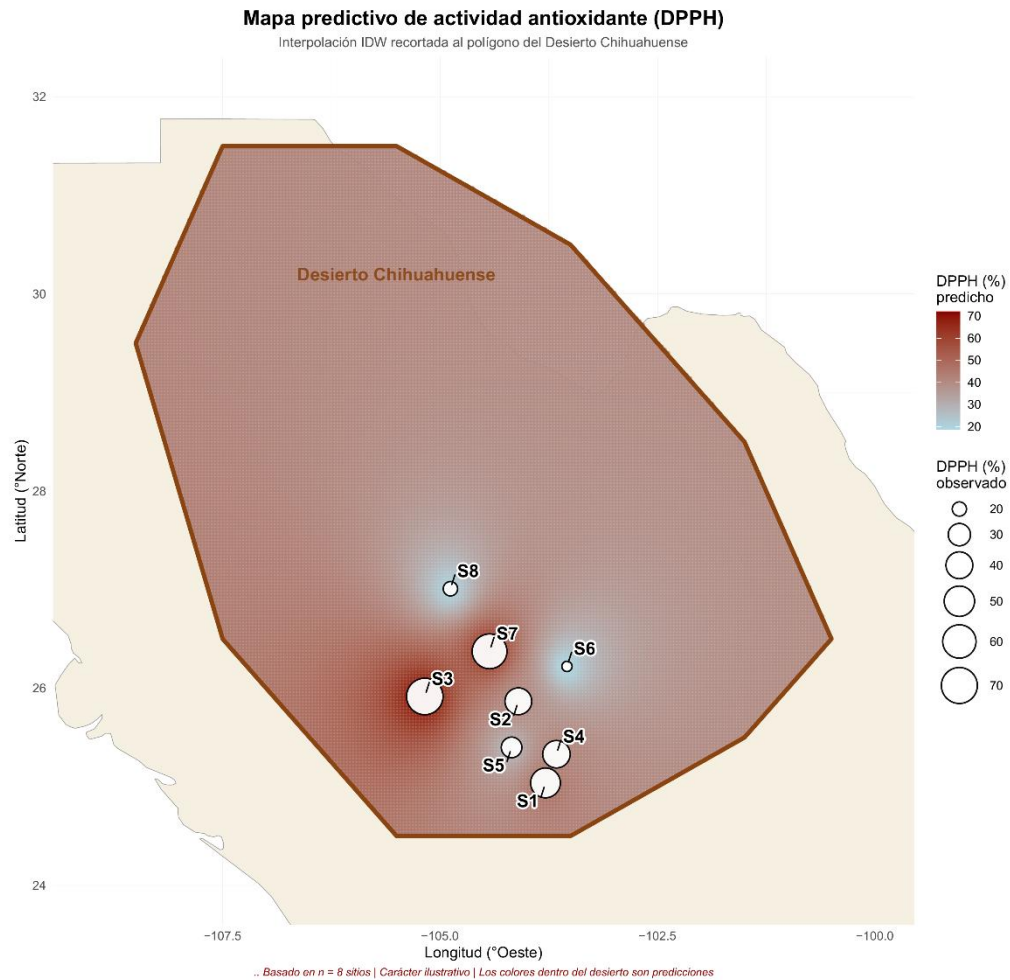


Figura 7. Mapa predictivo de la actividad antioxidante (DPPH) en el Desierto Chihuahuense generado mediante interpolación por distancia inversa ponderada (IDW). La escala de color representa los valores estimados de inhibición del radical DPPH (%), donde los tonos rojos indican mayor actividad antioxidante y los tonos azules menor actividad. Los círculos representan los sitios de muestreo (S1–S8), cuyo tamaño es proporcional a los valores observados experimentalmente. La interpolación fue recortada al polígono del área de estudio.

El modelo predictivo reveló un patrón continuo en la distribución de la actividad antioxidante, sugiriendo que esta propiedad está estructurada a lo largo de gradientes ambientales. Este tipo de patrones ha sido descrito en estudios recientes sobre metabolitos secundarios, donde la variabilidad espacial responde a la interacción entre factores climáticos, edáficos y biológicos (Alami et al., 2024).

Conclusiones

En conjunto, los resultados indican que la actividad antioxidante del muérdago en la región estudiada está determinada por una interacción compleja entre factores bioquímicos y ambientales, donde los compuestos fenólicos y flavonoides desempeñan un papel central como mediadores de la respuesta adaptativa. La integración de análisis bioquímicos, espaciales y multivariados permite comprender de manera más integral la variabilidad del potencial bioactivo en especies del género *Phoradendron*, particularmente en ecosistemas áridos y semiáridos.

Los resultados evidencian que la actividad antioxidante de *Phoradendron leucarpum* varía significativamente entre sitios y está estrechamente asociada con el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides. Esta variabilidad responde a gradientes ambientales y a la interacción con *Prosopis* spp., lo que sugiere que el potencial bioactivo de esta especie está determinado por factores ecológicos y fisiológicos. En conjunto, el estudio aporta evidencia sobre la influencia del entorno en la calidad fitoquímica de plantas hemiparásitas en ecosistemas áridos.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Referencias

1. Alami, M. M., Guo, S., Mei, Z., Yang, G., & Wang, X. (2024). Environmental factors on secondary metabolism in medicinal plants. *Medicinal Plant Biology*, 3, e016. <https://doi.org/10.48130/mpb-0024-0016>
2. Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, *28*(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
3. Fick, S. E., & 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>
4. Flanders, N., Kain, M., & McShea, W. J. (2024). Abiotic factors influencing establishment success of *Phoradendron leucarpum*. *Botany*, 102(3), 145–156.
5. Gülçin, İ. (2020). Antioxidants and antioxidant methods: An updated overview. *Archives of Toxicology*, 94(3), 651–715.
6. Ibarra-Berumen, J., et al. (2023). Wood chemical composition and antioxidant capacity of *Prosopis laevigata*. *Madera y Bosques*, 29(2).
7. Jia, Z., Tang, M., & Wu, J. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry*, *64*(4), 555–559. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2)
8. López-Martínez, L. X., et al. (2022). Phytochemical composition and antioxidant activity of desert mistletoe (*Phoradendron californicum*). *Plants*, 11(5), 645 <https://doi.org/10.3390/plants11050645>
9. Mańkowska, D., et al. (2025). Antioxidant activity and phenolic compounds in medicinal plants. *Molecules*, 30(24), 4812. <https://doi.org/10.3390/molecules30244812>

10. Munteanu, I. G., & Apetrei, C. (2021). Analytical methods used in determining antioxidant activity. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7), 3380. <https://doi.org/10.3390/ijms22073380>
11. Rawat, P., et al. (2025). Environmental influence on phytochemicals and antioxidant activity. *Discover Environment*, 3, 11. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00189-8>
12. Sana, S., et al. (2025). Secondary metabolite production under environmental stress. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1569014>
13. Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, *299*, 152–178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
14. Alami, M. M., Guo, S., Mei, Z., Yang, G., & Wang, X. (2024). Environmental factors on secondary metabolism in medicinal plants: exploring accelerating factors. *Medicinal Plant Biology*, 3(1), 0–0. <https://doi.org/10.48130/mpb-0024-0016>
15. Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology]*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/s0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/s0023-6438(95)80008-5)
16. Díaz-Díaz, M., Bernal-Cabrera, A., Trapero, A., Medina-Marrero, R., Sifontes-Rodríguez, S., Cupull-Santana, R. D., García-Bernal, M., & Agustí-Brisach, C. (2022). Characterization of Actinobacterial Strains as Potential Biocontrol Agents against *Macrophomina phaseolina* and *Rhizoctonia solani*, the Main Soil-Borne Pathogens of *Phaseolus vulgaris* in Cuba. *Plants*, 11(5), 645. <https://doi.org/10.3390/plants11050645>
17. Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas: NEW CLIMATE SURFACES FOR GLOBAL LAND AREAS. *International Journal of*

- Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
18. Flanders, N., Kain, M., & Mcshea, W. J. (2024). Abiotic factors influencing establishment success of *Phoradendron leucarpum*. *Botany*, 102(3), 145–156.
 19. Gulcin, İ. (2020). Antioxidants and antioxidant methods: an updated overview. *Archives of Toxicology*, 94(3), 651–715. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02689-3>
 20. Ibarra-Berumen, J. (2023). Wood chemical composition and antioxidant capacity of *Prosopis laevigata*. *Madera y Bosques*, 29(2).
 21. Kassambara, A. (2020). ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots (Version 0.4.0) [Software]. <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>
 22. Liu, S., Xing, M., & Yin, X. (2026). MAPK regulates secondary metabolism and abiotic stress in horticultural and medicinal plants. *Horticulture Research*, 13(3), uhaf350. <https://doi.org/10.1093/hr/uhaf350>
 23. Mańkowska, D., & Dems-Rudnicka, K. (2025). Antioxidant Activity and Phenolic Compounds in Medicinal Plants: A Comparison of Organic and Conventional *Mentha piperita*, *Melissa officinalis*, *Salvia officinalis*, and *Urtica dioica*. *Molecules* (Basel, Switzerland), 30(24), 4812. <https://doi.org/10.3390/molecules30244812>
 24. Montoya-Inzunza, L. A., Heredia, J. B., Patra, J. K., Gouda, S., Kerry, R. G., Das, G., & Gutierrez-Grijalva, E. P. (2024). Traditional uses, phytochemical constituents and ethnopharmacological properties of mistletoe from *Phoradendron* and *Viscum* species. *Combinatorial Chemistry & High Throughput Screening*, 27(8), 1093–1110. <https://doi.org/10.2174/1386207326666230825113631>
 25. Montoya-Inzunza, L. A., Moreno-Ulloa, A., Carballo-Castañeda, R. A., Xool-Tamayo, J., Contreras-Angulo, L. A., Leyva-López, N., Antunes-Ricardo, M., Gonzalez-Galaviz, J. R., Heredia, J. B., & Gutiérrez-Grijalva, E. P. (2023). Metabolomic characterization of *Phoradendron*

brachystachyum mistletoe and in-silico and in-vitro investigation of its therapeutic potential in metabolic disorders. *Plants*, 12(14), 2729.

<https://doi.org/10.3390/plants12142729>

26. Munteanu, I. G., & Apetrei, C. (2021). Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7), 3380. <https://doi.org/10.3390/ijms22073380>
27. Parola-Contreras, I., Guevara-González, R. G., Feregrino-Pérez, A. A., Reynoso-Camacho, R., Pérez-Ramírez, I. F., Ocampo-Velázquez, R. V., Rojas- Molina, A., Luna-Vazquez, F., & Tovar-Pérez, E. G. (2020). Phenolic compounds and antioxidant activity of methanolic extracts from leaves and flowers of chilcuague (*Heliopsis longipes* , Asteraceae). *Botanical Sciences*, 99(1), 149–160. <https://doi.org/10.17129/botsci.2671>
28. R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing (Version 4.4.3) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
29. Rawat, P., Dasila, K., Singh, M., & Kuniyal, J. C. (2025). Influence of environmental factors on phytochemical compositions and antioxidant activity of *Juniperus communis* L. *Discover Environment*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00189-8>
30. Sana, Aftab, T., Naeem, M., Jha, P. K., & Prasad, P. V. V. (2025). Production of secondary metabolites under challenging environments: understanding functions and mechanisms of signalling molecules. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1569014. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1569014>
31. Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). [14] Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. In *Oxidants and Antioxidants Part A* (pp. 152–178). Elsevier.
32. Teixeira-Costa, L., et al. (2020). Host influence on mistletoe physiology and metabolism. *Plant Biology*, 22(5), 805–812. <https://doi.org/10.1111/plb.13130>

33. Tennessee-Kentucky Plant Atlas. (2023). *Phoradendron leucarpum*.
<https://tennessee-kentucky.plantatlas.org>
34. Villanueva, R. A. M., & Chen, Z. J. (2019). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis (2nd ed.). Measurement: Interdisciplinary Research and Perspectives, 17(3), 160–167. <https://doi.org/10.1080/15366367.2019.1565254>
35. Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L., François, R., Golemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T., Miller, E., Bache, S., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D., Spinu, V., ... Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. Journal of Open Source Software, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
36. Yang, L., Wen, K.-S., Ruan, X., Zhao, Y.-X., Wei, F., & Wang, Q. (2018). Response of plant secondary metabolites to environmental factors. Molecules (Basel, Switzerland), 23(4), E762.
<https://doi.org/10.3390/molecules23040762>
37. Zhishen, J., Mengcheng, T., & Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. Food Chemistry, 64(4), 555–559. [https://doi.org/10.1016/s0308-8146\(98\)00102-2](https://doi.org/10.1016/s0308-8146(98)00102-2)

CAPITULO 4

Estandarización de protocolos para la extracción y amplificación de ADN genómico de *Phoradendron leucarpum* como base para estudios filogenéticos

ABSTRACT

Phoradendron leucarpum is a hemiparasitic plant belonging to the order Santalales, characterized by the presence of secondary metabolites and phenolic compounds that may hinder the extraction of high-quality genomic DNA for molecular studies. The aim of this study was to standardize an efficient protocol for the extraction and amplification of genomic DNA from *Phoradendron leucarpum* as a basis for future phylogenetic and genetic diversity analyses. Three DNA extraction methods were evaluated: a commercial Wizard® Genomic DNA Purification Kit, a classical CTAB protocol, and a modified CTAB protocol. DNA quality and concentration were assessed by spectrophotometry using the 260/280 and 260/230 absorbance ratios. Additionally, PCR amplification assays were performed using the RbcL, MatK, and UBC 862 markers. The results showed significant differences in DNA concentration among treatments ($P \leq 0.05$), with the modified CTAB protocol presenting the highest yield (750.36 ± 220 ng/ μ L), as well as improved purity values and amplification capacity. PCR assays revealed more defined and reproducible bands when DNA obtained through the modified CTAB protocol was used, particularly with the UBC 862 marker. The results obtained allowed the establishment of an efficient and reproducible protocol for genomic DNA extraction from *Phoradendron leucarpum*, providing a useful methodological basis for future phylogenetic, genetic diversity, and population structure studies in hemiparasitic species from arid and semi-arid ecosystems.

Keywords: mistletoe; molecular phylogeny; microsatellites; hemiparasitic plants; genetic diversity.

Tesis de Doctorado en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas,
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Margarita Jurado Pérez

Director de Tesis: Dr. Ricardo Trejo Calzada

ESTANDARIZACIÓN DE PROTOCOLOS PARA LA EXTRACCIÓN Y AMPLIFICACIÓN DE ADN GENÓMICO DE *PHORADENDRON LEUCARPUM* COMO BASE PARA ESTUDIOS FILOGENÉTICOS

RESUMEN

Phoradendron leucarpum es una planta hemiparásita perteneciente al orden Santalales, caracterizada por presentar metabolitos secundarios y compuestos fenólicos que pueden dificultar la obtención de ADN genómico de alta calidad para estudios moleculares. El objetivo del presente trabajo fue estandarizar un protocolo eficiente para la extracción y amplificación de ADN genómico de *Phoradendron leucarpum*, como base para futuros análisis filogenéticos y de diversidad genética. Se evaluaron tres métodos de extracción de ADN: un kit comercial Wizard® Genomic DNA Purification Kit, un protocolo CTAB clásico y un protocolo CTAB modificado. La calidad y concentración del ADN obtenido fueron evaluadas mediante espectrofotometría utilizando las relaciones de absorbancia 260/280 y 260/230. Asimismo, se realizaron pruebas de amplificación mediante PCR utilizando los marcadores RbcL, MatK y UBC 862. Los resultados mostraron diferencias significativas en la concentración del ADN entre tratamientos ($P \leq 0.05$), siendo el protocolo CTAB modificado el que presentó el mayor rendimiento (750.36 ± 220 ng/ μ L), así como mejores valores de pureza y capacidad de amplificación molecular. Las pruebas de PCR evidenciaron bandas más definidas y reproducibles utilizando el ADN obtenido mediante el protocolo CTAB modificado, particularmente con el marcador UBC 862. Los resultados obtenidos permitieron establecer un protocolo eficiente y reproducible para la extracción de ADN genómico de *Phoradendron leucarpum*, proporcionando una base metodológica útil para futuros estudios filogenéticos, de diversidad genética y estructura poblacional en especies hemiparásitas de zonas áridas y semiáridas.

Palabras clave: muérdago; filogenia molecular; microsatélites; hemiparásitas; diversidad genética.

INTRODUCCIÓN

Los muérdagos son plantas hemiparásitas aéreas que forman parte de la diversidad funcional de las angiospermas parásitas, particularmente dentro del orden Santalales, uno de los linajes más diversos de plantas con haustorio. Aunque conservan capacidad fotosintética, dependen de sus hospederos para la obtención de agua y nutrientes minerales, por lo que se consideran hemiparásitas. Esta condición les permite establecer interacciones ecológicas complejas con sus plantas hospederas, influir en la estructura de las comunidades vegetales y participar en procesos asociados con dispersión, establecimiento y dinámica ecosistémica (Teixeira-Costa & Davis, 2021; Flanders et al., 2023). Estudios relacionados con muérdago, específicamente de *Phoradendron leucarpum*, han señalado que su distribución puede estar relacionada no solo con la disponibilidad de hospederos, sino también con condiciones de establecimiento, disponibilidad de luz y características del hábitat (Flanders et al., 2023; Teixeira-Costa & Davis, 2021).

Desde una perspectiva evolutiva, el análisis filogenético de los muérdagos permite comprender los procesos de diversificación, especialización parasítica y posible asociación con linajes de hospederos. Las plantas parásitas presentan historias evolutivas complejas, en las que la adquisición del parasitismo, la modificación del sistema radical, el desarrollo del haustorio y la transición hacia formas de vida aéreas han sido eventos clave para su diversificación (Teixeira-Costa & Davis, 2021; Nickrent, 2020). En este contexto, la reconstrucción filogenética de especies de *Phoradendron* representa una herramienta útil para interpretar patrones de relación evolutiva, diferenciación genética y posible historia biogeográfica de poblaciones asociadas a ambientes áridos y semiáridos (Teixeira-Costa & Davis, 2021; Flanders et al., 2023).

Los marcadores moleculares han sido ampliamente utilizados para analizar diversidad genética, estructura poblacional y relaciones evolutivas en plantas. Entre estos, los microsatélites o SSRs (*Simple Sequence Repeats*) se

distinguen por su alto polimorfismo, herencia codominante y utilidad para detectar variación genética a escala intraespecífica. De manera relacionada, los primers ISSR desarrollados a partir de secuencias microsatélite, como los paquetes UBC, permiten amplificar regiones entre repeticiones simples sin necesidad de información genómica previa, por lo que han sido empleados en estudios de diversidad genética y diferenciación poblacional en especies no modelo (Vieira et al., 2016; Zietkiewicz et al., 1994). En muérdagos, se han reportado loci microsatélites para especies de *Phoradendron*, lo que demuestra la utilidad de este tipo de marcadores para explorar estructura genética y variabilidad molecular dentro del grupo (Arroyo et al., 2013; Ramírez-Barahona et al., 2017).

No obstante, uno de los principales retos en estudios moleculares con plantas hemiparásitas es la obtención de ADN genómico de buena calidad. Los tejidos vegetales pueden contener polisacáridos, polifenoles y otros metabolitos secundarios que interfieren con la extracción, purificación y amplificación del ADN. Estos compuestos pueden coprecipitar con los ácidos nucleicos, afectar la relación de absorbancia 260/280 y 260/230, e inhibir reacciones posteriores como PCR o secuenciación (Sahu et al., 2012; Schenk et al., 2023). Por ello, la elección y optimización del método de extracción representa una etapa crítica para garantizar resultados reproducibles en análisis moleculares, especialmente cuando se trabaja con especies no modelo o con tejidos ricos en compuestos fenólicos (Schenk et al., 2023; Liu et al., 2025).

El método CTAB ha sido uno de los protocolos más empleados para la extracción de ADN vegetal, debido a su eficiencia para separar ácidos nucleicos de polisacáridos y compuestos fenólicos. Sin embargo, el protocolo original suele modificarse de acuerdo con el tipo de tejido, la concentración de metabolitos secundarios y la calidad requerida para los análisis posteriores. Revisiones recientes han mostrado que las modificaciones al CTAB pueden incluir ajustes en temperatura y tiempo de incubación, concentración de sales, uso de β -mercaptoetanol, PVP u otros agentes antioxidantes, así como pasos

adicionales de lavado y purificación (Schenk et al., 2023; Liu et al., 2025). Estas modificaciones buscan mejorar el rendimiento, pureza e integridad del ADN, particularmente en especies vegetales recalcitrantes para la extracción molecular (Sahu et al., 2012; Schenk et al., 2023).

El objetivo del presente trabajo fue realizar la estandarización metodológica para la extracción y amplificación de ADN genómico de *Phoradendron leucarpum*, como base para futuros análisis filogenéticos y estudios de historia evolutiva. Considerando la complejidad química de los tejidos vegetales del muérdago y la necesidad de obtener ADN de alta calidad para análisis moleculares posteriores, se evaluaron diferentes estrategias de extracción y amplificación. La optimización de esta metodología representa un avance fundamental para el desarrollo de futuros estudios de diversidad genética, estructura poblacional y relaciones evolutivas en *Phoradendron leucarpum*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Para el desarrollo de los análisis moleculares se empleó tejido foliar de *Phoradendron leucarpum*, debido a que las hojas representan una fuente adecuada para la obtención de ADN genómico en especies vegetales. Se seleccionaron hojas jóvenes y sanas, las cuales fueron procesadas en fresco y mantenidas a baja temperatura con el fin de preservar la integridad del material genético y reducir su degradación. Posteriormente, el tejido vegetal fue macerado en nitrógeno líquido hasta obtener un polvo fino y homogéneo, favoreciendo la ruptura celular y la liberación del ADN para los procedimientos de extracción posteriores.

Extracción de ADN genómico

Con el objetivo de estandarizar un protocolo eficiente para la obtención de ADN genómico de *Phoradendron leucarpum*, se evaluaron tres métodos de extracción. El primer método correspondió al kit comercial Wizard® Genomic

DNA Purification Kit (Promega, Fitchburg, WI) (**M1**), siguiendo las especificaciones del fabricante. El segundo método consistió en una extracción mediante el protocolo CTAB clásico (**M2**) (Doyle & Doyle, 1987), utilizando buffer CTAB 2X (CTAB 2%, Tris-HCl 100 mM [pH 8], NaCl 1.4 M, EDTA 20 mM [pH 8]) y realizando dos etapas consecutivas de separación con cloroformo. El tercer método correspondió a una modificación del protocolo CTAB (**M3, CTAB modificado**). Al igual que en el M1, se utilizó CTAB 2x (CTAB 2%, Tris-HCl 100 mM [pH 8], NaCl 1.4 M, EDTA 20 mM [pH 8]), sin embargo, únicamente se realizó una extracción con cloroformo, esto con el propósito de disminuir la posible precipitación de metabolitos secundarios presentes en el tejido vegetal.

Evaluación de calidad e integridad del ADN

La calidad y concentración del ADN extraído se determinaron mediante espectrofotometría (NanoDrop 2000, UV/Vis, Thermo Scientific), evaluando las relaciones de absorbancia 260/280 y 260/230, utilizadas como indicadores de contaminación por proteínas, polisacáridos y compuestos fenólicos. Los valores de absorbancia A_{260/280} entre 1.8 y 2.1 son considerados indicativos de ADN con alta pureza, mientras que valores entre 1.6 y 1.7 corresponden a ADN de calidad aceptable. En contraste, relaciones inferiores a 1.6 pueden evidenciar la presencia de contaminantes, tales como compuestos aromáticos, proteínas o ARN. Por otra parte, la relación A_{260/230} es utilizada como indicador complementario de pureza, donde valores entre 2.0 y 2.2 reflejan ADN de calidad óptima; lecturas menores a 1.8 sugieren contaminación por sales, fenoles o carbohidratos. Asimismo, se registró la concentración del ADN expresada en ng/μL para comparar el rendimiento entre protocolos.

Para evaluar la capacidad de amplificación del ADN obtenido, se realizaron pruebas de reacción en cadena de la polimerasa (PCR) utilizando diferentes marcadores moleculares. Se emplearon los primers universales RbcL y MatK, así como el marcador microsatélite UBC 862. La concentración de ADN empleada en los ensayos de PCR fue de 10 ng·μL⁻¹. El programa térmico inició

con una etapa de desnaturalización inicial a 95 °C durante 2 min, seguida de 30 ciclos bajo las siguientes condiciones: desnaturalización a 95 °C durante 15 s, alineamiento a 60 °C durante 15 s y extensión a 72 °C durante 1 min. Finalmente, se realizó una extensión final a 72 °C durante 2 min. Los productos amplificados se separaron mediante electroforesis en gel de agarosa al 2%, teñido con Gel Red® (Biotium, Hayward, CA, EUA). La corrida electroforética se llevó a cabo a 80 V durante 1 h y 15 min, y los fragmentos obtenidos se visualizaron bajo luz ultravioleta utilizando un fotodocumentador UVP® MultiDoc-It Imaging System.

Análisis estadísticos

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, considerando un nivel de significancia de $\alpha < 0.05$. Posteriormente, se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. El procesamiento y análisis estadístico de la información se efectuó utilizando el programa R (R: The R Project For Statistical Computing, s. f.)

RESULTADOS

Se evaluaron tres protocolos para la extracción de ADN genómico a partir de tejido foliar de *Phoradendron leucarpum*: un kit comercial de extracción (M1), el método CTAB clásico (M2) y un protocolo CTAB modificado (M3). Durante el procesamiento de las muestras se observaron diferencias en la apariencia del material precipitado entre tratamientos. En el protocolo CTAB clásico se identificó una coloración más oscura en la pastilla de ADN, mientras que el método CTAB modificado presentó una apariencia más clara y homogénea, sugiriendo una menor coprecipitación de metabolitos secundarios presentes en el tejido vegetal.

Los resultados de concentración y calidad del ADN obtenido mediante los diferentes protocolos se presentan en el **Cuadro 3**. El análisis estadístico

mostró diferencias significativas en la concentración del ADN entre tratamientos ($P \leq 0.05$). El protocolo CTAB modificado (M3) presentó el mayor rendimiento, con una concentración promedio de 750.36 ± 220 ng/ μ L, siendo significativamente superior a los métodos M1 y M2, los cuales mostraron concentraciones promedio de 373.94 ± 130.3 ng/ μ L y 374.41 ± 53.79 ng/ μ L, respectivamente. En relación con la pureza del ADN, los valores de absorbancia 260/280 obtenidos oscilaron entre 1.48 y 1.7. El método M3 presentó el valor más cercano al rango considerado aceptable para ADN de buena calidad, con una relación promedio de 1.7 ± 0.20 . Respecto a la relación 260/230, el protocolo CTAB modificado también mostró el valor más alto (0.8 ± 0.10), indicando una menor presencia de contaminantes asociados con polisacáridos, sales y compuestos fenólicos en comparación con los demás tratamientos evaluados.

Cuadro 3. Análisis de rendimiento y calidad del ADN genómico de *Phoradendron leucarpum*.

Protocolo	Concentración ng/ μ l	260/280	260/230
Kit (M1)	373.94 ± 130.3^a	1.48 ± 0.24^a	0.61 ± 0.1^a
CTAB (M2)	374.41 ± 53.79^a	1.6 ± 0.23^a	0.67 ± 0.07^a
CTAB 2 (M3)	750.36 ± 220^b	1.7 ± 0.20^a	0.8 ± 0.10^b

Los valores son la media de las mediciones $\pm$ error estándar. Las columnas con valores seguidos por literales diferentes son significativamente diferentes Tukey ($p \leq 0.05$).

Para determinar la capacidad de amplificación del ADN extraído, se realizaron pruebas de PCR utilizando los marcadores RbcL, MatK y UBC 862. Los productos de amplificación fueron analizados mediante electroforesis en gel de agarosa al 1 % (**Figura 8**). Los resultados mostraron que el ADN obtenido mediante el método CTAB modificado presentó una mejor capacidad de amplificación, observándose bandas más definidas y reproducibles,

particularmente con el marcador UBC 862. En contraste, los métodos M1 y M2 mostraron una amplificación limitada o ausente, lo que sugiere la presencia de compuestos inhibidores o menor integridad del ADN.

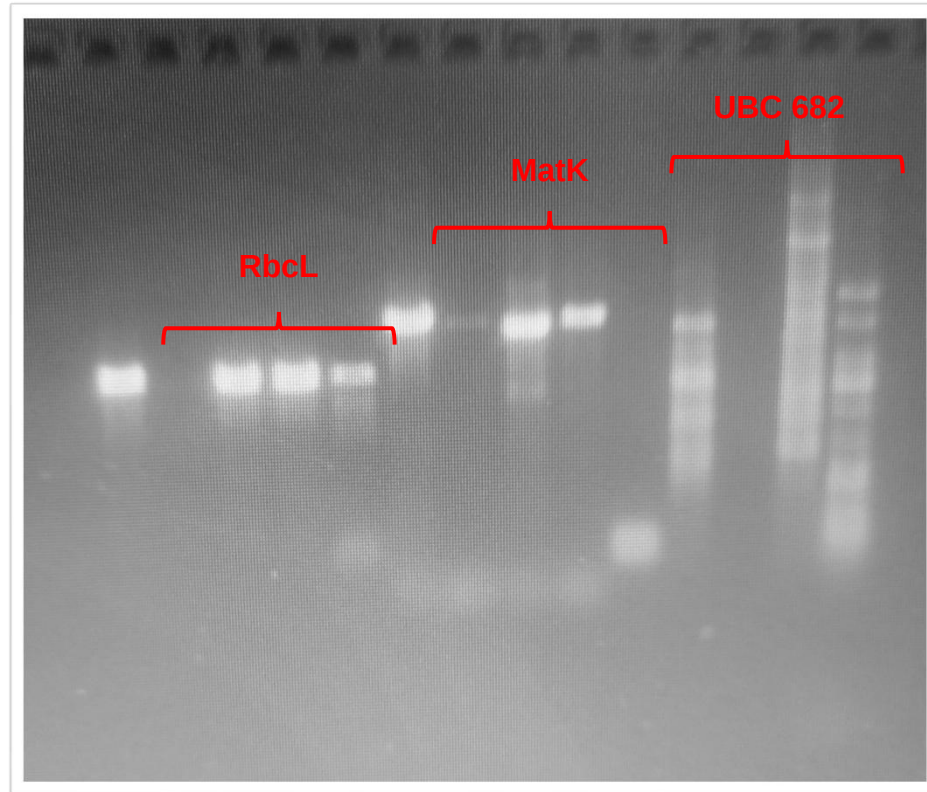


Figura 8. Gel de electroforesis del análisis de PCR utilizando ADN de *Phoradendron leucarpum* extraído con el método M3. Agarosa al 2%. Se usaron los marcadores RbcL, MatK y UBC 862.

En conjunto, los resultados obtenidos permitieron seleccionar el protocolo CTAB modificado como el método más eficiente para la extracción de ADN genómico de *Phoradendron leucarpum*, debido a su mayor rendimiento, mejor calidad espectrofotométrica y adecuada capacidad de amplificación molecular.

Discusión

La obtención de ADN genómico de alta calidad representa una de las principales limitantes en estudios moleculares de plantas hemiparásitas, debido

a la elevada presencia de metabolitos secundarios, compuestos fenólicos y polisacáridos que pueden interferir durante los procesos de extracción y amplificación molecular. En especies de muérdago, estas características químicas dificultan la recuperación de ADN íntegro y libre de contaminantes, afectando directamente la eficiencia de técnicas posteriores como PCR y análisis filogenéticos (Teixeira-Costa & Davis, 2021; Schenk et al., 2023). En el presente estudio, las diferencias observadas entre protocolos de extracción sugieren que la composición química foliar de *Phoradendron leucarpum* influye considerablemente sobre la calidad y rendimiento del ADN obtenido.

El protocolo CTAB modificado presentó el mayor rendimiento de ADN y mejores valores de pureza en comparación con el kit comercial y el método CTAB clásico. Estos resultados coinciden con estudios recientes que señalan que las modificaciones al protocolo CTAB permiten optimizar la extracción de ADN en especies vegetales con alto contenido de metabolitos secundarios, particularmente mediante ajustes en los pasos de separación y purificación (Schenk et al., 2023; Xie et al., 2023). Diversos autores han documentado que la reducción de etapas excesivas de extracción con cloroformo puede disminuir la pérdida de ADN y evitar la coprecipitación de compuestos inhibidores, favoreciendo la integridad del material genético recuperado.

Durante el procesamiento de las muestras se observó que el protocolo CTAB clásico generó pastillas de ADN con coloración más oscura, mientras que el método modificado produjo precipitados visualmente más claros. Este comportamiento probablemente se encuentra asociado con la presencia de compuestos fenólicos y otras moléculas fitoquímicas presentes en el tejido foliar de *Phoradendron leucarpum*. Estudios previos han reportado que este tipo de metabolitos pueden oxidarse durante la extracción y unirse al ADN, afectando tanto su pureza como su capacidad de amplificación (Mitchell et al., 2023; Carey et al., 2023). En este sentido, la eliminación de una segunda extracción

con cloroformo en el método M3 pudo favorecer una menor precipitación de compuestos interferentes y una mejor conservación del ADN genómico.

Aunque los valores de absorbancia 260/280 y 260/230 obtenidos en este estudio no alcanzaron los rangos óptimos reportados para ADN altamente puro, el protocolo CTAB modificado presentó los valores más cercanos a los parámetros considerados aceptables para análisis moleculares. Diversos trabajos han señalado que, en especies vegetales recalcitrantes, particularmente aquellas ricas en metabolitos secundarios, es común obtener relaciones espectrofotométricas inferiores a los valores ideales sin que ello impida la amplificación exitosa mediante PCR (Schenk et al., 2023; Liu et al., 2025). Por lo tanto, la funcionalidad del ADN extraído debe evaluarse no únicamente mediante parámetros espectrofotométricos, sino también considerando su desempeño en amplificación molecular.

Las pruebas de PCR confirmaron que el ADN obtenido mediante el protocolo CTAB modificado presentó una mejor capacidad de amplificación, especialmente utilizando el marcador UBC 862. La obtención de bandas definidas y reproducibles indica que el ADN extraído conservó una calidad adecuada para aplicaciones moleculares posteriores. Los primers ISSR derivados de secuencias microsatélite, como los UBC, han sido ampliamente utilizados en estudios de diversidad genética debido a su alta reproducibilidad, capacidad de detectar polimorfismos y utilidad en especies sin información genómica previa (Vieira et al., 2016; Zietkiewicz et al., 1994). En especies hemiparásitas y plantas no modelo, estos marcadores representan una alternativa eficiente para estudios preliminares de variabilidad genética y diferenciación poblacional.

Conclusión

Los resultados obtenidos en esta investigación permitieron establecer un protocolo eficiente y reproducible para la extracción de ADN genómico de *Phoradendron leucarpum*. La optimización metodológica desarrollada constituye una base importante para futuros análisis filogenéticos, estudios de diversidad genética y evaluaciones evolutivas en especies de muérdago presentes en ecosistemas áridos y semiáridos. Asimismo, este protocolo podría representar una alternativa útil para otras especies vegetales con características fitoquímicas similares y dificultades asociadas a la extracción de ADN de alta calidad.

REFERENCIAS

- Arroyo, J. M., Randle, C. P., & Hultine, K. R. (2013). Isolation of 18 microsatellite loci in the desert mistletoe *Phoradendron californicum* Nutt. (Viscaceae). *Applications in Plant Sciences*, 1(8), 1200458.
<https://doi.org/10.3732/apps.1200458>
- Carey, S. J., Becklund, L. E., Fabre, P. H., & Schenk, J. J. (2023). Sources of DNA contamination in plant molecular studies and strategies for mitigation. *Applications in Plant Sciences*, 11(5), e11528.
<https://doi.org/10.1002/aps3.11528>
- Doyle, J. J., & Doyle, J. L. (1987). A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. *Phytochemical Bulletin*, 19, 11–15.
- Flanders, N. P., Randle, C. P., Walters, E. L., & Musselman, L. J. (2023). Variation in establishment success for American mistletoe [*Phoradendron leucarpum* (Raf.) Reveal & M.C. Johnst. (Viscaceae)] appears most likely to predict its distribution in Virginia and North Carolina, United States. *Botany*, 102(3), 108–146. <https://doi.org/10.1139/cjb-2023-0050>

Liu, B., Wang, Y., Liu, Y., Zhang, Y., & Zhang, J. (2025). Reducing costs and shortening the cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) method to improve DNA extraction efficiency from wintersweet and some other plants. *Scientific Reports*, 15, 12648. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94822-4>

Liu, B., Wang, Y., Liu, Y., Zhang, Y., & Zhang, J. (2025). Reducing costs and shortening the cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) method to improve DNA extraction efficiency from wintersweet and some other plants. *Scientific Reports*, 15, 12648. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94822-4>

Mitchell, N., Meyer, R. S., & Liston, A. (2023). Challenges associated with secondary metabolites during plant DNA extraction and downstream molecular applications. *Plant Methods*, 19(1), 74. <https://doi.org/10.1186/s13007-023-01045-2>

R: The R Project for Statistical Computing. (s. f.). <https://www.r-project.org/>

Ramírez-Barahona, S., González, D., Castellanos-Morales, G., & Ornelas, J. F. (2017). The influence of climatic niche preferences on the population genetic structure of a mistletoe species. *New Phytologist*, 214(3), 1211–1221. <https://doi.org/10.1111/nph.14471>

Sahu, S. K., Thangaraj, M., & Kathiresan, K. (2012). DNA extraction protocol for plants with high levels of secondary metabolites and polysaccharides without using liquid nitrogen and phenol. *ISRN Molecular Biology*, 2012, 205049. <https://doi.org/10.5402/2012/205049>

Schenk, J. J., Becklund, L. E., Carey, S. J., & Fabre, P. P. (2023). What is the “modified” CTAB protocol? Characterizing modifications to the CTAB DNA extraction protocol. *Applications in Plant Sciences*, 11(3), e11517. <https://doi.org/10.1002/aps3.11517>

Schenk, J. J., Becklund, L. E., Carey, S. J., & Fabre, P. P. (2023). What is the “modified” CTAB protocol? Characterizing modifications to the CTAB DNA

extraction protocol. *Applications in Plant Sciences*, 11(3), e11517.

<https://doi.org/10.1002/aps3.11517>

Teixeira-Costa, L., & Davis, C. C. (2021). Life history, diversity, and distribution in parasitic flowering plants. *Plant Physiology*, 187(1), 32–51.

<https://doi.org/10.1093/plphys/kiab279>

Teixeira-Costa, L., & Davis, C. C. (2021). Life history, diversity, and distribution in parasitic flowering plants. *Plant Physiology*, 187(1), 32–51.

<https://doi.org/10.1093/plphys/kiab279>

Vieira, M. L. C., Santini, L., Diniz, A. L., & Munhoz, C. F. (2016). Microsatellite markers: What they mean and why they are so useful. *Genetics and Molecular Biology*, 39(3), 312–328. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-GMB-2016-0027>

Vieira, M. L. C., Santini, L., Diniz, A. L., & Munhoz, C. F. (2016). Microsatellite markers: What they mean and why they are so useful. *Genetics and Molecular Biology*, 39(3), 312–328. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-GMB-2016-0027>

Xie, C., Sun, P., Liu, H., & Zhang, Y. (2023). Optimization of CTAB-based DNA extraction methods for plants rich in polysaccharides and polyphenols. *Plant Gene*, 34, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2023.100398>

Zietkiewicz, E., Rafalski, A., & Labuda, D. (1994). Genome fingerprinting by simple sequence repeat (SSR)-anchored polymerase chain reaction amplification. *Genomics*, 20(2), 176–183.

<https://doi.org/10.1006/geno.1994.1154>

Zietkiewicz, E., Rafalski, A., & Labuda, D. (1994). Genome fingerprinting by simple sequence repeat (SSR)-anchored polymerase chain reaction amplification. *Genomics*, 20(2), 176–183.

<https://doi.org/10.1006/geno.1994.1151>

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES GENERALES

La presente investigación permitió identificar a *Phoradendron leucarpum* como la principal especie de muérdago asociada a mezquites en la región centro-sur del Desierto Chihuahuense, evidenciando además que su distribución ecológica se encuentra estrechamente relacionada con variables bioclimáticas, particularmente la temperatura y la precipitación. Los modelos de nicho ecológico desarrollados mediante MaxEnt mostraron que variables como la isothermalidad, el rango anual de temperatura y la precipitación del trimestre más cálido influyen significativamente en la probabilidad de establecimiento y convergencia ecológica entre *Phoradendron leucarpum* y *Neltuma laevigata*, destacando regiones del Desierto Chihuahuense y Sonorense como áreas con alta aptitud ambiental para ambas especies. Estos resultados sugieren que las variaciones climáticas pueden modificar las interacciones ecológicas y la distribución potencial de especies hemiparásitas en ecosistemas áridos.

Asimismo, se demostró que *Phoradendron leucarpum* presenta una importante variación espacial en su actividad antioxidante y contenido fitoquímico, asociada a las condiciones ambientales de los sitios de estudio. Las localidades con mayores niveles de precipitación y altitud registraron las concentraciones más elevadas de compuestos fenólicos y flavonoides, así como una mayor capacidad antioxidante, evidenciando una relación positiva entre los metabolitos secundarios y la actividad antioxidante de la especie. Estos hallazgos resaltan el potencial biotecnológico y farmacológico del muérdago como fuente natural de compuestos bioactivos. Adicionalmente, la estandarización del protocolo de extracción y amplificación de ADN genómico, mediante un método CTAB modificado, permitió obtener material genético de adecuada calidad y capacidad de amplificación, proporcionando una base metodológica útil para futuros estudios moleculares y de diversidad genética. En conjunto, esta investigación

amplía el conocimiento ecológico, fitoquímico y molecular de especies hemiparásitas de zonas áridas, aportando información relevante para estrategias de conservación, estudios de cambio climático y aprovechamiento sustentable de recursos vegetales del Desierto Chihuahuense.