



Revista Mexicana de Agroecosistemas

Oaxaca, Volumen XI, Número 2, 2024

Vol. II Núm. 2. Julio – Diciembre, 2024 ISSN: 2007-9559



Fotografía: Recolección de piñas de *Agave angustifolia* Haw.
San Baltazar Chichicápam, Ocotlán de Morelos, Oaxaca.



REVISTA MEXICANA DE AGROECOSISTEMAS, Vol. 11(2), 2024 es un órgano de difusión científica que se publica semestralmente desde 2014 por el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca; publica resultados de investigaciones científicas originales e inéditas, con enfoque hacia la productividad agrícola, pecuaria, forestal, servicios ecosistémicos y de aprovechamiento y conservación de recursos naturales; también del área social ligada a ese enfoque. La revista está incluida en el listado del *Open Journal System (OJS)*, que incluye DOI por artículo (Cross Ref) y en el Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (*latindex*).

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2023-041117195200-102 e ISSN 2007-9559, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor y vigentes al 2024.

Responsable de la última actualización de este número en la División de Estudios de Posgrado e Investigación: Dr. Gerardo Rodríguez-Ortiz, MC. Arely Concepción Ramírez Aragón y MC. Alfonso Aurelio Bautista Avendaño. Domicilio conocido, Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México, C.P. 71233, Tel y Fax. 01 (951) 5170788, <https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/index>, rmae@voaxaca.tecnm.mx, rmae.itvo@gmail.com. Fecha de última modificación, 20 de diciembre de 2024.

Para su publicación, los artículos son sometidos a arbitraje, su contenido es de la exclusiva responsabilidad de los autores y no representa necesariamente el punto de vista de la Institución; las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del equipo editorial.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación, sin previa autorización del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca.

Este número contiene como **“artículos científicos”** estudios sobre identificación de un gen en teocintles, interacción entre maíces nativos de San Luis Potosí y vegetación asociada a camorreal; **“notas técnicas”** temas acerca de desarrollo de agave por efecto de nutrición orgánica, quitina en especies defoliadoras de pinos y sobre el cultivo de malanga en invernadero. En los **“artículos de revisión (review)”** información referente a sistemas silvopastoriles y estrategias de gestión forestal. Como **“artículos de difusión”**, se abordan tópicos de estimación de residuos en la elaboración del mezcal; el chayote como alimento e implicaciones tradicionales y finalmente en cómo es la agricultura de subsistencia en áreas naturales protegidas de Tamaulipas. Esta contribución tiene asignado el DOI: <https://doi.org/10.60158/rma.v11i2>



Comité Editorial (DEPI-ITVO)

Dr. Aarón Martínez Gutiérrez

Dr. Ernesto Castañeda Hidalgo

Dr. Gerardo Rodríguez-Ortiz

Dr. José Cruz Carrillo Rodríguez

Dr. José Raymundo Enríquez del Valle

Dr. Vicente Arturo Velasco Velasco

Dr. Yuri Villegas Aparicio

Dra. Gisela Margarita Santiago Martínez

Dra. Gisela Virginia Campos Angeles

Dra. Martha Patricia Jerez Salas

Dr. Salvador Lozano Trejo

Dr. Gustavo Omar Díaz Zorrilla

Dra. María Isabel Pérez León

M.C. Judith Ruiz Luna

Coordinación editorial

Dr. Gerardo Rodríguez Ortiz

Diseño de portada y administración de página Web

MC. Arely Concepción Ramírez Aragón/MC. Alfonso Aurelio Bautista Avendaño



Política de revisión de manuscritos

Todos los manuscritos se reciben en español e inglés y se someten mediante la plataforma *OJS* de la revista (<https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/index>) con **carta de originalidad** firmada por el autor de correspondencia. Deben ser originales e inéditos, de alta calidad, acordes con las normas editoriales de RMAE y que no se hayan publicado o se vayan a publicar en otra revista.

Las contribuciones pasan a revisión del editor y estilo para el cumplimiento de las normas editoriales; se verifica nivel de plagio mediante Turnitin®, el cual no debe ser mayor a 20 % de coincidencias.

Todas las contribuciones se envían a arbitraje de “pares ciegos” de al menos dos especialistas del área de reconocido prestigio académico y de instituciones diferentes a la de los autores. Los árbitros revisan el documento en formato Word y hacen llenado del “formato de evaluación” (formato pdf), los cuales remiten al Comité Editorial. Cuando el manuscrito es aprobado por los árbitros y editor de RMAE, se envían al autor de correspondencia archivos Word revisados y formatos de evaluación, para que los autores realicen las correcciones pertinentes. El documento corregido por autores se remite al Comité Editorial, el cual extiende “carta de aceptación del manuscrito”.

Previo a la publicación, la RMAE envía al autor de correspondencia y en formato pdf, la “prueba de galeras” y la “carta cesión de derechos”, que debe ser revisada por si existen cambios menores.

ATENTAMENTE

Comité editorial



	Contenido	Pág.
	Artículo científico	
I	INTERACCIÓN GENOTIPO × AMBIENTE EN MAÍCES NATIVOS DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO ¹ Ana Laura Ramírez-Córdova  , ¹ Pablo Delgado-Sánchez  , ^{2§} Jesús Martínez-Sánchez  , ¹ María de la Luz Guerrero-González 	88 - 96
2	IDENTIFICACIÓN DEL GEN ANTIFÚNGICO <i>TI 14-kD</i> EN TEOCINTLES Y MAÍZ, Y SU RELACIÓN CON <i>Aspergillus</i> ¹ José Luis Hernández-Morales  , ¹ María del Socorro Pina-Canseco  , ² Nora Hilda Rosas-Murrieta  , ³ Marco Antonio Sánchez-Medina  , ³ Patricia Vásquez-Luis  , ³ Iván Antonio García-Montalvo  , ^{3§} Alma Dolores Pérez-Santiago 	97 - 108
3	DIVERSIDAD Y ESTRUCTURA DE LA VEGETACIÓN ASOCIADA AL “CAMORREAL” EN SAN PEDRO EL ALTO, OAXACA ¹ Josefa Itzel Pérez-Luis  , ^{2§} Gisela Virginia Campos-Angeles  , ³ Valentín José Reyes-Hernández  , ² Gerardo Rodríguez-Ortiz  , ² José Cruz Carrillo-Rodríguez 	109 - 118
	Nota técnica	
4	CONCENTRACIÓN DE QUITINA EN ESPECIES DEFOLIADORAS (<i>Zadiprion</i> ssp.) DE <i>Pinus</i> EN LA SIERRA NORTE, OAXACA ^{1§} Mario Ernesto Suárez-Mota  , ¹ Carlos Alberto Velasco-Paz  , ¹ Lizbeth Luna-Bautista  , ² Irene Bautista-Juárez  , ³ Luis Barbo Hernández-Portilla  , ¹ Waldo Santiago Juárez  , ¹ Wenceslao Santiago-García 	119 - 125
5	DESARROLLO DE <i>Agave americana</i> var. <i>oaxacensis</i> POR EFECTO DE NUTRICIÓN ORGÁNICA, FERTIRRIEGO Y BENCILAMINOPURINA ^{1§} Daniel Eduardo Canseco-Santiago  , ¹ José Raymundo Enríquez-del-Valle  , ¹ Gerardo Rodríguez-Ortiz  , ¹ Marcos Emilio Rodríguez-Vásquez  , ¹ Juan Ángel García-Aguilar  , ² Gloria Paulina Pérez-Félix 	126 - 135



6	DESARROLLO FENOLOGICO DEL CULTIVO DE MALANGA EN CONDICIONES DE INVERNADERO ¹ Ignacio Garay-Peralta  , ¹ Jesús Herrera-Alarcón  , ² Alfredo Díaz-Criollo  , ² Marlén Daniela Domínguez-Vazquez  , ³ Jesús Alberto Garza-Ortega 	136 - 143
Artículo de revisión		
7	ESTRATEGIAS DE GESTIÓN FORESTAL Y CAMBIO CLIMÁTICO: UNA REVISIÓN Julio Nemorio Martínez-Sánchez  , Wibke Himmelsbach  , María Inés Yáñez Díaz  , Marco González-Tagle  , [§] Homero Gárate-Escamilla 	144 - 157
8	SISTEMAS SILVOPASTORILES Y LAS CONDICIONES PARA SU ESTABLECIMIENTO ¹ Arturo Angel-Hernández  , ² Carlos Alberto García-Munguía  , ³ Edgar Aguilar-Urquizo  , ⁴ Alberto Margarito García-Munguía  , ⁵ Clemente Lemus-Flores  , ¹ Socorro Morales-Flores 	158 - 171
Artículo de difusión		
9	ESTIMACIÓN DE RESIDUOS RESULTANTES DE LA ELABORACIÓN DE MEZCAL Y POSIBLES ALTERNATIVAS DE RECICLAJE ¹ Martha Zuleyma Hernández San Juan  , ² José Raymundo Enríquez-del Valle  , ² Gerardo Rodríguez-Ortiz  , ² Vicente Arturo Velasco-Velasco 	172 - 178
10	CHAYOTE: EL TESORO VERDE DE LAS ALTAS MONTAÑAS DE VERACRUZ – RAÍCES DE TRADICIÓN Y SABOR ¹ Martha Romero-Jaen  , ¹ Susana Isabel Castillo-Martínez 	179 - 185
11	AGRICULTURA DE SUBSISTENCIA EN LAS ZONAS DE INFLUENCIA DE LAS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS EN TAMAULIPAS Victor Manuel Toribio-Solis  , Yolanda del Rocio Moreno-Ramírez  , [§] Mario Rocandio-Rodríguez 	186 - 192



DIRECTORIO

Maestro Ramón Jiménez López- Director General, Tecnológico Nacional de México (TecNM)

Dr. Jesús Olayo Lortía- Responsable del Despacho de los Asuntos, Competencia de la Dirección de
Posgrado, Investigación e Innovación (TecNM)

Dra. Marisa Guadalupe Flores Aguilar- Director (ITVO)

Dr. José Raymundo Enríquez del Valle - Subdirección Académica (ITVO), (jose.ev@voaxaca.tecnm.mx)
Editor Asociado Revista Institucional

Dr. Yuri Villegas Aparicio-Jefe de la DEPI-ITVO, (yuri.va@voaxaca.tecnm.mx)
Editor Asociado Revista Institucional

Dr. Gerardo Rodríguez Ortiz (gerardo.ro@voaxaca.tecnm.mx)
Editor en jefe Revista Institucional DEPI-ITVO

MC. Arely Concepción Ramírez Aragón (arely.ra@voaxaca.tecnm.mx)/MC, Alfonso Aurelio Bautista
Avendaño (alfonso.ba@voaxaca.tecnm.mx) - coordinación de soporte Revista Institucional DEPI-ITVO

Mayores informes:

Revista Mexicana de Agroecosistemas

Domicilio conocido

Ex-hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México

C. P. 71233

Tel. y Fax: 01(951) 5170788

Correo: rmae@voaxaca.tecnm.mx, rmae.itvo@gmail.com

<https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/index>



INTERACCIÓN GENOTIPO × AMBIENTE EN MAÍCES NATIVOS DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

GENOTYPE BY ENVIRONMENT INTERACTION IN MAIZE LANDRACES OF SAN LUIS POTOSI, MÉXICO

¹Ana Laura Ramírez-Córdova^{ORCID}, ¹Pablo Delgado-Sánchez^{ORCID}, ²Jesús Martínez-Sánchez^{ORCID}, ¹María de la Luz Guerrero-González^{ORCID}

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Agronomía y Veterinaria, San Luis Potosí, México. C.P. 78000. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Centro de Chiapas. Ocozocoautla de Espinosa, Chiapas, México. C.P. 29140. [§]Autor de correspondencia: (martínez.jesus@inifap.gob.mx).

RESUMEN

En el estado de San Luis Potosí, existe un gran potencial para el estudio, conservación, mejoramiento y aprovechamiento de los maíces nativos. En este trabajo, se evaluó la variación morfológica y la interacción genotipo × ambiente de poblaciones de maíz nativo de San Luis Potosí. En el año 2021, se evaluaron 55 poblaciones en dos ambientes contrastantes, bajo un diseño de bloques al azar con dos repeticiones. Los datos morfológicos se analizaron mediante análisis de varianza, mientras que para el rendimiento de grano se utilizaron el modelo de regresión en los sitios (SREG) y las gráficas GGE biplot para estudiar la interacción. El análisis de varianza para la caracterización morfológica presentó diferencias significativas para todas las variables. El análisis de interacción genotipo × ambiente y la estabilidad mostraron que las poblaciones 5, 665 y 438 fueron las más estables y con rendimiento superior al resto de las poblaciones.

Palabras clave: caracterización morfológica, componentes del rendimiento, estabilidad.

ABSTRACT

In the state of San Luis Potosí, there is great potential for the study, conservation, improvement and use of maize landraces. In this work, the morphological variation and the genotype × environment interaction of maize landraces

populations from San Luis Potosí. In 2021, 55 populations were evaluated in two contrasting environments, under a randomized block design with two repetitions. Morphological data were analyzed by analysis of variance, while for grain yield the site regression model (SREG) and the GGE biplot plot were used to study the interaction. The analysis of variance for morphological characterization showed significant differences for all variables. The analysis of genotype × environment interaction and stability showed that populations 5, 665 and 438 were the most stable and with higher performance than the rest of the populations.

Index words: morphological characterization, performance components, stability.

INTRODUCCIÓN

En el estado de San Luis Potosí las condiciones agroecológicas para la producción de maíz son muy diversas, razón por la cual el maíz nativo presentan una gran diversidad. En la entidad, diversos trabajos de colecta de maíces nativos han documentado la presencia de siete razas de maíz que presentan buen desempeño bajo condiciones de sequía: Tuxpeño, Ratón, Celaya, Olotillo, Elotes Occidentales, Cónico Norteño y Tuxpeño Norteño (Ortega-Corona et al., 2013; Ávila-Perches et al., 2010). Además, en varias regiones del estado se presentan condiciones medioambientales propicias para la selección de

maíces nativos con tolerancia a altas temperaturas y estrés hídrico, factores que son limitantes para la producción de maíz (SIAP, 2023; Diedhiou et al., 2022; Hellin et al., 2014). Diedhiou et al. (2021) reportaron que los maíces nativos de las regiones Altiplano y Media pueden representar un importante recurso genético para enfrentar los incrementos de temperatura y déficit hídrico, por ser los menos afectados en condiciones de laboratorio simulando la sequía mediante pruebas de germinación bajo presión osmótica y con diferentes niveles de temperatura y humedad. Sin embargo, es necesario complementar la información mediante estudios de campo en ambientes múltiples. Diversos autores han demostrado que los maíces nativos presentan una respuesta competitiva en rendimiento de grano bajo condiciones de temporal para diferentes regiones de México (Alvarado-Gómez et al., 2016; Martínez-Sánchez et al., 2016; Pecina-Martínez et al., 2011).

Ante los efectos del cambio climático, los maíces nativos poseen genes que favorecen un mejor desarrollo bajo condiciones de déficit hídrico, bajo esta premisa, es fundamental su conservación, caracterización, producción y mejoramiento (Turrent-Fernández et al., 2016). Existen diferentes metodologías para evaluar y seleccionar maíces nativos en campo bajo condiciones de temporal y ambientes restrictivos. Para ello es necesario evaluar diferentes poblaciones de maíces nativos en ambientes contrastantes y seleccionar las de mejor comportamiento (Martínez-Sánchez et al., 2018). Las técnicas estadísticas AMMI y SREG han sido efectivas para seleccionar genotipos con buen rendimiento de grano y estabilidad, lo que establece las bases para el mejoramiento formal de los maíces nativos (Arellano et al., 2014).

También, es necesario evaluar la variación agromorfológica de las poblaciones nativas de maíz para seleccionar caracteres deseables como la precocidad, que es útil en las estrategias de escape a la sequía en regiones con déficit hídrico bajo condiciones de temporal, para este fin, es factible

recorrir a los recursos genéticos resguardados en los bancos de germoplasma o a la colecta y evaluación de poblaciones de maíz nativo preservadas *in situ* por los agricultores (Diego-Flores et al., 2023). Bajo este contexto, se evaluó la variación morfológica y la interacción genotipo $\times$ ambiente de poblaciones de maíz nativo de San Luis Potosí, en ambientes contrastantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Los experimentos fueron conducidos bajo condiciones de temporal en el año 2021 en dos localidades (ambientes), el primero en la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (FAyV), a una altitud de 1835 m, coordenadas geográficas 22°13'48" LN, -100°81'22" LO, promedios de temperatura media anual y precipitaciones de 17 °C y 238 mm, respectivamente. El segundo se estableció en la localidad de Los Cerritos (LC) municipio de Ahualulco, a una altitud de 2023 m, coordenadas geográficas 22°38'00" LN, -101°13',33" LO, promedios de temperatura media anual y precipitación de 19 °C y 375 mm.

Diseño de muestreo

Respecto al material genético, se utilizaron 55 poblaciones de maíces nativos, 46 originarias de San Luis Potosí: 14 de la huasteca, 23 de la región media, dos de la región Centro y 7 del Altiplano más 9 poblaciones de otros estados (dos de Guanajuato, tres de Morelos y cuatro del estado de México). Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones por localidad. La unidad experimental fueron dos surcos de 5.0 m de longitud y 0.8 m de ancho, con dos plantas cada 50 cm, para alcanzar una densidad de 50,000 plantas ha⁻¹. El manejo agronómico en ambas localidades fue el recomendado por el INIFAP. Se midieron los días a floración masculina y femenina, alturas de planta y mazorca, rendimiento de grano y componentes del rendimiento: número de hileras, granos por hilera y granos por mazorca.

Manejo y análisis de datos

Las variables morfológicas se analizaron mediante análisis de varianza y la prueba de medias de Tukey (Datos no presentados) con los datos de la localidad de Los Cerritos, mientras que la interacción genotipo $\times$ ambiente y la estabilidad se interpretaron con el modelo SREG y las gráficas GGE biplot con datos de ambas localidades. Se utilizaron los programas estadísticos SAS y GEAR (Pacheco et al., 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se encontró diferencias estadísticas ($p < 0.01$) entre las poblaciones para todas las características morfológicas evaluadas y para los bloques solo hubo diferencia significativa en granos por mazorca (Tabla I). Los días a floración masculina y femenina oscilaron entre los 128 a 86 días y 130 a 90 días, respectivamente. Debido a que en muchas localidades donde se realizan siembras de temporal con poblaciones nativas de maíz procuran conservar maíces con diferencias en la floración con el fin de tener opciones ante las variaciones climáticas (Diego-Flores et al., 2023; Muñoz, 2003).

Las poblaciones 426, 2304 y 21343 presentaron sincronía floral a 99, 98 y 90 días después de la siembra (*dds*), respectivamente, la sincronía floral es deseable debido a que asegura la fecundación y la formación de grano (Contreras-Molina et al., 2016; Luna y Gutiérrez, 2000). La altura de planta y de mazorca registraron valores entre 274 a 160 y 144 a 60 cm, las poblaciones con porte muy altos se asocian a problemas de acame, pero son deseadas para producción de forraje, por otro lado, las poblaciones con porte bajo y precoces facilitan la implementación de estrategias de escape a la sequía (Martínez-Sánchez et al., 2017; Ramírez, 2013). En cuanto a los componentes de rendimiento se encontraron mazorcas con longitud de 19.2 a 10.9 cm, el diámetro de mazorca fue de 4.7 a 3.3, los números de hileras por mazorca fueron de 16 a 8 hileras, de 43 a 25 granos por hilera y de 509 a 252 granos por mazorca, las poblaciones con los valores más altos en estos caracteres, son importantes porque pueden ser utilizadas para transferir estos rasgos a las líneas que forman nuevos híbridos comerciales que carecen de buen tamaño de grano (Sah et al., 2020; Ramírez-Díaz et al., 2015).

Tabla I. Significancia estadística de poblaciones de maíz nativo evaluadas en San Luis Potosí en caracteres fenológicos, vegetativos y componentes del rendimiento.

Carácter	Fuentes de variación		Cuadrado medio del error	CV (%)	Mín. Máx.	
	Población	Bloque				
DFM (días a floración masculina, <i>dds</i>)	95.03 ^{**}	3.63	9.61	3.27	86	128
DFF (días a floración femenina, <i>dds</i>)	92.15 ^{**}	1.30	11.99	3.53	90	130
ALP (altura de planta, cm)	1610.31 ^{**}	4.00	818.58	13.02	160	274
ALM (altura de mazorca, cm)	837.01 ^{**}	1.30	383.75	20.69	60	144
LMZ (longitud de mazorca, cm)	6.11 ^{**}	0.80	1.80	9.23	10.9	19.2
DMZ (diámetro de mazorca, cm)	0.194 ^{**}	0.01	0.05	5.93	3.3	4.7
NH (número de hileras)	3.69 ^{**}	2.04	0.76	7.66	8	16
GH (granos por hilera)	36.99 ^{**}	25.53	9.12	9.40	25	43
GXM (granos por mazorca)	7403.97 ^{**}	8892.0 [*]	2094.12	12.50	252	509

CV = coeficiente de variación, * y ** significativo a nivel de $p < 0.05$ y $p < 0.01$, respectivamente.

Tabla 2. Análisis de varianza combinado del rendimiento de poblaciones de maíz nativo evaluadas en San Luis Potosí en dos ambientes contrastantes.

FV	SC	Explicación (%)	Acumulado (%)	CM
Ambiente	88.16	41.72	41.72	88.16**
Poblaciones	76.64	36.27	77.99	1.41**
Ambiente × Poblaciones	46.49	22.00	100	0.86**

** Significativos a nivel de $p < 0.01$, CM = cuadrado medio, SC = suma de cuadrados, FV = fuentes de variación.

Tabla 3. Prueba de Gollob para los componentes del modelo SREG de poblaciones de maíz nativo evaluadas en San Luis Potosí en dos ambientes contrastantes.

FV	SC	Explicación (%)	Acumulado (%)	CM
CPI	84.68	68.76	68.76	1.56**
CP2	38.46	31.23	100	0.73**

** Significativos a nivel de $p < 0.01$, CM = cuadrado medio, SC = Suma de cuadrados, FV = fuentes de variación.

En el análisis de varianza combinado hubo diferencias significativas ($p < 0.01$) entre los ambientes de evaluación (FAyV y Los Cerritos), las poblaciones y para la interacción poblaciones × ambientes en el rendimiento de grano, lo que indica que hay diversidad genética entre las 55 poblaciones y variación en los dos ambientes (Tabla 2). Para la variable de rendimiento en la interacción poblaciones × ambientes, en la prueba de Gollob se puede observar que el componente principal 1 (CPI) explica 68.73 % de la variación mientras que el componente 2 (CP2) explica el 31.23 %, valores que dan certeza estadística a la evaluación (Ledesma-Ramírez et al., 2012) (Tabla 3).

En cuanto al rendimiento promedio de las 55 poblaciones estudiadas en los dos ambientes. Para la localidad de FAyV el rendimiento promedio es de 1.5 t ha⁻¹ mientras que para Los Cerritos es de 2.73 t ha⁻¹, siendo esta última la localidad con la mejor respuesta en rendimiento (Datos no presentados). El CPI se encuentra correlacionado con el genotipo y representa la parte del rendimiento que es afectado por las características del genotipo (Martínez-Sánchez et al., 2018). Si el CP2 presenta valores bajos nos indica que la población tiene menor interacción (Yan & Tinker, 2006), tal es el caso de las poblaciones 5 (3.01 t

ha⁻¹), 665 (2.85 t ha⁻¹) y 438 (2.15 t ha⁻¹) con -0.070, -0.175 y -0.275 respectivamente y presentan rendimientos arriba del 2.1 t ha⁻¹, el origen de estas poblaciones se encuentra en la zona media del estado, lugar donde ocurren 500 mm de lluvia por año y considerando que en el periodo del experimento se presentaron precipitaciones que sumaron un aproximado de 520 mm (WeatherData, 2022), su buen comportamiento se podría deber a esa condición. La población con mejor comportamiento en la localidad de FAyV fue 423 con 3.15 t ha⁻¹ y para Los Cerritos fue 23677 con 5.11 t ha⁻¹, ambas con origen en la zona media. Estos resultados coinciden con Dhiedhiou et al. (2021) quienes reportaron que los maíces nativos de las regiones Media y Altiplano pueden ser un importante recurso genético para enfrentar los incrementos de temperatura y sequía por efecto del cambio climático. Ninguna de las poblaciones provenientes de otros estados destacó en rendimiento de grano, lo que demuestra la adaptación de las poblaciones sobresalientes a las condiciones medioambientales de San Luis Potosí.

En la Figura 1 se muestra el GGE biplot que describe el patrón quién fue el mejor y en dónde, que construye un polígono usando como vértices las poblaciones más alejadas del origen del biplot, para este caso son 1997, 23677, 423, 428, 443,

16417, 21201, 15938, 19670 y 17894, de tal manera que las 55 poblaciones se encuentren dentro del polígono formado. Las 10 poblaciones mencionadas anteriormente son las más sensibles a la interacción genotipo $\times$ ambiente, considerando también que si dichas vértices tienen el mayor rendimiento se puede ubicar las poblaciones con los mejores rendimientos en cada ambiente (Frutos et al., 2014), para Los Cerritos fueron las poblaciones 19957, 2292 y 23677 con 4.28, 3.09 y 5.11 t ha⁻¹, para la FAYV la población 423 fue la que mejor se comportó con 2.03 ha. Se formaron dos grupos, el primero se localiza FAYV donde se registró los rendimientos más bajos de las 55 poblaciones en comparación con Los Cerritos que presentó los rendimientos más altos (Figura 1).

En la Figura 2 se muestra el rendimiento promedio versus estabilidad, la línea con una flecha que pasa por el origen del biplot indica el rendimiento promedio de las poblaciones. La estabilidad se representa de forma perpendicular al

eje de las ordenadas, lo que indica que entre mayor longitud tenga el vector mayor será la interacción (Frutos et al., 2014). Por lo anterior se puede ubicar que las poblaciones 423 y 428 tienen el vector más largo por ende son las que tienen mayor interacción, por otro lado, entre las poblaciones con menor longitud de vector ubicamos a la población 429 lo que nos indica que es una de las poblaciones más estables y con rendimiento de grano arriba del promedio. Arellano et al. (2014) evaluaron variedades de maíces azules en ambientes múltiples del Altiplano Central de México, encontraron que algunas poblaciones presentaban estabilidad, pero rendimientos por debajo del promedio, las que obtuvieron los mejores rendimientos tenían la mayor interacción y solamente localizó una población con estabilidad y rendimiento arriba del promedio, Martínez-Sánchez et al. (2016) encontraron resultados similares evaluando maíces locales de clima cálido del estado de Chiapas.

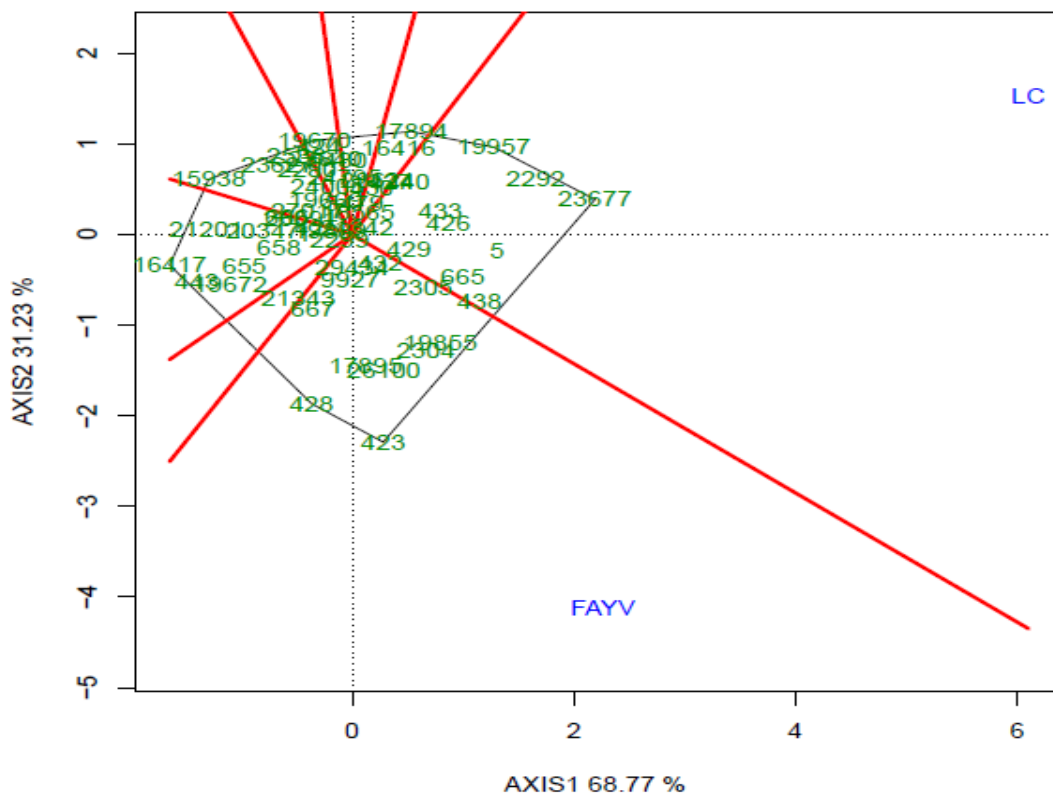


Figura 1. GGE biplot (SREG) donde se modela el patrón quien fue el mejor y en dónde (which-won-where).

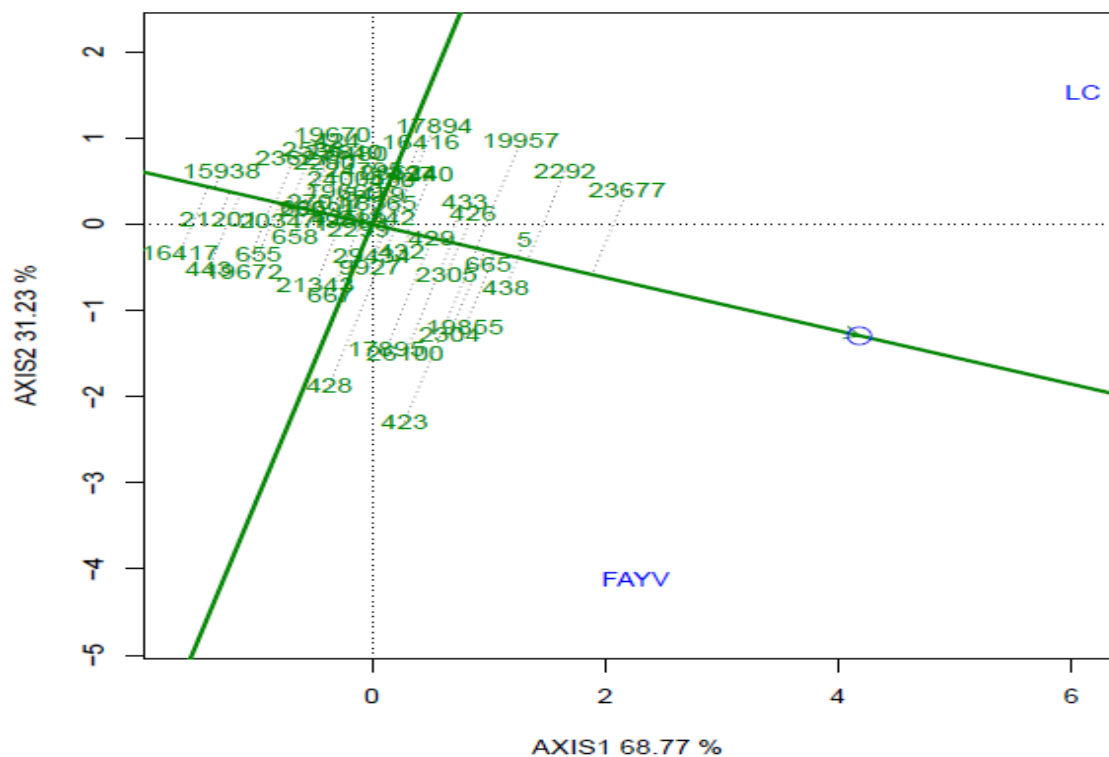


Figura 2. Rendimiento medio versus estabilidad en maíces nativos evaluados en dos ambientes contrastantes de San Luis Potosí.

Las características de un genotipo ideal son tener un rendimiento arriba del promedio y una alta estabilidad, a pesar de que el genotipo ideal no existe nos ayuda a referenciar para evaluar un conjunto de poblaciones. La representación en la **Figura 3** del genotipo ideal se representa con un punto absolutamente estable y los círculos concéntricos nos permiten visualizar la cercanía que hay entre las poblaciones y el ideal (Frutos et al., 2014). Las tres poblaciones que se visualizan más cercanas al ideal son 5, 665 y 438 provenientes de la región media, que se identifican con estabilidad y rendimientos por arriba del promedio general, una de las características en común de estas poblaciones es que tienen características de la raza tuxpeño, Martínez-Sánchez et al. (2018) mencionan que esta raza se destaca por su capacidad de adaptabilidad y alto rendimiento lo que ha llevado a que este tipo de material sea base para el mejoramiento genético.

CONCLUSIONES

Hubo diferencias entre ambientes, poblaciones y la interacción poblaciones $\times$ ambientes en el rendimiento de grano, se encontró que existen diferencias significativas en los caracteres fenológicos, vegetativos y los componentes del rendimiento, las poblaciones provenientes de la región media fueron las de mejor rendimiento de grano y gracias al modelo de regresión en los sitios se identificaron tres poblaciones con rendimientos por arriba del promedio y estabilidad 5, 665 y 438. En el estado de San Luis Potosí, México, existen poblaciones nativas de maíz con alto potencial agronómico para ser utilizadas en diferentes programas de conservación, mejoramiento genético y aprovechamiento sustentable.

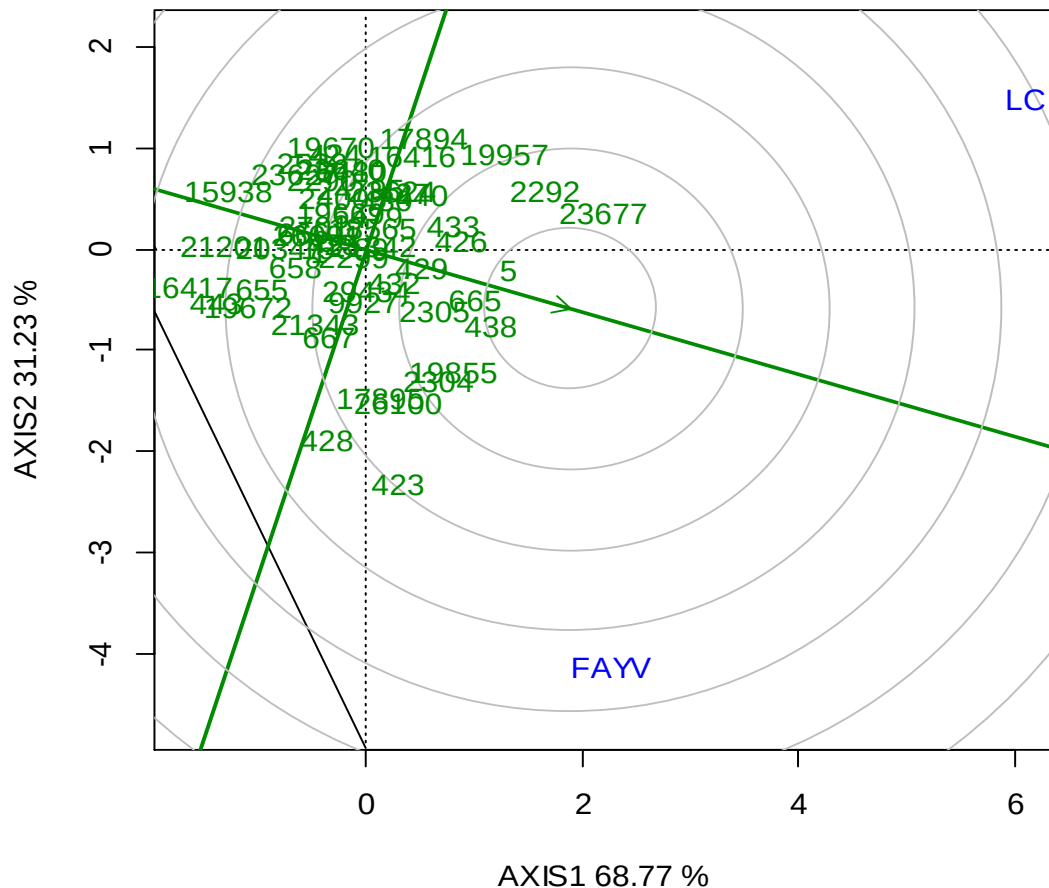


Figura 3. Ranking de las poblaciones evaluadas con respecto al genotipo ideal.

AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCYT por financiar los estudios de maestría de Ana Laura Ramírez Córdova.

REFERENCIAS

- Alvarado-Gómez, L.C., Graillet-Juárez, E.M., Martínez-Martínez, M., Arieta-Román, R.J. y Fernández-Figueroa, J.A. (2016). Potencial de rendimiento y variabilidad del maíz nativo (*Zea mays* L.) rojo en suelos ácidos de baja fertilidad en Acayucan, Veracruz. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 4(2), 112–117. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v4i2.79>
- Arellano, V.J.L., Rojas, M.I. y Gutiérrez, H.G.F. (2014). Variedades de maíz azul chalqueño seleccionadas por múltiples caracteres y estabilidad del rendimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(8), ME:1469-80. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i8.828>
- Ávila-Perches, M.A., Dorantes-González, J.R.A., Gámez-Vázquez, H.G. y Gámez-Vázquez, A.J. (2010). *Conocimiento de la diversidad y distribución actual del maíz nativo y sus parientes silvestres en México*. San Luis Potosí. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Centro. Campo Experimental Bajío. 81p.
- Contreras-Molina, O., Gil-Muñoz, A., Antonio-López, P., Reyes-López, D. y Guerrero-Rodríguez, J.D. (2016). Caracterización morfológica de maíces nativos de la Sierra Nororiental de Puebla, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 17, 3633-3647.

- Diedhiou, I., Ramírez-Tobías, H.M., Fortanelli-Martínez, J. & Flores-Ramírez, R. (2021). Effects of different temperatures and water stress in germination and initial growth of creole genotypes of maize from three different agroclimatic regions of San Luis Potosí (México). *Maydica*, 66(1), 1-16. <https://journals-crea.4science.it/index.php/maydica/index>.
- Diedhiou, I., Ramírez-Tobías, H.M., Fortanelli-Martínez, J. & Flores-Ramírez, R. (2022). Maize Intercropping in the Traditional "Milpa" System. Physiological, Morphological, and Agronomical Parameters under Induced Warming: Evidence of related Effect of Climate Change in San Luis Potosí (Mexico). *Life*, 12, 1589. <https://doi.org/10.3390/life12101589>
- Diego-Flores, P., Padilla-Cortes, E., Martínez-Martínez, L., Carrillo-Rodríguez, J.C. y Chavez-Servia, J.L. (2023). Variación fenotípica entre poblaciones precoces de maíz nativo de Oaxaca. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 10(2), 106-117. <https://doi.org/10.60158/rma.v10i2.406>.
- Frutos E., Galindo, M.P. & Leiva, V. (2014). An interactive biplot implementation in R for modeling genotype-by-environment interaction. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 28, 1629-1641. <https://doi.org/10.1007/s00477-013-0821-z>
- Hellin, J., Bellon, M.R., & Hearne, S.J. (2014). Maize landraces and adaptation to climate change in Mexico. *Journal of Crop Improvement*, 28(4), 484-501. <https://doi.org/10.1080/15427528.2014.921800>.
- Ledesma-Ramírez, L., Solís-Moya, E., Suaste-Franco, M.P., Rodríguez-Caracheo, J.F. y Cruz-Gonzalez, M.L. (2012). Análisis GGE BILOT del rendimiento de trigo (*Triticum* spp.) con riego normal y restringido en El Bajío, México. *Agrociencia*, 46(2), 119-131.
- Luna, F.M. y Gutiérrez, S.J.R. (2000). Investigación fisiotécnica de maíz de temporal en la región alta del Norte de México. *Revista Fitotecnía Mexicana*, 23, 195-210. <https://doi.org/10.35196/rfm.2000.2.195>.
- Martínez-Sánchez, J., Espinosa-Paz, N. y Villegas-Aparicio, Y. (2016). Interacción genotipo-ambiente en poblaciones de maíz nativo de Chiapas. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 3(1), 38-48.
- Martínez-Sánchez, J., Espinosa-Paz, N. y Cadena-Iñiguez, P. (2017). Caracterización morfológica en poblaciones de maíz nativo (*Zea mays* L.) en Chiapas, México. *Agroproductividad*, 10(9), 26-33. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/186>.
- Martínez-Sánchez, J., Espinosa-Paz, N., Ramírez-Córdoba, A.L., Camas-Gómez, R. y Villegas-Aparicio, Y. (2018). Expresión fenotípica y estabilidad en poblaciones de maíz nativo de Chiapas. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 5(1), 1-11.
- Muñoz, O. A. (2003). *Centli maíz*. Colegio de Posgraduados. Montecillo. Estado de México. 211 p.
- Ortega-Corona, A., Guerrero-Herrera, M.J. y Preciado-Ortiz, R.E. (2013). *Diversidad y distribución del maíz nativo y sus parientes silvestres en México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Libro Técnico. Núm 7. 250 p.
- Pacheco, A., Vargas, M., Alvarado, G., Rodríguez, F., Crossa, J. & Burgueño, J. (2015). "GEA-R (*Genotype x Environment Analysis with R for Windows*) Version 2.0", CIMMYT Research Data & Software Repository Network, VI6 <http://hdl.handle.net/11529/10203>
- Pecina-Martínez, A.J., Mendoza-Castillo, M.C., López-Santillán, J.A., Castillo-González, F. y Ortiz-Cereceres, J. (2011). Rendimiento de grano y sus componentes en maíces nativos de Tamaulipas evaluados en ambientes contrastantes. *Revista Fitotecnía Mexicana*, 34(2), 85-92.
- Ramírez, C. A. (2013). Selección de maíces nativos de ciclo corto como estrategia frente al cambio climático en Michoacán. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(2), 7-21.

- Ramírez-Díaz, J.L., Ledesma-Miramontes, A., Gómez-Montiel, N.O., Vidal-Martínez, V.A., Gómez-Montiel, N.O., Ruíz-Corral, J.A., Velázquez-Cardelas, G.A., Ron-Parra, J., Salinas-Moreno, Y. y Nájera-Calvo, L.A. (2015). Selección de maíces nativos como donadores de características agronómicas útiles en híbridos comerciales. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(2), 119-131.
- Sah, R.P., Chakraborty, M., Prasad, K., Pandit, M., Tudu, V.K., Chakravarty, M.K., Narayan, S.C., Rana, M. & Moha, D. (2020). Impact of water deficit stress in maize: phenology and yield components. *Scientific Reports*, 10, 2044. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59689-7>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023). *Cierre de la producción agrícola en México 2023*. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Turrent-Fernández, A., Espinosa-Calderón, A., Turrent-Thompson, C. y Mejía-Andrade, H. (2016). Cambio climático y algunas estrategias agrícolas para fortalecer la seguridad alimentaria de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), ME:1717-39. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i7.165>
- WeatherData. (2022). *Base de datos de precipitación de San Luis Potosí durante el año 2022*. <https://ram-n.github.io/weatherData>.
- Yan, W. and Tinker, N.A. (2006). Biplot analysis of multi-environmental trial data: Principles and applications. *Canadian Journal of Plant Sciences*, 86, 623-645. <https://doi.org/10.4141/P05-169>

IDENTIFICACIÓN DEL GEN ANTIFÚNGICO *TI14-kD* EN TEOCINTLES Y MAÍZ, Y SU RELACIÓN CON *Aspergillus*

IDENTIFICATION OF THE ANTIFUNGAL GENE *TI14-kD* IN TEOCINTLES AND MAIZE, AND ITS RELATIONSHIP WITH *Aspergillus*

¹José Luis Hernández-Morales^{ORCID}, ¹María del Socorro Pina-Canseco^{ORCID}, ²Nora Hilda Rosas-Murrieta^{ORCID},
³Marco Antonio Sánchez-Medina^{ORCID}, ³Patricia Vásquez-Luis^{ORCID}, ³Iván Antonio García-Montalvo^{ORCID}, ³Alma Dolores Pérez-Santiago^{ORCID}

¹ UNAM-UABJO, Centro de Investigación, Facultad de Medicina, , Avenida San Felipe del Agua (269 km), C.P. 68020 Oaxaca. México. ²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Laboratorio de Bioquímica y Biología Molecular. 4 Sur 104 Centro Histórico, C.P. 72000. Puebla. México. ³Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Oaxaca. Avenida Ing. Víctor Bravo Ahuja No. 125 Esquina Calzada Tecnológico, C.P. 68030, Oaxaca. México. [§]Autor de correspondencia: (alma.ps@oaxaca.tecnm.mx).

RESUMEN

Los teocintles son morfológica y genéticamente parecidos al maíz. Una de las enfermedades que afecta gravemente a este cultivo es causada por especies del género *Aspergillus*, hongos productores de aflatoxinas. Estudios proteómicos y genéticos realizados en híbridos comerciales y líneas endogámicas de maíz permitió el descubrimiento de la resistencia natural del maíz a esta infección fúngica, sin embargo, en los teocintles no se han realizado estudios similares; en este sentido, el objetivo del trabajo fue identificar y analizar *in silico* el gen *TI14-kD* de maíz y los teocintles: *Zea mays* ssp. *parviglumis*, *Zea diploperennis* y *Zea luxurians*, y su relación con el hongo fitopatógeno *Aspergillus*. Para la identificación del gen se diseñaron oligonucleótidos específicos y mediante la reacción en cadena de la polimerasa se obtuvieron los amplicones en maíz cónico, *Zea diploperennis* y *Zea luxurians*. Las secuencias nucleotídicas obtenidas por secuenciación sanger se depositaron en un banco de genes. Las secuencias se compararon en la base de datos del NCBI con otras secuencias TI que fueron altamente similares. Por su parte, el análisis *in silico* indicó dos cambios de aminoácidos en la secuencia de maíz y una en *Zea diploperennis*.

Palabras clave: inhibidor de la tripsina, PCR, *Zea diploperennis*, *Zea luxurians*, *Zea mays* ssp. *parviglumis*.

ABSTRACT

Teosintes are morphologically and genetically similar to corn. One of the diseases that seriously affects this crop is caused by species of the genus *Aspergillus*, aflatoxin-producing fungi. Proteomic and genetic studies carried out on commercial hybrids and inbred lines of corn allowed the discovery of the natural resistance of corn to this fungal infection, however, similar studies have not been carried out on teosintes; in this sense, the objective of the work was to identify and analyze *in silico* the *TI14-kD* gene of corn and the teosintes: *Zea mays* ssp. *parviglumis*, *Zea diploperennis* and *Zea luxurians*, and its relationship with the phytopathogenic fungus *Aspergillus*. Specific oligonucleotides were designed to identify the gene and amplicons were obtained by polymerase chain reaction in cone corn, *Zea diploperennis* and *Zea luxurians*. The nucleotide sequences obtained by sanger sequencing were deposited in a gene bank. The sequences were compared in the NCBI database with other TI sequences that were highly similar. *In silico* analysis indicated two amino acid changes in the maize sequence and one in *Zea diploperennis*.

Index words: trypsin inhibitor, PCR, *Zea diploperennis*, *Zea luxurians*, *Zea mays* ssp. *parviglumis*.

INTRODUCCIÓN

Los teocintles son un conjunto de pastos con ciclo de maduración anual o perennes; morfológica y genéticamente muy parecidos al maíz (CONABIO, 2021). Estudios genéticos han revelado que el teocintle de la cuenca del río Balsas, México; *Zea mays* ssp. *parviglumis*, es el progenitor directo del maíz y el resto de los teocintles son sus parientes silvestres (Matsuoka et al., 2002), los cuales representan un importante banco de genes para el mejoramiento del maíz (CONABIO, 2021) dado que éste ha perdido entre 4 % y 6 % de su genoma aproximadamente (Wright et al., 2005). Este grupo de plantas se encuentra en áreas tropicales y subtropicales de México, Guatemala, Costa Rica, Honduras, El Salvador y Nicaragua, creciendo en una variedad de condiciones ecológicas, desde regiones cálidas y húmedas, hasta valles templados y secos (Sánchez-González et al., 2018).

El maíz es uno de los cultivos más importantes para la alimentación humana, sin embargo, el cambio climático ha planteado nuevos retos en el cultivo, entre ellos, la resistencia a enfermedades (Ramos-Girona et al., 2020), si bien, no se había considerado que en el proceso de domesticación hubo reducción genómica en el cultivo, actualmente los mejoradores y genetistas de maíz tienen en consideración esta reducción para el mejoramiento y adaptación del cultivo a las condiciones climáticas venideras (Chen et al., 2020; Flint-García, 2013). Por su parte, los teocintles son objeto de estudio en la incorporación de alelos de interés agronómico para el maíz, entre ellos, de resistencia a infección fúngica (Cui et al., 2024; Wang et al., 2022; Sahoo et al., 2021).

Los hongos fitopatógenos que atacan al maíz tanto en campo como en almacén pertenecen a los géneros *Aspergillus*, *Fusarium* y *Penicillium*

(Montes et al., 2009); del género *Aspergillus*, las dos especies más importantes son: *Aspergillus flavus* y *A. parasiticus*, hongos productores de micotoxinas llamadas aflatoxinas que afectan la salud humana y animal (Chang, 2009).

El descubrimiento de la resistencia natural del maíz a la pudrición de la mazorca, la infección del grano y la contaminación por aflatoxinas causadas por *Aspergillus flavus* permitió el estudio a nivel proteómico en líneas resistentes y susceptibles al fitopatógeno, comparando perfiles proteínicos y secuenciando las proteínas sobreexpresadas o de perfil único (Chen et al., 2004; Chen et al., 2002). Entre las proteínas identificadas se encuentra el Inhibidor de la Tripsina de 14 kilodaltones (TI-14 kDa), una proteína antifúngica presente en concentraciones relativamente altas en granos de maíz resistente a la infección por *Aspergillus flavus* y ausente o en baja concentración en líneas susceptibles (Chen et al., 1998).

Actualmente, se analizan los niveles de expresión génica en maíz como una herramienta para identificar otros genes relacionados a la resistencia a la infección y contaminación de aflatoxinas por *Aspergillus* (Baisakh et al., 2023; Warburton et al., 2022; Castano-Duque et al., 2021). El estudio de genes de resistencia a la infección por este fitopatógeno se ha desarrollado principalmente en líneas endogámicas de maíz (Han et al. 2020; Warburton et al., 2015; Luo et al., 2011), mientras que los trabajos en razas nativas de México son escasos (Ortega-Beltran et al., 2021; Ortega-Beltran & Cotty, 2020). En Oaxaca se han estudiado algunos genes resistencia a este fitopatógeno en diferentes razas nativas (Vásquez-Luis et al., 2023; Varapizuela-Sánchez et al., 2022). A diferencia del maíz, los estudios genéticos en teocintles se han enfocado a la historia evolutiva de genes quitinasa (Tiffin, 2004), genes de resistencia a la mancha gris de la hoja de maíz (Zhang et al., 2017), resistencia a *Fusarium verticillioides* (Feng et al., 2022) y ataque de herbívoros (Han et al., 2021).

El papel del inhibidor de la tripsina en maíz, trigo y otros cereales ha mostrado un gran

potencial de aplicaciones en la agricultura (Chiu et al., 2022; Mishra et al., 2020). Por lo anterior, el estudio de este y otros genes relacionados con la resistencia a la infección por *Aspergillus* en los teocintles puede favorecer los programas de mejoramiento. Por tal motivo, el objetivo del trabajo fue identificar y analizar *in silico* el gen *TI 14-kD* de maíz y los teocintles: *Zea mays* ssp. *parviglumis*, *Zea diploperennis* y *Zea luxurians*, y su relación con el hongo fitopatógeno *Aspergillus*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención del material vegetal

Las especies de teocintles analizadas fueron: *Zea mays* ssp. *parviglumis*, *Zea diploperennis* y *Zea luxurians*. El maíz cónico fue colectado en la comunidad de Monte Frío, perteneciente al municipio de San Juan Tamazola, Nochistlán, Oaxaca, México.

Extracción de ADN genómico

Para la obtención del ADN se desinfectaron 10 semillas de cada teocintle y maíz con etanol al 70 % y se enjuagaron por tres ocasiones con agua destilada estéril, los granos desinfectados se colocaron en cámaras húmedas, posteriormente se incubaron a una temperatura de 28 °C. Después de 8 días de germinación se extrajo el ADN genómico de los coleóptilos siguiendo el método propuesto por Keb-Llanes et al. (2002). La integridad de ADN extraído se verificó en gel de agarosa al 1 % en buffer Tris-Acetato-EDTA (TAE), la cantidad y calidad del ADN se verificó por espectrofotometría (Thermo Scientific, Nano Drop 2000).

Diseño de oligonucleótido

La búsqueda de las secuencias nucleotídicas del gen *TI 14-kD* de maíz se realizó en la base de datos del GeneBank, administrada por el National Center for Biotechnology Information (NCBI). El alineamiento múltiple de las secuencias EU976659, EU976629, NM_001111591 y EU976428 mostró los sitios conservados apropiados para el diseño de los oligonucleótidos, los cuales se diseñaron con el software en línea

Primer3 (<https://bioinfo.ut.ee/primer3-0.4.0/>). El juego de oligonucleótidos elegido fue *TI-14kD* (Forward; 5' ACCAAGAAATCCATCGAGAGGC 3' y Reverse; 5' ATTGTTCCGGATGAACGATCC 3'). Finalmente se enviaron a sintetizar a la empresa T4 Oligo.

Reacción en cadena de la polimerasa

Para la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) se utilizó un kit comercial (goTaq® Green Master Mix 2X, Promega). Los oligonucleótidos fueron ajustados a una concentración final de 2 μM μL^{-1} , mientras que el ADN genómico se ajustó a una concentración final de 6 ng μL^{-1} . El termociclador (Techne® Prime) se programó de la siguiente manera: desnaturalización inicial de 94 °C por 5 min, 30 ciclos; con desnaturalización de 94 °C por 2 min, alineamiento de 58 °C por 30 s y extensión a 72 °C por 43 s; extensión final a 72 °C por 5 min y refrigeración temporal a 4°C. Como control positivo de la PCR se utilizó el gen *MAcI* (5' GTGACAATGGCACTGGAATG 3' y 5' GACCTGACCATCAGGCATCT 3') (Baker et al., 2009). Los productos de PCR se cargaron en un gel de agarosa al 2 % en buffer TAE.

Purificación de productos de PCR

La purificación de los productos de PCR se realizó por gel de agarosa al 1 % en buffer TAE, utilizando el kit GeneJET Gel Extraction Kit (Thermo Scientific). El amplicón purificado se cuantificó por NanoDrop y se analizó en gel de agarosa, posteriormente se almacenó a -20 °C hasta su envío.

Secuenciación y análisis *in silico* de secuencias

Los amplicones del gen *TI 14-kD* de *Zea diploperennis* y maíz fueron enviados al Instituto de Biotecnología (IBt)–UNAM para su secuenciación mediante el método de Sanger. En el análisis *in silico* de las secuencias se utilizó la herramienta BLAST y needle (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi> y https://www.ebi.ac.uk/Tools/psa/emboss_needle/) para cotejar las secuencias recuperadas con la herramienta básica de búsqueda de alineación local

(BLAST), se consideraron en el análisis las secuencias con un valor E de 0.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Extracción de ADN genómico

El rendimiento en concentración de ADN genómico de los teocintles y el maíz se encontró entre 200 a 500 ng μL^{-1} mientras que el índice de pureza A260/280 se encontró en el rango

generalmente aceptable de 1.8 -2.0. En la **Tabla I** se puede apreciar la concentración y la pureza de cada una de las muestras obtenidas.

La integridad del ADN se verificó en gel de agarosa al 1 % en buffer TAE. En la **Figura I**, carril 1 se observa la integridad del ADN de la muestra de maíz (M), en el carril 2, la muestra de *ssp. parviglumis* (P), en el carril 3, la muestra de *Zea diploperennis* (D), en el carril 4, la muestra de *Zea luxurians* (L).

Tabla I. Concentración de ADN genómico de maíz y teocintles.

No. Muestra	Especie	Concentración (ng μL^{-1})	A260/280
1	<i>Zea mays</i> ssp. <i>mays</i> (maíz cónico)	367.4	1.90
2	<i>Zea mays</i> ssp. <i>parviglumis</i>	494.1	1.87
3	<i>Zea diploperennis</i>	290.0	1.90
4	<i>Zea luxurians</i>	293.1	1.98

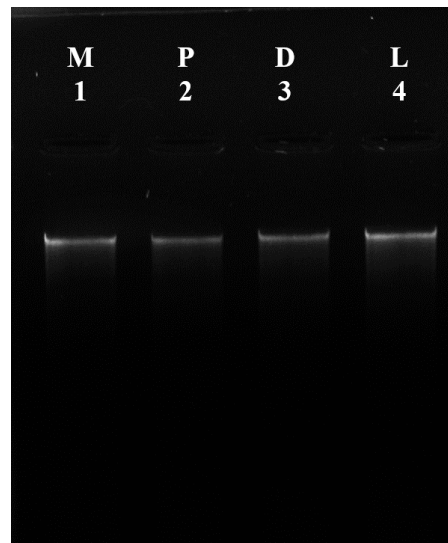


Figura I. Integridad de ADN genómico. ADNg de maíz (M), *ssp. parviglumis* (P), *Zea diploperennis* (D) y *Zea luxurians* (L) en gel de agarosa al 1 %.

Reacción en cadena de la polimerasa (PCR)

En la **Figura 2** se observa el marcador de peso molecular (MP) (100 bp DNA Ladder, Promega) en el primer carril, seguido del amplicón de *ssp. parviglumis*, *Zea diploperennis* y *Zea luxurians* en los carriles 3-5 respectivamente, en los carriles 6 y 7 se observan los amplicones de los controles negativo y positivo (gen de actina *MAcI*). El tamaño de los amplicones de PCR del maíz, *Zea diploperennis* y *Zea luxurians* corresponde con el tamaño esperado de 617 pb aproximadamente, mientras que en *ssp. parviglumis* el juego de oligonucleótidos no favoreció la amplificación del gen.

Secuenciación y análisis *in-silico* de secuencias

Los amplicones purificados de maíz y *Zea diploperennis* fueron secuenciados, los nombres asignados para las secuencias fueron: TI-I4M para el maíz cónico y para *Zea diploperennis* fue TI-I4D. Las dos secuencias nucleotídicas obtenidas fueron depositadas en el NCBI: el número de acceso asignado para TI-I4M fue MZ458531 y para TI-I4D fue MZ458532.

Adicionalmente, las secuencias fueron alineadas por separado en la base de información NCBI utilizando la herramienta BLAST. MZ458531

presenta una identidad del 99.65 %, cobertura de 100 % y valor E= 0.0 con secuencias de Maíz con número de acceso BT087963, DQ244553, BT016288, AY105998 y NM_001111591.1; mientras que con las secuencias EU976659, EU976629, NM_001111591 y EU976428 el porcentaje de identidad fue de 99.47 %. Por su parte, con la secuencia X54064.1 comparte una identidad del 99.29 %, la cobertura es del 100 % y valor E = 0.0.

Respecto a secuencias de teocintles, la *ssp. parviglumis* presentó una identidad del 99.65 % - 93.85 %, una cobertura de 100 % y un valor E= 0.0 con secuencias de los siguientes números de acceso; DQ147254, DQ147268, EU724290..EU724364, dichas secuencias están anotadas como Inhibidor de la Tripsina (*TI14-kD*) e Inhibidor del Factor Hageman (*hag*). Con la secuencia DQ147270 de *Zea diploperennis* presentó una identidad del 94.02 %, cobertura de 100 % y un valor E = 0.0, sin embargo, con las secuencias DQ147271, DQ147273, EU724350 y DQ147276 compartieron una identidad del 98.75-98.54 %, cobertura de 100 % y valor E= 0.0, registradas como Inhibidor del Factor Hageman (*hag*).

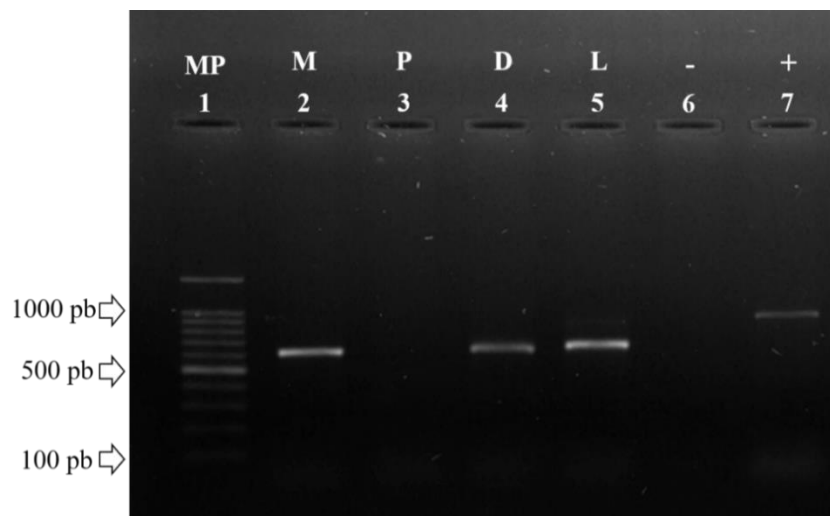


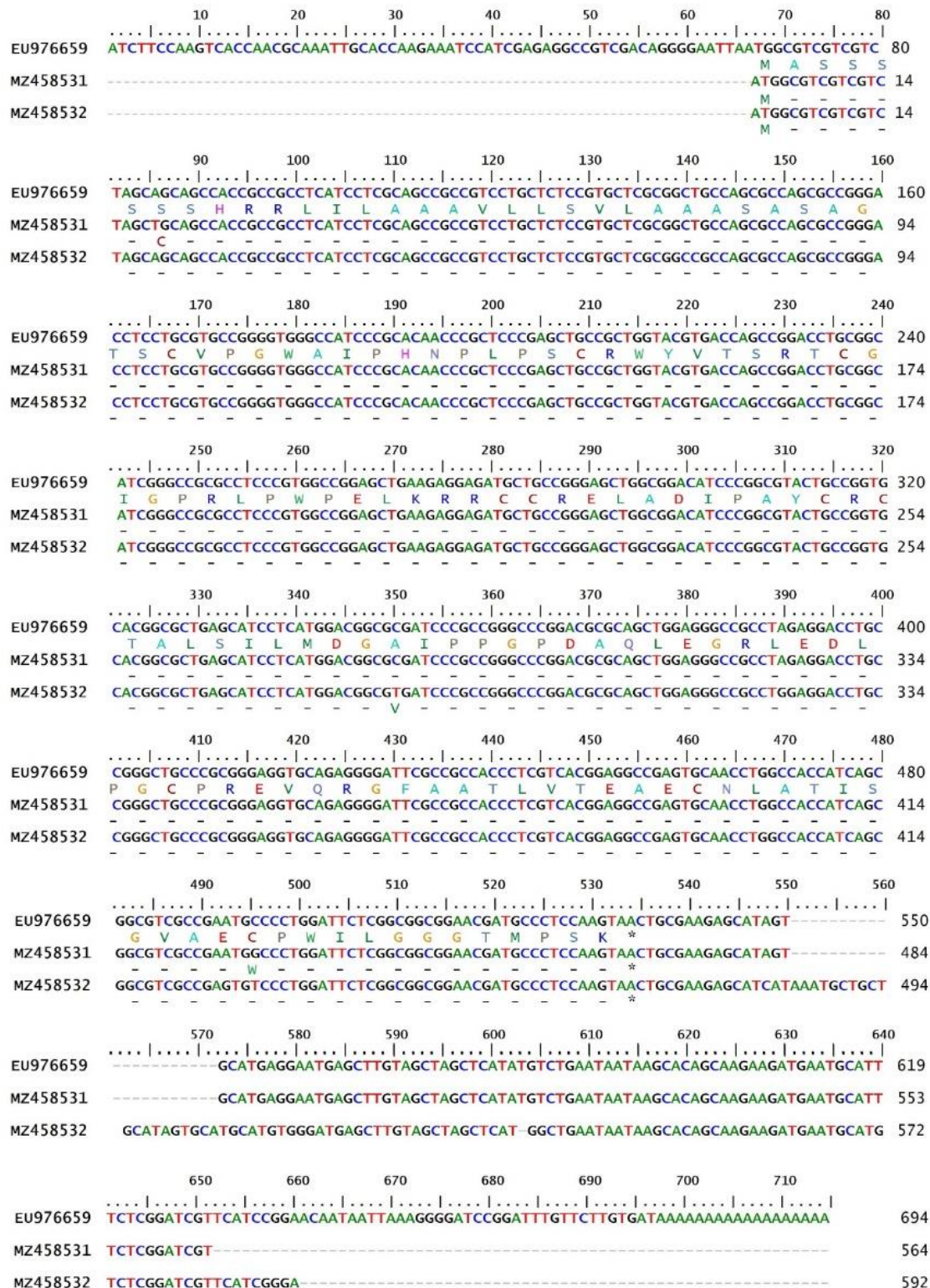
Figura 2. Amplificación del gen *TI14-kD* en maíz y teocintles. En el carril 1 se encuentra el marcador de peso (MP); carril 2, amplicón de maíz, carril 3 al 5: amplicones de *ssp. parviglumis*, *Zea diploperennis* y *Zea luxurians* respectivamente; carril 6 y 7 control negativo y positivo.

La secuencia MZ458532 se alineó con el 94.76 – 94.44 % de identidad con las secuencias de maíz; EU724353, EU724353, EU976629, BT016288, NM_001111591, AY105998 y EU976428, la cobertura fue del 100 % y valor E = 0.0. Con secuencias de *Zea diploperennis*, compartió una identidad del 98.99 – 97.69 %, una cobertura del 100 % y un valor E = 0.0, mientras que con la secuencia DQ147273 compartió una identidad de 99.00 % y una cobertura de 97.84 %. Con respecto a secuencias de spp. *parviglumis*, DQ147254..DQ147268, EU724290..EU724364 tiene una identidad del 97.98-94.11 %, una cobertura de 100 % y un valor E = 0.0.

También se realizó un alineamiento múltiple de las secuencias nucleotídicas de maíz cónico (MZ458531), *Zea diploperennis* (MZ458532) y la secuencia de referencia de maíz (EU976659.1) con el programa BioEdit, la traducción a aminoácidos de la región codificante se realizó al código de una letra. Se puede observar que las secuencias MZ458531 y MZ458532 tienen una longitud parcial de nucleótidos de 569 y 592 pb respectivamente, mientras que la secuencia nucleotídica completa del gen de referencia tiene una longitud de 694 pb (**Figura 3**). La secuencia de referencia contiene un único exón al igual que las secuencias MZ458531 y MZ458532. En la secuencia de maíz cónico se observaron dos cambios en las secuencias de aminoácidos; en el aminoácido 7, cisteína (C) por una serina (S) y en el aminoácido 143, triptófano (W) por una citocina (C); mientras que en *Zea diploperennis* se observó un cambio en el aminoácido 95, valina (V) por adenina (A) respecto a la secuencia de referencia.

Las plantas utilizan a los inhibidores de las proteasas entre ellas el inhibidor de la tripsina para su protección contra depredadores e infecciones causadas por fitopatógenos, (Jain et al., 2022; Gutiérrez-Gongora & Geddes-McAlister, 2021; Pesoti et al., 2015). La proteína TI de 14 kDa de maíz es una proteína bifuncional reportada para la inhibición *in vitro* de *Aspergillus flavus*, causante de la pudrición de mazorca y contaminación de aflatoxinas en granos (Behnke et al., 1998; Chen et al., 1998); la sobreexpresión de *TI* 14-kDa en *Escherichia coli* confirmó la inhibición del crecimiento de hifas y la germinación de conidios en *A. flavus* y otros hongos productores de micotoxinas (Baker et al., 2009; Chen et al., 1999). En trigo, también se ha registrado inhibición *in vitro* contra varios hongos, entre ellos *Botrytis cinerea* (Xie et al., 2021; Chilosi et al., 2000), además de otros cereales (Sagu et al., 2021), en leguminosas (García et al., 2004;), cacao (do Amaral et al., 2022) y papa (Wang et al., 2023). Estas proteínas bifuncionales tienen un importante papel fisiológico en la regulación de la α -amilasa endógena (Hellinger & Gruber, 2019), tienen además una alta especificidad por las amilasas de insectos (Divekar et al., 2022).

En este trabajo identificamos el gen *TI* 14-kD, en maíz cónico y en los teocintles: *Zea diploperennis* y *Zea luxurians*. Este gen es de interés en la resistencia a la infección por *Aspergillus* (Brown et al., 2010), el cual afecta la producción del cultivo, la salud humana y animal por la contaminación de aflatoxinas en el grano (Udomkun et al., 2017). Hasta el momento no se han reportados trabajos sobre el gen *TI* 14-kD o sobre la proteína en razas nativas ni en teocintles, ya que las investigaciones se han desarrollado en líneas endogámicas no mexicanas.



El análisis *in silico* tiene múltiples aplicaciones para identificar un gran número de moléculas, compuestos y estructuras génicas en plantas (Riyaphan et al., 2021; Jiang et al., 2020). El análisis de nuestras secuencias nucleotídicas evidenció el único exón característico del gen *TI* en maíz y *Zea diploperennis*. Por otra parte, el análisis de la traducción de las secuencias nucleotídicas a aminoácidas mostró dos cambios de aminoácidos en la secuencia de maíz y uno en *Zea diploperennis* respecto a la secuencia de referencia. Está documentado que la sustitución del residuo 34 en el inhibidor de la tripsina anula la actividad inhibidora (Hamad et al., 2017), sin embargo, se desconoce el efecto biológico de los cambios de aminoácidos en nuestras secuencias.

Se ha planteado que, durante la domesticación, el maíz perdió características agronómicas importantes (Wright et al., 2005) que podrían favorecer la adaptación al cambio climático (Pourkheirandish et al., 2020; Ortiz, 2015) como el trigo y el arroz cuyas características agronómicas deseables se han recuperado a partir de sus progenitores silvestres (Cakmak et al., 2004). Por su parte, los teocintles pueden servir como donadores de genes de resistencia a diversos tipos de estrés (Sahoo et al., 2021; Adhikari et al., 2021), dentro de estos, el gen *TI* 14-kD que juega un papel importante en la defensa ante la infección causada por *Aspergillus*.

CONCLUSIONES

Se identificó el gen *TI* 14 kD en *Zea luxurians*, maíz cónico y *Zea diploperennis*; los dos últimos se secuenciaron y depositaron en el banco de genes del NCBI. El gen del inhibidor de la tripsina se encuentra conservado en el maíz y en *Zea diploperennis*, la predicción de las secuencias aminoácidas mostró pocos cambios en ambas secuencias, sin embargo, se desconoce si estos cambios afectan la actividad de la proteína. Evaluar los niveles de expresión génica permitirá comprender la importancia de este gen en la defensa natural de los teocintles ante la infección por *Aspergillus*. El cambio climático plantea

nuevos retos en la producción del maíz y en la interacción cultivo-fitopatógeno, por lo cual, los teocintles son un recurso genético para su mejoramiento, como se ha realizado en otros cultivos con sus parientes silvestres.

AGRADECIMIENTOS

Al M.C. Flavio Aragón Cuevas, Investigador en Recursos Genéticos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP-Oaxaca, México) por proporcionar las semillas de los teocintles que se utilizaron en este estudio.

REFERENCIAS

- Adhikari, S., Joshi, A., Kumar, A., & Singh, N. K. (2021). Diversification of maize (*Zea mays* L.) through teosinte (*Zea mays* subsp. *parviglumis* Itis & Doebley) allelic. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 68(7), 2983–2995. <https://doi.org/10.1007/s10722-021-01170-z>
- Baisakh, N., Da Silva, E.A., Pradhan, A. K. & Rajasekaran, K. (2023). Comprehensive meta-analysis of QTL and gene expression studies identify candidate genes associated with *Aspergillus flavus* resistance in maize. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1214907>
- Baker, R.L., Brown, R.L., Chen, Z.-Y., Cleveland, T.E. & Fakhoury, A.M. (2009). A maize Trypsin Inhibitor (ZmTIp) with limited activity against *Aspergillus flavus*. *Journal of Food Protection*, 72(1), 185–188. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-72.1.185>
- Behnke, C.A., Yee, V.C., Trong, I.L., Pedersen, L.C., Stenkamp, R.E., Kim, S.-S., Reeck, G.R. & Teller, D.C. (1998). Structural determinants of the bifunctional corn Hageman Factor Inhibitor: X-ray crystal structure at 1.95 Å resolution. *Biochemistry*, 37(44), 15277–15288. <https://doi.org/10.1021/bi9812266>

- Brown, R. L., Chen, Z.-Y., Warburton, M., Luo, M., Menkir, A., Fakhoury, A., & Bhatnagar, D. (2010). Discovery and Characterization of Proteins Associated with Aflatoxin-Resistance: Evaluating Their Potential as Breeding Markers. *Toxins*, 2(4), 919–933. <https://doi.org/10.3390/toxins2040919>
- Cakmak, I., Torun, A., Millet, E., Feldman, M., Fahima, T., Korol, A., Nevo, E., Braun, H. J., & Özkan, H. (2004). *Triticum dicoccoides*: An important genetic resource for increasing zinc and iron concentration in modern cultivated wheat. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50(7), 1047–1054. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408573>
- Castano-Duque, L., Gilbert, M.K., Mack, B.M., Lebar, M.D., Carter-Wientjes, C.H., Sickler, C.M., Cary, J.W. & Rajasekaran, K. (2021). Flavonoids modulate the accumulation of toxins from *Aspergillus flavus* in maize kernels. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.761446>
- Chang, P.-K. (2009). Aflatoxin Biosynthesis and Sclerotial Development in *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus*. In: *Mycotoxins in Food, Feed and Bioweapons*, 77–92. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00725-5_6
- Chen, Q., Samayoa, L. F., Yang, C. J., Bradbury, P. J., Olukolu, B. A., Neumeyer, M. A., Romay, M. C., Sun, Q., Lorant, A., Buckler, E. S., Ross-Ibarra, J., Holland, J. B., & Doebley, J. F. (2020). The genetic architecture of the maize progenitor, teosinte, and how it was altered during maize domestication. *PLOS Genetics*, 16(5), e1008791. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1008791>
- Chen, Z.-Y., Brown, R. L., Damann, K. E., & Cleveland, T. E. (2004). Identification of a Maize Kernel Stress-Related Protein and Its Effect on Aflatoxin Accumulation. *Phytopathology*, 94(9), 938–945. <https://doi.org/10.1094/phyto.2004.94.9.938>
- Chen, Z.-Y., Brown, R. L., Damann, K. E., & Cleveland, T. E. (2002). Identification of Unique or Elevated Levels of Kernel Proteins in Aflatoxin-Resistant Maize Genotypes Through Proteome Analysis. *Phytopathology*, 92(10), 1084–1094. <https://doi.org/10.1094/phyto.2002.92.10.1084>
- Chen, Z.-Y., Brown, R. L., Lax, A. R., Guo, B. Z., Cleveland, T. E., & Russin, J. S. (1998). Resistance to *Aspergillus flavus* in Corn Kernels Is Associated with a 14-kDa Protein. *Phytopathology*, 88(4), 276–281. <https://doi.org/10.1094/phyto.1998.88.4.276>
- Chen, Z.Y., Brown, R.L., Lax, A.R., Cleveland, T.E. & Russin, J. S. (1999). Inhibition of plant-pathogenic fungi by a corn trypsin inhibitor overexpressed in *Escherichia coli*. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(3), 1320–1324. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.3.1320-1324.1999>
- Chilosi, G., Caruso, C., Caporale, C., Leonardi, L., Bertini, L., Buzi, A., Nobile, M., Magro, P. & Buonocore, V. (2000). Antifungal activity of a Bowman-Birk-type Trypsin Inhibitor from wheat Kernel. *Journal of Phytopathology*, 148(7–8), 477–481. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0434.2000.00527.x>
- Chiu, T., Poucet, T. & Li, Y. (2022). The potential of plant proteins as antifungal agents for agricultural applications. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 7(4), 1075–1083. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2022.06.009>
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2021). Teocintles. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/teocintles>
- Cui, Y., Xiao, X., Wang, M., Zhu, M., Yuyama, N., Zheng, J., Xiong, C., Liu, J., Wang, S., Yang, Y., Chen, J., & Cai, H. (2024). The construction of a maize-teosinte introgression population and quantitative trait loci analysis

- of their 21 agronomic traits. *Plant Science*, 348, 112226. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2024.112226>
- Divekar, P.A., Rani, V., Majumder, S., Karkute, S.G., Molla, K.A., Pandey, K.K., Behera, T.K. & Govindharaj, G.P.P. (2022). Protease inhibitors: an induced plant defense mechanism against herbivores. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(10), 6057–6073. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10767-2>
- do Amaral, M., Freitas, A.C.O., Santos, A.S., dos Santos, E.C., Ferreira, M.M., da Silva Gesteira, A., Gramacho, K.P., Marinho-Prado, J.S. & Pirovani, C.P. (2022). TcTI, a Kunitz-type trypsin inhibitor from cocoa associated with defense against pathogens. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04700-y>
- Feng, X., Xiong, H., Zheng, D., Xin, X., Zhang, X., Wang, Q., ... & Lu, Y. (2022). Identification of *Fusarium verticillioides* resistance alleles in three maize populations with teosinte gene introgression. *Frontiers in Plant Science*, 13, 942397. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.942397>
- Flint-Garcia, S. A. (2013). Genetics and Consequences of Crop Domestication. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(35), 8267–8276. <https://doi.org/10.1021/jf305511d>
- García, V.A., Freire, M. das G.M., Novello, J.C., Marangoni, S. & Macedo, M.L.R. (2004). Trypsin Inhibitor from *Poecilanthe parviflora* Seeds: Purification, characterization, and activity against pest proteases. *The Protein Journal*, 23(5), 343–350. <https://doi.org/10.1023/b:jopc.0000032654.67733.d5>
- Gutiérrez-Gongora, D. & Geddes-McAlister, J. (2021). From naturally-sourced protease inhibitors to new treatments for fungal infections. *Journal of Fungi*, 7(12), 1016. <https://doi.org/10.3390/jof7121016>
- Hamad, B.K., Pathak, M., Manna, R., Fischer, P.M., Emsley, J. & Dekker, L.V. (2017). Assessment of the protein interaction between coagulation factor XII and corn trypsin inhibitor by molecular docking and biochemical validation. *Journal of Thrombosis and Haemostasis*, 15(9), 1818–1828. <https://doi.org/10.1111/jth.13773>
- Han, G., Li, C., Xiang, F., Zhao, Q., Zhao, Y., Cai, R., Cheng, B., Wang, X. & Tao, F. (2020). Genome-wide association study leads to novel genetic insights into resistance to *Aspergillus flavus* in maize kernels. *BMC Plant Biology*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02404-5>
- Han, Y., Taylor, E.B. & Luthe, D. (2021). Maize Endochitinase expression in response to fall armyworm herbivory. *Journal of Chemical Ecology*, 47(7), 689–706. <https://doi.org/10.1007/s10886-021-01284-9>
- Hellinger, R. & Gruber, C. W. (2019). Peptide-based protease inhibitors from plants. *Drug Discovery Today*, 24(9), 1877–1889. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2019.05.026>
- Jain, M., Amera, G.M., Muthukumaran, J. & Singh, A.K. (2022). Insights into biological role of plant defense proteins: A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 40, 102293. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102293>
- Jiang, C., Wang, L., Shao, J., Jing, H., Ye, X., Jiang, C., Wang, H. & Ma, C. (2020). Screening and identifying of α -amylase inhibitors from medicine food homology plants: Insights from computational analysis and experimental studies. *Journal of Food Biochemistry*, 44(12). <https://doi.org/10.1111/jfbc.13536>
- Keb-Llanes, M., González, G., Chi-Manzanero, B., & Infante, D. (2002). A rapid and simple method for small-scale DNA extraction in *Agavaceae* and other tropical plants. *Plant Molecular Biology Reporter*, 20(3), 299–299. <https://doi.org/10.1007/bf02782465>
- Luo, M., Brown, R. L., Chen, Z.-Y., Menkir, A., Yu, J., & Bhatnagar, D. (2011). Transcriptional Profiles Uncover *Aspergillus*

- flavus*-Induced Resistance in Maize Kernels. *Toxins*, 3(7), 766–786. <https://doi.org/10.3390/toxins3070766>
- Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M.M., Sanchez G.J., Buckler, E. & Doebley, J. (2002). A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(9), 6080–6084.
- Mishra, U.N., Reddy, M.V. & Prasad, D.T. (2020). Plant serine protease inhibitor (SPI): A potent player with bactericidal, fungicidal, nematocidal and antiviral properties. *International Journal of Chemical Studies*, 8(1), 2985–2993. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1.at.8724>
- Montes, G. N., Reyes, M. C. A., Montes, R. N., & Cantu, A. M. A. (2009). Incidence of potentially toxigenic fungi in maize (*Zea mays* L.) grain used as food and animal feed. *CyTA - Journal of Food*, 7(2), 119–125. <https://doi.org/10.1080/19476330902940432>
- Ortega-Beltran, A. & Cotty, P.J. (2020). Influence of wounding and temperature on resistance of maize landraces from Mexico to aflatoxin contamination. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.572264>
- Ortega-Beltran, A., Jaime, R. & Cotty, P.J. (2021). Resistance of maize landraces from Mexico to aflatoxin contamination: influence of aflatoxin-producing fungi genotype and length of incubation. *European Journal of Plant Pathology*, 162(1), 237–246. <https://doi.org/10.1007/s10658-021-02385-7>
- Ortiz, R. (2015). *The Importance of Crop Wild Relatives, Diversity, and Genetic Potential for Adaptation to Abiotic Stress-Prone Environments*. Chapter 5, Wiley online library. 80–87 pp. <https://doi.org/10.1002/9781118854396.ch5>
- Pesoti, A.R., Oliveira, B.M.D., Oliveira, A.C.D., Pompeu, D.G., Gonçalves, D.B., Marangoni, S., ... & Granjeiro, P.A. (2015). Extraction, purification and characterization of inhibitor of trypsin from *Chenopodium quinoa* seeds. *Food Science and Technology*, 35, 588–597. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6655>
- Pourkheirandish, M., Golicz, A. A., Bhalla, P. L., & Singh, M. B. (2020). Global Role of Crop Genomics in the Face of Climate Change. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00922>
- Ramos-Girona, A. J., Marín Sillué, S., Molino Gahete, F., Vila Donat, P., & Sanchis Almenar, V. (2020). Las micotoxinas: el enemigo silencioso. *Arbor*, 196(795), 540. <https://doi.org/10.3989/arbor.2020.795n1004>
- Riyaphan, J., Pham, D.-C., Leong, M.K. & Weng, C.-F. (2021). *In silico* approaches to identify polyphenol compounds as α -Glucosidase and α -Amylase Inhibitors against Type-II Diabetes. *Biomolecules*, 11(12), 1877. <https://doi.org/10.3390/biom11121877>
- Sagu, S.T., Landgräber, E., Henkel, I.M., Huschek, G., Homann, T., Bußler, S., ... & Rawel, H. (2021). Effect of cereal α -amylase/trypsin inhibitors on developmental characteristics and abundance of digestive enzymes of mealworm larvae (*Tenebrio molitor* L.). *Insects*, 12(5), 454. <https://doi.org/10.3390/insects12050454>
- Sahoo, S., Adhikari, S., Joshi, A., & Singh, N. K. (2021). Use of Wild Progenitor Teosinte in Maize (*Zea mays* subsp. *mays*) Improvement: Present Status and Future Prospects. *Tropical Plant Biology*, 14(2), 156–179. <https://doi.org/10.1007/s12042-021-09288-1>
- Sánchez-González, J. de J., Ruiz Corral, J. A., García, G. M., Ojeda, G. R., Larios, L. D. la C., Holland, J. B., Medrano, R. M., & García Romero, G. E. (2018). Ecogeography of teosinte. *PLOS ONE*, 13(2), e0192676. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192676>
- Tiffin, P. (2004). Comparative evolutionary histories of chitinase genes in the genus *Zea* and family *Poaceae*. *Genetics*, 167(3), 1331–1340.

- <https://doi.org/10.1534/genetics.104.026856>
- Udomkun, P., Wiredu, A. N., Nagle, M., Müller, J., Vanlauwe, B., & Bandyopadhyay, R. (2017). Innovative technologies to manage aflatoxins in foods and feeds and the profitability of application – A review. *Food*, 76, 127-138. doi: 10.1016/j.foodcont.2017.01.008
- Varapizuela-Sánchez, C.F., Sánchez-Medina, M.A., Pina-Canseco, M.D.S., Rosas-Murrieta, N.H., Pérez-Santiago, A.D. & García-Montalvo, I.A. (2022). Glyoxalase I (GLX-I) analysis in native maize from Oaxaca, Mexico, infected with *Aspergillus flavus* in vitro. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Zulia*, 39(4). [https://doi.org/10.47280/revfacagron\(luz\).v39.n4.01](https://doi.org/10.47280/revfacagron(luz).v39.n4.01)
- Vásquez-Luis, P., del Socorro Pina-Canseco, M., Pérez-Santiago, A.D., Matías-Pérez, D., García-Montalvo, I.A., Hernández-Morales, J.L. & Sánchez-Medina, M.A. (2023). Expresión del gen antifúngico *zeamatina* en coleóptilos de maíz arrocillo ante infección por *Aspergillus*. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 10(2), 68-77. <https://doi.org/10.60158/rma.v10i2.401>
- Wang, B., Wang, Y., He, W., Huang, M., Yu, L., Cheng, D., ... & Chen, H. (2023). StMLPI, as a Kunitz trypsin inhibitor, enhances potato resistance and specifically expresses in vascular bundles during *Ralstonia solanacearum* infection. *The Plant Journal*, 116(5), 1342-1354. <https://doi.org/10.1111/tpj.16428>
- Wang, Q., Liao, Z., Zhu, C., Gou, X., Liu, Y., Xie, W., Wu, F., Feng, X., Xu, J., Li, J., & Lu, Y. (2022). Teosinte confers specific alleles and yield potential to maize improvement. *Theoretical and Applied Genetics*, 135(10), 3545–3562. <https://doi.org/10.1007/s00122-022-04199-5>
- Warburton, M. L., Tang, J. D., Windham, G. L., Hawkins, L. K., Murray, S. C., Xu, W., Boykin, D., Perkins, A., & Williams, W. P. (2015). Genome-Wide Association Mapping of *Aspergillus flavus* and Aflatoxin Accumulation Resistance in Maize. *Crop Science*, 55(5), 1857–1867. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.06.0424>
- Warburton, M.L., Jeffers, D., Smith, J.S., Scapim, C., Uhdre, R., Thrash, A. & Williams, W.P. (2022). Comparative analysis of multiple GWAS results identifies metabolic pathways associated with resistance to *A. flavus* infection and aflatoxin accumulation in maize. *Toxins*, 14(11), 738. <https://doi.org/10.3390/toxins14110738>
- Wright, S. I., Bi, I. V., Schroeder, S. G., Yamasaki, M., Doebley, J. F., McMullen, M. D., & Gaut, B. S. (2005). The Effects of Artificial Selection on the Maize Genome. *Science*, 308(5726), 1310–1314. <https://doi.org/10.1126/science.1107891>
- Xie, Y., Ravet, K. & Pearce, S. (2021). Extensive structural variation in the Bowman-Birk inhibitor family in common wheat (*Triticum aestivum* L.). *BMC Genomics*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12864-021-07475-8>
- Zhang, X., Yang, Q., Rucker, E., Thomason, W. & Balint-Kurti, P. (2017). Fine mapping of a quantitative resistance gene for gray leaf spot of maize (*Zea mays* L.) derived from teosinte (*Z. mays* ssp. *parviglumis*). *Theoretical and Applied Genetics*, 130, 1285-1295. <https://doi.org/10.1007/s00122-017-2888-2>

DIVERSIDAD Y ESTRUCTURA DE LA VEGETACIÓN ASOCIADA AL “CAMORREAL” EN SAN PEDRO EL ALTO, OAXACA

DIVERSITY AND STRUCTURE OF THE VEGETATION ASSOCIATED WITH THE “CAMORREAL” IN SAN PEDRO EL ALTO, OAXACA

¹Josefa Itzel Pérez-Luis^{ORCID}, ^{2S}Gisela Virginia Campos-Angeles^{ORCID}, ³Valentín José Reyes-Hernández^{ORCID},
²Gerardo Rodríguez-Ortiz^{ORCID}, ²José Cruz Carrillo-Rodríguez^{ORCID}

^{1,2}Estudiante, investigador, TecNM/Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca. C.P. 71233. ³Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco KM. 36.5, Montecillo, Texcoco Estado de México, C.P. 56230. [§]Autor de correspondencia: (gisela.ca@voaxaca.tecnm.mx).

RESUMEN

Las plantas medicinales representan una alternativa para mejorar la salud, por lo que muchas especies son extraídas de su hábitat natural. Los estudios ecológicos juegan un papel crucial en la comprensión y gestión de los ecosistemas, especialmente cuando se trata de la extracción de especies vegetales. Por lo anterior, el objetivo del estudio fue estimar la distribución y diversidad asociada a las plantas conocidas como “camorreal” en la localidad de San Pedro el Alto, Zimatlán, Oaxaca. El estudio se realizó durante los meses de julio y agosto del 2022, y se ubicaron lugares donde crecen las plantas de “camorreal”, donde se realizó un inventario y se registraron las condiciones ecológicas de cada sitio. Se estimaron los valores del índice de valor de importancia (IVI), diversidad alfa y se evaluó la distribución espacial, estos índices proporcionan una visión completa de la estructura, la composición y la dinámica de la comunidad vegetal. Se identificaron cinco especies a las que se les nombra de forma indistinta “camorreal” *Asclepias circinalis*, *Asclepias melantha*, *Iostephane trilobata*, *Lobelia hartwegii* y *Psacalium paucicapitatum*. Las poblaciones naturales de estas plantas se encuentran asociadas a diferentes especies, aunque se localizan en el mismo tipo de vegetación pino-encino, las cinco especies de “camorreal” presentan una distribución agregada. La especie *Iostephane trilobata*, tiene abundancia superior a las demás. Uno de los sitios de estudio presenta tres especies

de “camorreal” *Asclepias melantha*, *Iostephane trilobata*, y *Psacalium paucicapitatum*, aunque no es el sitio más diverso.

Palabras clave: *Asclepias* sp., distribución espacial, plantas medicinales *Psacalium paucicapitatum*.

ABSTRACT

Medicinal plants represent an alternative to improve health, which is why many species are extracted from their natural habitat. Ecological studies play a crucial role in the understanding and management of ecosystems, especially when it comes to the extraction of plant species. Therefore, the objective of the study was to estimate the distribution and diversity associated with plants known as “camorreal” in the town of San Pedro el Alto, Zimatlán, Oaxaca. The study was carried out during the months of July and August 2022, and places where “camorreal” plants grow were located, where an inventory was made and the ecological conditions of each site were recorded. Importance value index (IVI) values, alpha diversity and spatial distribution were estimated, these indices provide a complete picture of the structure, composition and dynamics of the plant community. Five species indistinctly named “camorreal” *Asclepias circinalis*, *Asclepias melantha*, *Iostephane trilobata*, *Lobelia hartwegii* and *Psacalium paucicapitatum* were identified. The natural populations of these plants are associated with different species, although they are

located in the same type of pine-oak vegetation, the five species of “camorreal” have an aggregate distribution. The species *Iostephane trilobata* has a higher abundance than the others. One of the study sites has three species of “camorreal” *Asclepia melantha*, *Iostephane trilobata*, and *Psacalium paucicapitatum*, although it is not the most diverse site.

Index words: *Asclepias* sp., spatial distribution, medicinal plants, *Psacalium paucicapitatum*.

INTRODUCCIÓN

La biodiversidad contempla toda clase de comunidades a nivel de paisaje, los bosques son uno de sus repositorios más grandes, quienes brindan una gran variedad de bienes y servicios ambientales (FAO, 2010; Simula, 2009). Los productos forestales no maderables (PFNM), se clasifican según la FAO (1996), en siete categorías que son: alimentos, forrajes, plantas aromáticas, teñido y curtido, utensilios, productos ornamentales y plantas medicinales. Los cuales desempeñan un papel importante en las poblaciones rurales y campesinas ya que son aprovechados por pobladores que habitan cerca de los bosques (Aguirre & Aguirre, 2021). También algunos de ellos son recursos nativos e incluso endémicos por lo que representan un patrimonio invaluable, además de su importancia ecológica y cultural (Feng et al., 2022). Por lo que, su conservación es fundamental para la vitalidad de los ecosistemas forestales (Monárrez-González et al., 2018).

Los primeros reportes del uso de plantas medicinales datan del siglo XVI, a través del Códice Badiano (*Libellus de Medicinalibus Indorum Herbis*) que es una obra en la que se describen los conocimientos de la medicina tradicional (INAH, 2023).

En México se distribuyen aproximadamente 30,000 especies de plantas vasculares, de estas 23 314 se consideran nativas y 11 578 son endémicas (Villaseñor, 2016). De ellas 4500 tiene atributos

medicinales (SEMARNAT, 2021; Muñetón-Pérez, 2009). De las cuales 3000 se encuentran en el herbario del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). Cabe destacar que tan sólo en el estado de Oaxaca se han documentado 1302 especies vegetales con uso medicinal (Cruz-Pérez et al., 2021), la Secretaría de Salud señala que el 90 % de la población mexicana ha utilizado alguna planta medicinal, sin embargo, solo el 5 % de las especies reportadas cuenta con estudios científicos (SADER, 2022).

Por otra parte, sus poseedores las usan de forma limitada y desconocen otros usos potenciales; por lo que en algunos casos han sido extraídas y aprovechadas con fines comerciales fuera de las comunidades rurales, sin que ellas obtengan algún beneficio, por lo que su valoración local es crucial para aprovecharlas de forma sustentable. La SEMARNAT (2021) menciona que el 85 % de las plantas medicinales son extraídas del medio silvestre, sin ningún plan de manejo, lo que altera la composición y dinámica de los ecosistemas. Por lo que es preciso conocer la estructura de la vegetación y la dinámica de las poblaciones vegetales, para describir su comportamiento y estar en posibilidades de proponer estrategias de manejo sustentable de las especies (Aguirre & Aguirre, 2021; FAO, 2020). Para describir la biodiversidad de un ecosistema, se han utilizado diversos índices, entre los cuales destacan el Índice de Valor de Importancia (IVI), propuesto por Curtis y McIntosh (1951), y los índices de diversidad alfa, desarrollados por Magurran (1983). Estos índices son herramientas valiosas para determinar la estructura y composición de la vegetación. Entre ellos, la función K de Ripley es especialmente valiosa para comprender el patrón de distribución espacial de una especie dentro de una comunidad. Esta función permite determinar si los individuos de una especie están distribuidos de manera regular, agrupada o aleatoria en diversas escalas espaciales. Al evaluar la función K, se obtiene una visión detallada sobre cómo se organiza y distribuye espacialmente una especie en un área específica, proporcionando información crucial sobre la dinámica ecológica y las interacciones

entre las especies (Ripley, 1977). Además, el análisis de la función K puede ayudar a identificar patrones de agregación o dispersión que son esenciales para el manejo y conservación de los hábitats naturales.

Las plantas medicinales conocidas como “camorreal” son empleadas por los habitantes de la comunidad de San Pedro el Alto por sus propiedades terapéuticas. Estas plantas pertenecen a diferentes familias botánicas, y en la práctica tradicional, se utiliza principalmente la raíz para aprovechar sus beneficios. Los pobladores han desarrollado un profundo conocimiento sobre las propiedades curativas de estas raíces, que han sido un pilar en sus prácticas de medicina tradicional a lo largo del tiempo.

Por lo anterior, el objetivo del estudio fue estimar la diversidad y estructura vegetal asociadas a las poblaciones silvestres de “camorreal”, así

como su distribución espacial en la comunidad de San Pedro El Alto, Zimatlán, Oaxaca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en áreas forestales de la comunidad de San Pedro el Alto, Zimatlán, Oaxaca (**Figura I**). Entre las coordenadas geográficas $16^{\circ} 34' 58''$ a $16^{\circ} 49' 58''$ de latitud norte, y $97^{\circ} 00' 36''$ a $97^{\circ} 13' 20''$ longitud oeste; durante el periodo de lluvias (julio y agosto del año 2022). La precipitación media anual es de 1500 mm, la temperatura media anual de 18°C , el clima que predomina es templado subhúmedo con lluvias en verano C (w) (i) (García, 2004), y una altitud entre 1900 y 2800 m, se reconocen tres tipos genéricos de vegetación: bosques de pino (19567 ha), bosques de pino-encino (1169 ha) y bosques caducifolios de encino (8991 ha) (de los Santos-Posadas et al., 2015).

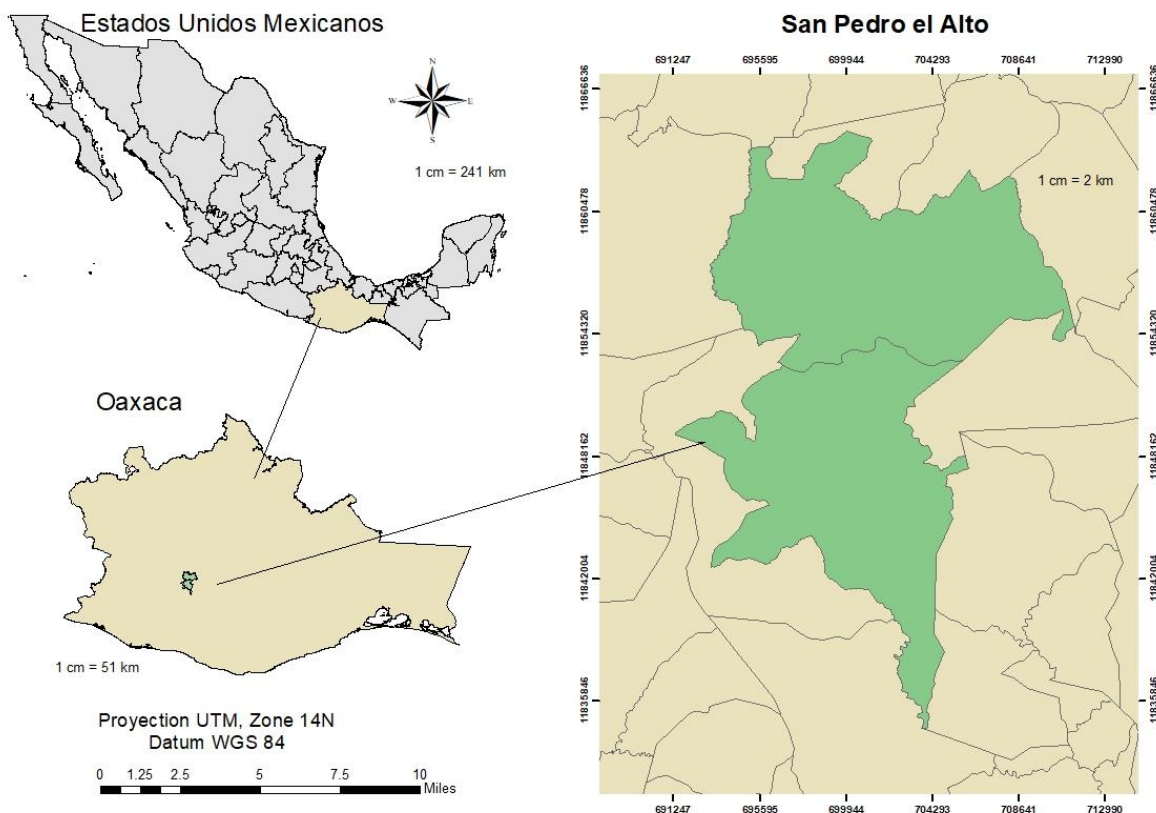


Figura I. Ubicación de la zona de estudio, San Pedro el Alto, Zimatlán.

Se realizó un muestreo dirigido en zonas en donde crecen de forma natural las especies conocidas en la comunidad como “camorreal”, dentro de bosques dominados por pino (*Pinus pringleii* Shaw, *P. patula* Schiede ex Schltdl. & Cham, *P. teocote* Schiede ex Schltdl y *P. pseudostrobus* Lindl). Se establecieron seis sitios de muestreo, y en cada uno se delimitó un total de tres unidades circulares, cada una con un área de 400 m²; además, se registró la georreferencia, la altitud, la pendiente (en porcentaje) y la exposición. Para identificar y caracterizar a la vegetación arbórea asociada a las poblaciones naturales de “camorreal” se realizó un inventario en el cual se incluyeron individuos con diámetro normal ($DN \geq 7.5$ cm; se identificó la especie de cada uno, así como sus medidas dasométricas, DN , (cm) con una cinta diamétrica (Forestry Suppliers®) y la altura total (AT , m), con un distanciómetro laser (Laser Technology® TruPulse 200 B). Mientras que para las plantas conocidas como “camorreal”, se registraron la altura total (ATP) en cm, y el diámetro de cuello (DCP) cm, dentro de cada unidad de muestreo se delimitó una subunidad de 100 m² en la cual se registraron los arbustos a los cuales se les determinaron la altura total (ATA , m) y el diámetro al cuello (DCA , cm). En caso de las hierbas se identificó la especie, y se registró su altura (ATH , m) y su diámetro (DCH , cm).

Manejo y análisis de datos

Con la información registrada, se estimó la densidad de las especies de “camorreal”, calculando la relación entre el número de individuos de cada especie y el espacio que ocupan dentro de la unidad de muestreo. Además, se determinó el patrón de distribución espacial utilizando el índice $K(t)$ de Ripley (Ripley, 1977). Para estimar la diversidad de especies se calculó la diversidad alfa con los índices: de Simpson-D, Shannon_H (Melo-Cruz & Vargas-Ríos, 2003) y el de Margalef (Magurran, 1983) por medio del programa Past 3.21®. Se calculó el índice de valor de importancia (IVI) para identificar la especie con el mayor valor ecológico, siguiendo las metodologías de Mueller-Dombois y Ellenberg (1976) y Curtis y McIntosh (1951).

RESULTADOS

Densidad de las especies de “camorreal”

Se identificaron cinco especies: *Psacalium paucicapitatum* (B.L.Rob. & Greenm.) H.Rob. & Brettell, *Lobelia hartwegii* Benth. ex A.DC, *Iostephane trilobata* Hemsl, *Asclepias melantha* Decne y *Asclepias circinalis* (Decne.) Woodson a las que se les llama “camorreal” de forma indistinta (Tabla I), estas plantas son utilizadas para fines medicinales y se encuentran de manera silvestre en los bosques de la comunidad. Los resultados mostraron que las poblaciones naturales de todas ellas se encuentran asociadas a diferentes especies, aunque se localizan en el mismo tipo de vegetación.

Tabla I. Nombre científico y nombre local de las especies de “camorreal” con uso medicinal de la comunidad de San Pedro el Alto

Nombre científico	Nombre local
<i>Asclepias circinalis</i> (Decne.) Woodson	“camorreal”
<i>Asclepias melantha</i> Decne	“camorreal” de conejo
<i>Iostephane trilobata</i> Hemsl	Camote manzo
<i>Lobelia hartwegii</i> Benth. ex A.DC	“camorreal” de venado
<i>Psacalium paucicapitatum</i> (B.L.Rob. & Greenm.) H.Rob. & Brettell,	“camorreal” de cebolla

La densidad que presentan las plantas de "camorreal" se muestran en la **Figura 2**, el desarrollo de las especies depende de las condiciones ecológicas, con la densidad es posible observar las áreas específicas donde se ubica cada uno de los individuos de las diferentes especies, por ejemplo, *Iostephane trilobata* Hemsl, tiene una densidad superior a las demás con 908 ind ha⁻¹. Según las referencias proporcionadas por los habitantes de la comunidad, se sabe que esta planta es la menos extraída de los bosques locales debido a su escasa utilización en comparación con otras especies, además de que es abundante por pertenecer a la familia Asteraceae; por ello sus poblaciones silvestres presentan gran número de individuos (**Figura 3**), donde también se muestra su distribución espacial.

Lobelia hartwegii Benth. ex A.DC, es una hierba que presenta un valor de 625 ind ha⁻¹, se concentra en colonias en los taludes, formando pequeñas franjas, por ello el patrón de distribución es de tipo agregado, además de que se asocia con especies de los géneros *Pinus* y *Quercus*. *Psacalium*

paucicapitatum (B.L.Rob. & Greenm.) H.Rob. & Brettell, cuenta con 566 ind ha⁻¹, se desarrolla bajo la sombra de los pinos además de presentarse en pequeñas aglomeraciones.

La especie *Asclepia circinalis* (Decne.) Woodson, mostró 500 ind ha⁻¹, se encuentra en lugares donde el suelo está cubierto con una capa densa de ocoxal. Por último, *Asclepia melantha* Decne presentó 316 ind ha⁻¹ es la especie que se encuentra más dispersa. Las cinco especies identificadas de "camorreal" exhiben un patrón de distribución agregado, concentrándose en áreas específicas. En la **Figura 3** se muestra la distribución de cada especie y la formación de pequeñas colonias. Este patrón de distribución revela la densidad, que se refiere al espacio ocupado por cada especie dentro de un área geográfica determinada. La disposición espacial de las plantas de "camorreal" está influenciada por factores ecológicos y cambios ambientales, lo que permite observar cómo se organizan los individuos en la superficie estudiada.

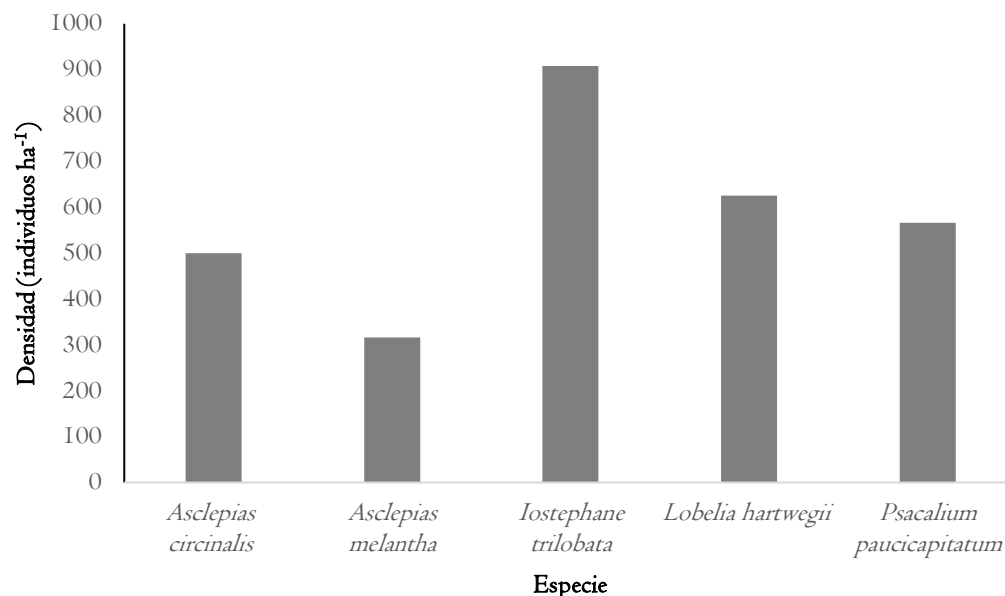


Figura 2. Densidad de especies de "camorreal" en San Pedro El Alto, Oaxaca.

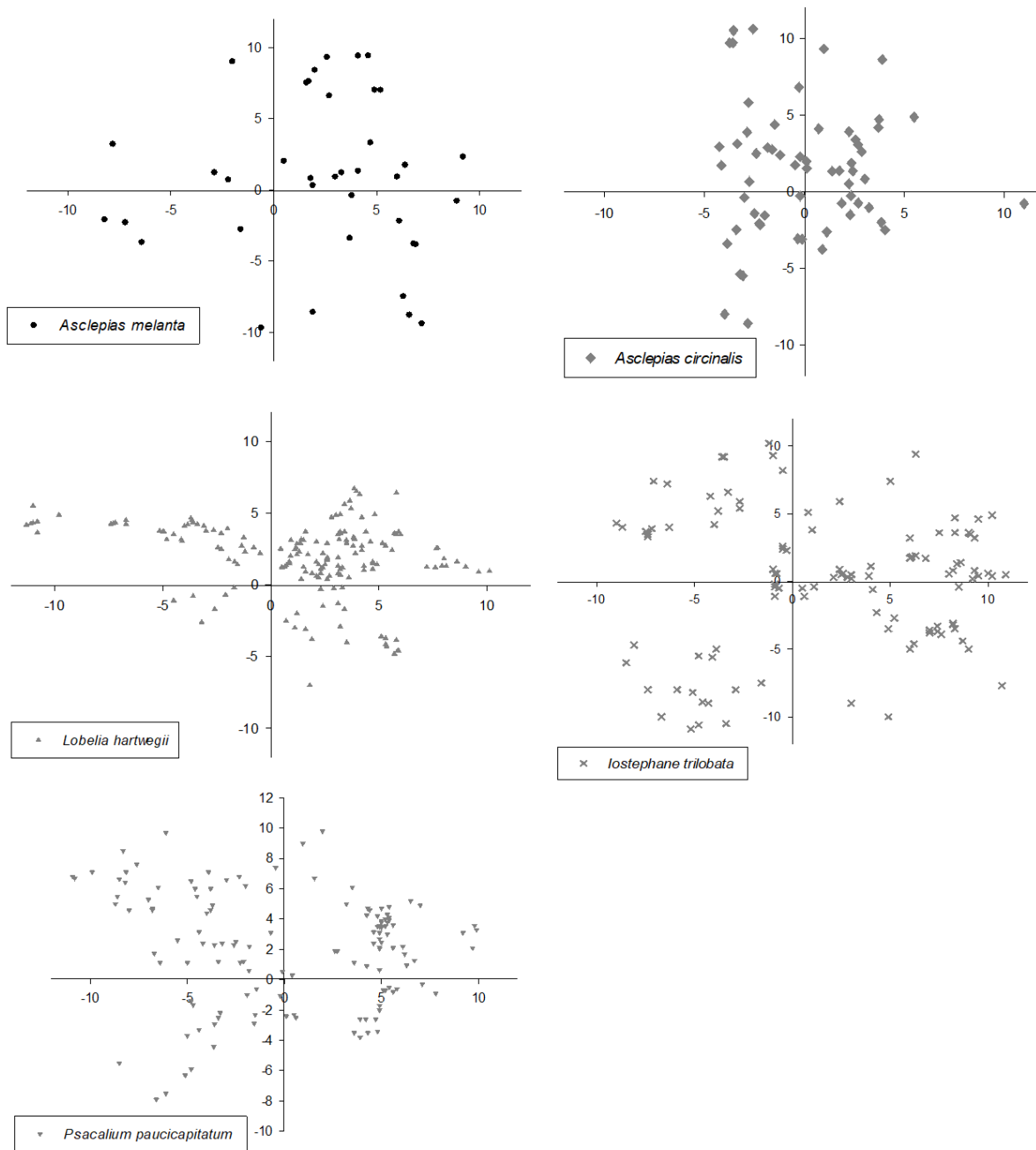


Figura 3. Distribución espacial de las especies de “camorreal” en San Pedro El Alto, Oaxaca.

Diversidad alfa

El índice de riqueza de Margalef arrojó un valor de 3.78, mostrando que la comunidad vegetal tiene una diversidad baja, comparada con otras. También se calculó el índice de Simpson-D, que resultó ser de 2.65. Este valor indica que la comunidad analizada presenta una distribución equilibrada de especies en términos de riqueza y

abundancia. Este índice, junto con el índice de riqueza de Margalef, refleja las características de la vegetación, mostrando que las especies del género *Pinus* son las que tienen la mayor densidad en la comunidad. Para estimar la diversidad específica se utilizó el índice de Shannon, el valor fue de 2.66 lo que indica que dicha diversidad en los sitios de estudio es moderada, es decir que existe una

cantidad limitada de especies y su distribución también es limitada, ya que el valor máximo de dicho índice es de 4, cabe resaltar que este índice considera tanto la cantidad de especies presentes, como su abundancia relativa. En campo pudo observarse que existen pocas especies, ya que la vegetación se encuentra dominada por pinos y encinos debido a que en 2021 se aplicaron cortas de regeneración, cortas de liberación y aclareos como tratamientos silvícolas.

Índice de valor de importancia (IVI)

El IVI evalúa la importancia de las especies sobre la estructura horizontal, lo que permite evaluar y definir la importancia ecológica de las especies de “camorreal”; la especie con mayor valor ecológico es *Pinus pringlei* con un 24.55 %, seguida por *Pinus montezumae* con un valor de 22.42 %, estas especies son dominantes en los bosques de la

comunidad además de presentar asociaciones (Tabla 2). Es importante resaltar que aunque las especies que corresponden al género *Pinus* y *Quercus* obtienen los valores más altos en este índice de importancia, las condiciones ecológicas (altitud, orografía, textura del suelo, exposición) determinan donde se desarrollan las plantas de “camorreal”, las cuales influyeron en los valores del peso ecológico. La especie *Iostephane trilobata* Hemsl es la única que obtuvo un valor mayor al 10 %, probablemente, este valor se debe a que es la especie menos extraída de sus poblaciones naturales, comparada con *Asclepias circinalis* (Decne.) Woodson, *Asclepias melantha* Decne, *Lobelia hartwegii* Benth. ex A.DC, y *Psacalium paucicapitatum* (B.L.Rob. & Greenm.) H.Rob. & Brettell, las cuales tienen un valor inferior al 10 %. La especie con menor IVI es *Asclepias melantha* Decne, que solo cuenta con un 4.07 %.

Tabla 2. Índice de valor de importancia (IVI) para las especies localizadas.

Especie	Densidad (%)	Dominancia (%)	IVI (%)
<i>Pinus pringlei</i> Sham	3.43	18.61	24.55
<i>Pinus montezumae</i> Lamb	11.55	0.04	22.42
<i>Pinus douglasiana</i> Martínez	7.91	11.19	24.10
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenb. ex Schltdl	2.81	16.12	21.43
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl	14.26	0.02	19.27
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl	2.71	4.31	18.68
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltdl.	1.98	2.72	10.53
<i>Quercus magnoliifolia</i> Née	1.66	4.01	11.50
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	6.24	0.00	8.75
<i>Quercus rugosa</i> Née	1.14	0.01	6.99
<i>Cupressus</i>	0.42	0.00	2.92
<i>Juniperus</i>	0.21	0.74	2.62
<i>Rubus ulmifolius</i> Schott	0.42	0.26	3.18
<i>Senecio roldana</i> DC.	0.42	0.00	2.92
<i>Eryngium heterophyllum</i> Engelm.	0.42	0.05	2.97
<i>Iostephane trilobata</i> Hemsl	11.34	0.01	13.85
<i>Lobelia hartwegii</i> Benth. ex A.DC	0.73	4.53	7.76
<i>Psacalium paucicapitatum</i> (B.L.Rob. & Greenm.) H.Rob. & Brettell	3.95	0.00	6.46
<i>Asclepias circinalis</i> (Decne.) Woodson	0.83	0.06	4.22
<i>Asclepias melantha</i> Decne	2.39	0.01	4.07

DISCUSIÓN

Distribución espacial

La distribución espacial de las cinco especies de “camorreal”, tienden a presentar un patrón de agrupamiento. Este tipo de distribución se caracteriza por una alta concentración de individuos en áreas específicas. De acuerdo con Gadow et al. (2007) lo anterior puede ser producto por dos factores, uno es el grado de mezcla de las especies y a la diversidad de la estructura espacial. Ávila-Flores et al. (2014) señalan que la distribución agregada, se debe a la forma de reproducción, esto produce una discontinuidad y forma grupos densos de individuos, al mismo tiempo las variaciones climáticas o factores ambientales (gradientes altitudinales, disponibilidad de nutrientes en el suelo, humedad, tipo de suelo e intensidad de luz) inducen a las plantas a resistir los cambios para asegurar su sobrevivencia. Elías, et al. (2011) atribuyen la distribución de especies a la respuesta de éstas a perturbaciones del ambiente y a la de regeneración de cada especie. Las variaciones ecológicas que se presentan en los sitios de muestreo y las características de la vegetación son factores que intervienen en la disposición espacial que muestran las especies de “camorreal” (Rubio-Camacho et al., 2017), ya que la distribución agrupada en los bosques se relaciona con la buena calidad del hábitat.

Diversidad

Los bosques de San Pedro el Alto, sufren modificaciones en su estructura por la extracción de madera, y el comportamiento de los índices estructurales, es el resultado de tales perturbaciones (Rubio-Camacho et al., 2017). Las prácticas forestales contemplan una serie de actividades que pueden generar en algunas ocasiones impactos negativos en la dinámica de los ecosistemas (Vásquez-Cortez et al., 2018). En áreas bajo aprovechamiento forestal ocurren modificaciones en la estructura de la vegetación y en muchas ocasiones las propiedades físicas y químicas del suelo también sufren cambios. Monárrez-González et al. (2018) señalan que el

impacto del manejo forestal sobre la diversidad vegetal se relaciona con la intensidad de manejo, y la calidad productiva del bosque. Luna-Bautista et al. (2015) mencionan que las investigaciones en sobre biodiversidad, en las que se incluyen estimaciones del valor de importancia de las especies, generalmente contemplan sólo el estrato arbóreo, aunque, el sotobosque contempla la mayor riqueza y diversidad, independientemente del tratamiento silvícola.

Índice de valor de importancia

El índice de valor de importancia (IVI), es un valor para evaluar la estructura de un bosque que se obtiene con las variables estructurales como abundancia, dominancia, densidad y frecuencia. En las unidades de muestreo evaluadas, el género *Pinus* predomina, lo que es lógico por el tipo de bosque del que se trata, que de acuerdo con Cuevas-Guzmán et al. (2011), presenta valores de IVI superiores a 80 % para pino y menores de 50 % para encino. Rendón-Pérez et al. (2021), también encontraron que la familia ecológicamente más importante en el bosque estudiado es Pinaceae, *Pinus* se posiciona como el género con mayor número de especies presentes en el área de estudio. Las características de sotobosque se relacionan principalmente con el dosel, ya que las especies que se pueden desarrollar dependen de la cantidad de luz disponible.

CONCLUSIONES

El grupo de plantas denominadas “camorreal” presentan un patrón de distribución agregado, está formado por cinco especies que son: *Asclepias circinalis* (Decne.) Woodson, *Asclepias melantha* Decne, *Iostephane trilobata* Hemsl, *Lobelia hartwegii* Benth. ex A.DC y *Psacalium paucicapitatum* (B.L.Rob. & Greenm.) H.Rob. & Brettell; todas se encuentran en estado silvestre en los bosques de la localidad. La única especie que obtuvo un valor de importancia superior al 10 % fue *Iostephane trilobata* Hemsl (13 %), debido a que es la más abundante y presenta la mayor densidad. *Pinus* y *Quercus* son los géneros arbóreos con las que las especies de “camorreal”

mostraron mayor asociación. De acuerdo a los índices estimados, la riqueza de especies mostró baja diversidad, lo que es una muestra de la heterogeneidad en el bosque.

REFERENCIAS

- Aguirre, Z., & Aguirre, L. A. (2021). Estado actual e importancia de los productos forestales no maderables. *Bosques Latitud Cero*, 11(1), 71–82.
- Ávila-Flores, D. Y., González-Tagle, M. A., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E., Vargas-Larreta, B., & Rodríguez, E. A. (2014). Efecto de la severidad del fuego en las características de la estructura forestal en rodales de coníferas. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(1), 33–45. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.01.005>
- Cruz-Pérez, A. L., Barrera-Ramos, J., Bernal-Ramírez L. A., Bravo-Avilé, D., & Rendón-Aguilar, B. (2021). Actualized inventory of medicinal plants used in traditional medicine in Oaxaca, Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine* 17(1). <https://doi.org/10.1186/s13002-020-00431-y>
- Cuevas-Guzmán, R., Cisneros-Lepe, E. A., Jardel-Peláez, E. J., Sánchez-Rodríguez, E. V., Guzmán-Hernández, L., Núñez-López, N. M., & Rodríguez-Guerrero, C. (2011). Análisis estructural y de diversidad en los bosques de *Abies* de Jalisco, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(4), 1219-1233.
- Curtis, J. T., & Macintosh, R. P. (1951). An Upland Forest Continuum in the Prairie-Forest Border Region of Wisconsin. In Source: Ecology (Vol. 32, Issue 3).
- de los Santos-Posadas, H. M., Valdez-Lazalde, J. R., & Torres-Rojo, J. M. (2015). San Pedro El Alto Community Forest, Oaxaca, Mexico. In *Forest Plans of North America* (pp. 199-208). Academic Press.
- Elías, R., Días, E., & Pereira, F. (2011). Disturbance, regeneration and the spatial pattern of tree species in Azorean Mountain forests. *Community Ecology*, 12(1), 23–30. <https://doi.org/10.1556/ComEc.12.2011.1.4>
- FAO. (1996). Desarrollo de productos forestales no madereros en América latina y el caribe. <https://www.fao.org/publications/card/en/c/01931c41-a2a2-55ce-bfc0-1cbca23f72a6/>
- FAO. (2010). La gestión de los bosques ante el cambio climático. Asociación de Colaboración en materia de Bosques, 2008. <https://www.fao.org/3/i1960s/i1960s00.pdf>
- FAO. (2020). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020. Informe principal. Roma. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- Feng, G., Ying-Jie, X., Hua-Yu, W., Yao L., & Ling-Feng, M. (2022). Endemic medicinal plant distribution correlated with stable climate, precipitation, and cultural diversity. *Plant Diversity*, 45(4), 479-484. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2022.09.007>
- Gadow, K. V, Sánchez, S., Juan, O., & Álvarez-González, G. (2007). *Estructura y Crecimiento del Bosque*. Alemania: Universidad de Göttingen.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México.
- INAH. (2023, June 6). Códice Badiano. <https://www.mediateca.inah.gob.mx/repositorio/islandora/object/codice%3A851#page/1/mode/2up>
- Juárez-Jaimes, V., Rodríguez-Morales, L. O., Paniagua-Ibáñez, M., Hernández-Barón, G. M., & Fishbein, M. (2022). Diversity and distribution of the genus *Asclepias* (Apocynaceae: Asclepiadoideae) in México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 93. <https://doi.org/10.22201/IB.20078706E.2022.93.3958>
- Luna-Bautista, L., De La Rosa, P. H., Velázquez-Martínez, A., Gómez-Guerrero, A., & Acosta-Mireles, M. (2015). El sotobosque en la composición y diversidad de áreas bajo manejo forestal en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

- Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(1), 109–121.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.08.037>
- Magurran, A. (1988). Ecological Diversity and Its Measurement. *Springer Science & Business Media* <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7358-0>
- Melo-Cruz, O. A., & Vargas-Ríos, R. (2003). Evaluación ecológica y silvicultura de ecosistemas boscosos. Universidad del Tolima, Colombia.
- Monárrez-González, J. C., Pérez-Verdín, G., López-González, C., Márquez-Linares, M. A., & González-Elizondo, M. D. S. (2018). Effects of forest management on some ecosystem services in temperate forest ecosystems of Mexico. *Madera y Bosques*, 24(2).
<https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421569>
- Mueller-Dombois, D., & Ellenberg, H. (1976). Aims and Methods of Vegetation Ecology. *Geographical Review*, 66(1), 114.
<https://doi.org/10.2307/213332>
- Muñeton-Pérez, P. (2009). Plantas medicinales: un complemento vital para la salud de los mexicanos. Entrevista con el Dr. Erick Estrada Lugo. *Revista Digital Universitaria*, 10(9).
- Rendón-Pérez, M. A., Hernández-De la Rosa, P., Velázquez-Martínez, A., Alcántara-Carbajal, J. L., & Reyes-Hernández, V. J. (2021). Composition, diversity, and structure of a managed forest in central México. *Madera y Bosques*, 27(1).
<https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712127>
- Ripley, B. D. (1977). Modelling Spatial Patterns. *Journal of the Royal Statistical Society*. 39(2), 172–212.
- Rubio-Camacho, E. A., González-Tagle, M. A., Himmelsbach, W., Ávila-Flores, D. Y., Alanís-Rodríguez, E., & Jiménez-Pérez, J. (2017). Patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque mixto de pino-encino del noreste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(1), 113–121.
<https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.01.015>
- SADER. (2022). México, segundo lugar mundial en registro de plantas medicinales. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/mexico-segundo-lugar-mundial-en-registro-de-plantas-medicinales?idiom=es>
- SEMARNAT. (2021). Plantas medicinales de México.
<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/plantas-medicinales-de-mexico?idiom=es>
- Simula M. (2009). *Hacia una Definición de Degradación de los Bosques: Análisis Comparativo de las Definiciones Existentes*. Roma, Italia. Documento de trabajo, 154, 54.
<https://www.fao.org/3/k6217s/k6217s.pdf>
- Vásquez-Cortez, V. F., Clark-Tapia, R., Manzano-Méndez, F., González-Adame, G., & Aguirre-Hidalgo, V. (2018). Tree and shrub structure composition and diversity in three forest management conditions in Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Madera y Bosques*, 24(3).
<https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431649>
- Villaseñor, J. L. (2016). Catálogo de las plantas vasculares nativas de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), 559–902.
<https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.017>

CONCENTRACIÓN DE QUITINA EN ESPECIES DEFOLIADORAS (*Zadiprion* spp.) DE *Pinus* EN LA SIERRA NORTE, OAXACA

CHITIN CONCENTRATION ON DEFOLIATOR SPECIES (*Zadiprion* spp.) OF *Pinus* IN THE SIERRA NORTE, OAXACA

^{1§}Mario Ernesto Suárez-Mota[✉], ¹Carlos Alberto Velasco-Paz[✉], ¹Lizbeth Luna-Bautista[✉], ²Irene Bautista-Juárez[✉], ³Luis Barbo Hernández-Portilla[✉], ¹Waldo Santiago Juárez[✉], ¹Wenceslao Santiago-García[✉]

¹Universidad de la Sierra Juárez (UNSIJ). Av. Universidad S/N. Barrio la Asunción, Ixtlán de Juárez, Oaxaca. C.P. 68725. ²Colegio de Postgraduados (COLPOS), Montecillos, Posgrado en Botánica. Km. 36.5 Carretera México-Texcoco Montecillo, Texcoco Estado de México, México. C.P. 56264. ³Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Laboratorio Nacional en Salud: Diagnóstico Molecular y Efecto Ambiental en Enfermedades Crónico-Degenerativas. Av. de los Barrios. Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla Estado de México, México. C.P. 54090. §Autor de correspondencia (mesuarez@unsij.edu.mx).

RESUMEN

El género *Zadiprion* incluye insectos defoliadores de gran importancia debido a que presenta un estatus de plaga, esto aunado a las grandes infestaciones que provoca pérdida de bosques. El conocimiento escaso que se tiene del comportamiento y la forma de su distribución es una limitante para tomar medidas de prevención o control contra el ataque de estos insectos defoliadores. El objetivo planteado es caracterizar la composición química y concentración de quitina en la cubierta de la pupa de especies defoliadoras de pinos registrada en la Sierra Norte de Oaxaca. Se determinó la composición química de *Zadiprion* sp. mediante una digestión química y el uso de espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR). Los resultados obtenidos permitieron hacer una determinación de la composición química de *Zadiprion* sp. en las diferentes etapas de su ciclo de vida (pupa, larva mosca). Adicionalmente, se registró la concentración de quitina en las estructuras corporales de la especie analizada, mediante el uso de ATR-FTIR se determinaron las bandas de absorción correspondientes al grupo funcional amida y las vibraciones de tensión que se registran, lo que afirma que uno de los componentes resultantes del producto después de la desmineralización y desproteinización es quitina.

Palabras clave: ATR-FTIR, Diprionidae, Ixtepeji, Ixtlán, mosca sierra.

ABSTRACT

The *Zadiprion* genus includes defoliating insects of great importance, due to its pest status and the large infestations that cause forest loss. The scarce knowledge of their behavior and distribution is a limitation to take preventive or control measures against the attack of these defoliating insects. The objective of the present work is to characterize the chemical composition and concentration of chitin in the pupal cover of pine defoliator species registered in the Sierra Norte of the state of Oaxaca. The chemical composition of *Zadiprion* sp. was determined by chemical digestion and the use of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The results obtained allowed a determination of the chemical composition of *Zadiprion* sp. in the different stages of its life cycle (fly, larva and pupa). Additionally, the concentration of chitin in the body structures of the analyzed species was recorded. Using ATR-FTIR, the absorption bands corresponding to the amide functional group and the stress vibrations recorded were determined, which affirms that one of the resulting components of the product after demineralization and deproteinization is chitin.

Index words: ATR-FTIR, Diprionidae, Ixtepeji, Ixtlán, sawfly.

INTRODUCCIÓN

Una plaga forestal puede causar daños a los árboles, bosques y a los productos forestales; pueden ser insectos y otro tipo de vida silvestre, así como plantas parásitas como el muérdago (FAO, 2018). Su presencia se debe a factores, como la dinámica poblacional de los insectos y patógenos, el estrés al que se somete la vegetación forestal, cambios climáticos, deterioro por actividades humanas (FAO, 2018). Además, pueden incidir negativamente en el crecimiento e incluso en la supervivencia de los árboles.

Zadiprion es un género de la familia Diprionidae comúnmente llamadas moscas sierra, siendo su principal fuente de alimento el follaje de árboles de *Pinus* spp. Dichos insectos son nativos de los Estados Unidos de Norteamérica, México y Guatemala, se tienen registros de seis especies hasta ahora descritas *Zadiprion falsus* Smith, *Z. towsendi*, *Z. howdeni*, *Z. ojedae*, *Z. roteus* y *Z. rhoweri*, todas ellas se encuentran presentes en México (Smith et al., 2012).

Las especies del género *Zadiprion* se caracterizan por sus hábitos gregarios en su fase larvaria para alimentarse, de una sola hoja. Las larvas causan los mayores daños ya que se alimentan del follaje, llegando a defoliar totalmente a los árboles. Otra característica importante, es que empiezan a devorar la corteza de la ramilla, lo que provoca la muerte total o parcial del árbol (Cibrián et al., 1995).

La quitina es un componente químico ampliamente distribuido en la naturaleza. Siendo uno de los primeros polisacáridos más abundantes en la tierra (Dumitriu, 2005). Barbosa-Corona y Escudero-Abarca (2002) han investigado las

propiedades de las quitinasas para atacar a insectos que constituyen plagas, debido a que la quitina es un componente de insectos, nemátodos, hongos y moluscos, es una biomolécula importante para plantear estrategias de control biológico (Barbosa-Corona y Escudero-Abarca, 2002). Las concentraciones de quitina contenida en organismos defoliadores se pueden reconocer mediante espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) por la reflectancia total atenuada (ATR-FTIR), que permite analizar una muestra hasta una profundidad de 5 μm (Ochiai, 2015). Las vibraciones moleculares en los espectros son características de los grupos funcionales, y dependen del ambiente químico en el que están presentes (Tasumi, 2015). Además, se puede estimar el contenido de minerales, lípidos y carbohidratos de la cubierta de la pupa de un defoliador y así realizar una estrategia para su control. En las especies del género *Zadiprion*, no se tiene aún conocimiento de su composición química, así como de su posible contenido de quitina en su estructura corporal. Por lo cual, se plantea el objetivo para determinar contenido de quitina en la cubierta de la pupa de especies defoladoras de pinos registrada en la Sierra Norte de Oaxaca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Sierra Norte de Oaxaca es una de las ocho regiones económicas en las que administrativamente se divide el estado. Su extensión territorial es de 9,347.96 km², cifra que representa el 9.8 % de la superficie estatal. Está integrada por comunidades zapotecas, mixes y chinantecas, abarca tres de los 30 distritos político-administrativos que integran esta entidad federativa: Ixtlán de Juárez, Villa Alta y Mixe (Fernández y Salinas, 2012) (Figura 1).

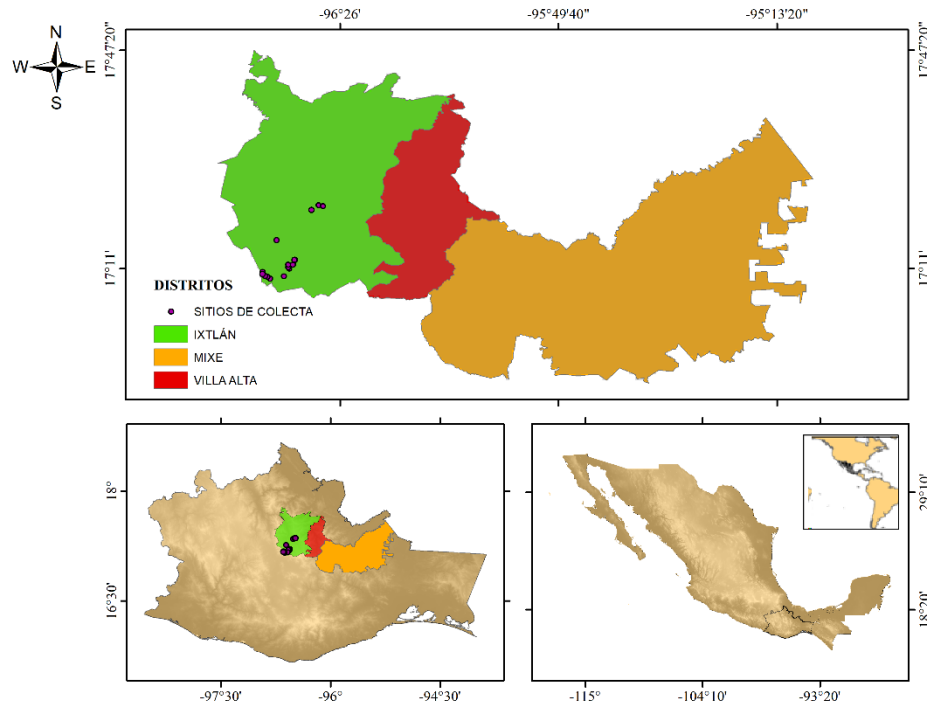


Figura I. Localización Geográfica de la Sierra Norte de Oaxaca.

Diseño de muestreo y distribución de especies

Se realizaron registros de campo en la región mediante la colecta de las especies del género *Zadiprion* sp. Las cuales fueron georreferenciadas con un geoposicionador satelital (GPS, Garmin eTrex X 20®). Los ejemplares colectados fueron depositados en frascos herméticos con alcohol al 70 %, para posteriormente ser identificados.

Obtención de harina de *Zadiprion* sp. para analizar el contenido de quitina

Las muestras colectadas de *Zadiprion* sp. en sus tres fases (pupa, larva y mosca) se limpiaron de manera manual y se lavaron con agua destilada varias veces posteriormente, se metieron a un horno de secado con circulación forzada marca Kiossa®, por dos horas a 60°C, una vez secas se molieron en un mortero. Finalmente, la harina obtenida se colocó en bolsas herméticas para protegerla de la humedad y la luz.

Transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR)

El análisis FTIR es una técnica que determina los aspectos moleculares (grupos funcionales, y tipos

de enlaces químicos) y estructurales (conformación cristalina) en compuestos como son la quitina y el quitosano (Kaya et al., 2015a). Con base en su arreglo molecular, la quitina se encuentra en la naturaleza de tres formas cristalinas diferentes; α , β y γ (Kaya et al., 2015b,c). Las muestras se analizaron con un espectrómetro marca Perkin Elmer (FT-IR/NIR Spectrometer modelo Frontier®).

El espectro se obtuvo con un accesorio de reflectancia total atenuada (ATR), con ventana de diamante a una resolución de 4 cm⁻¹, y con un barrido de número de onda (1/λ) de 4000 a 400 cm⁻¹.

La harina resultante se colocó sobre el diamante del accesorio ATR, ejerciendo una presión de 80 unidades y se realizó el análisis en el software Spectrum (Versión 10.5.2). Se llevaron a cabo diez repeticiones de las muestras previamente obtenidas de *Zadiprion* sp. para cada caso (pupa, larva, y mosca), para comparar los espectros y tener veracidad en los gráficos obtenidos.

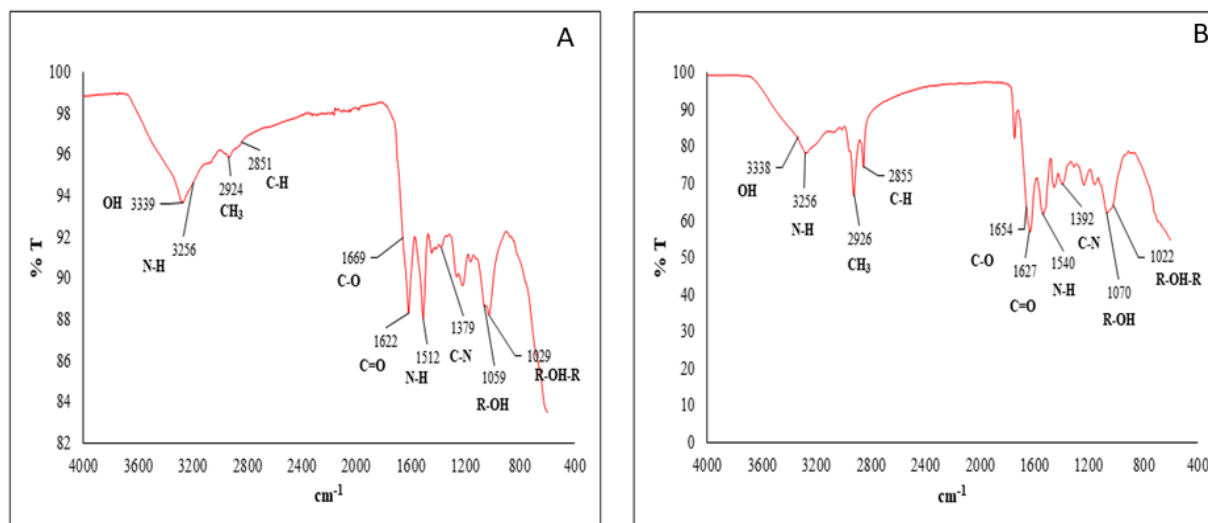


Figura 2. Espectro de infrarrojo con trasformada de Fourier, obtenido para quitina de *Zadiprion* sp. en el pre-tratamiento A) Pupa y B) Adulto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los espectros de infrarrojo de la quitina que se observaron fueron de la pupa previamente lavados y retirada la materia orgánica que pudiera traer, sin ningún proceso químico. En estos espectros se observó que existen ciertas similitudes en el caso de la pupa (**Figura 2A**) como en el adulto (**Figura 2B**) de *Zadiprion* sp. En los dos espectros se observaron las tres bandas típicas del grupo funcional amida presentes en 1622, 1512 y 1379 cm⁻¹, estas bandas son características en las quitinas ya que corresponden al doble enlace C = O (Un

átomo de carbono conectado a un átomo de oxígeno a través del enlace doble). para la transmitancia en las bandas observadas.

En los espectros de infrarrojo de la quitina en la Pupa de *Zadiprion* sp. (post-tratamiento), que se obtuvieron mediante el FTIR, (**Figura 3**) se observaron también las bandas 1.622, 1.555 e 1.379 cm⁻¹, que corresponden al estiramiento del grupo carbonilo presente en la amida, a la vibración del enlace N-H de la misma amida y a la vibración del enlace del C-N de la amida respectivamente. (grupo carbonilo).

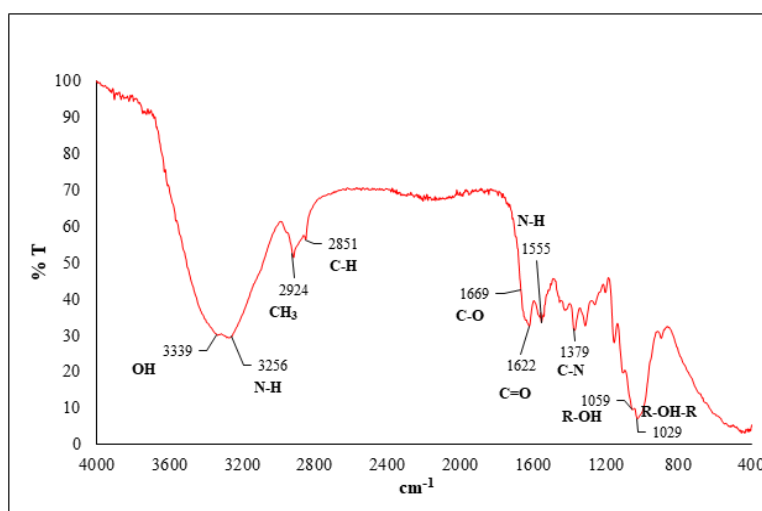


Figura 3. Espectro de infrarrojo con trasformada de Fourier, obtenido para quitina de la pupa de *Zadiprion* sp. en el pos-tratamiento.

La señal a 1622 cm^{-1} es generada por el estiramiento vibracional del enlace C-N del grupo $\text{C}=\text{O}$ superpuesto, como un grupo OH- por un enlace puente de hidrogeno. La banda presente a 1555 cm^{-1} es promovida por la flexión del enlace N-H en el grupo amida. La amida II de NH y la amida III de CN, respectivamente. Es importante señalar que las bandas del grupo carbonilo en la amida I de quitina se observan en 1.622 y 1.669 cm^{-1} , que se atribuye a los dos tipos de enlaces de H, formados por grupos amida en la alineación antiparalela presente en las regiones cristalinas de quitina.

Las bandas presentes entre 3500 y 2800 cm^{-1} en los espectros de quitina son el resultado de las tensiones vibracionales del grupo funcional OH debido a la captación de moléculas de agua y la presencia de OH de las estructuras de la quitina. La banda observada a 3339 cm^{-1} corresponde a la vibración del estiramiento de los grupos OH mientras que en la banda a 3256 cm^{-1} es correspondiente a la vibración de los NH_2 presentes. En cuanto a las bandas localizadas a 2851 y 2924 cm^{-1} , estas se pueden atribuir a la presencia de grupos metilo (CH_3) y al estiramiento simétrico y asimétrico de los enlaces CH. Las longitudes de onda entre 2800 y 1700 cm^{-1} indican que las interacciones de hidrogeno están menos pronunciadas y evidencio la presencia de grupos hidroxilo libres. Mientras que la deformación de los grupos CO-NH y CH_2 , se debieron a la formación de un grupo CO-NH .

Los resultados obtenidos indican la presencia de quitina en las fases del ciclo de vida de especies de *Zadiprion*, este tipo de análisis no han sido desarrollados para estas especies. Sin embargo, se ha aislado quitina en otros insectos de Orthoptera mediante técnicas químicas, teniendo resultados satisfactorios en cuanto al conocimiento de su composición molecular (Kaya, 2015b).

De acuerdo con lo reportado por Smith et al. (2012), una importante característica para la

determinación de especies de *Zadiprion* es la cantidad de sérrulas y la presencia o ausencia del primer anillo del ovopositor de las hembras. El segundo anillo del ovopositor femenino de las especies del género es el asociado a la primera sérrula, cuando se afirma que el primer anillo está ausente significa que no hay ningún anillo con dientes basales al segundo anillo. Los ejemplares colectados en la Sierra Norte de Oaxaca, presentan caracteres que de acuerdo con lo propuesto por Smith et al. (2012) las hembras de *Z. howdeni* Smith, son similares a *Z. falsus* en apariencia general, pero la lanceta u ovopositor carece del primer anillo, presentando un total de siete (**Figura 3A**). Mientras que en *Z. falsus*, las hembras tienen una lanceta en el primer anillo con tres o cuatro dientes, en total presenta 10 anillos (**Figura 4B**). *Z. roteus*, se caracteriza por su ovopositor que es similar al de *Z. howdeni* excepto por ligeras diferencias en el segundo y tercer anillo que están más juntos en *Z. roteus*, que presenta ocho anillos (Smith et al., 2012; **Figura 4C**).

Sin embargo, los ejemplares colectados que coinciden con estas especies son de muy baja frecuencia y restringidos solo a algunos sitios. No obstante, la especie con mayor abundancia y distribución no coincide con las especies antes citadas (**Figura 5**), lo cual hace suponer que se trata de una especie aún no registrada pudiendo ser alguna variedad de las ya reconocidas, esto será reforzado y determinado con validación de más ejemplares y consultando a especialistas en taxonomía. De estas especies del género, aún no bien identificadas se seleccionaron muestras para hacer los análisis de concentración de quitina en sus diferentes fases de vida. En trabajos previos se ha evaluado la distribución de *Zadiprion* en la Sierra Norte de Oaxaca, habiendo encontrado como especie abundante a *Z. howdeni* (Suárez-Mota et al., 2018). Sin embargo, se han registrado otras especies pertenecientes al género sin tener una evaluación de su distribución y relación con variables ambientales, por lo que es importante realizar trabajo de campo y taxonómico con mayor esfuerzo.



Figura 4. Ovipositores *Zadiprion*. Hembra: A) *Z. howdeni* Smith, B) *Z. falsus* Smith, C) *Z. roteus* Smith. Las fotografías se obtuvieron con una cámara Nikon® D3300 adaptada a un microscopio óptico Zeigen® usando un objetivo de 10x.

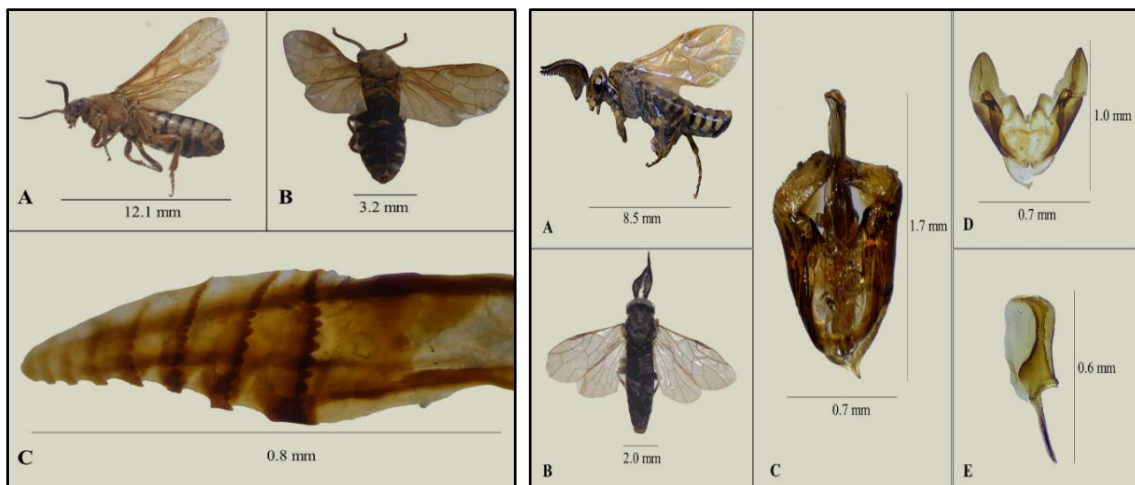


Figura 5. *Zadiprion* sp. Lado izquierdo Hembra: A) vista lateral, B) vista dorsal, C) Ovipositor. Lado derecho Macho: A) Vista lateral, B) Vista dorsal, C y D) Capsula Genital, E) Válvula peneana. Las fotografías se obtuvieron con una cámara Nikon D3300® adaptada a un microscopio óptico Zeigen® usando un objetivo de 10x.

CONCLUSIONES

Dentro del combate para la plaga se desconoce su composición química, cuando se encuentra en sus diferentes etapas de vida, derivado de ello, se determinó la presencia de quitina lo cual representa un estudio novedoso ya que podría llegar a solucionar la problemática de la plaga forestal (*Zadiprion* sp.) mediante la implementación de inhibidores de quitina en las etapas específicas de mayor presencia. La quitina aislada a partir de las

diferentes fases: mosca, larva y pupa ofrece una excelente alternativa para la obtención requerida, con el uso del *FTIR*, se observó mediante las bandas de absorción correspondientes al grupo funcional amida y las vibraciones de tensión que se registraron en las regiones, indican que el producto obtenido después de la desmineralización y desproteínización es quitina, tiene presencia en las tres fases de vida de *Zadiprion*, con mayor presencia en la fase de larva.

REFERENCIAS

- Barbosa-Corona, J. E. & Escudero-Abarca, B. I. (2002). Cómo usar una bacteria para combatir plagas y hongos. *Ciencia*, 53(3), 76-83.
- Cibrián, D., Méndez, J. T., Campos, R., Yates III, H. O. & Flores, J. (1995). *Insectos Forestales de México*. Universidad Autónoma Chapingo, México-SARH-USDA-FOREST SERVICE-COFAN. Chapingo, Estado de México, México. 453 p.
- Dumitriu, S. (2005). *Polysaccharidees. Structural, diversit and functional versatility*. Marcel Dekker, 2^a edition. New York, USA.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2018). *Sustainable Forest Management (SFM) Toolbox*. <http://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/forestpests/basic-knowledge/es/>
- Fernández, M. & Salinas, J. (2012). *Defensa de los derechos territoriales en Latinoamérica*. RIL editores. Santiago de Chile, Chile.
- Kaya, M., Baran, T., Asan-Ozusaglam, M., Cakmak, Y. S., Tozak, K. O., Mol, A., Menten A. & Sezen G. (2015a). Extraction and characterization of chitin and chitosan with antimicrobial and antioxidant activities from cosmopolitan Orthoptera species (Insecta). *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 20, 168-179. DOI:10.1007/s12257-014-0391-z.
- Kaya, M., Erdogan, S., Mol, A., & Baran T. (2015b). Comparison of chitin structures isolated from seven Orthoptera species. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 797-805. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2014.09.034.
- Kaya, M., Lelesius, E., Nagrockaite, R., Sargin, I., Arslan, G., Mol, A., Baran T., Can E. & Bitim, B. (2015c). Differentiations of chitin content and surface morphologies of chitins extracted from male and female Grasshopper species. *PLOS ONE*, 10(1), e0115531. DOI: 10.1371/journal.pone.0115531.
- Ochiai, S. (2015). Attenuated Total Reflection Measurements. En: M. Tasumi (Ed.), *Introduction to experimental infrared spectroscopy: fundamentals and practical methods*. (UK. pp. 179-198). John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, W. Sussex.
- Pacheco-García, M. M., Bautista-Juárez, I., Santiago-García W., Luna Bautista L., Ruiz-Aquino F., Ramírez-García E. & Suárez-Mota, M. E. (2022). Análisis de la amplitud del nicho ecológico de *Zadiprion* spp., un defoliador de *Pinus* en el Sureste de México. *Bosque*, 43(3), 287-298.
- Smith, D. R., Sánchez, M. G. & Ojeda, A. A. (2012). A new species of *Zadiprion* (Hymenoptera: Diprionidae) on *Pinus durangensis* from Chihuahua, Mexico, and a review of other species of the genus. *Proceedings of the Entomological Society of Washington*, 114(2), 224-237. DOI: 10.4289/0013-8797.114.2.224.
- Suárez-Mota, M. E., Pacheco-García, M. M., Cristóbal-Angulo, O. P., Antúnez, P., Santiago-García, W. & Bautista-Juárez, I. (2018). La plaga defoliadora *Zadiprion howdeni* Smith en la Sierra Norte de Oaxaca, México: estado actual y perspectivas. *Agroproductividad*, 11(7), 35-41.
- Suárez-Mota, M. E., Cristóbal-Angulo, O. P., Santiago-García, W. & Ruiz-Aquino, F. (2021). Distribution of the defoliating pest *Zadiprion falsus*: an analysis of overlapping niches of its hosts in Mexico. *Entomologica Americana*, 127(1), 5-11.
- Tasumi, M. (2015). Introduction to infrared spectroscopy. En: M. Tasumi, (Ed.). *Introduction to experimental infrared spectroscopy: fundamentals and practical methods*. (UK. pp. 3-13) John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, W. Sussex.

DESARROLLO DE *Agave americana* var. *oaxacensis* POR EFECTO DE NUTRICIÓN ORGÁNICA, FERTIRRIEGO Y BENCILAMINOPURINA

DEVELOPMENT OF *Agave americana* var. *oaxacensis* DUE TO THE EFFECT OF ORGANIC NUTRITION, FERTIGATION AND BENCYLAMINOPURINE

¹Daniel Eduardo Canseco-Santiago , ¹José Raymundo Enríquez-del-Valle , ¹Gerardo Rodríguez-Ortiz ,
¹Marcos Emilio Rodríguez-Vásquez , ¹Juan Ángel García-Aguilar , ²Gloria Paulina Pérez-Félix 

¹Tecnológico Nacional de México, Campus Valle de Oaxaca (TecNM-ITVO). Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México. C.P. 71233. ²Instituto Politécnico Nacional-Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (IPN-CIIDIR), Unidad Oaxaca, Oaxaca, México. C.P. 71230. ³Autor de correspondencia: (danny-casant@hotmail.com).

RESUMEN

Las especies de agave se reproducen de forma sexual y asexual; sin embargo, gran parte de las plantas en vivero no se fertilizan, ocasionando plantas raquíticas y de bajo porte, afectando así, la adaptación a nuevos sitios de establecimiento, escasa producción de bulbos y bajos niveles de azúcares durante su etapa fisiológica en campo. Por lo anterior el objetivo fue evaluar en vivero el crecimiento de plantas de *Agave americana* var. *oaxacensis*, y su producción de rizomas en diferentes sustratos, fertirriego y aplicación de N6-bencilaminopurina (BAP). El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar, con seis tratamientos; la unidad experimental fue una planta con cinco repeticiones por tratamiento. Los agaves fueron irrigados con agua, o fertirrigados con solución nutritiva (SN) o con SN+ bencilaminopurina (BAP), dos veces por semana durante 140 días. Los datos se sometieron a análisis de varianza, pruebas de medias (Tukey, 0.05) y contrastes ortogonales. Transcurridos 140 días, las plantas en suelo agrícola (SA) + abono bovino (AB), fertirrigadas con SN+ 20 mg L⁻¹ de BAP mostraron mejor crecimiento en las variables medidas; de tal manera que el incremento en rizomas, altura de planta, número de hojas y diámetro de tallo mejoró respectivamente en: 20.0, 19.8, 12.7 y 26.1 % en relación al grupo testigo (plantas en SA e irrigadas con agua). El abastecimiento nutrimental mediante fertirriego o incorporando abono al sustrato, así como la

aplicación de citocininas estimulan el crecimiento de las plantas de *A. americana* var. *oaxacensis* y desarrollan más vástagos de rizoma.

Palabras clave: citocinina, emisión de rizomas, solución nutritiva, sustratos.

ABSTRACT

Agave species reproduce sexually and asexually; however, a large part of the plants in the nursery are not fertilized, causing stunted and low plants, thus affecting the adaptation to new sites of establishment, low production of bulbs and low levels of sugars during their physiological stage in the field. Therefore, the objective was to evaluate the growth of *Agave americana* var. *oaxacensis*, and its production of rhizomes in different substrates, fertigation and application of N6-benzylaminopurine (BAP). The experiment was established under a completely randomized design, with six treatments. The experimental unit was one plant and there were five repetitions per treatment. The agaves were irrigated with water, or fertigated with nutrient solution (SN) or with SN+ benzylaminopurine (BAP), twice a week for 140 days. The data were analyzed using analysis of variance, tests of means (Tukey, 0.05) and orthogonal contrasts. After 140 days, the plants in agricultural soil (SA) + bovine manure (AB), fertigated with SN+ 20 mg L⁻¹ of BAP reached the best growth in the measured variables; in such way that the increase in rhizomes, plant height, number

of leaves and stem diameter improved respectively by: 20.0, 19.8, 12.7 and 26.1 % in relation to the control group (plants in SA and irrigated with water). Nutrient supply through fertigation or incorporating organic fertilizer into the substrate, as well as the application of cytokinins stimulate the growth of *A. americana* var. *oaxacensis* and develop more rhizome shoots.

Index words: cytokinin, rhizome emission, nutrient solution, substrates.

INTRODUCCIÓN

México, es considerado como centro de origen y diversificación de los agaves que son especies vegetales de gran importancia económica y cultural. En el país se encuentra el 75 % de especies (García-Mendoza, 2007) y su alta diversidad genética ofrece la oportunidad de seleccionar individuos que sobresalgan en adaptación a ambientes particulares, productividad y calidad de las cosechas (Eguiarte y González, 2009); lo anterior, se observa en variaciones morfológicas y fisiológicas, por lo que algunas especies son aprovechadas como alimento, obtención de fibras, mientras que a partir de otras se elaboran jarabe fructosado, bebidas (fresca, fermentada, destilada) y forraje (Colunga-García et al., 2017).

En el estado de Oaxaca, las especies de agaves se propagan de forma sexual y asexual; aunque los viveristas utilizan dos tipos de plantas obtenidas de forma asexual: las que se originan de bulbilos desarrollados en la inflorescencia, y plantas originadas de vástagos de rizoma (Enríquez-del Valle, 2008; García-Mendoza, 2007). Ambos tipos de plantas son resistentes y vigorosas, teniendo una tasa de sobrevivencia de alrededor del 95 % en campo (Wang y Cronk, 2003); sin embargo, la mayoría de viveristas no fertilizan las plantas, por lo que éstas no se desarrollan adecuadamente antes de su trasplante a campo. La sobrevivencia y tiempo para que las plantas reinicien el crecimiento en campo, depende principalmente de su calidad morfológica,

fisiológica y sanidad de acuerdo a su manejo en vivero (Bernaola-Paucar et al., 2015).

En la axila de cada hoja se encuentra una yema vegetativa y un rizoma desarrolla a partir de la brotación de una de estas yemas (Cervantes et al., 2007; Enríquez-del Valle, 2008); por otro lado, la dominancia apical es la inhibición de la brotación de yemas axilares debido a la actividad de la yema apical (Shin et al., 2020). La brotación de yemas axilares se estimula mediante la eliminación de la yema apical, o mediante aplicación de citoquinina, o dosis altas de fertilización (principalmente nitrogenada) y a menudo la brotación de las yemas se reprime mediante la aplicación exógena de auxinas justo encima de la yema lateral. Cuando ocurre la activación de alguna yema axilar y el alargamiento del nuevo brote, éste puede comenzar a producir su propia auxina (Su y Zhang, 2014).

La aplicación exógena de reguladores de crecimiento (*RC*), auxinas, giberelinas y citocininas, es otra alternativa para influir en el desarrollo vegetal; los reguladores de crecimiento son compuestos orgánicos producidos por la planta y que en bajas concentraciones tienen efectos en procesos metabólicos a nivel celular (Alcántara et al., 2019); aunado a esto, la mayoría de estudios reportados en plantas de agave se enfocan en evaluar el efecto de las fitohormonas sobre el crecimiento de cultivos *in vitro* (Borjas et al., 2020).

Las poblaciones de *A. americana* var. *oaxacensis* (maguey arroqueño) para la elaboración de mezcal han disminuido notablemente (Domínguez et al., 2008). A pesar de su importancia, es escasa la información sobre la propagación y cultivo (Morales et al., 2008). Por lo anterior, el objetivo fue evaluar en vivero el crecimiento de plantas de *A. americana* var. *oaxacensis* y desarrollo de rizomas, al someterlas a diferentes sustratos, fertirriego y aplicación de N6-bencilaminopurina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño de muestreo

Se seleccionaron 30 plantas de *A. americana* var. *oaxacensis* obtenidas *in vitro* mediante la organogénesis de brotes adventicios a partir de tejidos de tallo y el posterior enraizado de los brotes. Las plantas se aclimataron en invernadero y posteriormente en el vivero del Tecnológico Nacional de México/IT Valle de Oaxaca. A la edad de un año de crecimiento *ex vitro*, se colocaron en contenedores de 20 cm de diámetro por 25 cm de altura (7.8 cm³), que contenían los sustratos de suelo agrícola (SA) solo o SA combinado en proporción 1:1 con abono bovino (AB). Antes de preparar la mezcla, los materiales SA y el AB fueron tamizados mediante una malla, para eliminar pequeñas piedras, semillas de malezas, algunas pupas y larvas de insectos. Se estableció una planta en cada contenedor y se tuvieron 20 plantas en contenedores con SA y 10 plantas en contenedores con la mezcla de SA-AB. Las plantas fueron evaluadas durante un periodo de 140 días (febrero-junio), en sustrato SA-AB, se fertirrigaron con la solución nutritiva (SN), de la fórmula Steiner (1984) y se separaron en dos grupos para aplicarles dos condiciones de riego bajo los tratamientos que se indican en la **Tabla I**. La SN de Steiner (1984) contiene en mg L⁻¹: 166.42 N, 30.68 P, 276.44 K, 182.34 Ca, 49.09 Mg, 111.15 S, 1.25 Fe, 0.21 Mn, 0.025 Zn, 0.076 B, 0.005 Cu y 0.021 Mo.

Manejo y análisis de datos

El experimento se estableció en diseño completamente al azar, usando como unidad experimental una planta con cinco repeticiones. En los datos se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilks y Bartlett ($\alpha = 0.05$). Los datos se sometieron a análisis de varianza, comparación de medias (Tukey, 0.05) y contrastes ortogonales. Todos los análisis se realizaron con el paquete estadístico SAS 9.4. (SAS Institute, 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las plantas de *A. americana* var. *oaxacensis* que se evaluaron a los 140 días en vivero, mostraron diferencias de tamaño ($p \leq 0.01$) (**Tabla 2**) en respuesta al abastecimiento nutrimental, debido al abono incorporado en el sustrato, así como la aplicación de solución nutritiva, y la citocinina BAP incorporada en la solución nutritiva. Además, se observaron diferencias en magnitud de crecimiento de las plantas en los diversos tratamientos, particularmente en la cantidad de hijuelos de rizoma (**Figura 1 y 2**).

Tabla I. Tratamientos aplicados a plantas de agave sometidas durante 140 días a diferentes sustratos, dosis de fertilización y bencilaminopurina.

Tratamientos	Factores
T1	SA-AB + SN, 20 mg L ⁻¹ de BAP
T2	SA-AB + SN
T3	SA, + SN y 20 mg L ⁻¹ de BAP
T4	SA + SN
T5	SA + SN y 10 mg L ⁻¹ de BAP
T6	SA y agua común

SA = suelo agrícola; AB = abono bovino; SN = solución nutritiva; BAP = bencilaminopurina.



Figura. 1. A) Plantas de *Agave americana* var. *oaxacensis* en vivero. B) Desarrollo de vástagos de rizoma en los laterales de las plantas.

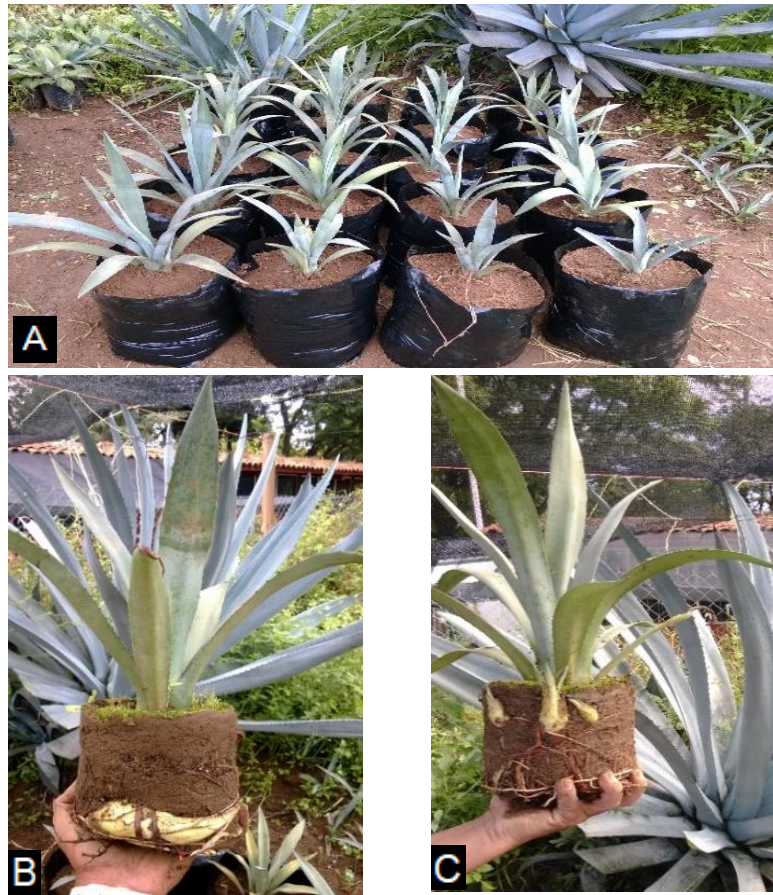


Figura 2. Desarrollo de vástagos de rizoma en plantas de *Agave americana* var. *oaxacensis* debido al efecto de diferentes condiciones de sustratos, abastecimiento nutricional en riego y aplicación de citocinina. A) Plantas con dos meses de fertirriego; B) planta en que se observa el desarrollo de rizoma; C) Planta con tres hijuelos de rizoma de tamaños diferentes.

Son escasos los reportes que describen el desarrollo de hijuelos de rizoma en especies de agaves y los efectos de diversas condiciones ambientales y de cultivo que influyen en la cantidad de hijuelos que forma la planta. En plantas obtenidas de bulbilos de inflorescencia de *Agave angustifolia* Haw que se evaluaron desde los 8 a los 20 meses de edad en vivero, Garnica-García et al. (2021) y Jarquín-Rosales et al. (2023) indican que están iniciando el desarrollo de hijuelos de rizoma. Por otro lado, Jarquín-Rosales et al. (2023) mostraron que plantas de *A. angustifolia*, originadas de bulbilos y sometidas a abastecimiento nutrimental y sustratos diferentes y fertirrigadas e inoculadas con la bacteria promotora de crecimiento *Azospirillum* sp. tuvieron tamaño mayor y desarrollaron cantidad mayor de rizomas, en comparación a plantas que recibieron menor abastecimiento nutrimental.

Los tratamientos que contenían sustrato SA-AB, SN con 20 mg L⁻¹ de bencilaminopurina (BAP) mostraron diferencias de efecto altamente significativas ($p \leq 0.01$) en altura de planta, número de hojas, diámetro de tallo y la cantidad de vástagos de rizoma. De acuerdo con las comparaciones de contrastes ortogonales planteadas, se comportaron de la siguiente manera: las plantas en los tratamientos que contenían abono bovino, SN y/o BAP, resultaron superiores en las variables número de rizomas, altura de la planta, número de hojas y diámetro del tallo ($p \leq 0.05$). Las plantas del grupo testigo su tamaño promedio fue inferior a la media de las plantas en los demás tratamientos (Tabla 2).

Tabla 2. Resumen del análisis de varianza de las características de las plantas de agave sometidas durante 140 días a diferentes sustratos, dosis de fertilización y bencilaminopurina.

FV/contraste (C)	GL	Cuadrados medios y significancia			
		NRIZO	Altura (cm)	NH	DT (cm)
Tratamiento (trat)	5	2.94 **	38.07 **	3.39 **	3.08 **
CI (trat 1,2 vs. trat 3,4,5,6)	1	3.750 *	104.280 **	8.81 **	2.016 **
C2 (trat 1 vs. trat 2)	1	3.600 *	23.409 *	0.400 ns	1.849 **
C3 (trat 3,5 vs. trat 4,6)	1	4.81 *	35.72 **	2.81 **	8.97 **
C4 (trat 1,2,3,4,5 vs. trat 6)	1	2.13 *	1.36 ns	3.33 **	2.58 **
C5 (trat 3 vs. trat 5)	1	0.400 ns	25.600 **	1.600 *	0.004 ns
CV (%)		24.2	2.4	3.2	1.7
RCME		0.605	1.044	0.547	0.164
Error	24				
Total	29				

FV = fuente de variación, CV = coeficiente de variación, RCME = raíz cuadrada media del error, GL = grados de libertad, NRIZO = número de vástagos de rizoma, NH = número de hojas, DT = diámetro de tallo. C= contraste ortogonal; CI = suelo agrícola más abono vs. suelo agrícola sin abono, C2 = suelo agrícola más abono, BAP vs. abono sin BAP, C3 = suelo agrícola más BAP vs. suelo agrícola sin BAP, C4 = SN vs. agua, C5 = BAP 20 mL vs. BAP 10 mL. **altamente significativo ($p \leq 0.01$). * significativo ($p \leq 0.05$), ns no significativo ($p > 0.05$).

La promoción del desarrollo de mayor cantidad de hijuelos de rizoma debido al abastecimiento nutrimental coincide con lo reportado en dos experimentos de campo (Sitangshu et al., 2018; Sitangshu et al., 2017) realizados en cultivos de sisal (*A. sisalana* Perr. Ex. Engelm), en Bamra, Odisha, India, en que se evaluó el potencial de producción de hijuelos de rizoma en plantas que se sometieron a diferentes niveles de tres factores: dos niveles de riego, dosis de aplicación de abono, y diferentes dosis de fertilizantes químicos; en donde encontraron que la aplicación de riego por goteo, abono y fertilizantes ($N_{60} P_{30} K_{60}$ o $N_{120} P_{30} K_{60}$ kg ha⁻¹), ejerció un efecto positivo en las plantas para aumentar su producción de hijuelos de rizoma. La producción de hijuelos de rizoma fue de 23.4 hasta 24.2×10^3 ha⁻¹. Las plantas durante los 7 a 12 años de edad produjeron un total de 142.6×10^3 hijuelos de rizoma ha⁻¹. La cantidad de hijuelos producidos cada año disminuyó gradualmente a partir del año 7 hasta el 12, después del cual el cultivo de sisal completó su ciclo de vida con el desarrollo del escapo floral y posterior muerte de las plantas.

Por otro lado, el contraste ortogonal C1, muestra que la incorporación de abono al sustrato tuvo efecto positivo en el desarrollo de las plantas. Se observa que, en las plantas establecidas en sustrato de suelo con abono vs. plantas en suelo sin abono, desarrollaron 3 y 2.2 hijuelos de rizoma, 45.7 y 41.79 cm de altura, 17.6 y 16.45 hojas, así como 9.89 y 9.34 cm de diámetro de tallo, cantidades significativamente diferentes. En el

contraste ortogonal C2, se observó que la citocinina BAP tuvo efecto positivo en el desarrollo de las plantas, que se establecieron en suelo con abono, SN y BAP, en contraste con las plantas en suelo con abono, SN sin BAP, presentaron 3 y 2.4 hijuelos, 47.3 cm y 44.2 cm de altura, 10.32 cm y 9.46 cm en diámetro de tallo, magnitudes significativamente diferentes ($p \leq 0.05$), mientras que tuvieron 17.8 y 17.4 hojas, que fueron valores no significativamente diferentes ($p > 0.05$). El contraste ortogonal C3, muestra que cuando no se incorporó abono al suelo, el abastecimiento de nutrimentos mediante solución nutritiva estimuló el desarrollo de las plantas, ya que las plantas que se establecieron en suelo agrícola e irrigaron con SN vs. plantas en suelo agrícola, irrigadas con agua, desarrollaron de 2.53 y 1.4 hijuelos de rizoma, de 42.56 y 39.48 cm de altura, 16.6 y 15.80 hojas, 9.72 y 8.18 cm en diámetro de tallo, en cada caso fueron significativamente diferentes ($p \leq 0.05$). El contraste ortogonal C4, muestra que la aplicación combinada de abastecimiento nutrimental mediante solución nutritiva y con citocinina, tuvo efecto significativo ($p \leq 0.05$) para promover mayor desarrollo en las plantas; ya que las plantas establecidas en suelo, SN, BAP vs. suelo, agua y sin BAP, presentaron 2.8 y 1.4 hijuelos de rizoma, con 17.0 y 5.8—hojas, 10.02 y 8.18 cm en diámetro de tallo; mientras que en la altura de plantas no hubo efecto significativo ($p > 0.05$) con promedios de 42.8 y 39.5 cm.

Tabla 3. Características de plantas de *Agave americana* var. *oaxacensis* en vivero y en diferentes condiciones de sustrato, abastecimiento nutrimental en el riego y aplicación de bencilaminopurina.

Tratamiento	Inc. vástagos de rizoma	Alt planta (cm)	Número de hojas (cm)	Diámetro del tallo (cm)
1) SA-AB, SN+BAP (20 mg l ⁻¹)	3.60 ^a	47.3 ^a	17.8 ^a	10.32 ^a
2) SA-AB, SN	2.40 ^{ab}	44.2 ^b	17.4 ^a	9.46 ^b
3) SA, SN+BAP (20 mg l ⁻¹)	2.60 ^{ab}	41.2 ^{cd}	16.6 ^c	10.00 ^a
4) SA, SN	2.00 ^{bc}	42.1 ^c	16.0 ^c	9.14 ^b
5) SA, SN+BAP (10 mg l ⁻¹)	3.00 ^{ab}	44.4 ^b	17.4 ^a	10.04 ^a
6) SA + agua	1.40 ^c	39.5 ^d	15.8 ^c	8.18 ^c

SA = suelo agrícola; AB = abono bovino; SN = solución nutritiva, Alt = altura; Inc.= incremento; BAP = bencilaminopurina. Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas (Tukey, 0.05).

En el contraste ortogonal C5, se observó que en las plantas en suelo y que recibieron SN, al aplicar citocinina *BAP*, las dosis de ésta mostraron diferencias de efecto en el crecimiento de las plantas; ya que aquellas plantas a las que se aplicó SN con 20 mg L⁻¹ de *BAP* y las plantas irrigadas con SN y 10 mg L⁻¹ presentaron alturas de 41.2 y 44.4 cm, 16.6 y 17.4 hojas, magnitudes significativamente diferentes ($p \leq 0.05$); además, presentaron diámetros de tallo de 10.0 y 10.0 cm, así como 2.6 y 3.0 hijuelos, magnitudes no significativos ($p > 0.05$) (Tablas 2 y 3).

Garnica-García et al. (2021) reportaron que plantas de *A. angustifolia* establecidas en sustrato que, en relación a su volumen tuvieron 17.5 a 35 % de abono orgánico, acumularon más biomasa y sus tejidos foliares obtuvieron mayor contenido de nutrientes: N, P, K, Fe, Zn, B y Mg; además, desarrollaron mayor altura, número y tamaño de hojas, volumen foliar, raíces, tallo y vástagos de rizoma, en comparación a plantas que estuvieron

en sustrato que no se incorporó fertilizante orgánico. Resultados similares, en plantas de *A. angustifolia* Haw propagadas *in vitro* y adaptadas durante seis meses en vivero estuvieron en sustratos con compost y se fertirrigaron, lograron mayor tamaño, en comparación a las plantas que estuvieron en sustrato con menor contenido de materia orgánica e irrigadas con agua (Enríquez-del Valle, 2008; Enríquez-del Valle et al., 2005).

Cabe mencionar que las plantas establecidas durante los 140 días en sustrato con SA-AB, fertirrigadas con SN y aplicación de *BAP* a 10 y 20 mg L⁻¹, mostraron tamaño superior, comparándolas con las plantas del Tratamiento I, desarrollaron mayor número de rizomas, altura de la planta, número de hojas y diámetro del tallo mensualmente en comparación a las plantas en T6, establecidas en sustrato que no tenía abono, e irrigaron con agua (Figura 3).

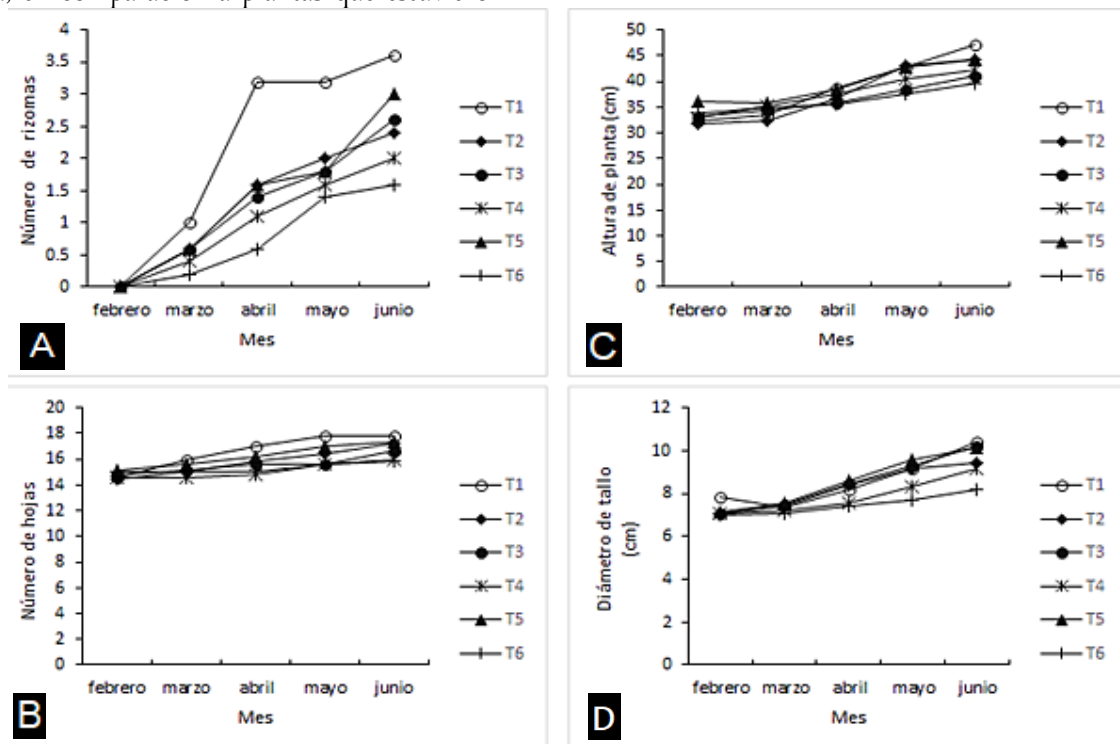


Figura 3. En plantas sometidas a los diversos tratamientos de abono en el sustrato, riego con solución nutritiva, SN, y citocinina en la SN. Tasa de crecimiento mensual durante el experimento en: a = número de rizomas, b = número de hojas, c = altura de la planta, d = diámetro de tallo.

Por otro lado, Ríos-Ramírez et al. (2021) evaluaron los contenidos nutrimentales en tejidos foliares y su relación con el tamaño de las plantas de *A. angustifolia*, en condiciones de vivero, fertirrigadas a diferentes concentraciones de nutrimentos. Las plantas fueron de tamaño mayor conforme se les abasteció con cantidades crecientes de *SN*. De manera similar, Sánchez-Mendoza y Bautista-Cruz (2022) evaluaron el efecto de la aplicación de fertilizantes de liberación lenta y fitohormonas en el crecimiento y contenido de azúcares en plantas de *A. angustifolia* Haw.; como resultado, estas plantas fueron superiores (10.1 %) en número de hojas (*NH*), 10.4 % en altura de planta (*AP*), 10.2 % en diámetro de tallo (*DT*), 28.4 % en peso fresco foliar y 33.1 % en peso fresco aéreo (*PFT*). Por lo anterior, los datos del presente trabajo muestran el inicio del efecto positivo del abastecimiento nutrimental y de una citocinina, en el crecimiento de las plantas y el desarrollo de hijuelos de rizoma; sin embargo, es conveniente evaluar las plantas durante un periodo mayor para observar diferencias más marcadas del efecto de tratamientos.

Al evaluar el crecimiento, nutrición y contenido de sólidos solubles totales (*TSS*, azúcares) de agave coyote (*Agave* spp.) en respuesta a la aplicación de fertilizantes de liberación lenta (*SRFs*) en condiciones de campo, Castillejos-Reyes et al. (2023) encontraron que plantas que se establecieron en sustrato en que se incorporó fertilizante Osmocote, éstas crecieron más, 28.4 % en el número de hojas desplegadas, 77.0 % en el peso fresco de hojas, 62.8 % en el peso fresco de tallo, 177.0 % en peso seco de hojas, 53.1 % en peso seco de tallo y 39.1 % en peso seco de raíz, con respecto a las plantas no fertilizadas. Por otro lado, Espinoza-González et al. (2022) al evaluar los efectos del tamaño de cormo (*TC*) y bencilaminopurina (*BAP*) sobre la proliferación de plántulas del plátano, *Musa*, encontraron que los efectos principales al aplicar *BAP* produjo un 30 % y 31 % de incrementos de tasa de multiplicación por cormo y por m², respectivamente, en relación al tratamiento sin *BAP*. Enríquez-del Valle et al. (2016) al evaluar

durante cinco meses en vivero el desarrollo de plantas micropropagadas-aclimatizadas de *Agave potatorum* Zucc que se fertirrigaron con cantidades diferentes de nutrimentos, observaron que las plantas fertirrigadas con solución nutritiva diluida a 1 % y plantas irrigadas con solución nutritiva completa (100%) presentaron 9.8 y 17 hojas, 126.53 y 392.35 cm² de área foliar, 2.22 y 2.84 cm de diámetro del tallo, 10.5 y 17.4 raíces primarias, 4 y 7.4 cm³ de volumen de raíz, 2.79 y 6.50 g de peso seco foliar, respectivamente. Las evidencias obtenidas en el presente estudio muestran que las plantas alcanzaron mayor tamaño en respuesta al abastecimiento nutrimental, ya sea mediante abono en el sustrato, riego con solución nutritiva, e incorporación de una citocinina en la solución nutritiva. Los reguladores de crecimiento vegetal influyen en las rutas de desarrollo, ya que en cultivos *in vitro* de *Agave americana*. Reyes-Zambrano et al. (2016) reportaron que el ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) y de 6-bencil adenina (*BA*) inducen la formación de callos embriogénicos, y encontraron que la organogénesis indirecta podría ser una alternativa para la micropropagación de *A. americana* L. con fines comerciales.

CONCLUSIONES

Las plantas de *Agave americana* var. *oaxacensis* que en condiciones de vivero se establecieron en sustrato con abono bovino y además recibieron abastecimiento nutrimental mediante fertirriego, alcanzaron mayor tamaño en altura, diámetro de tallo, número de hojas y número de vástagos de rizoma. El abastecimiento nutrimental mediante abono o fertirriego, complementado con la aplicación de la citocinina *BAP*, promueve que las plantas desarrollen mayor cantidad de hijuelos de rizoma; además, a los 140 días de fertirriego con 20 mg L⁻¹ de *BAP* y sustrato de suelo agrícola-abono, los agaves fueron más grandes en todas las variables evaluadas y en promedio tres vástagos de rizoma por planta, en comparación a las sometidas a las otras condiciones.

REFERENCIAS

- Alcántara C. J. S., Acero, G. J., Alcántara C. J. D. y Sánchez, M. (2019). Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *Nova*, 17(32), 109-129. <http://dx.doi.org/10.22490/24629448.3639>
- Bernaola-Paucar, R. M., Pimienta-Barrios, E., Gutiérrez-González, P., Ordaz-Chaparro, V. M., Alejo-Santiago, G. y Salcedo-Pérez, E. (2015). Volumen del contenedor en calidad y supervivencia de *Pinus hartwegii* Lindl en sistema doble-trasplante. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(28), 174-187.
- Borjas, V., R., Julca, O., A. y Alvarado, H., L. (2020). Las fitohormonas una pieza clave en el desarrollo de la agricultura. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 8(2), 150-164. <https://doi.org/10.36610/j.jsab.2020.080200150>
- Castillejos-Reyes, C., Bautista-Cruz, A., Sánchez-Mendoza, S. & Quiñonez-Aguilar, E. E. (2023). Response of agave coyote (*Agave* spp.) to the application of slow-release fertilizers under conditions. *Revista Bio Ciencias*, 10, e1431. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1431>
- Colunga-García, P., Torres, G. I., Casas, A., Figueredo-U, C., Rangel-L, S., Lemus, A., Vargas-P, O., Cabrera-T. D., Zizumbo-V. D., Aguirre-D. X., Eguiarte, L. y Galván, G. (2017). Los agaves y las prácticas mesoamericanas de aprovechamiento, manejo y domesticación. In: *Domesticación en el Continente Americano*, Vol. Cap. II, pp. 273-308.
- Cervantes, M.T., Armenta, C.A.D. y Sánchez, A.J.G. (2007). El cultivo del maguey bacanora (*Agave angustifolia* Haw.) en la sierra de Sonora. Publicación Técnica No. I. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Fundación Produce Sonora, Universidad de la Sierra. Hermosillo, México. 37 p.
- Domínguez, R. M. S., González, M. L., Rosales, C., Quiñones, C., Delgadillo, L. Mireles, J. y Pérez, B. E. (2008). El cultivo *in vitro* como herramienta para el aprovechamiento, mejoramiento y conservación de especies del género *Agave*. España. *Investigación y Ciencia*, 16, 53-62.
- Enríquez-del Valle, J. R. (2008). *La propagación y crecimiento de agaves*. Fundación produce Oaxaca A. C. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. México. 46 p.
- Enríquez-del Valle, J. R., Alcará-Vázquez, S. E., Rodríguez-Ortiz, G., Miguel-Luna, M. E. y Manuel-Vázquez, C. (2016). Fertirriego en vivero a plantas de *Agave potatorum* Zucc micropropagadas-aclimatizadas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 1167-1177.
- Enríquez-del Valle, J.R., G. Carrillo-Castañeda, y J. Rodríguez-de la O. (2005). Sales inorgánicas y ácido indolbutírico en el enraizamiento in vitro de brotes de *Agave angustifolia*. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 28, 175-178.
- Eguiarte, L. E. y Gonzáles, G. A. (2009). De genes y magueyes estudio y conservación de los recursos genéticos del tequila y el mezcal. Ciencias, No 087, Universidad Autónoma Nacional de México (UNAM).
- Espinoza-González, J., Bustamante-González, A. y Cedeño-García, G. (2022). Efectos del tamaño de corno y bencilaminopurina sobre la proliferación del plátano en dos ambientes de propagación. *Ciencia y Agricultura*, 19(1), 45-60. <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n1.2022.13905>
- García-Mendoza, A. J. (2007). *Los agaves de México*. Universidad Autónoma Nacional de México, Distrito Federal, México. 23 p.
- Garnica-García, R., Enríquez-del Valle, J. R., Rodríguez-Ortiz, G., Pérez-León, I., Trejo-Calzada, R., Morales, I. (2021). Plant growth and rhizome shoots of *Agave angustifolia* in different substrates, with fertigation and benzylaminopurine. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 32, 702-710. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2020.v32.i9.2141>

- Jarquín-Rosales, D., Enríquez-del Valle, J. R., Alpuche-Osorio, J. J., Rodríguez-Ortiz G., Campos-Ángeles, G. V., Morales, I. (2023). *Agave angustifolia* bulbil growth in different substrates, with doses of fertigation and inoculation with *Azospirillum brasilense*. *Ciencia Rural Journal*, 53(3), 3-13. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210863>
- Morales, R. M. M., Torrez, M. M. I. y De la Cruz, L. L. (2008). Relación fenotípica entre plantas de *Agave tequilana* provenientes de micropropagación y de propagación convencional por hijuelos. Instituto de Manejo y Aprovechamiento de Recursos Fitogenéticos. Departamento de Producción Agrícola. CUCBA. *XIX Semana Nacional de la Investigación Científica*. Universidad de Guadalajara. pp. 55-61.
- Reyes-Zambrano, S. J., Lecona-Guzmán, C. A., Barredo-Pool, F. A., Ambrosio-Calderón, J. D., Abud-Archila, M., Rincón-Rosales, R., Ruiz-Valdiviezo, V. M. y Gutierrez-Miceli, F. A. (2016). Optimización de los reguladores de crecimiento para maximizar el número de brotes en *Agave americana* L. por organogénesis indirecta. *Gayana Botanica*, 73(1), 124-131. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432016000100014>
- Ríos-Ramírez, S. del C., Enríquez-del Valle, J. R., Rodríguez-Ortiz, G., Ruíz-Luna, J. y Velasco-Velasco, V. A. (2021). El crecimiento de *Agave angustifolia* Haw. con relación a la condición nutrimental. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5), 865-873. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2638>
- SAS Institute. (2022). The SAS system for Windows user's guide. Release 9.4 SAS Institute. Cary, NC. USA. Disponible en <https://support.sas.com/en/documentation/install-center/94/installation-guide-for-windows.html>
- Sánchez-Mendoza, S. y Bautista-Cruz, A. (2022). Efecto de fertilizantes de liberación lenta y fitohormonas en el crecimiento de *A. angustifolia* Haw. *Entreciencias*, 10(24), 1-11. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.82738>
- Sitangshu, S., Jha, A. K., Majumdar, B. & Saha, A.R. (2018). Influence of drip-irrigation, manure and fertilizers on production of planting material in sisal (*Agave sisalana* Perr. Ex Engelm.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 7(9), 1934-1941. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.709.235>
- Sitangshu, S., Saha, A. R. & Majumdar, B. (2017). Sucker production potential of sisal (*Agave sisalana* Perr. Ex. Engelm.) as influenced by drip-irrigation, manure and fertilizers. *International Journal of Current Agricultural Research*, 5(6), 221-223.
- Su, Y. & Zhang, X. (2014). The hormonal control of regeneration in plants. *Current Topics in Developmental Biology*, 108, 35-69. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391498-9.00010-3>
- Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture. Lunteren. *International Society for Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands*. Pp. 633-650.
- Shin, J., Bae, S. & Seo, P. (2020). De novo shoot organogenesis during plant regeneration. Review paper. *Journal of Experimental Botany*, 71(1), 63-72. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz395>
- Wang, C. N. & Cronk, Q. C. (2003). Meristem fate and bulbil formation in *Titanotrichum* (Gesneriaceae). *American Journal of Botany*, 90, 1696-1707.

DESARROLLO FENOLÓGICO DEL CULTIVO DE MALANGA EN CONDICIONES DE INVERNADERO

PHENOLOGICAL DEVELOPMENT OF TALO CULTIVATION UNDER GREENHOUSE CONDITIONS

¹Ignacio Garay-Peralta , ¹Jesús Herrera-Alarcón , ²Alfredo Díaz-Criollo , ²Marlén Daniela Domínguez-Vazquez , ³Jesús Alberto Garza-Ortega 

^{1,2}Investigador, estudiante Tecnológico Nacional de México (TecNM), Campus Úrsulo Galván (ITUG). Carretera Cardel-Chachalacas km 4.5. Colonia Campestre, en Úrsulo Galván, Veracruz, México. C.P. 91667.

³TecNM, Campus Matehuala (ITMH). Carretera Matehuala -Saltillo km 5. Col Aviación, en Matehuala, San Luis Potosí, México C.P. 78746. [§]Autor de correspondencia: (ignacio.gp@ugalvan.tecnm.mx).

RESUMEN

El cultivo de malanga (*Colocasia esculenta* L. Schott) es una planta originaria del sur de Asia, que ha ganado importancia en regiones tropicales de América debido a su alto valor nutritivo y a su potencial comercial. En México, la producción se concentra en el estado de Veracruz, principalmente en los municipios de Actopan y Úrsulo Galván. El presente estudio se llevó a cabo en el Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván, con el objetivo de evaluar el desarrollo fenológico de la malanga bajo condiciones de invernadero. Se utilizaron 200 plantas en un diseño experimental de bloques completos al azar, evaluando cuatro tratamientos con y sin acolchado plástico más foliares y sin ellos. Las variables analizadas fueron altura y diámetro del tallo y peso del propágulo. Se realizó un análisis de varianza para determinar diferencia estadística entre tratamientos. La comparación de prueba de medias fue por Tukey ($\alpha = 0.05$). Los resultados indicaron que los propágulos provenientes de parcelas comerciales mostraron una adecuada adaptabilidad y desarrollo en condiciones controladas, siendo viables para su uso en sistemas productivos. No se encontraron diferencias significativas en el diámetro del tallo, pero sí en la altura de los propágulos. Se concluye que la malanga cultivada en invernadero representa un potencial para su comercialización y expansión agrícola en zonas tropicales. Se sugiere continuar con investigaciones

adicionales para optimizar las prácticas de cultivo y mejorar la calidad de los propágulos.

Palabras clave: acolchado, fenología, nutriente, propágulos, variables.

ABSTRACT

Malanga (*Colocasia esculenta* L. Schott) is a plant native to southern Asia that has gained importance in tropical regions of the Americas due to its high nutritional value and commercial potential. In Mexico, production is concentrated in the state of Veracruz, mainly in the municipalities of Actopan and Úrsulo Galván. The present study was carried out at the Úrsulo Galván Technological Institute, with the objective of evaluating the phenological development of malanga under greenhouse conditions. Two hundred plants were used in a randomized complete block experimental design, evaluating four treatments with and without plastic mulch plus foliar and without them. The variables analyzed included stem height and diameter, as well as propagule weight, performing an analysis of variance and to determine if there is a statistical difference, a Tukey ($\alpha = 0.05$) mean comparison test was applied. The results indicated that propagules from commercial plots showed adequate adaptability and development under controlled conditions, being viable for use in productive systems. No significant differences were found in stem diameter, but significant

differences were found in propagule height. It is concluded that malanga grown in greenhouses represents a potential for commercialization and agricultural expansion in tropical zones. It is suggested to continue with further research to optimize cultivation practices and improve the quality of propagules.

Index words: mulching, phenology, nutrient, propagules, variables.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de malanga (*Colocasia esculenta* L. Schott) es de las plantas vegetales con mayor antigüedad en el mundo, ya que existe evidencia documentada que señala su presencia desde hace 10 mil años. Proviene del sur de Asia, transitó por África, posteriormente llegó a las zonas tropicales del continente americano por las embarcaciones de esclavos. Existen más de 15 variedades que se propagan vegetativamente y que son cultivables en América, incluyendo el Caribe (Erazo-Díaz, 2022). Los cultivos de tubérculos y raíces se encuentran en el segundo lugar a nivel mundial para superficie sembrada de 47 millones de hectáreas y una producción de 556 millones de toneladas. Si bien es un cultivo no tradicional y por sus características de zona tropical es un producto factible de cultivarse y colocar a México como el principal proveedor de Estados Unidos (Mazariegos-Sánchez et al., 2017).

El volumen de producción nacional es de 47,000 t, generando un valor económico de 252 millones de pesos. El estado de Veracruz es el principal productor con 43 mil t, cultivada principalmente en los municipios de Actopan y Úrsulo Galván, sin embargo (SIAP, 2023a). Para la siembra de malanga se emplean densidades de población entre 12 a 17 mil plantas ha⁻¹, con rendimientos promedio de 40 t ha⁻¹ en ciclos de entre seis y ocho meses.

Específicamente en ambientes tropicales, la malanga ha sido fundamental dentro de los

alimentos cotidiano y significativo con sus pobladores (Arano, 2019).

Este cultivo se enmarca en los productos denominados exóticos o no tradicionales, cuyo consumo mundial ha tenido un auge importante aprovechando el interés por parte de sectores crecientes de consumidores. Debido al contenido de almidón de estructura micro-granular, minerales y vitaminas (magnesio, hierro, fósforo, potasio, sodio, cobre y manganeso, vitamina C, vitamina E y vitamina B6) hacen de la malanga una fuente de alimentos nutritiva y de alta digestibilidad (Bruso, 2017; Mundo Alimentos, 2011; Rodríguez-Miranda et al., 2011).

De acuerdo con el SIAP (2023b), para su cultivo en campo abierto se recomienda realizar un barbecho para después surcar a una distancia de 80 cm entre surcos. En la siembra se pueden utilizar los camotes o las plántulas (propágulos), en función de la disponibilidad de éstos. Si se decide por tubérculos, estos deben ser pequeños (menos de 200 g), enteros y sanos. Si se utilizan plántulas, se deben acondicionar podando las hojas y cortando parte del camote. Los productores de la zona de Actopan Veracruz reportan rendimientos promedios de 50 t ha⁻¹ (Nazario-Lezama et al., 2020).

Existen reportes de cultivo *in vitro* donde se demuestra que los medios de cultivo que contenían nitrato de plata y tiosulfato de sodio mantienen la asepsia y presentan un incremento en el número de explantes (Rodríguez, 2003; Astudillo-Robles, 2013; Martínez et al., 2013).

Sin embargo, no existe información acerca del comportamiento fenológico de la malanga en condiciones de invernadero, por lo que es necesario realizar investigaciones que sirvan como base o referencia para generar alternativas productivas y fortalecer las líneas de investigación en el TecNM campus Úrsulo Galván. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue de evaluar el desarrollo fenológico de la malanga bajo condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El trabajo se realizó en el área experimental del Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván., Veracruz, México, en un invernadero (360 m²) y se localiza en los paralelos 96° 22' LN y 19° 24' LO, con una altitud de 20 m (Garay-Peralta et al., 2024).

Diseño de muestreo

Se desarrolló una investigación de dos tratamientos: con y sin acolchado plástico. En cuatro unidades experimentales se evaluaron 200 plantas de malanga, en un diseño de bloques completos al azar (el gradiente de variación es sombra en la parte oeste).

Posteriormente se procedió a sembrar a una distancia de 40 cm entre plantas y un metro entre surcos en el invernadero, con un sistema de siembra de doble hilera. Los tratamientos fueron: 1-Sin acolchado plástico, 2-con acolchado plástico, 3-si acolchado plástico + foliares y 4-con acolchado plástico + foliares.

Imagen de propágulos

Es importante mencionar que el cultivo de malanga no es tan conocido en muchas partes del país e incluso del mundo, por ello la importancia de que conozcan los propágulos que se utilizaron en la investigación y como se colectó al menos la variable de altura del propágulo (Figura I).



Figura I. Propágulos de malanga, que se utilizaron para la investigación 2024.

Variables de estudio

Propágulo: se midió desde el tronco del tallo, hasta donde se seccionó por el “sacador de planta”. Esto se realizó con un flexómetro de 5 m de la marca Truper®. Diámetro de tallo: se estimó midiendo a 5 cm de la base del tallo con un vernier marca Truper®. Peso del propágulo completo: se registró en una báscula analítica de 6 kg de capacidad de la marca Truper®.

Manejo y análisis de datos

Los datos de las variables colectadas fueron analizadas con un ANOVA en el programa SAS (SAS Institute, 2004). Se utilizó la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) para la comparación de medias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Altura de propágulo

Para la variable altura de propágulo se encontró que el material vegetativo establecido en el tratamiento tres fue superior estadísticamente al resto ($p \leq 0.05$), esto se atribuye a que las personas que cortaron el material vegetativo realizaron la actividad de forma empírica, es decir cortaron por

“tanteo” la planta que van obteniendo de la plantación productora del germoplasma, para posteriormente meterla a las lonas y transportarla a los lugares donde se estableció (Figura 2). Aunque se aleatorizó el proceso de selección de propágulos para la siembra, esta condición pudo haber generado una fuente de variación adicional, que se reflejó en los resultados. Espinosa-Cuellar et al. (2011) y Torres-Rapelo et al. (2013) establecieron las plantas con una altura de 15 cm, una vez que fueron obtenidas de forma *in vitro*, mientras que Rodríguez-Fernández (2017), estableció propágulos de 20 a 30 cm en campo, aunque también existen reportes Rayas et al. (2013) de alturas de plantas de 1 a 3 cm, también obtenidas de forma *in vitro*, para evaluar la adaptabilidad en campo los cuales han tenido éxitos en su crecimiento y desarrollo.

Lo anterior se fundamenta mediante un coeficiente de determinación de 0.19, además se observa un escaso coeficiente de variación (8.06 %), lo que es indicativo de la baja variabilidad mostrada en la altura de los propágulos, una raíz media de 3.0 y una altura promedio de 37.6.

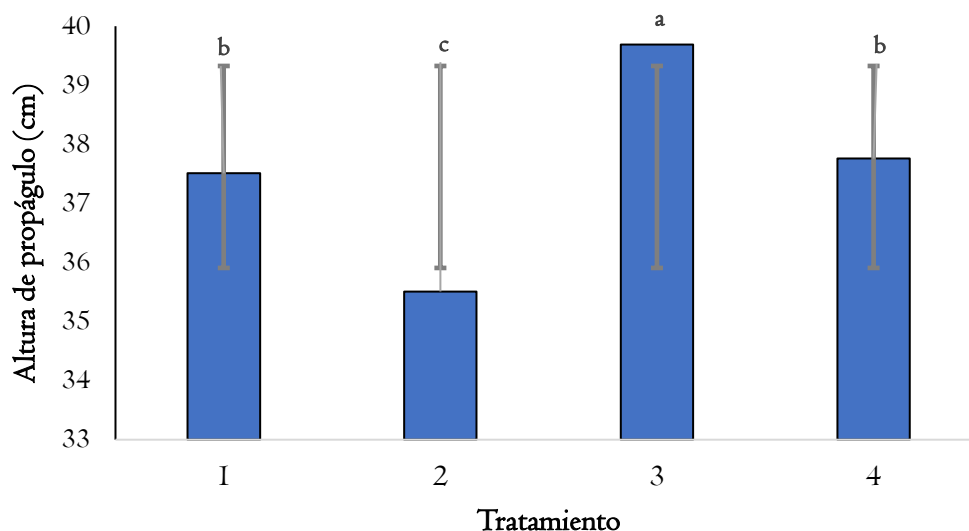


Figura 2. Altura de propágulos de malanga antes del establecimiento del cultivo en invernadero. Letras diferentes en las barras indican diferencia significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$), barras verticales = desviación estándar.

Diámetro de tallo

Para la variable diámetro de tallo, no se encontró diferencia estadística ($p > 0.05$); sin embargo es necesario destacar que al seleccionar los propágulos para la siembra de malanga los diámetros deberán ser de al menos 25.4 mm (Chemonics Internacional Inc., s/f), mientras que Madrigal-Abriz et al. (2018) comentan que su grosor debe estar sobre 39 mm, condición que se cumplió en este estudio, lo cual justifica los promedios obtenidos, aunque, Espinosa-Cuéllar et al. (2013) recomiendan diámetros de 6 cm a 7 cm (Figura 3), indicador de la calidad de los propágulos cultivados en invernadero.

Se observó una gran variabilidad en el diámetro en términos estadísticos (coeficiente de variación de 31.9 %), sin embargo, se considera aceptable en función de la variación natural presente en la plantación donde se extrajeron los propágulos, la cual fue de interés comercial. Estos datos se reafirman al tener una raíz del cuadrado medio del

error de 8.61 y un diámetro promedio de 26.93 mm por unidad experimental.

Peso propágulos

Para esta variable no se encontró diferencia estadística ($p > 0.05$), sin embargo, según González-Vélez & Ortiz-López, 1999; Mazariegos-Sánchez et al., 2017; Figueroa-Aguila et al., 2019; SIAP (2023b) el peso del material de propagación deberá ser menor de 200 g, por lo que se observa, de acuerdo a las medias, los propágulos utilizados no rebasaban los 90 g de peso; lo anterior incrementa la resistencia de los propágulos cuando se establece en campo o que no sean arrastrados por la corriente del agua. Espinosa-Cuéllar (2013); Rodríguez-Fernández (2017) mencionan que el peso adecuado o promedio oscila entre 59 g y 85 g; finalmente Gálvez-Guerra et al. (2013) comentan que al menos se deben considerar cinco repeticiones, sin embargo, en este experimente se superó el número de repeticiones recomendadas para tener mayor confiabilidad en los datos (Figura 4).

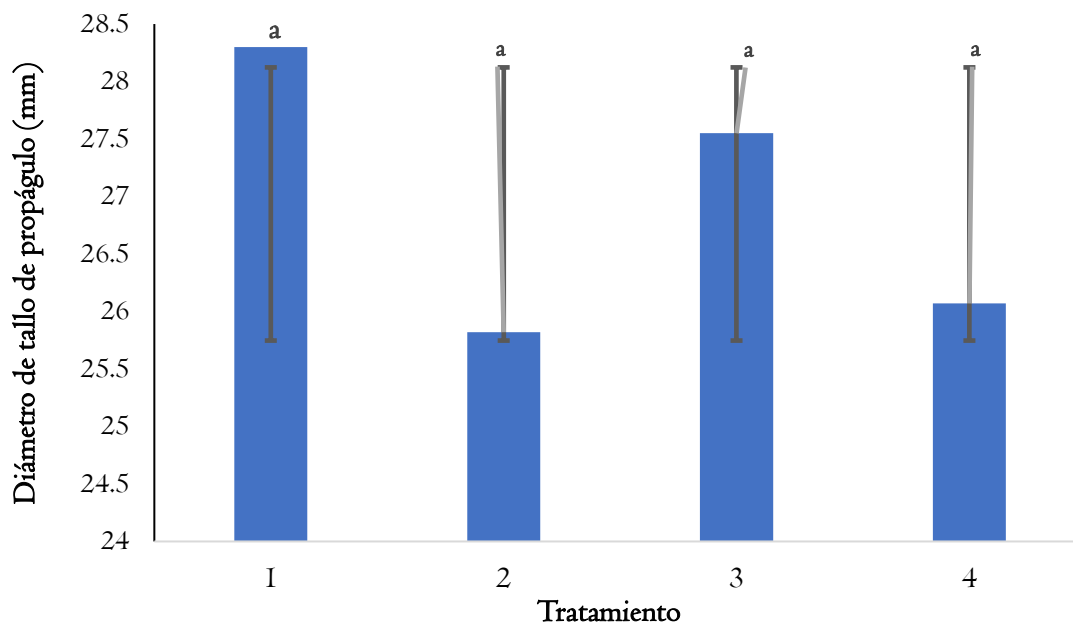


Figura 3. Diámetro de tallo promedio de los propágulos de malanga antes del establecimiento del cultivo en invernadero. Letras iguales en las barras indican que no existe diferencia significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$), barras verticales = desviación estándar.

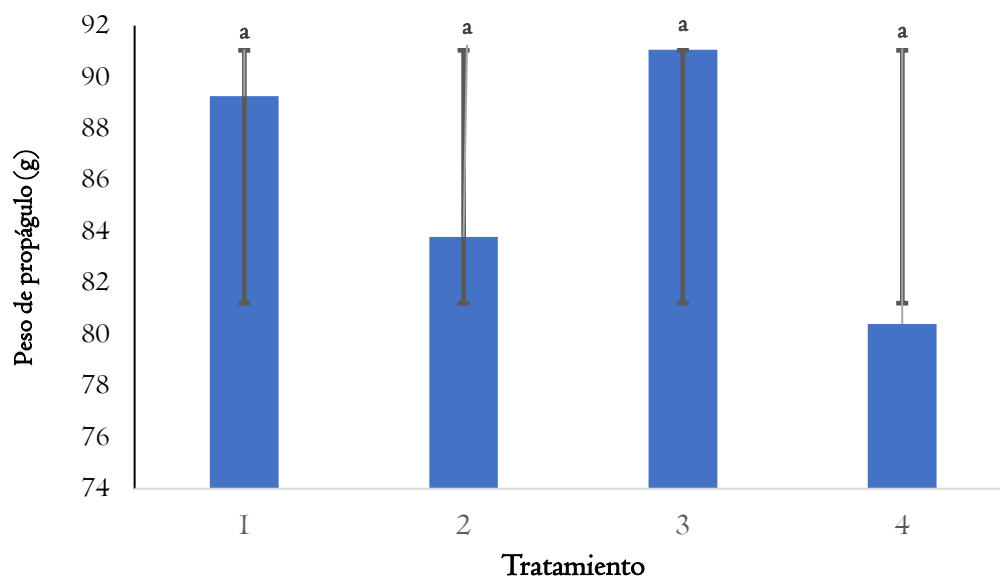


Figura 4. Peso de propágulos promedio de malanga antes del establecimiento del cultivo en invernadero. Letras iguales en las barras indican que no existe diferencia significativa con $p > 0.05$, barras verticales= desviación estándar.

Estos datos permiten explicar los altos porcentajes de coeficiente de variación (62.17 %), lo cual puede ser debido a jornaleros agrícolas no tienen el cuidado en la selección de los propágulos y discriminan plantas de mejor calidad en términos de peso del material vegetal. Adicionalmente se tiene una raíz del cuadrado medio del error de 53.55 y un peso promedio de 86.12 g, para esta variable.

CONCLUSIONES

Se comprobó la factibilidad de utilizar propágulos de malanga provenientes de una parcela comercial para su siembra en invernadero, debido a la adaptabilidad y desarrollo que estos tienen. Los resultados muestran evidencia de la calidad de los propágulos utilizados para el establecimiento de sistemas productivos e incluso para la comercialización de estos, aun siendo material que se ha cultivado por diferentes ciclos productivos, al ser propágulos sanos para su reproducción o plantación.

AGRADECIMIENTOS

Al tecnológico Nacional de México campus Úrsulo Galván, por permitir desarrollar la presente investigación en sus instalaciones

REFERENCIAS

- Arano Á. S. (2019). *Optimización en la micropropagación de malanga (Colocasia esculenta L. Schott) utilizando biorreactores de inmersión temporal* (Master's thesis).
- Astudillo-Robles, J. E. (2013). *Establecimiento y multiplicación in vitro de malanga coco (Colocasia esculenta L. Schott)*. (Doctoral Dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana).
- Bruso, J. (2017). *Valor nutricional de la raíz de malanga*. www.ehowenespanol.com/nutricional-raiz-malanga-sobre_37548/
- Chemonics Internacional Inc. (s/f) Proyecto de Desarrollo de la Cadena de Valor y Conglomerado Agrícola. *El Cultivo de Malanga coco*.

- <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/RENF01C965cm.pdf>
- Erazo-Díaz, E. J. (2022). *Manejo agronómico del cultivo de la malanga (Xanthosoma sagittifolium Schott) en el Ecuador*. (Bachelor's thesis).
- Espinosa-Cuéllar, E., Herrera-Isla, L., Dávila-Martínez, A., Espinosa-Cuéllar, A., Fuigueroa-Aguila, Y., Armario-Aragón, D., Pérez-García, D., & Aguiar, J. (2013). Incidencia de las pudriciones secas de la malanga (*Colocasia esculenta* (L.) Schott y *Xanthosoma* spp.) en plantas propagadas de diferentes tipos de material de plantación. *Centro Agrícola*, 40(3), 47-52.
- Espinosa-Cuéllar, E., Herrera-Isla, L., Folgueras-Montiel, M., Cabrera-Jova, M., Espinosa-Cuéllar, A., & Fandiño-Cachemaille, Y. (2011). Efecto depresivo de los agentes causales de las pudriciones secas en plantas producidas in vitro de malanga (*Xanthosoma sagittifolium*). *Revista Colombiana de Biotecnología*, 13(2), 155-161.
- Figuroa-Aguila, Y., Milián-Jiménez, M. D., & Rodríguez-García, Y. (2019). Mejoramiento, conservación y diversidad genética de la malanga (*Colocasia esculenta* (L.) Schott.) en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 40(2), 1-27.
- Gálvez-Guerra, D., Cabrera-Jova, M., Beovides-García, Y., Robaina-Jiménez, A., Rodríguez-Morales, S., & Rodríguez-Pérez, D. (2013). Establecimiento in vitro de yemas axilares del clon de *Colocasia esculenta* Schott INIVIT MC-2001'. *Biotecnología Vegetal*, 13(2), 107-112.
- González-Vélez, A., & Ortiz-López, J. (1999). Rendimiento y concentración foliar de nutrimentos de la malanga 'Blanca' bajo dos distancias de siembra y tres niveles de abonamiento. *Journal of Agriculture-University of Puerto Rico*, 83, 41-46.
- Garay-Peralta, I., Villarruel-Fuentes, M., Díaz-Peón, A. L., Chávez-Morales, R., & Herrera-Alarcón, J. (2024). Factores climáticos en el desarrollo y producción de cacao en Úrsulo Galván, Veracruz, México. *Agronomía Mesoamericana*, 35(1), 54337.
- <https://dx.doi.org/10.15517/am.2024.54337>
- Madrigal-Ambriz, L. V., Hernández-Madrigal, J. V., Carranco-Jáuregui, M. E., Calvo-Carrillo, M. de la C., & Casas-Rosado, R. de G. (2020). Caracterización física y nutricional de harina del tubérculo de "Malanga" *Colocasia esculenta* L. Schott) de Actopan, Veracruz, México. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* (ALAN), 68(2), 175-183.
- Martínez, C., Muñozcano, M., & Santoyo, J. (2010). Paquete tecnológico para el establecimiento de malanga. *Sinaloa México: Fundación Produce Sinaloa*. México. file:///C:/Users/W11/Downloads/Paquete%20tecnol%C3%B3gico%20para%20el%20establecimiento%20de%20malanga%20(1).pdf
- Mazariegos-Sánchez, A., Águila-González, J.M., Milla-Sánchez, A.I., Espinosa-Zaragoza, S., Martínez-Chávez, J., López-Sánchez, C. (2017). Cultivo de malanga (*Colocasia esculenta* Schott) en Tuxtla Chico, Chiapas, México. *Agro Productividad*, 10(3), 75-80.
- Mazariegos-Sánchez, A. (2018). Cultivo de malanga (*Colocasia esculenta* Schott) En Tuxtla Chico, Chiapas, México. *Agro Productividad*, 10(3), 75-80.
- Mundo Alimentos. (9 de febrero de 2011). *La malanga*. www.mundoalimentos2010.blogspot.mx/2011/02/la-malanga.html
- Nazario-Lezama, N., Arvizu-Barrón, E., Mayett-Moreno, Y., Álvarez-Ávila, M. D. C., & García-Pérez, E. (2020). Production and marketing of taro (*Colocasia esculenta* (L.) Shott) in Actopan, Veracruz, Mexico: Value chain perspective. *Agro Productividad*, 13(5), 59-64. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1660>
- Rayas, A., Cabrera, M., Santos, A., Basail, M., López, J., Medero, V., & Beovides, Y. (2013). Efecto del manitol y el nitrato de plata en la conservación in vitro de la malanga (*Xanthosoma* spp.). *Revista Colombiana de Biotecnología*, 15(1), 167-171.

- Rodríguez, A. (2003). Establecimiento *in vitro* de ápices de malanga (*Xanthosoma sagittifolium* Schott). *Cultivos Tropicales*, 24(3), 19-22.
- Rodríguez-Fernández, P. A. (2017). Impacto de los residuos orgánicos sobre algunos indicadores del crecimiento y productividad de la malanga (*Xanthosoma sagittifolium*, Schott). *Ciencia en su PC*, 2, 59-70.
- Rodríguez-Miranda, J., Rivadeneyra-Rodríguez, J., Ramírez-Rivera, E. D., Juárez-Barrientos, J. M., Herrera-Torres, E. y Navarro-Cortez, R. O. (2011). Caracterización fisicoquímica, funcional y contenido fenólico de harina de malanga (*Colocasia esculenta*) cultivada en la región de Tuxtepec, Oaxaca, México. *Ciencia y Mar*, 15(43), 37-47.
- SIAP. (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2023a). *Malanga*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/838424/Malanga_monografi_a_2023.pdf
- SIAP. (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2023b). *Promueve Agricultura cultivo de malanga en beneficio de productores del sur sureste del país*. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/promueve-agricultura-cultivo-de-malanga-en-beneficio-de-productores-del-sur-sureste-del-pais>
- Torres-Rapelo, A., Montero-Castillo, P., & Durán-Lengua, M. (2013). Propiedades fisicoquímicas, morfológicas y funcionales del almidón de malanga (*Colocasia esculenta*). *Revista Lasallista de Investigación*, 10(2), 52-61.

ESTRATEGIAS DE GESTIÓN FORESTAL Y CAMBIO CLIMÁTICO: UNA REVISIÓN

FOREST MANAGEMENT STRATEGIES AND CLIMATE CHANGE: A REVIEW

Julio Nemorio Martínez-Sánchez¹, Wibke Himmelsbach², María Inés Yáñez Díaz³, Marco González-Tagle⁴, §Homero Gárate-Escamilla⁵

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Campus Linares, Carretera Nacional # 85, km. 145, C.P. 67700, Linares, Nuevo León, México. §Autor de correspondencia: (hgaratesc@uanl.edu.mx).

RESUMEN

El cambio climático (CC) es un fenómeno global que tiene diversas repercusiones en la distribución, biodiversidad y productividad de los ecosistemas forestales. Los bosques son una parte fundamental del sistema climático y un componente clave en las estrategias de adaptación y mitigación. El objetivo de la revisión es conocer las diferentes estrategias de gestión forestal para la adaptación frente al CC. Los impactos del CC en los bosques han dado lugar al manejo forestal adaptativo (MFA) con el fin de integrar los cambios en la variabilidad climática actual y futura como uno de los componentes más importantes de la gestión forestal. El MFA puede dividirse en estrategias de resistencia, resiliencia y transición. El MFA debe seguir evolucionando a medida que los impactos del CC en los bosques aumentan en intensidad y frecuencia para hacer frente a los requisitos medioambientales, sociales y económicos de las generaciones futuras. El éxito de la aplicación de la gestión forestal en el contexto del CC, incluida la migración asistida, dependerá en gran medida de su aprobación a nivel científico, social, político y económico. A medida que el cambio climático se intensifique, se espera que este conjunto de estrategias acelere los cambios en la distribución y composición de los bosques necesarios para el desarrollo de individuos, especies y ecosistemas con mayor capacidad de adaptación.

Palabras clave: ecosistemas forestales, gestión forestal sostenible, gestión forestal adaptativa, migración asistida.

ABSTRACT

Climate change (CC) is a global phenomenon that has diverse impacts on the distribution, biodiversity, and productivity of forest ecosystems. Forests are a fundamental part of the climate system and a key component in adaptation and mitigation strategies. The objective of the review is to know the different forest management strategies for adaptation to CC. The impacts of CC on forests have given rise to adaptive forest management (AFM) in order to integrate changes in current and future climate variability as one of the most important components of forest management. AFM can be divided into resistance, resilience, and transition strategies. AFM should continue to evolve as CC impacts on forests increase in intensity and frequency to address the environmental, social, and economic requirements of future generations. The successful implementation of forest management in the context of CC, including assisted migration, will depend to a large extent on its scientific, social, political and economic approval. As climate change intensifies, this set of strategies is expected to accelerate the changes in forest distribution and composition necessary for the development of more resilient individuals, species and ecosystems.

Index words: forest ecosystems, sustainable forest management, adaptive forest management, assisted migration.

INTRODUCCIÓN

Los bosques cubren aproximadamente el 30 % del planeta tierra (Morin et al., 2018) y concentran el 80 % de la biodiversidad (FAO, 2020). Los bosques ejercen una labor clave tanto en la regulación del sistema climático (Shukla et al., 2022) como en el cuidado de la biodiversidad (Wolfslehner et al., 2019). Además, proporcionan una amplia variedad de bienes y servicios ecosistémicos (BSE), incluidos servicios de abastecimiento, regulación, apoyo y culturales (Phillips et al., 2020; Pohjanmies et al., 2017). Del total de la cubierta forestal, el 42 % corresponde a bosques tropicales, el 27 % a bosques boreales, el 16 % a bosques templados y el 11 % a bosques situados en regiones subtropicales (Nunes et al., 2022).

Los bosques son sensibles a los cambios en la temperatura y la precipitación, y pueden ser afectados por un gran número de disturbios bióticos y abióticos, incluyendo incendios forestales, sequías, ondas de calor, tormentas, heladas, nevadas, plagas y enfermedades (Seidl et al., 2017). Estas pueden provocar impactos negativos en factores como la dinámica, la biodiversidad, la distribución y la composición de los bosques (Hoffman et al., 2018), provocando una mayor vulnerabilidad en estos (Patacca et al., 2023). Un bosque se considera vulnerable si es susceptible de sufrir una reducción de su salud y productividad, así como en la fluctuación de la composición, estructura y diversidad de especies causados por alteraciones en el clima (Brandt et al., 2017).

En algunas regiones de bosques templados la temperatura ha aumentado más rápido que el promedio global (Testolin et al., 2022), favoreciendo incendios forestales, sequías, ondas de calor más intensas y un mayor estrés hídrico (Cholet et al., 2022). Los ecosistemas tropicales son particularmente vulnerables a cambios en el sistema climático debido a que concentran una mayor cantidad de población y biodiversidad (Artaxo et al., 2022). Los bosques subtropicales en

regiones montañosas son particularmente vulnerables debido a su poca resistencia a temperaturas extremas (Nunes et al., 2022; Albrich et al., 2020). A diferencia de los bosques tropicales y templados, los bosques boreales en su conjunto han permanecido relativamente estables en cuanto a cambios en su distribución en los últimos años (Pohjanmies et al., 2017; D'Orangeville et al., 2016). En el caso de las plagas forestales, un aumento en la temperatura promedio favorece un ciclo reproductivo más acelerado y una mejor adaptación a condiciones climáticas adversas (Pureswaran et al., 2018; Agne et al., 2018). En general, condiciones más calurosas y secas facilitan las sequías, incendios y las perturbaciones provocadas por insectos, mientras que condiciones más cálidas y húmedas aumentan las alteraciones provocadas por las fuertes corrientes de aire y otros agentes dañinos (Seidl et al., 2017). Por lo tanto, el objetivo de esta revisión de literatura es realizar un compendio de los resultados de diversas acciones de gestión forestal relacionadas con el CC, e identificar las principales acciones para la mitigación efectiva del CC que garanticen la provisión de BSE también para las generaciones futuras.

DESARROLLO

En las últimas décadas, el cambio climático (CC) causado por el aumento de la utilización de combustibles fósiles y la degradación de la cubierta forestal ha modificado los patrones de precipitación y temperatura, dando lugar a veranos más secos e inviernos más cálidos en algunas regiones (Shukla et al., 2022). Estos cambios han intensificado los impactos negativos del CC (Weiskopf et al., 2020) acelerando la pérdida de especies (Román-Palacios & Wiens, 2020). De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), el CC se refiere a variaciones significativas en el estado del clima que persisten durante varias décadas debido a causas naturales o actividades antropogénicas (Shukla et al., 2022; Colorado-Ruiz et al., 2018). El CC se ha clasificado según su nivel de peligro y destructividad en incremental, peligroso o

catastrófico (Castro-Pereira & Viola, 2018). El primero se produce cuando hay un aumento de la temperatura promedio mundial a un ritmo de 0.1 °C por década y está presente desde 1950. El segundo se asocia a un aumento superior a 1.5 – 2.0 °C y existe consenso en que podría ocurrir en las próximas dos décadas. Por último, el CC catastrófico se produce cuando se alcanzan varios puntos de inflexión en el clima con un aumento de más de 3.0 °C en la temperatura media global. El Sexto Informe de Evaluación del IPCC indica que la temperatura promedio global aumentará entre 1.2 y 2.0 °C para el año 2050. Varios escenarios también sugieren que aumentará hasta 2.0 – 4.0 °C a finales de este siglo (Shukla et al., 2022), favoreciendo un incremento en la intensidad y frecuencia de disturbios forestales (Kirchmeyer-Young et al., 2019; Seidl et al., 2017).

Debido a las interacciones entre el clima y los bosques, el CC ha sido uno de los retos más trascendentales para la gestión forestal en los últimos años (Hörl et al., 2020; Jandl et al., 2019; Yousefpour et al., 2017b). Por ejemplo, los impactos del CC pueden reducir significativamente la resiliencia, mitigación y capacidad de adaptación de los bosques (Hisano et al., 2018) y pueden amenazar la provisión de BSE (Hernández-Morcillo et al., 2022; Hof et al., 2017). Por otro lado, la demanda de BSE ha aumentado (Nocentini et al., 2022). Por lo tanto, es importante saber con qué rapidez y de qué manera responderán los bosques al CC. Por esta razón, científicos de diferentes campos, como ecólogos, biólogos, científicos forestales y científicos agrícolas, han centrado sus investigaciones en los efectos del CC en los bosques y otros ecosistemas durante las últimas treinta décadas (D'Amato et al., 2023; McGann et al., 2023; Artaxo et al., 2022; Weiskopf et al., 2020; FAO, 2020; Hisano et al., 2018).

La cuestión ahora es cómo aplicar mejor esta información a la gestión forestal para contrarrestar los efectos negativos del CC. Así, recientemente se han incorporado estrategias de gestión forestal que incorporan los bosques como un componente

crítico en la mitigación del CC (Ontl et al., 2020) y consideran los impactos del CC en la provisión de BSE (McGann et al., 2023; Albrich et al., 2020).

Definición y desarrollo de la gestión forestal

Aguirre-Calderón (2015) define la gestión forestal como las decisiones y actividades necesarias para utilizar los recursos forestales de forma ordenada para cumplir las necesidades de las generaciones actuales sin poner en riesgo a las generaciones posteriores. Además, la gestión forestal debe considerar la conservación de la biodiversidad, la productividad y la capacidad de regeneración de los bosques (Weiskopf et al., 2020). En sus primeras etapas, la gestión forestal se centraba en la ordenación de las zonas arboladas para la obtención de madera (Guerra-De-la-Cruz et al., 2021). A medida que las necesidades de la sociedad han cambiado y los BSE han aumentado, las estrategias de gestión forestal han evolucionado (Weiskopf et al., 2020). Si bien se ha reconocido que el sector forestal tiene un rol fundamental en el desarrollo de medidas de adaptación y mitigación al CC, éste ha obligado a darle un mayor papel a los bosques dentro de las políticas de gestión forestal ya existentes (St-Laurent et al., 2021). Para hacer frente a los impactos del CC se han desarrollado estrategias de manejo forestal orientadas a la mitigación y adaptación (Jandl et al., 2019; Iverson et al., 2019). La mitigación se refiere a los esfuerzos para disminuir los impactos negativos del CC, mientras que la adaptación se refiere a los ajustes de los ecosistemas en respuesta a los impactos potenciales de los cambios en el clima actual y futuro, y para aumentar la resiliencia y reducir la vulnerabilidad (Villamor et al., 2023; Mackey et al., 2020; Ontl et al., 2020).

Las estrategias de adaptación se proponen ayudar a los ecosistemas a hacer frente a los efectos del CC. Esto implica desarrollar técnicas para reducir la vulnerabilidad de las personas y el entorno natural a los impactos del CC, se centran en ajustarse a los cambios que ya se están produciendo (Yousefpour et al., 2017a). Mientras que las estrategias de mitigación, por su parte,

pretenden reducir las causas del *CC* disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero (*GEI*), ya sea disminuyendo la tasa de deforestación o el uso de tierras agrícolas, incremento en la capacidad de captura y almacenamiento de carbono, restauración y el manejo forestal sostenible (*MFS*) basado en prácticas silvícolas que reduzcan las emisiones (Mackey et al., 2020).

Manejo forestal sostenible

El *MFS* se encuentra dentro de los objetivos de desarrollo sostenible (*ODS*) de la Agenda 2030 (Shukla et al., 2022) y ha sido reconocido como uno de los instrumentos principales para mitigar los efectos del *CC* (Zhou et al., 2015). El *MFS* se define como “la administración de las tierras forestales de una manera y a una armonía que conserven su biodiversidad, vitalidad, capacidad de reproducción, productividad y su capacidad para desempeñar, actualmente y en el futuro, las funciones ecológicas, económicas y sociales relevantes, sin causar daños a otros ecosistemas” (Mackey et al., 2015). Aguirre-Calderón (2015) define al *MFS* como la aplicación de un amplio rango de principios científicos, económicos y sociales para el aprovechamiento y gestión de los recursos de forma ordenada, incluyendo aspectos de silvicultura, protección y regulación, con el objetivo de satisfacer las necesidades que la sociedad necesita actualmente sin comprometer su provisión para las futuras generaciones.

De acuerdo con el Proceso de Montreal, elaborado en 1987, entre los criterios e indicadores del *MFS* se encuentran los siguientes: conservación de la biodiversidad, mantenimiento de la capacidad productiva, mantenimiento de la salud y vitalidad, conservación y mantenimiento de los recursos del suelo y agua, mantenimiento de la contribución de los bosques al ciclo de carbono, mantenimiento y mejora de múltiples BSE a largo plazo y la creación de marcos legales, institucionales y económicos para la conservación y el *MFS* (Aguirre-Calderón, 2015).

Según Keenan (2015), la implementación del *MFS* depende de factores como entender el

sistema climático, evaluar las posibles respuestas de los ecosistemas y las sociedades, así como de compartir conocimientos entre la comunidad científica y quienes toman las decisiones con el fin de realizar análisis de diferentes opciones de manejo. Dentro de los beneficios del *MFS* se encuentran una producción continua de la madera y de mejor calidad, mejoras en las reservas de carbono en los árboles y prevención del impacto de los disturbios forestales (Shukla et al., 2022). En concreto, el *MFS* es crucial para incrementar la magnitud de mitigación de los bosques al *CC*, reduciendo el riesgo de daños ecosistémicos y medioambientales (Verkerk et al., 2020).

Manejo forestal adaptativo

Las estrategias de adaptación se enfocan en reconocer y reducir los posibles impactos del *CC* en los bosques (Keenan, 2015). Dentro de las estrategias de adaptación se encuentra el manejo forestal adaptativo o *MFA* (Spathelf et al., 2018). El *MFA* se enfoca en fortalecer la capacidad de adaptación de los bosques frente a los posibles impactos del *CC* y es imprescindible para el suministro de múltiples BSE (Fouqueray et al., 2020).

El *MFA* se basa en el supuesto de que un bosque más resistente contendrá varias especies más especializadas por lo que probablemente habrá especies con una mayor capacidad de adaptación en cualquier escenario de *CC* (Hof et al., 2017). El *MFA* surge como una estrategia orientada a hacer frente a diversos retos que presenta el *CC* en los bosques, principalmente aquellos asociados a la incertidumbre en sus posibles impactos y la velocidad a la que ocurren (Lindner et al., 2014).

Se han propuesto varios marcos diferentes para el perfeccionamiento y la ejecución de estrategias de *MFA*. Según D'Aprile y Gentilucci (2022), un marco para la *MFA* debe tener en cuenta la capacidad de las distintas instituciones para poner en práctica acciones de planificación y gestión.

También debe incluir la financiación para el uso de recursos científicos y técnicos, la revisión de los posibles efectos del CC sobre los recursos forestales y el seguimiento de los resultados y avances obtenidos. Yousefpour et al. (2017a) propusieron un marco basado en: a) la consideración del conocimiento experto del sector forestal, b) la generación de diferentes opciones de gestión forestal, y c) el elegir las mejores opciones de MFA. Halofsky et al. (2018) sugieren un marco similar en el que los componentes clave son: a) incluir a los responsables de la toma de decisiones, b) comunicar y reforzar los objetivos, c) desarrollar objetivos realistas, d) cooperación interinstitucional, y e) centrarse en la administración sustentable de los recursos

forestales. Las estrategias de adaptación al CC requieren la identificación de los impactos en cada zona, la evaluación de la fragilidad de los bosques a los posibles impactos, el desarrollo de estrategias de adaptación y su incorporación a la gestión forestal (Brandt et al., 2017). En cualquier caso, es fundamental definir los objetivos a alcanzar e identificar las mejores estrategias de gestión para conseguirlos (Temperli et al., 2012). Sin embargo, hay que considerar que no siempre es posible proyectar los efectos de dichas estrategias, especialmente a medio y largo plazo, ya que la dinámica forestal depende también de otros factores como los cambios en la utilización del suelo (Reyer et al., 2015).

Tabla I. Estrategias de gestión forestal adaptativa.

Tipo	Definición	Objetivos	Útilice	Uso de MA
Resistencia	Acciones que mejoran las defensas de los bosques frente a los cambios previstos o que protegen directamente a los bosques de las perturbaciones para mantener unas condiciones relativamente inalteradas.	Mantener sin cambios la estructura y las funciones de los bosques Proteger los refugios Reducir los factores de estrés ambiental	A corto plazo Regiones poco sensibles al CC	Sin migración asistida (MA)
Resiliencia	Acciones que permiten un ligero cambio, pero fomentan el retorno a las condiciones anteriores tras la perturbación.	Mejorar las especies estructurales y la diversidad genética Restauración de alteraciones naturales	A corto plazo Regiones con gran capacidad de adaptación	Puede incorporar la expansión asistida de la población
Transición (Respuesta)	Acciones que se adaptan intencionadamente al cambio y permiten a los ecosistemas responder de forma adaptativa a las condiciones cambiantes.	Facilitar nuevas funciones y composiciones de los ecosistemas Facilitar activamente el cambio para fomentar respuestas adaptativas	A largo plazo Regiones de alta vulnerabilidad	Incorpora la expansión de la población asistida

La **Tabla 1** muestra las diferentes estrategias de MFA (Halofsky et al., 2018; Nagel et al., 2017; Millar et al., 2007). La resistencia puede definirse como las acciones conjuntas que mejoran las defensas de los bosques frente a los cambios ambientales para mantener unas condiciones relativamente inalteradas. Las acciones de resiliencia son aquellas orientadas a acomodar ligeras fluctuaciones, pero fomentando el regreso a las condiciones previas tras la perturbación. Por último, la transición se define en términos de acciones que intencionadamente se acomodan a los cambios y permiten a los ecosistemas responder a las condiciones ambientales cambiantes. Las primeras están orientadas a aumentar la resiliencia de los bosques a corto plazo reduciendo el impacto de las perturbaciones climáticas y a mantener relativamente inalteradas las características de los bosques (Millar et al., 2007). Las estrategias de resiliencia pretenden desarrollar una elevada capacidad de adaptación de los bosques ante fenómenos climáticos o meteorológicos adversos. Por último, las estrategias de transición pretenden facilitar el cambio de las condiciones forestales teniendo en cuenta que los bosques no permanecen dentro del rango histórico, por lo general, son útiles en regiones con alta vulnerabilidad (McGann et al., 2023; Hörl et al., 2020). Mientras que las dos primeras buscan soluciones a corto y medio plazo, la transición ofrece una alternativa de adaptación a largo plazo para las especies con mayor riesgo de extinción (Hörl et al., 2020). Minkova y Arnold (2020) indican que las principales dificultades en la aplicación de estrategias de MFA son: la resistencia a reconocer la incertidumbre, la falta de implicación institucional en la toma de decisiones, el excesivo énfasis en la organización, la falta de precisión en cuanto al nivel de certidumbre para la acción y la insuficiente participación de las partes interesada.

Migración asistida

Las poblaciones e individuos forestales responden al CC de tres formas: 1) migran a áreas de distribución con condiciones ambientales más adecuadas, 2) se adaptan a nuevos patrones climáticos dentro de su distribución actual, y 3) se

extinguen a nivel local o de especie (Klisz et al., 2023). La migración es un proceso natural que se produce gradualmente a lo largo de varias generaciones (Klisz et al., 2023). En cambio, el CC es un fenómeno rápido, por lo que las poblaciones forestales deben adaptarse más rápidamente a sus posibles impactos.

Una de las estrategias de adaptación es la migración asistida (*MA*), que surge como respuesta a los cambios en la relación bosque-clima debidos al CC (Gustafson et al., 2023). La *MA* facilita la colonización de especies forestales en nuevos hábitats con un clima más adecuado (Klisz et al., 2023). Estas estrategias implican cambios en la composición y en la diversidad estructural de los bosques. Esto puede hacerse mediante la reforestación de especies más adaptadas a los cambios climáticos para aumentar la salud de los individuos y las poblaciones (D'Amato et al., 2023; Palik et al., 2022; Sáenz-Romero et al., 2020). La *MA* puede clasificarse en tres categorías: a) migración dentro de los límites geográficos actuales, b) migración a zonas externas de la ocurrencia actual de la especie, y c) migración fuera del área de distribución actual a regiones donde no se espera que la migración se produzca de forma natural (Klisz et al., 2023; Sáenz-Romero et al., 2020).

Algunas ventajas significativas de la *MA* incluyen el aumento de la diversidad de especies, poblaciones mejor adaptadas, distribución de riesgos y mayor disponibilidad de servicios ecosistémicos (Gustafson et al., 2023; Hof et al., 2017). Por otro lado, las estrategias de *MA* pueden verse limitadas por la disponibilidad de regiones adecuadas (Blanco-Cano et al., 2022). Las plantas de mayor altitud desaparecerían, mientras que las de menor altitud migrarían hacia altitudes más altas. Por otro lado, también puede aumentar el riesgo de que nuevas especies y poblaciones introduzcan nuevos patógenos, aumente la competitividad o se desplacen algunas especies (Kracke et al., 2021). Además, algunas prácticas de *MA* pueden limitar la prestación de servicios ecosistémicos (Winkler et al., 2021).

Manejo forestal en México

En el país se pueden identificar tres periodos con distintos enfoques de manejo forestal (Guerra-De-la-Cruz, et al., 2021). El primero caracterizado por una política forestal que promovía el aprovechamiento de los recursos maderables. El segundo periodo (2001-2010) inicia con el establecimiento de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en el año 2001 donde se impulsó a la investigación. En el tercer periodo (2010-2020), la predisposición hacia un *MFS* se acentuó por la aceptación del rol de los bosques en la mitigación del CC (Guerra-De-la-Cruz et al., 2021).

Casos de estudio

Se han realizado varios estudios de MA con especies del género *Pinus* en México, incluyendo poblaciones de *P. devoniana*, *P. leiophylla* y *P. pseudostrobus* en el ecosistema de pino-encino de la región occidental de México (Castellanos-Acuña et al., 2015). En estos estudios se demostró que algunas especies de pino se adaptan mejor a los cambios en las condiciones ambientales. En el caso de las poblaciones de *P. devoniana*, éstas disminuyeron su crecimiento cuando fueron desplazadas más de 650 m a mayores altitudes. Mientras que las poblaciones de *P. leiophylla* revelaron una tasa de crecimiento similar cuando fueron desplazadas a distintas altitudes. Otras poblaciones de especies de bosques nublados tropicales y subtropicales como *Quercus insignis* han mostrado una alta tolerancia a una gran diversidad de condiciones climáticas (Toledo-Aceves et al., 2023) a pesar de ser una especie de distribución limitada. Las poblaciones del género *Abies*, incluida *A. religiosa*, pueden adaptarse con relativa rapidez a condiciones climáticas más frías (Carbajal-Navarro et al., 2019).

En los bosques boreales, se ha demostrado que es posible que algunas poblaciones migren a regiones de mayor latitud donde la temperatura media se acerca a los 4 °C (Ding y Brouard, 2022). Estos estudios concluyen que las estrategias de MA son factibles siempre que se tengan en cuenta diferentes umbrales de tolerancia en las condiciones ambientales para las distintas especies.

El crecimiento de la población mundial, así como el aumento y diversificación de las actividades industriales han incrementado la demanda de los servicios ecosistémicos a nivel global (Shukla et al., 2022). La industrialización del sector agrícola ha favorecido el aumento de la pérdida de vegetación y de la degradación de los suelos con vocación forestal, así como la reducción de la cubierta forestal y la disponibilidad de servicios ecosistémicos (Vadell et al., 2022). Además, la aceleración del CC ha modificado los esquemas de precipitación y temperatura con cambios en la intensidad y frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos (Seidl et al., 2017). En el caso de los incendios forestales, se han duplicado en todo el mundo desde la década de 1980 (Mansoor et al., 2022). En varias regiones, los episodios de sequía y las olas de calor son más severos, ya que los fenómenos de El Niño y La Niña son más extensos y frecuentes (Pacheco et al., 2022).

El CC ha provocado un cambio de paradigma en las estrategias mundiales de gestión forestal. En un principio, la gestión forestal estaba orientada al aprovechamiento de los recursos madereros. Hoy, se basa en el desarrollo de habilidades de gestión sostenible que contemplen acciones de adaptación y mitigación ante los posibles impactos del CC (Shukla et al., 2022; Palik et al., 2022; Hof et al., 2017).

Por otro lado, los avances en el desarrollo de modelos y proyecciones del CC han permitido diseñar estrategias de gestión forestal basadas en diversos escenarios (Iverson et al., 2019). La mayor disponibilidad de información climática actual y futura es crucial para el diseño de estrategias de gestión forestal (Yousefpour et al., 2017a; Prasad et al., 2020). Estos escenarios permiten analizar los impactos potenciales del CC en los bosques. El éxito de las estrategias de adaptación y mitigación están en manos de su capacidad para integrar dicha información para una amplia variedad de especies y poblaciones en un marco con objetivos concretos (D'Aprile y Gentilucci, 2022).

La migración y la adaptación de los bosques son procesos generacionales que se producen de forma natural y gradual (McGann et al., 2023). Por el contrario, el CC es un fenómeno que se ha acelerado en los últimos años y se espera que sus impactos sobre la dinámica de los ecosistemas forestales aumenten en las próximas décadas. Por tanto, es necesario integrar medidas de adaptación en las estrategias de gestión forestal existentes. La MA surge como una opción que ayuda a los bosques a adaptarse más rápidamente a las condiciones climáticas adversas a corto, medio y largo plazo (Sáenz-Romero et al., 2020; Iverson et al., 2019).

En algunos casos, la MA se considera la última opción para rescatar especies amenazadas o en peligro o poblaciones marginales debido a sus costes y a los riesgos potenciales asociados al aumento de la competitividad entre especies, al incremento del número de especies invasoras y al desplazamiento de especies autóctonas (Messier et al., 2019). Sáenz-Romero et al. (2021) mencionan que, aunque la proporción de especies invasoras sea baja, los impactos negativos sobre la dinámica forestal pueden ser considerables. Sin embargo, varios estudios han demostrado que la MA es eficaz, especialmente en zonas con fuertes gradientes climáticos y altitudinales (Backus et al., 2022). Algunos casos de MA de especies de bosques templados en México y Canadá han tenido éxito (Casmey et al., 2022; Sáenz-Romero et al., 2020; Gómez-Pineda et al., 2019), donde la MA ha logrado compensar un calentamiento de hasta 2 °C. Sin estas acciones, algunas especies de coníferas podrían disminuir más del 70 % de su hábitat natural (Gómez-Pineda et al., 2019).

Es importante reconocer que la MA sigue presentando retos en su aplicación. A diferencia de las estrategias de resistencia y resiliencia, las comunidades forestales perciben la MA y otras acciones de translocación como menos familiares y con un mayor riesgo económico (McGann et al., 2023). Aunque algunas estrategias de MFA proporcionan beneficios a corto y medio plazo, se recomienda incluir estrategias que proporcionen

un mayor número de beneficios a largo plazo. Tales estrategias tendrán incremento en la dinámica forestal y en la capacidad de los bosques para mitigar el CC y adaptarse a él.

COMENTARIOS FINALES

En los últimos años, la aceleración del CC ha aparecido como uno de los retos más relevantes en el desarrollo de estrategias de gestión forestal. En la mayoría de los ecosistemas forestales, la conjunción del aumento de la temperatura y la reducción de la precipitación han dado lugar a sequías más intensas y de mayor duración, incendios forestales más severos y cambios en la distribución y frecuencia de plagas forestales.

Por lo tanto, se han desarrollado estrategias de gestión forestal para mitigar las consecuencias del CC en los ecosistemas forestales y reforzar su capacidad de adaptación a fenómenos extremos de precipitación y temperatura. Los bosques son un componente clave en la regulación del clima a nivel mundial, por lo que es crucial desarrollar, promover y aplicar las estrategias de gestión más eficaces a escala local, nacional y regional. Esto requiere el desarrollo de marcos flexibles que impliquen activamente a las comunidades locales, la comunidad científica, el sector privado y las instituciones intergubernamentales. El éxito de la ejecución de la gestión forestal en el contexto del CC, incluida la migración asistida, dependerá en gran medida de su aprobación a nivel científico, social, político y económico. A medida que el CC se intensifique, se espera que este conjunto de estrategias acelere los cambios en la distribución y composición de los bosques, promoviendo el desarrollo de individuos, especies y ecosistemas con una mayor capacidad de adaptación.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo a la beca de manutención del primer autor.

REFERENCIAS

- Agne, M. C., Beedlow, P. A., Shaw, D. C., Woodruff, D. R., Lee, E.H., Cline, S. P., & Comeleo, R. (2018). Interactions of predominant insects and diseases with climate change in Douglas-fir forests of western Oregon and Washington, U.S.A. *Forest Ecology and Management*, 409, 317-332. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.004>
- Aguirre-Calderón, O. A. (2015). Manejo forestal en el siglo XXI. *Madera y Bosques*, 21, 17-28. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210423>
- Albrich, K., Rammer, W., & Seidl, R. (2020). Climate change causes critical transitions and irreversible alterations of mountain forests. *Global Change Biology*, 26, 4013-4027. <https://doi.org/10.1111/gcb.15118>
- Artaxo, P., Hansson, H. C., Machado, L. A. T., & Rizzo, L. V. (2022). Tropical forests are crucial in regulating the climate on Earth. *PLoS Climate*, 1(8), e0000054. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000054>
- Backus, G. A., Huang, Y., & Baskett, M. L. (2022). Comparing management strategies for conserving communities of climate-threatened species with a stochastic metacommunity model. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 377(1857), 20210380. <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0380>
- Blanco-Cano, L., Navarro-Cerrillo, R. M., & González-Moreno, P. (2022). Biotic and abiotic effects determining the resilience of conifer mountain forests: The case study of the endangered Spanish fir. *Forest Ecology and Management*, 520, 120356. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120356>
- Brandt, L. A., Butler, P. R., Handler, S. D., Janowiak, M. K., Shannon, P. D., & Swanston, C. W. (2017). Integrating Science and Management to Assess Forest Ecosystem Vulnerability to Climate Chang. *Journal of Forestry*, 115, 212-221. <https://doi.org/10.5849/jof.15-147>
- Carbajal-Navarro, A., Navarro-Miranda, E., Blanco, A., Cruzado-Vargas, A., Gómez-Pineda, E., Zamora-Sánchez, C., Pineda-García, F., O'Neill, G., Gómez-Romero, M., Cisneros, R., Johnsen, K., Lobit, P., López-Toledo, L., Herrerías-Diego, Y., & Sáenz-Romero, C. (2019). Ecological Restoration of Abies religiosa Forests Using Nurse Plants and Assisted Migration in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 421. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00421>
- Casmey, M., Hamann, A., & Hacke, U. G. (2022). Adaptation of white spruce to climatic risk environments in spring: Implications for assisted migration. *Forest Ecology and Management*, 521, 120555. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120555>
- Castellanos-Acuña, D., Cisneros, R., & Sáenz-Romero, C. (2015). Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere*, 6, 1-16. <https://doi.org/10.1890/ES14-00375.1>
- Castro-Pereira, J., & Viola, E. (2018). Catastrophic Climate Change and Forest Tipping Points: Blind Spots in International Politics and Policy. *Global Policy*, 9, 513-524. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.12578>
- Cholet, C., Houle, D., Sylvain, J. D., Doyon, F., & Maheu, A. (2022). Climate Change Increases the Severity and Duration of Soil Water Stress in the Temperate Forest of Eastern North America. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 879382. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.879382>
- Colorado-Ruiz, G., Cavazos, T., Salinas, J. A., De Grau, P., & Ayala, R. (2018). Climate change projections from Coupled Model Intercomparison Project phase 5 multi-model weighted ensembles for Mexico, the North American monsoon, and the mid-summer drought region. *International Journal of Climatology*, 38(15), 5699-5716. <https://doi.org/10.1002/joc.5773>

- D'Amato, A. W., Palik, B. J., Raymond, P., Puettmann, K. J., & Girona, M. M. (2023). Building a Framework for Adaptive Silviculture Under Global Change. In *Boreal Forests in the Face of Climate Change: Sustainable Management* (pp. 359-381). Cham: Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_13
- D'Aprile, F., & Gentilucci, M. (2022). Adaptive Forest Management under Climate Change: Some Adaption Criteria for Practical Purposes. Preprints.org, 2022070392.
<https://doi.org/10.20944/preprints202207.0392.v2>
- D'Orangeville, L., Houle, D., Duchesne, L., & Côté, B. (2016). Can the Canadian drought code predict low soil moisture anomalies in the mineral soil? An analysis of 15 years of soil moisture data from three forest ecosystems in Eastern Canada. *Ecohydrology*, 9(2), 238-247.
<https://doi.org/10.1002/eco.1627>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas*. Roma.
<https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- Ding, C., & Brouard, J. S. (2022). Assisted migration is plausible for a boreal tree species under climate change: A quantitative and population genetics study of trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.) in western Canada. *Ecology and Evolution*, 12(10), e9384.
<https://doi.org/10.1002/ece3.9384>
- Fouqueray, T., Charpentier, A., Trommetter, M., & Frascaria-Lacoste, N. (2020). The calm before the storm: How climate change drives forestry evolutions. *Forest Ecology and Management*, 460, 117880.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117880>
- Gómez-Pineda, E., Sáenz-Romero, C., Ortega-Rodríguez, J., Blanco, A., Madrigal-Sánchez, X., Cisneros, R., López-Toledo, L., Pedraza-Santos, M., & Rehfeldt, G. E. (2019). Suitable climatic habitat changes for Mexican conifers along altitudinal gradients under climatic change scenarios. *Ecological Applications*, 30(2), e02041.
<https://doi.org/10.1002/eap.2041>
- Guerra-De-la-Cruz, V., Buendía-Rodríguez, E., Cerano-Paredes, J., Islas-Gutiérrez, F., Monárrez-González, J. C., Flores-Ayala, E., Pineda-Ojeda, T., & Acosta-Mireles, M. (2021). Investigaciones del INIFAP en manejo forestal y servicios ambientales de bosques templados mexicanos: evolución, logros y perspectivas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12, 4-30.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-I.1020>
- Gustafson, E. J., Kern, C. C., & Kabrick, J. M. (2023). Can assisted tree migration today sustain forest ecosystem goods and services for the future?. *Forest Ecology and Management*, 529, 120723.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120723>
- Hörl, J., Keller, K., & Yousefpour, R. (2020). Reviewing the performance of adaptive forest management strategies with robustness analysis. *Forest Policy and Economics*, 119, 102289.
<https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102289>
- Halofsky, J., Edwards, J., Schmitt, K., Andrews-Key, S., Williamson, T., Johnston, M., Swanston, C., Peterson, D., & Nelson, H. (2018). Adapting forest management to climate change: The state of science and applications in Canada and the United States. *Forest Ecology and Management*, 421, 84-97.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.037>
- Hernández-Morcillo, M., Torralba, M., Baiges, T., Bernasconi, A., Bottaro, G., Brogaard, S., Bussola, F., Díaz-Varela, E., Geneletti, D., Grossmann, C. M., Kister, J., Klingler, M., Loft, L., Lovric, M., Mann, C., Pipart, N., Roces-Díaz, J. V., Sorge, S., Tiebel, M., Tyräinen, L., Varela, E., Winkel, G. & Plieninger, T. (2022). Scanning the solutions for the sustainable supply of forest ecosystem services in Europe. *Sustainability Science*, 17(5), 2013-2029.

- <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01111-4>
- Hisano, M., Searle, E. B., & Chen, H. Y. (2018). Biodiversity as a solution to mitigate climate change impacts on the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*, 93(1), 439-456. <https://doi.org/10.1111/brv.12351>
- Hof, A. R., Dymond, C.C., & Mladenoff, D. J. (2017). Climate change mitigation through adaptation: the effectiveness of forest diversification by novel tree planting regimes. *Ecosphere*, 8(11), e01981. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1981>
- Hoffmann, A., Rymer, P., Byrne, M., Ruthrof, K., Whinam, J., McGeoch, M., Bergstrom, D., Guerin, G., Sparrow, B., Joseph, L., Hill, S., Andrew, N., Camac, J., Bell, N., Riegler, M., Gardner, J., & Williams, S. (2018). Impacts of recent climate change on terrestrial flora and fauna: Some emerging Australian examples. *Austral Ecology*, 44(1), 3-27. <https://doi.org/10.1111/aec.12674>
- Iverson, L. R., Prasad, A. M., Peters, M. P., & Matthews, S. N. (2019). Facilitating adaptive forest management under climate change: A spatially specific synthesis of 125 species for habitat changes and assisted migration over the eastern United States. *Forests*, 10(11), 989. <https://doi.org/10.3390/f10110989>
- Jandl, R., Spathelf, P., Bolte, A., & Prescott, C. E. (2019). Forest adaptation to climate change—is non-management an option?. *Annals of Forest Science*, 76(2), 1-1. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0827-x>
- Keenan, R. J. (2015). Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. *Annals of Forest Science*, 72, 145-167. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0446-5>
- Kirchmeyer-Young, M. C., Gillett, N. P., Zwiers, F. W., Cannon, A. J., & Anslow, F. S. (2019). Attribution of the influence of human-induced climate change on an extreme fire season. *Earth's Future*, 7(1), 2-10. <https://doi.org/10.1029/2018EF001050>
- Klisz, M., Chakraborty, D., Cyjetkovic, B., Grabner, M., Lintunen, A., Mayer, K., George, J., & Rossi, S. (2023). Functional Traits of Boreal Species and Adaptation to Local Conditions. In *Boreal Forests in the Face of Climate Change: Sustainable Management* (pp. 323-355). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_12
- Kracke, I., Essl, F., Zulka, K. P., & Schindler, S. (2021). Risks and opportunities of assisted colonization: the perspectives of experts. *Nature Conservation*, 45, 63-84. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.45.72554>
- Lindner, M., Fitzgerald, J. B., Zimmermann, N., Reyer, C., Delzon, S., van der Maaten, E., Schelhaas, M. J., Lasch, P., Eggers, J., van der Maaten-Theunissen, M., Suckow, F., Psomas, A., Poulter, B., & Hanewinkel, M. (2014). Climate change and European forests: what do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management?. *Journal of Environmental Management*, 146, 69-83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.030>
- Mackey, B., Della Sala, D. A., Kormos, C., Lindenmayer, D., Kumpel, N., Zimmerman, B., Hugh, S., Young, V., Foley, S., Arsenis, K., & Watson, J. E. M. (2015). Policy options for the world's primary forests in multilateral environmental agreements. *Conservation Letters*, 8(2), 139-147. <https://doi.org/10.1111/conl.12120>
- Mackey, B., Kormos, C., Keith, H., Moomaw, W., Houghton, R., Mittermeier, R., Hole, D., & Hugh, S. (2020). Understanding the importance of primary tropical forest protection as a mitigation strategy. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25(5), 763-787. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09891-4>
- Mansoor, S., Farooq, I., Kachroo, M. M., Mahmoud, A. E. D., Fawzy, M., Popescu, S. M., Alyemeni, M. N., Sonne, C., Rinklebe, J.,

- & Ahmad, P. (2022). Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change. *Journal of Environmental Management*, 301, 113769.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113769>
- McGann, T. C., Schattman, R. E., D'Amato, A. W., & Ontl, T. A. (2023). Climate Adaptive Management in the Northeastern United States: Common Strategies and Motivations of Rural and Urban Foresters. *Journal of Forestry*, 121(2), 182-192.
<https://doi.org/10.1093/jofore/fvac039>
- Messier, C., Bauhus, J., Doyon, F., Maure, F., Sousa-Silva, R., Nolet, P., Mina, M., Aquilué, N., Fortin, M. J., & Puettman, K. (2019). The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes. *Forest Ecosystems*, 6(1), 1-16.
<https://doi.org/10.1186/s40663-019-0166-2>
- Millar, C. I., Stephenson, N. L., & Stephens, S. L. (2007). Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecological Applications*, 17(8), 2145-2151.
<https://doi.org/10.1890/06-1715.1>
- Minkova, T. V., & Arnold, J. S. (2020). A structured framework for adaptive management: bridging theory and practice in the Olympic Experimental State Forest. *Forest Science*, 66(4), 478-489.
<https://doi.org/10.1093/forsci/fxz011>
- Morin, X., Fahse, L., Jactel, H., Scherer-Lorenzen, M., García-Valdés, R., & Bugman, H. (2018). Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. *Scientific Reports*, 8(1), 5627.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-23763-y>
- Nagel, L. M., Palik, B. J., Battaglia, M. A., D'Amato, A. W., Guldin, J. M., Swanston, C. W., Janowiak M. K., Powers M. P., Joyce L. A., Millar C. I., Peterson D. L., Ganio L. M., Kirschbaum C., & Roske, M. R. (2017). Adaptive silviculture for climate change: a national experiment in manager-scientist partnerships to apply an adaptation framework. *Journal of Forestry*, 115(3), 167-178.
<https://doi.org/10.5849/jof.16-039>
- Nocentini, S., Travaglini, D., & Muys, B. (2022). Managing Mediterranean forests for multiple ecosystem services: research progress and knowledge gaps. *Current Forestry Reports*, 8(2), 229-256.
<https://doi.org/10.1007/s40725-022-00167-w>
- Nunes, L. J. R., Meireles, C. I. R., Gomes, C. J. P., & Ribeiro, N. M. C. A. (2022). The impact of climate change on forest development: a sustainable approach to management models applied to Mediterranean-type climate regions. *Plants*, 11(1), 69.
<https://doi.org/10.3390/plants11010069>
- Ontl, T. A., Janowiak, M. K., Swanston, C. W., Daley, J., Handler, S., Cornett, M., Hagenbuch, S., Handrick, C., McCarthy, L., & Patch, N. (2020). Forest management for carbon sequestration and climate adaptation. *Journal of Forestry*, 118(1), 86-101.
<https://doi.org/10.1093/jofore/fvz062>
- Pacheco, J., Solera, A., Avilés, A., & Tonón, M. D. (2022). Influence of ENSO on droughts and vegetation in a high mountain equatorial climate basin. *Atmosphere*, 13(12), 2123.
<https://doi.org/10.3390/atmos13122123>
- Palik, B., Clark, P., D'Amato, A., Swanston, C., & Nagel, L. (2022). Operationalizing forest-assisted migration in the context of climate change adaptation: Examples from the eastern USA. *Ecosphere*, 13(10), e4260.
<https://doi.org/10.1002/ecs2.4260>
- Patacca, M., Lindner, M., Lucas-Borja, M. E., Cordonnier, T., Fidej, G., Gardiner, B., Hauf, Y., Jasinevičius, G., Labonne, S., Linkevičius, E., Mahnken, M., Milanovic, S., Nabuurs, G. J., Nagel, T. A., Nikinmaa, L., Panyatov, M., Bercak, R., Seidl, R., Ostrogović Sever, M. Z., Socha, J., Thom, D., Vuletic, D., Zudin, S., & Schelhaas, M. J. (2023). Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Global Change Biology*, 29(5), 1359-1376.
<https://doi.org/10.1111/gcb.16531>

- St-Laurent P., Locatelli, B., Hoberg, G., Gukova V. & Hagerman, S. (2021). Models for integrating climate objectives in forest policy: Towards adaptation-first?. *Land Use Policy*, 104, 105357. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105357>
- Phillips, R. P., Brandt, L., Polly, P. D., Zollner, P., Saunders, M. R., Clay, K., Iverson, L., & Fe, S. (2020). An integrated assessment of the potential impacts of climate change on Indiana forests. *Climatic Change*, 163, 1917-1931. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2326-8>
- Pohjanmies, T., Triviño, M., Le Tortorec, E., Mazziotto, A., Snäll, T., & Mönkkönen, M. (2017). Impacts of forestry on boreal forests: An ecosystem services perspective. *Ambio*, 46, 743-755. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0919-5>
- Prasad, A., Pedlar, J., Peters, M., McKenney, D., Iverson, L., Matthews, S., & Adams, B. (2020). Combining US and Canadian forest inventories to assess habitat suitability and migration potential of 25 tree species under climate change. *Diversity and Distributions*, 26(9), 1142-1159. <https://doi.org/10.1111/ddi.13078>
- Pureswaran, D. S., Roques, A., & Battisti, A. (2018). Forest insects and climate change. *Current Forestry Reports*, 4, 35-50. <https://doi.org/10.1007/s40725-018-0075-6>
- Reyer, C. P. O., Bugmann, H., Nabuurs, G. J., & Hanewinkel, M. (2015). Models for adaptive forest management. *Regional Environmental Change*, 15, 1483-1487. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0861-7>
- Román-Palacios, C., & Wiens, J. J. (2020). Recent responses to climate change reveal the drivers of species extinction and survival. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(8), 4211-4217. <https://doi.org/10.1073/pnas.1913007117>
- Sáenz-Romero, C., Mendoza-Maya, E., Gómez-Pineda, E., Blanco, A., Agramont, A., Cisneros, R., Upton, J., Trejo-Ramírez, O., Wehenkel, C., Cibrián-Tovar, D., Plascencia-González, A., Flores López, C., & Vargas-Hernández, J. (2020). Recent evidence of Mexican temperate forest decline and the need for ex situ conservation, assisted migration, and translocation of species ensembles as adaptive management to face projected climatic change impacts in a megadiverse country. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(9), 843-854. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0329>
- Sáenz-Romero, C., O'Neill, G., Aitken, S. N., & Lindig-Cisneros, R. (2021). Pruebas de campo de migración asistida en Canadá y México: Lecciones, limitaciones y retos. *Bosques*, 12(1):9. <https://doi.org/10.3390/f12010009>
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martín-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T., & Reyer, C. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7(6), 395-402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
- Shukla, P. R., Skea, J., Slade, R., Al Khourdajie, A., Van Diemen, R., McCollum, D., & Malley, J. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. *Contribution of working group III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 10, 9781009157926. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
- Spathelf, P., Stanturf, J., Kleine, M., Jandl, R., Chiantante, D., & Bolte, A. (2018). Adaptive measures: integrating adaptive forest management and forest landscape restoration. *Annals of Forest Science*, 75, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0736-4>
- Temperli, C., Bugmann, H., & Elkin, C. (2012). Adaptive management for competing forest goods and services under climate change. *Ecological Applications*, 22(8), 2065-2077. <https://doi.org/10.1890/12-0210.1>

- Testolin, R., Dalmonech, D., Marano, G., Bagnara, M., D'Andrea, E., Matteucci, G., Noce, S., & Collalti, A. (2022). Simulating alternative forest management in a changing climate on a *Pinus nigra* subsp. *laricio* plantation in Southern Italy. *bioRxiv*, Pre Print, 1-39. <https://doi.org/10.1101/2022.05.12.491636>
- Toledo-Aceves, T., Sáenz-Romero, C., Cruzado-Vargas, A. L., & Vásquez-Reyes, V. (2023). *Quercus insignis* seedling response to climatic transfer distance in the face of climate change. *Forest Ecology and Management*, 533, 120855. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120855>
- Vadell, E., Pemán, J., Verkerk, P. J., Erdozain, M., & de-Miguel, S. (2022). Forest management practices in Spain: Understanding past trends to better face future challenges. *Forest Ecology and Management*, 524, 120526. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120526>
- Verkerk, P. J., Costanza, R., Hemetäki, L., Kubiszewski, L., Leskinen, P., Nabuurs, G. J., Potočník, J., & Palahí, M. (2020). Climate-smart forestry: the missing link. *Forest Policy and Economics*, 115, 102164. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102164>
- Villamor, G. B., Wakelin, S. J., Dunningham, A., & Clinton, P. W. (2023). Climate change adaptation behaviour of forest growers in New Zealand: an application of protection motivation theory. *Climatic Change*, 176(2), 3. <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03469-x>
- Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J. E., Hyde, K. J. W., Morelli, T. L., Morissette, J. T., Muñoz, R. C., Pershing, A. J., Peterson, D. L., Poudel, R., Staudinger, M. D., Sutton-Grier, A. E., Thompson, L., Vose, J., Weltzin, J. F., & Whyte, K. P. (2020). Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of the Total Environment*, 733, 137782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>
- Winkler, K. J., Dade, M. C., & Rieb, J. T. (2021). Mismatches in the ecosystem services literature—a review of spatial, temporal, and functional-conceptual mismatches. *Current Landscape Ecology Reports*, 6, 23-34. <https://doi.org/10.1007/s40823-021-00063-2>
- Wolfslehner, B., Prokofieva, I., & Mavsar, R. (2019). *Non-wood forest products in Europe: Seeing the forest around the trees*. What Science Can Tell Us 10. European Forest Institute. From Science to Policy, 10.
- Yousefpour, R., Augustynczyk, A. L. D., & Hanewinkel, M. (2017a). Pertinence of reactive, active, and robust adaptation strategies in forest management under climate change. *Annals of Forest Science*, 74, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0640-3>
- Yousefpour, R., Temperli, C., Jacobsen, J. B., Thorsen, B. J., Meilby, H., Lexer, M. J., Lindner, M., Bugmann, H., Borges, J. G., Palma, J. H. N., Ray, D., Zimmermann, N. E., Delzon, S., Kremer, A., Kramer, K., Reyer, C. P. O., Lasch-Born, P., Garcia-Gonzalo, J., & Hanewinkel, M. (2017b). A framework for modeling adaptive forest management and decision making under climate change. *Ecology and Society*, 22(4). <https://doi.org/10.5751/ES-09614-220440>
- Zhou, M. (2015). Adapting sustainable forest management to climate policy uncertainty: A conceptual framework. *Forest Policy and Economics*, 59, 66-74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2015.05.013>

SISTEMAS SILVOPASTORILES Y LAS CONDICIONES PARA SU ESTABLECIMIENTO

SILVOPASTORAL SYSTEMS AND THE CONDITIONS FOR THEIR ESTABLISHMENT

¹Arturo Angel-Hernández^{ORCID}, ²Carlos Alberto García-Munguía^{ORCID}, ³Edgar Aguilar-Urquiza^{ORCID}, ⁴Alberto Margarito García-Munguía^{ORCID}, ⁵Clemente Lemus-Flores^{ORCID}, ¹Socorro Morales-Flores^{ORCID}

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental La Posta. Paso del Toro, Medellín de Bravo, Veracruz. C.P. 94277. ²Universidad de Guanajuato, División Ciencias de la Vida, Departamento de Veterinaria y Zootecnia. Ex hacienda el Copal, Irapuato, Guanajuato. C.P. 36500. ³Tecnológico Nacional de México, Campus Conkal. Conkal, Yucatán. C.P. 97345. ⁴Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Ciencias Agronómicas. Aguascalientes, Aguascalientes. C.P. 20100. ⁵Universidad Autónoma de Nayarit, Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Compostela, Nayarit. C.P. 63700. [§]Autor de correspondencia: (angel.arturo@inifap.gob.mx)

RESUMEN

La ganadería basada en monocultivos de pastos se asocia al impacto negativo ambiental y a la erosión del suelo, una alternativa para contrarrestar estos efectos es la implementación de sistemas silvopastoriles (SSP), estos en su interacción pasto/arbusto-árbol/animal incrementan el potencial productivo y elevan el valor nutricional de los forrajes. Actualmente se han realizado investigaciones que representan un avance importante en la asociación de cultivos multiespecie donde es necesario estudiar las características de este tipo de sistemas considerando múltiples factores; por este motivo, la presente revisión bibliográfica tuvo como objetivo evidenciar las consideraciones en el establecimiento de los sistemas silvopastoriles, la asociación de cultivos y el enfoque espacial y temporal. Existe una gran diversidad de conceptos en cuanto a los arreglos espaciales y temporales y es posible que surjan otros, sin embargo, es importante considerar los objetivos del productor y conocer las características de las especies que se ajusten a las condiciones de regiones agroecológicas específicas. Se concluye que los SSP ofrecen un modelo prometedor para la gestión y uso adecuado de los recursos naturales en la ganadería retomando las prácticas agrícolas de asociación de cultivos y la interacción entre los

componentes del sistema; para el establecimiento de los SSP se tienen que considerar las condiciones edafoclimáticas, así como las características de las especies a establecer tomando en cuenta la disposición y densidad de plantación en la búsqueda de un aumento en el rendimiento.

Palabras clave: bovinos, forrajes, producción forrajera, pastoreo multiespecie, sustentabilidad.

ABSTRACT

Livestock farming based on pasture monocultures is associated with negative environmental impact and soil erosion. An alternative to counteract these effects is the implementation of silvopastoral systems (SSP). These, in their grass/shrub-tree/animal interaction, increase productive potential and raise the nutritional value of forages. Currently, research has been carried out that represents an important advance in the association of multispecies crops where it is necessary to study the characteristics of this type of systems considering multiple factors, for this reason, the present bibliographic review aimed to highlight the considerations in the establishment of the silvopastoral systems, crop association and spatial and temporal approach. There is a great diversity of concepts regarding spatial and temporal arrangements and it is possible that others may

arise; however, it is important to consider the objectives of the producer and know the characteristics of the species that adjust to the conditions of specific agroecological regions. It is concluded that silvopastoral systems offer a promising model for the management and adequate use of natural resources in livestock farming, resuming agricultural practices of crop association and the interaction between the components of the system. For the establishment of *SSP*, they must be considered the edaphoclimatic conditions, as well as the characteristics of the species to be established, taking into account the layout and density of planting in the search for an increase in yield.

Index words: cattle, forage, forage production, multispecies grazing, sustainability

INTRODUCCIÓN

Actualmente los sistemas de explotación de bovinos basados en pastoreo presentan una baja eficiencia debido al deterioro de los recursos naturales (Moreno et al., 2017) lo que ha causado fuertes cambios en la vegetación (Ibarra et al., 2018) y pérdida de biodiversidad. Una opción para reducir el impacto negativo en la producción ganadera es la implementación de sistemas silvopastoriles (*SSP*), estos son una modalidad de agroforestería pecuaria donde se busca maximizar la eficiencia de los recursos para conseguir una producción de alta calidad, además, se promueven interacciones entre los componentes del sistema que se manifiestan en un incremento en la producción (Chará et al., 2020); se definen como un sistema de manejo integral donde se desarrollan conjuntamente arbustos, árboles, herbáceas, en interacción con animales y suelo (Arciniegas y Flórez, 2018), por ejemplo, la calidad de la dieta del ganado mejora significativamente con la presencia de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, que aumenta la cantidad y calidad del forraje disponible (Hernández et al., 2020). Los *SSP* coadyuvan a mejorar las características del suelo, ya que contribuye al ciclo de nutrientes a través de la hojarasca, lo que promueve un manejo sostenible

del suelo (Martínez-Atencia et al., 2023), también ofrecen beneficios adicionales como la fijación biológica de nitrógeno, la protección del suelo y la retención de humedad, lo que contribuye a una mayor diversidad y productividad (Quiroz et al., 2021). Estos sistemas juegan un papel crucial en la recuperación de suelos degradados y en la mitigación de los gases de efecto invernadero al capturar el carbono atmosférico y fijarlo en el suelo (Santos et al., 2019). Asimismo, permiten el uso sostenible de los bosques al no comprometer la capacidad productiva del suelo (Delgado et al., 2021). Además, mantener la temperatura y la humedad relativa dentro de las áreas de pastoreo por lo que conllevan a la generación de microclimas que mejoran la producción de biomasa forrajera disponible para los animales y aportan al bienestar animal (López et al., 2020; Rosales et al., 2020; Saucedo et al., 2020). En los sistemas pecuarios el estudio de especies de árboles y arbustos forrajeros es una necesidad en función de la productividad de biomasa, disponibilidad de forraje y del valor nutritivo (Muñoz et al., 2016).

En los *SSP* se aprovechan los beneficios de varios estratos de vegetación, de la biodiversidad que se compara con los ecosistemas naturales, así como de la asociación de cultivos que constituye mayores ventajas frente a sistemas de monocultivo (Tamayo y Alegre, 2022). Diferentes estudios han resaltado las bondades de asociar especies gramíneas-leguminosas con especies arbustivas como los ciclos de nutrientes en suelo como el de nitrógeno y por la parte de nutrición donde mantener esa asociación con el aporte de proteína, también se considera incorporar arbóreas que proporcionen subproductos como frutas, madera y especias (Bermúdez & Mendieta-Araica, 2022; Quiroz et al., 2021; Lezcano et al., 2020; Sotelo et al., 2017), la diversidad existente en los *SSP* genera un panorama amplio de aprovechamiento, siendo innumerables las posibilidades de diseñar arreglos tanto en espacio como en tiempo. Los arreglos integrados son enfoques dirigidos fundamentalmente hacia el mejor uso de los recursos naturales, lo que permite la optimización de la producción y la obtención diversificada de

productos y servicios que abonan a la sostenibilidad del sistema (Saucedo et al., 2020).

Los SSP tienen como objetivo principal maximizar la producción de leche y carne, al tiempo que se promueve la conservación del suelo, la biodiversidad, el bienestar animal y la diversificación económica, sin embargo, poco se conoce de las consideraciones de su diseño lo que incluye los arreglos espaciales y temporales además de los estratos, dimensiones y proyecciones en la vegetación. Actualmente se han realizado investigaciones que representan un avance importante en la asociación y distribución de cultivos multiespecie donde es necesario estudiar las características de este tipo de sistemas considerando múltiples factores, por este motivo, la presente revisión bibliográfica tuvo como objetivo evidenciar las consideraciones en el establecimiento de los SSP, la asociación de cultivos, así como el enfoque espacial y temporal de las especies.

DESARROLLO

Establecimiento de sistemas silvopastoriles para la ganadería bovina en el trópico

En México la actividad pecuaria genera alrededor del 40 % del valor nacional de la producción del sector primario (SIAP, 2022), una de las principales actividades es la ganadería bovina doble propósito, en el país se estimó en el año 2022 una producción de carne en canal de bovino de dos millones de toneladas y 13 millones de litros de leche (SADER, 2024). En las regiones tropicales de México el sistema de producción bovina se desarrolla generalmente en sistemas de pastoreo extensivo, tiene como principal fuente de alimentación pastos naturales o inducidos en monocultivo (Enríquez et al., 2020), estos sistemas intervienen en la modificación de los procesos ecológicos, con un impacto ambiental relacionado con la fragmentación de los ecosistemas naturales, compactación del suelo, deforestación, desertificación, erosión y pérdida de biodiversidad entre otros (Bacab et al., 2013). Lo anterior hace necesaria la adopción de sistemas

productivos de menor impacto ambiental, sin afectar los aspectos productivos, sociales y económicos. Recientemente se han propuesto los SSP, estos combinan la ganadería con la silvicultura, logrando la integración de árboles maderables, frutales, arbustos forrajeros, pastos y animales en un mismo sistema con lo que se tiene disponibilidad de forraje en los periodos de escases, beneficios ecológicos y sociales, además de confort para los animales, por lo que este sistema se convierte en una alternativa prometedora en la producción ganadera (Aguirre et al., 2021). En cuanto al factor productivo González (2013) refiere que al establecer un SSP con *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. se tiene una capacidad de carga animal de hasta 2.6 veces más, la producción de proteína (kg/ha) es 5.8 mayor, lo que hace que se reduzca el uso de alimento complementario debido a que el SSP no es un sistema consumista de agroquímicos, lo que minimiza los costos de cultivo sobre cualquier cultivo tradicional, en cuanto al aspecto ambiental, en el aspecto ambiental Gálvez et al. (2019) reportó que en los SSP existen mayor presencia de individuos descomponedores de materia orgánica, una producción de biomasa comestible mayor (17,82 Ton MS ha⁻¹ año⁻¹) del SSP) frente al sistema convencional (11,97 Ton MS ha⁻¹ año⁻¹) y un contenido de N (0,07%), K (0,43 cmol kg⁻¹) y MO (2,04%) mayor en el suelo y que en estos sistemas se incrementa la diversidad de especies, en el trópico encontraron un total de 38 especies entre herbáceas, arbustivas y arbóreas, pertenecientes a 25 familias y 35 géneros, siendo las familias más representativas *Fabaceae*, *Urticaceae* y *Solanaceae*, Bautista - Tolentino et al. (2011), refieren que los SSP encontrados en el trópico integran árboles multipropósito, los cuales están principalmente asociados a pastos nativos (*Bouteloua* spp., *Paspalum* spp. y *Axonopus* spp.) o introducidos (*Panicum máximum* Jaqc. e *Hyparrhenia rufa* (Nees) Stapf), el ganado bovino se mantiene bajo un sistema de pastoreo continuo y en ocasiones de rotación lenta durante los meses de junio a febrero con presencia de *Bos taurus* x *Bos indicus*.

Asociación de leguminosas – gramíneas

La asociación de cultivos es una técnica realizada desde épocas antiguas, consiste en combinar dos o más especies en la misma superficie durante parte o todo su ciclo, tiene como objetivo promover la relación complementaria entre los cultivos y aumentar la eficiencia productiva en comparación con los monocultivos (INIFAP, 2018), la combinación de especies vegetales puede ser realizada considerando diversas orientaciones productivas con base en especies de ciclo corto, perenne, cultivos hortofrutícolas, pasturas, árboles y arbustos en asociaciones simples o complejas (Tamayo y Alegre, 2022). Los principales beneficios están relacionados con un mejor uso de los recursos naturales, uso eficiente del espacio disponible, aumento y diversificación de la producción, disponibilidad de nutrientes para otras especies, manejo integrado de plagas y enfermedades, mejoramiento del bienestar animal, fertilidad del suelo y mitigación del cambio climático.

Los cultivos asociados representan una opción viable para alcanzar una agricultura sustentable e incrementar los rendimientos por unidad de área y tiempo (Colina et al., 2020) además genera ventajas agronómicas, tales como el uso intensivo de la tierra, la diversificación de cultivos y de fuentes de alimento (Pérez et al., 2013). Los SSP se pueden mejorar con el uso de leguminosas en asociación con gramíneas, esta asociación requiere de ciertos arreglos de siembra, para evitar efectos de competencia por espacio, luz, agua o nutrientes que provoquen el dominio o desplazamiento de alguno de los componentes botánicos, lo que aseguraría mantenerlos estables en el tiempo y en el espacio. Algunos estudios señalan que el intercalar leguminosas herbáceas, con marcos de plantación en surcos dobles el rendimiento de forraje se incrementa hasta un 16 % en comparación con el alcanzado cuando se emplean surcos sencillos. Las leguminosas, tienen la capacidad única de establecer simbiosis con bacterias como *Rhizobium etli*, lo que les permite fijar nitrógeno atmosférico y promover el crecimiento tanto de leguminosas como de no

leguminosas a través de la producción de compuestos beneficiosos (Duchen y Torres, 2021; López et al., 2021; Conn et al., 2014), esta capacidad de fijación de nitrógeno es fundamental para mejorar la fertilidad del suelo y la productividad de las especies vegetales de interés (Castro et al., 2009). La incorporación de leguminosas en SSP con gramíneas ha demostrado aumentar la productividad animal y mejorar el balance de nitrógeno, lo que se ve influenciado por factores como la época de distribución de las precipitaciones y la capacidad de fijación de nitrógeno de las leguminosas (Torres y Martínez, 2022; Calderón et al., 2018). Estudios han demostrado que las leguminosas presentan una mayor supervivencia en comparación con las no leguminosas en ciertos contextos, lo que destaca su importancia en términos de desempeño productivo (Alfonso et al., 2016).

La incorporación de leguminosas es importante, pues presentan un mayor contenido de proteína, en la región tropical de México se ha reportado la asociación de *Leucaena* con pasto estrella, además de Kudzú (*Pueraria thomsonii* Benth.), cacahuatillo, (*Arachis pintoii* Krapov. & Gregori.), *Cratylia argentea* (Desvaux) O. Kuntze, entre otras (Enríquez et al., 2020). En otros trabajos se han asociado especies como *Urochloa decumbens* (Stapf.) R.D. Webster, *Brachiaria dictyoneura* (Fig. & De Nuf) Stapf. y *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweickt, con las leguminosas, *Centrosema macrocarpum* Benth. y *Desmodium ovalifolium* (Prain.) obteniendo resultados positivos (Rojas et al., 2005).

Rodríguez y Roncallo (2013) indican que al evaluar un monocultivo de pasto *Bothriochloa pertusa* L. y *Panicum máximum* Jacq. cv. Tanzania como testigos; y cuatro arreglos basados en *Guazuma ulmifolia* Lam. *Crescentia cujete* L., *Leucaena leucocephala* Lam. los resultados revelaron mayor producción de forraje con plantas de mayor altura en los arreglos silvopastoriles en relación con el monocultivo de *Bothriochloa pertusa* L., sin embargo, se destaca una mayor producción de materia seca en pasto guinea.

También refieren que en los arreglos silvopastoriles predominan las gramíneas en comparación con el aporte de las arbóreas en la época de verano presentando una disminución de rendimiento en época de seca, la proporción porcentual de arbóreas varía en los diferentes arreglos y se resalta que los sistemas asociados presentan sus mayores ventajas en época de sequía, temporada donde los pastos presentan bajo rendimiento y calidad nutricional. Por otra parte, Rivera et al. (2011) indican que al comparar la cantidad y calidad de la leche producida en un sistema de monocultivo de *Brachiaria* sp. y uno donde se asoció *Tithonia diversifolia* Hemsl. con pasturas renovadas de *Braquiaria brizantha* (Mochst) Stapf., *B. decumbens* Stapf. y *B. humidicola* (Rendle) Schweickt y árboles maderables en franjas de diversas especies la producción de leche en el SSP incrementó en 36.72 %.

Por lo anterior se puede inferir en que una de las alternativas para mejorar la calidad de las praderas tropicales es la introducción de leguminosas persistentes y compatibles con gramíneas pues representan una opción para solucionar el problema de la alimentación del ganado en el trópico y una alternativa viable para alcanzar una agricultura sustentable (Tamayo y Alegre, 2022).

Selección de especies para el establecimiento de un sistema silvopastoril

La asociación de las diferentes especies se basa en plantas nativas o introducidas seleccionadas para cada condición edafoclimática, que posean alta especificidad biológica, traducida para la eficiencia en captación de energía solar, multifuncionales y con altos rendimientos sobre la base de mínimos recursos e insumos importados (Milera, 2013). Además, es importante considerar para los estratos herbáceo y arbustivo las siguientes características: 1) características agronómicas: crecimiento rápido, adaptación a suelos de baja fertilidad, resistencia a quemaduras, enfermedades y plagas, producción de abundante hojarasca, producción de biomasa en época seca, alta producción de semilla y fácil

propagación, alta tasa de sobrevivencia al trasplante en campo y capacidad de asociación (Argüello et al., 2019). 2) Capacidad de asociación: asociación con arbóreas y gramíneas, sistema radicular profundo, permitir el crecimiento de otras plantas bajo su dosel. Respuesta a defoliación: Respuesta adecuada a podas y ramoneo frecuente, alta producción de rebrotes después de la defoliación. Valor nutricional y consumo: alto valor nutritivo (Cabrera et al., 2021), aceptable y palatable para el ganado, bajo contenido de metabolitos secundarios, aumento en índices productivos y reproductivos de los animales.

Por otra parte, para el estrato arbóreo se tendrán consideraciones según los servicios ambientales o subproductos que puedan generar, en este sentido se busca un aporte secundario del sistema que tenga como función proporcionar sombra, forraje, madera, leña, postes, fruta o especias.

Estratos de vegetación: arbóreo, arbustivo y herbáceo

La estructura de la cobertura vegetal se divide en tres estratos fundamentales; arbóreas, arbustivas y herbáceas. Las plantas pertenecientes al estrato arbóreo son plantas de gran tamaño, perennes y leñosas, el estrato arbustivo está representado por plantas perennes o bianuales con capacidad de resistir la cosecha foliar y podas frecuentes, el estrato herbáceo está conformados por plantas de cobertura. Estos estratos de vegetación en un SSP son fundamentales para comprender la dinámica y la interacción de los diferentes componentes en este tipo de sistemas. Vlassova et al., (2017) destacan la importancia de los estratos de vegetación en los ecosistemas, donde la presencia de árboles y herbáceas genera complejos mecanismos de intercambio de carbono y agua.

Cada uno de estos estratos deben de ser analizados y se deben elegir especies que cumplan con cometidos específicos dependiendo de la

región edafoclimática, características agronómicas, necesidad del productor y el mercado objetivo.

a) Estrato arbóreo: las especies a utilizar se puede subdividir en frutales, maderables, medicinales, melíferas, postes y leña, en las regiones tropicales existe una gran gama de árboles que se pueden incorporar a un SSP y las consideraciones para su establecimiento son orientación, distribución, circulación de aire, altura, ventilación, suelo y superficie. Algunas especies propuestas pueden ser *Acacia mangium* Willd., *Tectona grandis* L. f. (Milera, 2013), *Azadirachta indica* A. Juss., *Cordia dodecandra* A. DC., *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm., *Quercus robur* L., *Bursera simaruba* (L.) Sarg. entre otras.

b) Estrato arbustivo: el número de especies es reducida pues estas deben cumplir con características necesarias como tolerancia a la defoliación y poda, aporte nutricional relevante y capacidad de asociación. Dentro de las especies arbustivas existe una clasificación importante a considerar; leguminosas y no leguminosas, su asociación es importante en el equilibrio de nitrógeno en los agroecosistemas, sin embargo, también existen desventajas en estas especies, una de las principales es la presencia de metabolitos secundarios, estos son compuestos químicos producidos por las plantas que, aunque no son esenciales para su supervivencia, desempeñan un papel crucial en su interacción con el entorno. Estos metabolitos pueden influir en la calidad nutricional y la palatabilidad de las plantas forrajeras. Estudios como el de Varón y Granados (2012) señalan que la presencia de metabolitos secundarios en plantas forrajeras como *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp. y *Tithonia diversifolia* Hemsl. puede afectar la digestibilidad y la absorción de nutrientes en los animales, lo que a su vez puede tener efectos sistémicos en su salud. Por otro lado, investigaciones como la de Méndez et al., (2022) indican que, en condiciones naturales, algunas especies de arbustos como *Phyllanthus acuminatus* Vahl producen bajas concentraciones de metabolitos secundarios de interés medicinal. Esto resalta la importancia de comprender la variabilidad en la producción de

estos compuestos en diferentes especies vegetales. Además, la identificación de metabolitos secundarios en plantas forrajeras como *Tithonia diversifolia* Hemsl. ha sido abordada en estudios como el de Gallego et al. (2016), donde se menciona que el contenido de estos compuestos no fue alto, lo que sugiere que podrían tener un impacto limitado en la palatabilidad y digestibilidad de la materia seca.

Algunas de las especies arbustivas con potencial forrajero son: *Tithonia diversifolia* Hemsl., *Cratylia argentea* (Desv.) Kunze y *Clitoria fairchildiana* R. A. Howard, *Morus* sp. y *Trichanthera gigantea*, entre las leguminosas arbustivas recomendadas están: *Leucaena leucocephala* (Lam.) y *Albizia lebbbeck*, *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp. (Milera, 2013).

c) Estrato herbáceo la problemática es menor debido que existe muchos avances en el estudio de forrajes de gramíneas y en el mercado se cuentan con diversas variedades de pastos forrajeros que constituyen el mayor volumen de consumos de los animales en los SSP por lo que es de suma importancia la buena elección de un pasto y su mantenimiento. Una de las principales desventajas es la estacionalidad ambiental ya que se ven afectados teniendo una disminución radical en su disponibilidad en épocas secas de alrededor del 90 %. Además, estas especies disminuyen su concentración de nitrógeno dado a su rápido crecimiento que se registra generándose una fuerte dilución de nitrógeno dentro de la planta, causando que el forraje sea de mala calidad nutricional (Enríquez et al., 2024). A lo anterior se puede sumar el manejo, cuando este es inadecuado se reduce el rendimiento de la producción forrajera, afectando la disponibilidad del forraje.

Arreglos temporales y espaciales en la agricultura

Combinar temporal o espacialmente diversos tipos de plantas es una práctica muy antigua, en América Latina esta práctica de siembra fue implementada en diversas regiones desde épocas prehispánicas, uno de los ejemplos más representativos antiguos

es el sistema “milpa” que integra poblaciones silvestres de maíz, frijol y calabaza (Zizumbo y Colunga, 2017) en este complejo sistema mesoamericano de policultivo se aprovecha de manera diversificada el terreno o parcela, tanto en el tiempo como en el espacio (Garibay, 2011) y cada especie tiene una función especial, así se permite un equilibrio en el ecosistema. INIFAP (2022) señala que el maíz es una planta extractora de nutrientes, el frijol restituye o fija nitrógeno atmosférico al suelo, mientras que la siembra de calabaza al expandirse en la superficie del suelo ayuda a no dejar crecer arvenses no deseadas y las flores ayudan a la atracción de polinizadores, en esta asociación se ejemplifica la relación y beneficios que otorga.

Actualmente se retoma la importancia de asociar una amplia diversidad de especies y plantas herbáceas donde los principales arreglos basados en la asociación de cultivos, algunos de estos son; asociación de cultivos agrícolas, sistemas agroforestales y SSP (Tamayo y Alegre, 2022).

La incorporación de arreglos temporales y espaciales en diferentes estratos de vegetación para la implementación de un SSP incrementa la producción, el beneficio ambiental, además se mantiene la interrelación adecuada de cada uno de sus componentes.

Arreglos desde el enfoque espacial en los sistemas silvopastoriles

En los arreglos silvopastoriles se presentan interacciones de diversa complejidad y magnitud, la asociación puede ser sencilla empleando dos especies o complejas con la interacción de más de dos especies, se establecen en rotaciones, intercalamientos y/o cultivos en franjas, en estos sistemas los factores abióticos (luz, agua, nutrientes, temperatura), bióticos (animales, plantas, organismos vivos edáficos, otros agentes vivos) y arreglos especiales interactúan de diversas formas, produciendo efectos variables.

Para los arreglos se tiene que considerar la estructura de los tres estratos que conforman un SSP, se recomienda que el estrato arbóreo sea establecido como cercas vivas y/o de forma dispersa para proveer de sombra, fruta, especies, madera, leña, también se permite la formación de vías de tránsito y hábitat de la fauna silvestre (Delgado et al., 2021; López et al., 2021; Ramírez et al., 2021) pues la interacción entre la fauna silvestre y los SSP es crucial para comprender cómo estas prácticas afectan a los ecosistemas. Estudios han demostrado que la fauna silvestre se ve afectada por factores como la fragmentación de hábitats generando impactos negativos en la población de animales, por lo que estos sistemas pueden aportar a disminuir este impacto (Rosero et al., 2021; Ossa et al., 2015).

En la actualidad existen una gran cantidad de arreglos espaciales en los SSP, con sus características particulares y con beneficios de su implementación (Tabla I).

El arreglo espacial rectangular sugiere priorizar la incorporación de leguminosas, los cultivos se organizan en hileras rectas o en patrones rectangulares para optimizar el espacio y facilitar el cultivo y la cosecha. Este método permite un uso eficiente de la tierra y los recursos, facilitando el manejo de los cultivos y la realización de tareas agrícolas como deshierbe, riego y cosecha.

Tabla I. Distancias y densidades de siembra de árboles por hectárea, en sistemas de siembra al tresbolillo, cuadrado y rectángulo.

Espaciamento empleado según el uso de las plantaciones (m)	“Tresbolillo” (plantas ha ⁻¹)	(número En cuadro y en rectángulo (plantas ha ⁻¹))
1×1	11,547	10,00
2×2	2,887	2,500
2×3	1,924	1,666
2.5×3	1,540	1,333
3×3	1,283	1,111
3×4	962	833
4×4	722	625
5×5	462	400

Fuente: Bueno y Guillermo (2012).

Otro arreglo es el “tres bolillo”, en este se planta en forma de zigzag lo que permite optimizar el espacio con una mayor densidad de árboles por unidad de área que consiste en sembrar tres o más hileras y dejar callejones de 15 m a 20 m entre las franjas, que corresponde a las áreas de pastoreo mientras los árboles se desarrollan y se evita que las raíces compitan duplicando el número de plantas por el número de hileras, en cada uno de estos diseños se establece la distancia y densidad de siembra (Bueno y Guillermo, 2012). El arreglo cinco de oros podría sugerir un patrón de siembra que involucra tres hileras de un cultivo, donde cada hilera represente se encuentra intercalada, este patrón puede tener beneficios prácticos, como maximizar la exposición a la luz solar, mejorar la circulación del aire o mejorar el rendimiento de los cultivos mediante el uso eficiente del espacio.

Las distancias de siembra varían de acuerdo con la especie, tipo de producto o función que defina el productor de acuerdo con su sistema de producción (Tabla I).

Saucedo (2020) refiere que los arreglos con árboles en callejones y árboles dispersos registran menor variabilidad en los parámetros ambientales, reflejando que las bondades que ofrece el componente arbóreo guardan relación con la densidad de árboles y la cobertura que se logra a través de su copa. Se recomienda establecer arbustos con potencial forrajero en forma de callejones para la fácil administración del pastoreo,

es importante dar manejo a la altura de planta para que pueda ser de fácil cosecha por los animales en el proceso de defoliación (Angel y Morales, 2023; Saucedo et al., 2020; Gargoloff et al., 2016).

Por otra parte, Merma y Julca (2012) señalan que en los policultivos los arreglos espaciales más representativos son los cultivos asociados, cultivos intercalados, multiestrato desordenado, cultivos de borde y cultivos en franjas. La preferencia por los policultivos radica en que es una estrategia de diversificación de productos en el campo, los principales cultivos son de hábito perenne que requieren de árboles de sombra y la vegetación natural del ecosistema tropical se regenera y mantiene una foresta boscosa.

Algunos de los arreglos espaciales en los SSP son los siguientes: a) arreglo disperso: los árboles y arbustos endémicos crecen de forma natural, no presenta una lógica para el establecimiento, estas especies atraen fauna dispersora de semillas y ofrecen condiciones microambientales propicias para la germinación y crecimiento de plántulas de diversas especies. El productor lo deja en el predio por que otorga algún beneficio, este puede ser sombra, cercos vivos, postes, forraje, madera o alimento.

b) Arreglo en borde: las especies arbóreas y arbustivas se establecen en el perímetro del predio cumpliendo la función de cercos vivos, suministrar forraje, madera, frutos, evitar la erosión del suelo, también funcionan como corredores locales donde

pueden habitar tanto fauna como flora (Morantes y Renjifo, 2018).

Arreglos desde el enfoque temporal en los sistemas silvopastoriles

En el trópico la producción de especies forrajeras se caracteriza por una alta estacionalidad, lo que ocasiona cambios en la productividad por variaciones ambientales (Portillo et al., 2019), la época de siembra es decisiva para lograr una respuesta positiva en la productividad, para elegir la fecha de establecimiento es necesario conocer las condiciones ambientales de la región (Bolaños et al., 2020). Una de las formas más efectivas para incrementar y mejorar la producción y productividad del ganado es la selección de especies forrajeras de gramíneas y leguminosas con potencial de producción, persistencia y adaptación a las más diversas condiciones climáticas y edáficas, por lo que es importante contemplar los enfoques de la temporalidad en la producción de los forrajes donde se tiene que uniformizar el manejo dentro del pastoreo, aplicar el pastoreo rotacional, mantener la producción de los forrajes y la vida productiva de las plantas (Bautista et al., 2022; Jurado et al., 2021; Laiton et al., 2021). Para lograrlo es necesario que las plantas de los estratos involucrados en la producción de forrajes tengan similar el tiempo de cosecha principalmente el estrato herbáceo y arbustivo, en las diferentes épocas del año.

Por esta razón, se recomienda enfocar los esfuerzos de investigación a estudiar la adaptación y producción estacional de germoplasma de herbáceas y arbustivas. Esta información será de gran utilidad para el aumento de la producción de forraje, ya que el SSP estudiado es complementario a los sistemas tradicionales locales de producción de forraje.

Finalmente, es esencial evaluar las implicaciones económicas, ambientales y de bienestar animal de la adopción de los SSP para más arreglos y condiciones agroecológicas según las características de cada región o localidad (Chará et al., 2020).

COMENTARIOS FINALES

Los sistemas silvopastoriles ofrecen un modelo prometedor para la gestión y uso adecuado de los recursos naturales en la ganadería retomando las prácticas agrícolas de asociación de cultivos y la interacción entre los componentes del sistema, Además coadyuva en servicios ambientales como recuperación de suelos, captura de carbono, por mencionar algunos, en el aporte a la economía del productor al diversificar el sistema y obtener diferentes productos. Para el establecimiento de los sistemas silvopastoriles se tienen que considerar las condiciones edafoclimáticas, así como las características de las especies a establecer tomando en cuenta la disposición y densidad de plantación en la búsqueda de un aumento en el rendimiento.

REFERENCIAS

- Aguirre, F.S., Nelson, V., Piraneque, G.C. & Abaunza, S.F. (2021). Especies con potencial para sistemas agroforestales en el Departamento del Magdalena, Colombia. *Información Tecnológica*, 32(5), 13-28. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000500013>
- Alfonso, C., Riverol, M., Porras, P., Cabrera, E., Llanes, J., López, H.J. & Somoza, V. (2016). Las asociaciones maíz-leguminosas: su efecto en la conservación de la fertilidad de los suelos. *Agronomía Mesoamericana*, 8(1), 65-73. <https://doi.org/10.15517/am.v8i1.24732>
- Angel, H.A. & Morales, F.S. (2023). Sistemas silvopastoriles intensivos donde se incorporen arbustos forrajeros como opción a la sustentabilidad ganadera en la Región Centro del estado de Veracruz. *Jóvenes de la Ciencia*, 6, 1-6.
- Arciniegas, T.S. & Flórez, D.D. (2018). Estudio de los sistemas silvopastoriles como alternativa para el manejo sostenible de la ganadería. *Ciencia y Agricultura*, 15(2), 107-116. <https://doi.org/10.19053/01228420.v15.n2.2018.8687>
- Argüello, R.J., Mahecha, L.L. & Angulo, A.J. (2019). Arbustivas forrajeras: importancia en

- las ganaderías de trópico bajo Colombiano. *Agronomía Mesoamericana*, 30(3), 899-915. <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.35136>
- Bacab, H.M., Madera, N.B., Solorio, F.J., Vera, F. & Marrufo, D.F. (2013). Los sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala*: una opción para la ganadería tropical. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(3), 67-81.
- Bautista, G.G., López, O.S., Hernández, P., Cuevas, F., Ortega, J.E. & Collado, C. (2022). Estudio preliminar del pastoreo racional voisin como herramienta para mejorar las condiciones del suelo después del pastoreo extensivo. *Revista Terra Latinoamericana*, 40, 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.893>
- Bautista-Tolentino, M., López-Ortíz, S., Pérez-Hernández, P., Vargas-Mendoza, M., Gallardo-López, F. & Gómez-Merino, F.C. (2011). Sistemas agro y silvopastoriles en la comunidad el Limón, municipio de Paso de Ovejas, Veracruz, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 63 - 76
- Bermúdez, C. and Mendieta-Araica, B. (2022). Sistemas silvopastoriles: una alternativa para la ganadería bovina sostenible. *La Calera*, 22(38). <https://doi.org/10.5377/calera.v22i38.14193>
- Bolaños, A.E., Enríquez, Q.J. & Frago, I.A. (2020). *Paquete tecnológico para el establecimiento de praderas tropicales*. INIFAP. pp 1-38. https://vun.inifap.gob.mx/BibliotecaWeb/_Content?/=12291
- Bueno, G. & Guillermo, A. (2012). Sistemas silvopastoriles, arreglos y usos. *Rev. Sist. Prod. Agrocol.*, 3(2), 56-83. <https://doi.org/10.22579/22484817.604>
- Cabrera, N.A., Lammoglia, V.M., Alarcón, P.S., Martínez, S.C., Rojas, R.R. & Velázquez, J.S. (2021). Árboles y arbustos forrajeros utilizados para la alimentación de ganado bovino en el norte de Veracruz, México. *Abanico Veterinario*, 9, 1-11. <http://dx.doi.org/10.21929/abavet2019.913>
- Calderón, S., Fernández, J., Pezo, D. & Calderón, R. (2018). Asociación de cultivos, maíz y leguminosas para la conservación de la fertilidad del suelo. *Revista de Investigación Ciencia Tecnología y Desarrollo*, 4(1), 15-22. <https://doi.org/10.17162/rictd.v4i1.1068>
- Castro, R., Mojica, E., León, J., Pabón, M., Carulla, J. & Cárdenas, E. (2009). Balance de nitrógeno en pastura de gramíneas y pastura de gramínea más *Lotus uliginosus* en la sabana de Bogotá, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 10(1), 91-101. https://doi.org/10.21930/rcta.vol10_num1_art:133
- Chará, J., Reyes, E., Peri, P., Otte, J., Arce, E. & Schneider, F. (2020). *Sistemas silvopastoriles y su contribución al uso eficiente de los recursos y a los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Evidencia desde América Latina*. CIPAV, FAO & Agri Benchmark, Editorial CIPAV, Cali, 60 pp. <https://cipav.org.co/wp-content/uploads/2020/09/SSP-contribucion-uso-efic-recursos.pdf>
- Colina, A.M., Nava, J.C., Rodríguez, Z.F., Portillo, P.E., Martínez, S.J. & Faría, A. (2020). Evaluación del comportamiento de los cultivos de yuca, maíz y topocho bajo distintas asociaciones. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 37, 112-128.
- Conn, L., Pérez, A., Ramírez, M. & Franco, M. (2014). Efecto de la temperatura de almacenamiento sobre la viabilidad de bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno utilizadas en la elaboración de inoculantes biológicos para arveja (*Pisum sativum*) y soya (*Glycine max*). *Revista Colombiana de Biotecnología*, 16(2), 45-56. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v16n2.47244>
- Delgado, G., Zárate, F., Chirinos, J., Espilco, P., Bojorquez, J., Egoavil, D. & Delgado, J. (2021). Efecto de *Acacia macracantha* en las propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema silvopastoril. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(3), 15-22. <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i3.20389>

- Duchen, D. & Torres, J. (2021). Interacción de bacterias y plantas en la fijación del nitrógeno. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 8(2), 87-101.
<https://doi.org/10.53287/uyxf4027gf99e>
- Enríquez, Q.J., Esqueda, E.V. & Bolaños, A.E. (2020). Leguminosas forrajeras para mejorar la alimentación de bovinos en el trópico de México. INIFAP.
https://vun.inifap.gob.mx/BibliotecaWeb/_Content?/=12288
- Enríquez, Q.J.F., Bolaños, A.E.D., Fragoso, I.A., Montero, L.M. & Vinay, V.J.C. (2024). Ganancias de peso del ganado en pastoreo en la época seca en el trópico de México: Ganancias de peso del ganado en pastoreo en la época seca en México. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(1), 38-48.
<https://doi.org/10.34188/bjaerv7n1-003>
- Gallego, C.L., Mahecha, L.L. & Angulo, A.J. (2016). Calidad nutricional de *Tithonia diversifolia* hemsl. a gray bajo tres sistemas de siembra en el trópico alto. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 213.
<https://doi.org/10.15517/am.v28i1.21671>
- Gálvez, C.A.L., Apráez, G. J.E., Apráez M. J.J., Ruales E. F. R. (2019). Implementación y evaluación de un sistema silvopastoril en el Chocó biogeográfico colombiano. *Revista FAGROPEC*, 11(2), 129. DOI. 10.47874/fagropec.v11n2a6
- Gargoloff, N., Blandi, M., Sarandón, S. & Cavalcante, M. (2016). Prácticas, conocimientos y percepciones que dificultan la conservación de la agrobiodiversidad. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 13(78), 97-122.
<https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdri3-78.pcpd>
- Garibay, R.M. (2011). *Maíz criollo, milpa y agrobiodiversidad*. Ciencia y Desarrollo. CONACYT.
<https://www.cyd.conacyt.gob.mx/archivo/255/articulos/maiz-criollo-milpa-y-agrobiodiversidad.html>
- González, J. M. (2013). Costos y beneficios de un sistema silvopastoril intensivo (sspi), con base en *Leucaena leucocephala* (Estudio de caso en el municipio de Tepalcatepec, Michoacán, México). *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(3), 35-50
- Hernández, H.M., López, O.S., Jarillo, R.J., Ortega, J.E., Pérez, E.S., Díaz, R.P., & Crosby G.M.M. (2020). Rendimiento y calidad nutritiva del forraje en un sistema silvopastoril intensivo con *Leucaena leucocephala* y *Megathyrsus maximus* cv. Tanzania. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(1), 53-69.
<https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4565>
- Ibarra, F.F., Martín, R.M., Moreno, M.S., Ibarra, M.F. & Retes, L.R. (2018). Cambios de vegetación y costos asociados con el continuo sobrepastoreo del ganado en el pastizal mediano abierto de cananea, Sonora, México. *Revista Mexicana de Agronegocios*. 42, 855-866.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). (2022). Milpa en Transición Agroecológica. *Un sistema ancestral*.
<https://www.gob.mx/inifap/articulos/milpa-en-transicion-agroecologica>
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). (2018). *La asociación de cultivos de frijol y cítricos es una alternativa conveniente en plantaciones jóvenes que aún no empiezan a producir, ya que el aprovechamiento del suelo es óptimo en el consumo de nutrientes*.
<https://www.gob.mx/inifap/prensa/alternativa-para-impulsar-plantaciones-jovenes-inifap>
- Jurado, G.P., Velázquez, M.M., Sánchez, G.R., Álvarez, H.A., Martínez, P., Gutiérrez, L.R. & Chávez, R.M. (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>
- Laiton, M.J., Nery, V. & Granados, M.J. (2021). Evaluación de tres especies de *Brachiaria* spp. con pastoreo rotacional para ceba bovina.

- Orinoquía, 25(1), 15-22.
<https://doi.org/10.22579/20112629.652>
- Lezcano, M., Lezcano, C., Diaz, S., & Ortiz, M. (2020). Contenido de materia orgánica en suelos de sistemas silvopastoriles establecidos en el chaco central paraguayo. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 25(2), 131-143.
<https://doi.org/10.32480/rscp.2020.25.2.131>
- López, A., Serrano, A., Cruz, J., Galarza, C., & Castro, F. (2020). Indicadores de bienestar animal en vacas lecheras en un sistema silvopastoril del trópico alto colombiano. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 31(4), e16871.
<https://doi.org/10.15381/rivep.v31i4.16871>
- López, P., Meneses, B.D., Burbano, E., Nisivoccia, M. & Rincón, E. (2021). Valor nutritivo de mezclas forrajeras en épocas seca y de lluvias en nariño, colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 32(2), 556-572.
<https://doi.org/10.15517/am.v32i2.43207>
- Martínez-Atencia, J., Osorio-Vega, N., León-Peláez, J., Cajas-Girón, Y., Contreras-Santos, J., & Berrío-Guzmán, E. (2023). Retorno potencial de nutrientes vía hojarasca foliar en sistemas silvopastoriles en el norte de Colombia. *Agronomía Costarricense*, 47(1).
<https://doi.org/10.15517/rac.v47i1.53946>
- Méndez, R., Quesada, K. & Garro, M.G. (2022). Cultivo in vitro de raíces pilosas del arbusto *Phyllanthus acuminatus* (Phyllanthaceae). *Revista de Biología Tropical*, 70(1), 647-657.
<https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v70i1.49227>
- Merma, I. & Julca, A. (2012). Tipología de productores y sostenibilidad de cultivos en Alto Urubamba, La Convención – Cusco. *Scientia Agropecuaria*, 3(2), 149-159.
- Milera, M. (2013). Contribución de los sistemas silvopastoriles en la producción y el medio ambiente. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(3), 7-24.
- Morantes, T.J. & Renjifo, L.M. (2018). Cercas vivas en sistemas de producción tropicales: una revisión mundial de los usos y percepciones. *Revista de Biología Tropical*, 66(2), 739-753.
<http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i2.33405>
- Moreno, M.S., Ibarra, F.F., Martín, R.M. & Moreno, Á.R. (2017). Impacto económico del deterioro de los recursos naturales asociados con la eficiencia de la reproducción ganadera. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 21(40), 649-659.
- Muñoz, G.J., Huerta, B.M., Lara, B.A., Rangel, S.R. & De la Rosa, A.J. (2016). Producción y calidad nutrimental de forrajes en condiciones del Trópico Húmedo de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16, 3315-3327.
- Ossa, V., Ossa, N.O. & Medina, B.E. (2015). Atropellamiento de fauna silvestre. *Revista Colombiana de Ciencia Animal Recia*, 7(1), 109-116.
<https://doi.org/10.24188/recia.v7.n1.2015.430>
- Pérez, A., Martínez, E., Vélez, L. & Cotes, J. (2013). Acumulación y Distribución de Fitomasa en el Asocio de Maíz (*Zea mays* L.) y Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, Colombia*, 66(1), 6865-6880.
- Portillo, L.P., Meneses, B.D., Morales, M.S., Cadena, G.M. & Castro, R.E. (2019). Evaluación y selección de especies forrajeras de gramíneas y leguminosas en Nariño, Colombia. *Pastos y Forrajes*, 42(2), 93-103.
- Quiroz, B., Ortega, G., Romero, N., & Ortega, C. (2021). Ganadería en sistemas de producción silvopastoril. *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias -Fagropec*, 13(2), 156-168.
<https://doi.org/10.47847/fagropec.v13n2a7>
- Ramírez, P., Aponte, A., Díaz, G., Piña, C. & Román, R. (2021). Análisis del marco jurídico para la creación de una unidad de manejo ambiental en México. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 9(1), 01-15.
<https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v9i1.336>
- Rivera, J.E., Arenas, F.A., Cuartas, C.A., Naranjo, J.F., Tafur, A.O., Hurtado, E., Gacharna, N.,

- Zambrano, F. & Murgueitio, R.E. (2011). Producción y calidad de leche bovina en un sistema de pastoreo en monocultivo y un sistema silvopastoril intensivo (SSPi) compuesto de *Tithonia diversifolia* bajo ramoneo directo, *Brachiaria* spp. y árboles maderables en el piedemonte amazónico. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 24(3), 524.
<https://doi.org/10.17533/udea.rccp.324710>
- Rodríguez, F.G. & Roncallo F.B. (2013). Producción de forraje y respuesta de cabras en crecimiento en arreglos silvopastoriles basados en *Guazuma ulmifolia*, *Leucaena leucocephala* y *Crescentia cujete* Corpoica. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 14(1), 77-89.
- Rojas, H.S., Olivares, P.J., Jiménez, G.R. & Hernández, C.E. (2005). Manejo de praderas asociadas de gramíneas y leguminosas para pastoreo en el trópico REDVET. *Revista Electrónica de Veterinaria*, 6(5), 1-20.
- Rosales, H., Cevallos, E., Cevallos, F., & Peñafiel, G. (2020). Influencia de los sistemas silvopastoriles en la conducta alimentaria de vacas lecheras holstein. *Sathiri*, 15(2), 199-206.
<https://doi.org/10.32645/13906925.988>
- Rosero, D., Benavides, R.H., Carvajal, P.L. & Revelo, S.G. (2021). Análisis de las poblaciones edáficas en suelos con sistemas silvopastoriles dedicados a la producción lechera, en la finca San Vicente, El Carmelo, Ecuador. *Revista Criterios*, 28(2), 85-194.
<https://doi.org/10.31948/rev.criterios/28.2-art12>
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). (2024). *La ganadería en México, un orgullo nacional*. La Ganadería en México: Un Orgullo Nacional | Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx)
- Santos, J., Atencia, J., Torres, J., & Guzmán, C. (2019). Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del caribe colombiano. *Agronomía Costarricense*, 44(1), 29-41.
<https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.39999>
- Saucedo, J., Oliva, M., Maicelo, J.L., Quispe, H. & Meléndez, J.B. (2020). Arreglos silvopastoriles con especie arbórea *Alnus acuminata* (aliso) y su efecto sobre los factores ambientales de sistemas ganaderos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 46(3), 323-328.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2022). *¿Qué cifras se esperan de la actividad pecuaria en 2022?*
<https://www.gob.mx/siap/articulos/que-cifras-se-esperan-de-la-actividad-pecuaria-en-2022?idiom=es>
- Sotelo, M., Suárez, S.J., Álvarez, F., Castro, N.A., Calderón, S.V. & Arango, J. (2017). *Sistemas sostenibles de producción ganadera en el contexto amazónico-Sistemas silvopastoriles: ¿una opción viable?* Publicación CIAT No. 448. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
<https://hdl.handle.net/10568/89088>
- Tamayo, O.C. & Alegre, O.J. (2022). Asociación de cultivos, alternativa para el desarrollo de una agricultura sustentable. *Revista SIEMBRA*, 9(1), 2-21.
<https://doi.org/10.29166/siembra.v9i1.3287>
- Torres, J. & Martínez, G.C. (2022). Supervivencia de 12 especies de árboles nativos en plantaciones de restauración en la selva estacionalmente seca. *Botanical Sciences*, 100(2), 314-330.
<https://doi.org/10.17129/botsci.2878>
- Varón, L. & Granados, J. (2012). Interrelación entre el contenido de metabolitos secundarios de las especies *Gliricidia sepium* y *Tithonia diversifolia* y algunas propiedades físicoquímicas del suelo. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 3(1), 53-62.
<https://doi.org/10.22490/21456453.934>

Vlassova, L., Tufiño, P. & Llovería, R. (2017). Variabilidad espacio-temporal de la temperatura de superficie en ecosistemas de dehesa estimada mediante imágenes landsat tm: el papel del arbolado. *Geographicalia*, 68, 69-86.
https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2016681582

Zizumbo, V.D. & Colunga, G.P. (2017). La milpa del occidente de Mesoamérica: profundidad histórica, dinámica evolutiva y rutas de dispersión a Suramérica. *Revista de Geografía Agrícola*, 58, 33-46.

ESTIMACIÓN DE RESIDUOS RESULTANTES DE LA ELABORACIÓN DE MEZCAL Y POSIBLES ALTERNATIVAS DE RECICLAJE

ESTIMATION OF WASTE RESULTING FROM THE MISCAL PRODUCTION AND POSSIBLE RECYCLING ALTERNATIVES

¹Martha Zuleyma Hernández San Juan , ²José Raymundo Enríquez-del Valle , ²Gerardo Rodríguez-Ortiz , ²Vicente Arturo Velasco-Velasco 

^{1,2}Estudiante, investigador, Tecnológico Nacional de México, Campus Valle de Oaxaca (ITVO). Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México. C.P. 71233. [§]Autor de correspondencia: jenriquezdelvalle@yahoo.com.

Introducción. En México, los magueyes han tenido gran importancia económica y cultural durante dos milenios, ya que se han utilizado como fuente de alimento, en la construcción, elaboración de abono, combustible, la obtención de fibras (García-Mendoza, 2007). Su principal uso es la elaboración de la bebida denominada mezcal, que actualmente en Oaxaca ha incrementado su producción de manera considerable, al pasar de 980,375 L en el año 2011, a 12,934,522 L de mezcal certificado en la categoría de artesanal, en el año 2022; esto representa un crecimiento exponencial de 1,219.3 %. El mezcal producido en el estado de Oaxaca fue el 77, 99 y 91 % de la producción total nacional en los años 2011, 2013 y 2022, respectivamente (**Tabla I**). Según el Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAM, 2023), el mezcal es un producto representativo de la República Mexicana, que tiene una denominación de origen en el estado de Oaxaca y se rige bajo la norma NOM-070-SCFI-2016, de las bebidas alcohólicas.

Durante el proceso de elaboración del mezcal, en las etapas de horneado, fermentación y destilación, se generan residuos, tales como el bagazo, vinazas, cenizas y carbón, que llegan a causar afectaciones negativas en el ambiente (Martínez-Gutiérrez et al., 2013).

Las vinazas que resultan de la etapa de destilación son líquidos recalcitrantes con residuos de materia orgánica y su pH es muy bajo, de 3.5-5.0 (Ariza-Calvo et al., 2019). Se generan grandes cantidades de estos residuos que al no tener algún tratamiento o uso alternativo representan un peligro, principalmente para los cuerpos de agua y el suelo, en donde son vertidos con mayor frecuencia (Díaz-Barajas et al., 2024). El bagazo al ser un residuo sólido compuesto principalmente de fibras, materiales ligno-celulósicos que provienen de la molienda de los tallos de agave y la destilación, se consideran de mayor índice de contaminación, pero del que no se tienen propuestas de manejo (Acosta-Sotelo et al., 2023). Por otra parte, al aumentar la producción de mezcal (**Tabla I**) debido a su demanda creciente, también se ha incrementado la generación de residuos. La producción de mezcal en la comunidad de San Baltazar Chichicapám, a través del tiempo ha cobrado popularidad y es generadora de empleos, pero además de ello el proceso productivo genera residuos contaminantes al medio ambiente que, por años, han sido arrojados a los ríos o transferidos a terrenos de cultivo. Por lo que el objetivo del presente trabajo fue cuantificar los residuos que resultan del proceso de elaboración de mezcal artesanal de San Baltazar Chichicapám y sugerir posibles alternativas que minimicen las afectaciones al medio ambiente.

Tabla 1. Producción anual de mezcal (L) en Oaxaca y a nivel nacional, durante el periodo 2011 a 2022.

	Año					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Oaxaca	758,810.25	971,567.28	2,504,450.592	1,360,259.766	2,354,382.695	2,528,380
Total nacional	980,375	1,044,696	2,519,568	1,451,718	2,419,715	3,028,000
Prop-nacional	0.77	0.93	0.99	0.94	0.97	0.84
	Año					
	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Oaxaca	3,467,142.2	4,697,762.6	6,437,680.139	7,273,474.667	6,917,050.714	12,934.52
Total nacional	3,985,221	5,089,667	7,145,039	7,846,251	8,099,591	14,165.50
Prop-nacional	0.87	0.92	0.90	0.93	0.83	0.91

Prop-nacional= proporción de la producción nacional.

Desarrollo. La investigación se realizó en la comunidad de San Baltazar Chichicapám, ubicada en el Distrito de Ocotlán, en las coordenadas 96° 29' 22" LO, 16° 46' 40" LN (Figura 1) y su topografía con variaciones de altitud entre los 1,552 y 2,600 m, con una superficie de 10,079 ha. En la comunidad hay un total de 2,576 habitantes de los cuales 1,351 y 1,225 son de sexo femenino, y masculino, respectivamente; 2,099 personas son hablantes de zapoteco (INEGI, 2020). En el

territorio predomina el clima templado subhúmedo con temperatura promedio de 14 °C; lluvias en verano en las partes más altas (montañas), y datos de 10 años muestran que la precipitación media anual es de 747.56 mm. Mientras que la parte sur presenta menor altitud, predomina un clima semiseco, y semicálido, con 18-21°C y precipitación de 454.50 mm (Plan de Desarrollo Municipal, PDM, 2008).

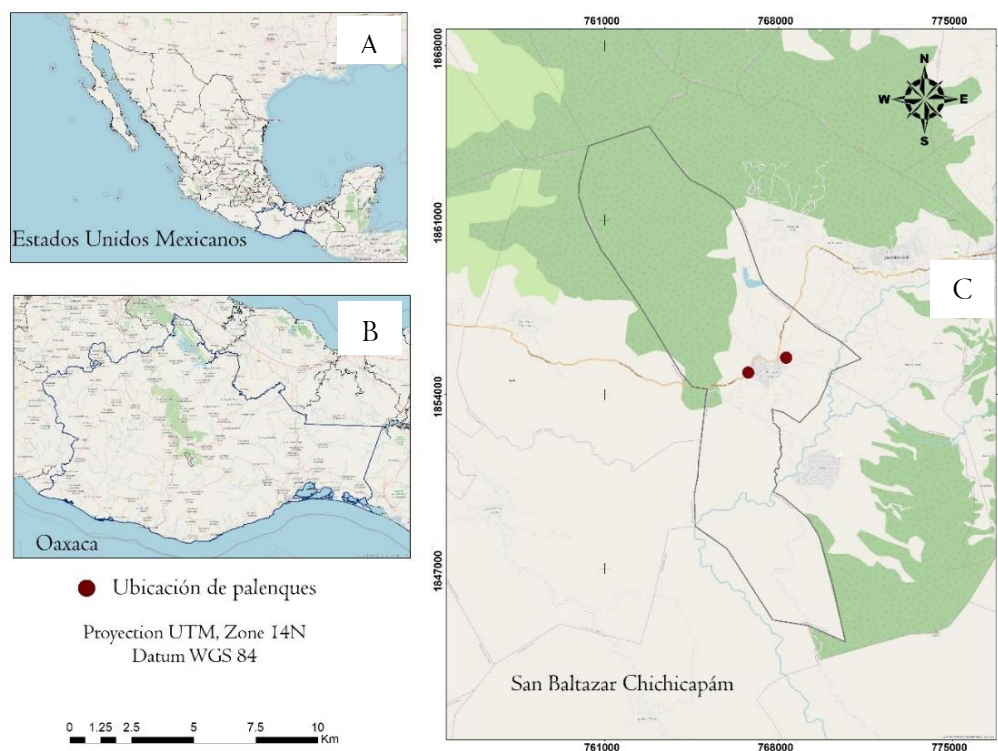


Figura 1. Ubicación de San Baltazar Chichicapám: A) Oaxaca en la república mexicana, B) Oaxaca, C) ubicación de palenques en San Baltazar Chichicapám.

La presente investigación se realizó en dos palenques (destilerías de mezcal) de la comunidad antes mencionada, los cuales se seleccionaron mediante un muestreo no probabilístico o por conveniencia (Otzen y Manterola, 2017). Estos dos palenques no pertenecen a alguna de las asociaciones de maestros mezcaleros en la comunidad (Hernández-Sampieri., 2014). Durante los meses de enero a octubre del año 2023, se realizaron visitas frecuentes a los palenques, y mediante técnicas de observación directa participativa, diálogo con los responsables de los palenques, seguimiento del proceso, registro de datos y la toma de fotografías, se obtuvo información; se describió un total de cuatro lotes de elaboración de mezcal, durante los meses de enero hasta octubre del año 2023, en los cuales se realizó primeramente la descripción del proceso, que comenzó desde la cosecha (rasurado de maguey de las plantas de agave en campo, traslado de los tallos (piñas), al palenque, proceso de horneado, maceración, fermentación, destilación, refinación y ajuste de grado alcohólico. En cada lote se cuantificó la cantidad de materia prima de

agave; en las etapas de horneado y destilación se cuantificó la cantidad de leña utilizada medida en cargas y kg, y el carbón generado. En destilación se cuantificó el total de bagazo (kg) y vinazas (L) que se generaron, y por último, en el proceso de destilación y refinación se cuantificó la cantidad de ceniza generada (kg). Se consideró que una carga de leña equivale en promedio a 85 kg ya que, al pesar diversas cargas de leña, estas presentaron variaciones en peso que fueron entre 80 kg y 90 kg. Para cuantificar las vinazas, éstas se colectaron en tambos de plástico de 200 L, y el bagazo, carbón y cenizas generadas se pesaron en báscula con capacidad de 50 kg y 100 kg de las marcas Pretul® y Chiciris, respectivamente.

En la localidad de San Baltazar Chichicapám, la producción de mezcal es una de las principales actividades económicas de las familias, por ello es importante cuantificar los residuos que llegan a generarse por cada lote de producción y así proponer alternativas que podrían aplicarse para reducir la contaminación, mayormente en suelo y agua (Figura 2).



Figura 2. A) Montículo de bagazo húmedo, B) contenedor de vinazas, C) carbón resultante del proceso de horneado, D) cenizas de destilado y refinación.

La cantidad de “piña” que se utiliza influye en las cantidades de residuos que se generan. En el caso de las vinazas existen aproximaciones, respecto a este líquido recalcitrante, con pH ácidos, y se estima que se llegan a generar de 10 L a 12 L por cada litro de mezcal producido (Zelaya-Benavidez et al., 2021). En el caso de los procesos que se describieron existieron variaciones en el volumen de vinazas producido, ya que por cada litro de mezcal producido se generaron de 12, 13 y 14 L de vinazas, entrando en el rango que se menciona, todo esto dependiendo de la especie con la cual se trabajó en cada lote de producción. Las vinazas al no tener un uso, se vierten en el suelo donde se infiltran al subsuelo. En el caso del palenque a cargo del señor Faustino García, se tiene una cisterna con capacidad de 20,000 L, donde deposita este residuo, cuando se llega a la capacidad máxima de la cisterna, este residuo se vende. En el palenque a cargo de Donato Hernández, las vinazas se vierten en un pozo de tierra por lo que se infiltran en el subsuelo. Lo anterior está causando contaminación de los mantos freáticos, pues los productores reportan que el agua que extraen de los pozos presenta coloración y aroma de vinazas.

Los bagazos, son las fibras que quedan después de que el maguey fue horneado (para provocar la hidrólisis térmica de los fructanos y obtener azúcares reductores), troceado, macerado y destilado. En palenques artesanales en el estado de San Luis Potosí, por cada litro de mezcal que se elabora a partir de *Agave salmiana*, la cantidad de bagazo en fresco llega a ser de 15- 20 kg (Chávez-Guerrero, 2010). En otros trabajos se menciona

que por cada litro de mezcal se obtienen 4.4 kg de bagazo tal como menciona Ordaz-Díaz et al. (2019). En el caso de este estudio se obtuvieron de 5 a 6 kg de bagazo por litro de mezcal. En los cuatro lotes se usaron 8,000, 3,000, 6,500 y 11,000 kg de agave, de los que se obtuvieron 950, 180, 715 y 1,200 L de mezcal, en los que se generó un total de 17,490 kg de bagazo (Tabla 2).

Las cenizas que se obtienen de la combustión de leña de diversas especies, son parte de los residuos que son tirados fuera de los palenques sin que se les haya prestado atención, aunque se generan en cantidades elevadas. Estos materiales pueden contener hasta 4 % de K (potasio), 3 % de P (fósforo) 6 % de Mg (magnesio) que son importantes para los suelos y las plantas (Angaspilco-Llamo et al., 2021).

El carbón que se llega a generar es el resultado de la combustión de leña de especies como mezquite (*Prosopis* sp.), eucalipto (*Eucalyptus* sp.) y encino (*Quercus* sp.) que se usa en la cocción de las piñas de agave. Los trozos de carbón se utilizan principalmente para las necesidades domésticas (Cruz-Montelongo et al., 2020).

De acuerdo a las evidencias obtenidas (Tabla 2) se puede afirmar que en la comunidad de San Baltazar Chichicapám, para obtener un litro de mezcal se requieren de 8.42 a 16.66 kg de materia prima de agave, y de 2.94, a 5.55 kg de leña; de lo que se obtienen de 5 a 6 kg de bagazo; de 12 a 14 L de vinazas, de 11.18 a 15.0 g de cenizas, de 52.63 a 166.66 g de carbón.

Tabla 2. Volumen de mezcal producido según la cantidad de materia prima de tallo (piña) de *Agave* y residuos generados para cada lote de producción.

Lotes	Mezcal (L)	piña (kg)	Total de leña (kg)	Bagazo (kg)	Vinaza (L)	Ceniza (kg)	Carbón (kg)
Espadín/Tepeztate (<i>A. angustifolia</i> , <i>A. marmorata</i>)	950	8,000	2,800	5,700	12,350	14	50
Tobalá (<i>A. potatorum</i>)	180	3,000	1,000	900	2,160	6	30
Espadín (<i>A. angustifolia</i>)	715	6,500	2,600	4,290	8,580	8	40
Espadín (<i>A. angustifolia</i>)	1,200	11,000	4,200	6,600	16,800	18	65

La información que proporcionaron la mayoría de los encargados de los palenques muestra que en muy raras ocasiones les dan uso a los residuos, los bagazos como fuente de composta que se incorpora al suelo como abono, y la mayor utilización que se tiene es para la tapada del horno, en próximos lotes de elaboración de mezcal. En el caso de las vinazas no se les da algún tipo de uso. El carbón se le utiliza mayormente para las labores del hogar, venta y por supuesto como abono para los terrenos de cultivo, otro tipo de abono que se utiliza para el suelo son las cenizas de leña. Algunas veces las cenizas son vendidas a personas dedicadas a elaborar adobes para la construcción.

Usos alternativos

En Oaxaca y otras partes del país se realizan investigaciones para usar los subproductos derivados de la elaboración del mezcal, actualmente están presentando alternativas para darles un nuevo uso, para evitar más afectaciones al medio ambiente.

El bagazo puede ser utilizado para elaborar composta, que para la degradación natural de las fibras se deja apilado durante un año y medio a dos años. Práctica que realizan quienes trabajan en los palenques. El bagazo seco también se usa como material combustible durante el proceso de refinación, o también en las labores del hogar, las amas de casa lo usan como sustituto de leña de ocote (*Pinus* sp.), para usar el bagazo como material combustible, éste es secado a la intemperie, exponiéndolo a radiación solar. De esta manera se mantiene impregnado de los alcoholes lo que permite su fácil manipulación y el costo de un rollo que pesa 250 g, es vendido a un precio aproximado de 15 pesos (Ordaz-Díaz et al., 2019). En el estado de Guanajuato, se han realizado investigaciones sobre el aprovechamiento de fibras de *A. lechuguilla*, *A. angustifolia*, *A. tequilana*, *A. americana*, *A. salmiana* y *A. mapisaga*, que muestran la posibilidad de usar el bagazo para elaborar diversos productos como cepillos de dientes, maceteros, elaboración de papel entre otros (Parra-Negrete et al., 2010)

En el estado de Oaxaca, se han realizado estudios en donde el bagazo de agave se usó como sustrato para cultivo del hongo comestible *Pleurotus* y posterior de cosechar los cuerpos frutíferos del hongo, el sustrato composteado se usó para cultivar tomate (Chairez-Aquino et al., 2015; Martínez-Gutiérrez et al., 2013).

Se tienen evidencias de que es posible producir etanol a partir del bagazo. Los datos muestran que por cada 100 g de bagazo se obtienen 2.9 g de etanol puro, todo esto bajo condiciones de laboratorio (Estrada-Maya y Weber, 2022). De igual manera el bagazo es utilizado para la elaboración de adobe, al mezclarlo con arcilla, utilizados para la construcción de casas, que además de darle firmeza, es un material orgánico.

Las vinazas en la actualidad han presentado mayores problemas en sus usos, por las características que presentan. Se ha comenzado con la creación de refinerías con el objetivo de obtener electricidad, o como fuente de combustible, con el fin de sustituir el uso de leña en el proceso productivo de mezcal en la destilación y la refinación (Díaz-Barajas et al., 2024). En el Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca, se han realizado investigaciones para la digestión anaerobia de bagazos y vinazas, mezclados con excretas porcinas, que mediante la acción de bacterias se produce metano que puede ser usado como fuente de energía. Con este procedimiento se logra la remoción del 70 % a 91 % de materia orgánica biodegradable, Posteriormente los lodos se usan como abono (Gómez-Guerrero, 2014).

Las cenizas son utilizadas como abono, en los terrenos de cultivo mayormente de maguey. En labores domésticas las cenizas se usan para la limpieza de impurezas de los trastes. Este material también se mezcla con otros materiales para la elaboración de hornos de barro. El carbón es mayormente utilizado en las labores del hogar como fuente de energía, las aproximaciones del carbón que se genera en un proceso de horneado de maguey son de 30-65 kg.

Prospectiva. Los residuos generados en el proceso de elaboración de mezcal son un problema ambiental, que causa las mayores afectaciones al suelo y a los cuerpos de agua, y es de vital importancia que los estudios se sigan realizando para buscar más alternativas que sean amigables con el medio ambiente. En esta investigación se sugieren alternativas que estén al alcance de los productores, pero se mencionan experiencias realizadas en diversas entidades de México, que pretenden un uso más integral de la planta de agave, el aprovechamiento de los residuos de la industria de destilados, incrementando el valor agregado, a la vez que se reduciría la cantidad de residuos que actualmente son contaminantes. Se menciona la digestión anaerobia de bagazos y vinazas, que muestran la posibilidad de obtener gas combustible, abono y agua para uso en agricultura. También se mencionan dos residuos más que se generan a lo largo del proceso, tales como el carbón y las cenizas. En el caso de las cenizas se les sugirió como alternativa la venta de este material, a las personas que se dedican a la elaboración de productos de barro. El carbón por otra parte lo utilizan las amas de casa como combustible en sus cocinas, para la preparación de sus alimentos, pero además de esto se les hizo la propuesta de separar el carbón en dos categorías de tamaño, para venderlos a precios diferentes, los de tamaño igual o mayor a 5 cm y los de tamaño menor que, se venderán por kg o por costales, lo que beneficiaría económicamente a las amas de casa, ya que ellas son las encargadas de extraer el carbón del horno.

REFERENCIAS

- Acosta-Sotelo, L.L., Zamora-Natera, J.F., Rodríguez-Macías, R., González-Eguiarte, D.R., Gallardo-Lancho, J.F. y Salcedo-Pérez, E. (2023). Bagazo y composta de bagazo de agave tequilero en suelos contrastantes: dinámica de degradación. *Biotechnia*, 25(2), 90-96. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v25i2.1801>
- Angaspilco-Llamo, M., Bocanegra-Avellaneda, J.C., Muñoz-Pérez, S.P., Torres-Zavaleta L.J. y Villanueva-Meza, C. D. (2021). Uso de cenizas de carbón para mejorar la resistencia de comprensión del concreto. *Revista Ciencia No@rdina*, 4(2), 47-60.
- Ariza-Calvo, D., Rincón-Ravelo, M., Paz-Cadavid, C.A. y Gutiérrez-Montero, D.J. (2019). Evaluación de producción de biogás y reducción de carga orgánica de vinazas mediante digestión anaerobia. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 21(2), 118-130. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n2.79555>
- Chairez-Aquino, J., Enríquez-del Valle, J.R., Ruíz-Luna, J., Campos-Ángeles, G.V. y Martínez-García, R. (2015). Uso del bagazo de *Agave* spp y hojas de maíz para cultivar el hongo *Pleurotus ostreatus*. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 2(1), 23-28.
- Chávez-Guerrero, L. (2010). Uso de bagazo en la industria mezcalera como materia prima para generar energía. *Ingenierías*, 23(47), 8-16.
- COMERCAM. (2023). Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal. *Informe de actividades* https://comercam-dom.mx/wp-content/uploads/2023/05/INFORME-2023_PUBLICO.pdf
- Cruz-Montelongo, C., Herrera-Gamboa, J., Ortiz-Sánchez, I.A., Ríos-Saucedo, J.C., Rosales-Cerna, R. & Carrillo-Parra, A. (2020). Caracterización energética del carbón vegetal producido en el Norte Centro de México. *Madera y Bosques*, 26(2), 262-271. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621971>
- Díaz-Barajas, S. Moreno-Andrade, I. Garzón-Zúñiga, M.A. (2024). Tratamiento de vinazas de mezcal: Revisión de procesos evaluados. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 15(2) 164-206. DOI: 10.24850/j-tyca-15-02-04
- Estrada-Maya, A. & Weber, B. (2022). Biogás y bioetanol a partir de bagazo de agave sometido a explosión de vapor e hidrólisis enzimática. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 23(2), 1-10. <https://doi.org/10.22201/ft.25940732e.2022.23.2.009>

- García-Mendoza, A.J. (2007). Los agaves de México. *Ciencias*, (87), 14-23.
- Gómez-Guerrero, A.V. (2014). *Producción de biogás a partir de bagazo y vinaza del Agave angustifolia Haw generada como residuo en la elaboración de mezcal*. Tesis. Maestro en ciencias. IPN-CIIDIR. Unidad Oaxaca. 79 p.
- Hernández-Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A de C.V.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2020). Censo de población y vivienda. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>.
- Martínez-Gutiérrez, G.A., Iñiguez-Covarrubias, G., Ortiz-Hernández, Y.D., López-Cruz, J.Y. y Bautista-Cruz, M.A. (2013). Tiempos de apilado del bagazo del maguey mezcalero y su efecto en las propiedades del compost para sustrato de tomate. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3), 209-216.
- Ordaz-Díaz, L., Madrid-del Palacio, M., Rodríguez-Flores, F. & Bailón-Salas, A. (2019). Aprovechamiento de los subproductos en la industria del mezcal. *Revista Ciencia Administrativa*, 1(1), 12-21.
- Otzen, T., y Manterola, C. (2017). Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. *Int. J. Morphol.*, 35(1), 227-232.
- Parra-Negrete, L.A. Villar-Quiñones, P. Prieto-Rodríguez, A. Prieto-Rodríguez, A. (2010). Extracción de fibras de agave para elaborar papel y artesanías. *Acta Universitaria*, 20(3), 77-83.
- Plan de Desarrollo Municipal (PDM) (2008). *Plan de Desarrollo Municipal 2008-2010, San Baltazar Chichicapám Ocotlán Oaxaca*.
- Zelaya-Benavidez, E.A., Martínez-Gutiérrez, G.A., Robles-Pérez, C. & Morales-García, I. (2021). Vinazas de mezcal y su efecto biofertilizante en el rendimiento de hortalizas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(3), 3159. <https://doi.org/10.19136/era.a8n3.3159>

CHAYOTE: EL TESORO VERDE DE LAS ALTAS MONTAÑAS DE VERACRUZ – RAÍCES DE TRADICIÓN Y SABOR

CHAYOTE: THE GREEN TREASURE OF THE VERACRUZ HIGHLANDS - ROOTS OF TRADITION AND TASTE

¹Martha Romero-Jaen , ^{1§}Susana Isabel Castillo-Martínez 

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Zongolica, Km 4 Carretera a la Compañía S/N, Tepetitlanapa, 95005 Zongolica, Veracruz, México. [§]Autor de correspondencia: (susana_castillo@zongolica.tecnm.mx).

Introducción. El chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.), una fruta originaria de Mesoamérica, que se cultiva ampliamente en las zonas montañosas de Veracruz. Dicho estado acapara el 84 % de la producción en México (SIAP, 2023). El chayote es un alimento tradicional nativo que se consume en la región de las Altas Montañas (Vázquez-Martín et al., 2024a). Este fruto no solo destaca por sus beneficios nutricionales, sino también por su valor cultural e histórico para la región. El cultivo y consumo de chayote están profundamente enraizados en la vida de las comunidades locales, quienes lo utilizan en diversas preparaciones culinarias y con fines medicinales. En las Altas Montañas de Veracruz, el chayote se ha convertido en un recurso esencial que impulsa el desarrollo rural y el turismo agroalimentario, al mismo tiempo que preserva las tradiciones y la biodiversidad local (Beltrán-Morales, 2022; Guadarrama-Chávez, 2018).

Las problemáticas en la producción de chayote se han analizado desde diferentes enfoques, por ejemplo, la presencia y diversidad de plagas (Cadena-Iñiguez et al., 2024; Jiménez-Martínez et al., 2020; González-Lucas et al., 2019), diversidad genética del cultivo (Cheng et al., 2024; Shi et al., 2023), etapas de la postcosecha (Salam et al., 2023; Montecinos-Pedro, 2019). Este artículo explora la importancia del chayote desde sus orígenes hasta sus innovaciones actuales, resaltando su rol en la economía local y su relevancia cultural y ecológica.

Desarrollo. Origen e importancia cultural: el chayote pertenece a la familia de las cucurbitáceas y ha sido cultivado en México desde épocas prehispánicas. Su domesticación en Veracruz es especialmente significativa debido a la biodiversidad que caracteriza a esta región. Hoy en día, se cultiva principalmente en climas subtropicales y templados, donde sus frutos se adaptan bien a las condiciones locales.

Un legado milenario: en épocas prehispánicas, el chayote fue uno de los alimentos principales de las comunidades indígenas de Mesoamérica. Su facilidad para crecer en terrenos montañosos y su resistencia a plagas hicieron de esta planta un recurso esencial en la dieta de nuestros ancestros. Además, se han encontrado registros de uso medicinal del chayote en códices antiguos, donde se destaca por sus propiedades refrescantes y sus beneficios para el sistema digestivo.

El chayote y el comercio local: las comunidades han mantenido una relación simbiótica con el chayote, usándolo no solo como alimento, sino también en prácticas de intercambio en mercados tradicionales, como el Tianguis Tradicional de Coscomatepec de Bravo, Veracruz, México (**Figura 1**). Este mercado es un espacio donde se fomenta el comercio local y se preservan prácticas ancestrales, conectando a las comunidades a través de tradiciones de intercambio y comercio justo (Beltrán-Morales, 2022).



Figura 1. Flora nativa comercializada en el mercado tradicional de Coscomatepec de Bravo, Veracruz (Vázquez-Martín et al., 2024b).

Valor nutricional y beneficios para la salud: el chayote constituye una valiosa fuente de vitaminas, minerales y compuestos bioactivos que benefician a la salud, que también son llamadas propiedades nutraceuticas. Entre sus nutrientes destacan: a) vitamina C que contribuye a la función inmune y a la producción de colágeno, promoviendo una piel saludable; b) potasio que es fundamental para el funcionamiento muscular y el control de presión arterial; c) magnesio que apoya al metabolismo energético y la salud ósea; y, d) fibra que contribuye en la salud digestiva ya que mantiene estable la glucosa en sangre (Ramírez-Rodas et al., 2023; Riviello-Flores et al., 2018).

Adicionalmente posee propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, ya que a través de los compuestos flavonoides y cucurbitacinas que contiene se disminuye el estrés oxidativo y la inflamación en el organismo, lo que resulta fundamental para la prevención de enfermedades crónicas (Riviello-Flores et al., 2018; Ramírez-Rodas et al., 2023).

Innovaciones en productos derivados: investigaciones sobre variedades comerciales,

como *Virens levis* y *Nigrum spinosum*, han demostrado que el jugo de chayote conserva sus propiedades antioxidantes y puede mezclarse con ingredientes naturales como piña y estevia, creando productos atractivos para consumidores interesados en la salud y el bienestar (Riviello-Flores et al., 2018).

Impacto económico y desarrollo rural: el chayote es un cultivo de importancia económica para Veracruz y fuente de ingresos de muchas familias, ya que concentra el 84 % de la producción en México, en una superficie sembrada de más de 2306 ha, en las cuales obtienen rendimientos que ascienden a 71.20 t ha⁻¹ (**Figura 2**) (SIAP, 2023). El impacto económico y el desarrollo rural asociados a su cultivo se destacan por su contribución a la economía local y a la sostenibilidad de las comunidades rurales. Este cultivo, conocido por sus múltiples aplicaciones y su capacidad de adaptarse a diversas condiciones agroclimáticas, ha sido fundamental para el sustento y desarrollo de muchas familias campesinas y pequeños productores.

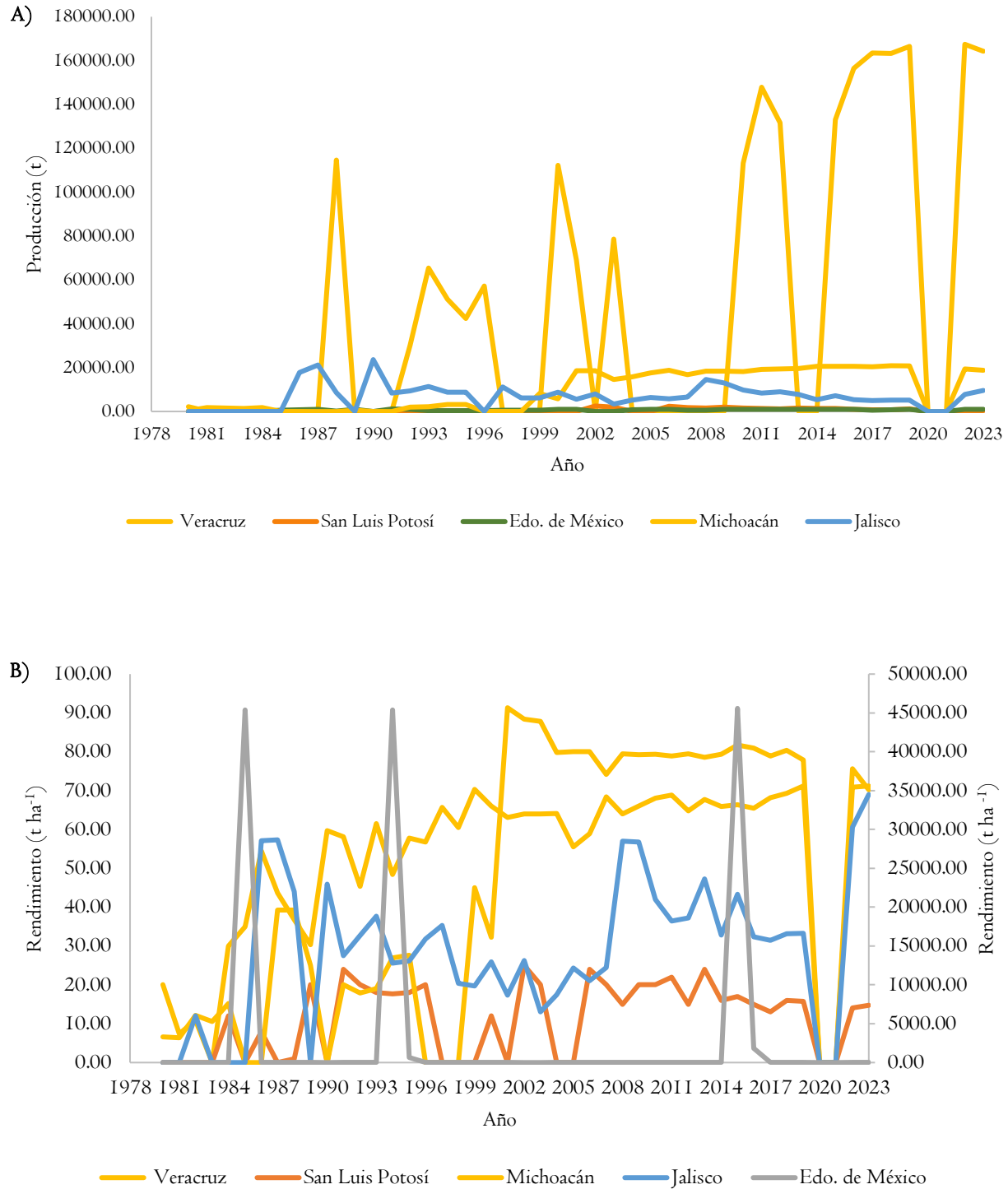


Figura 2. Evolución del cultivo de chayote en México (1978 - 2023). A) Producción de chayote. B) Rendimiento de chayote.

Contribución al ingreso familiar: el chayote es un cultivo clave en la región de Veracruz, que ha permitido a las familias rurales obtener ingresos estables y mejorar su calidad de vida. La venta y comercialización de chayote proporciona una fuente significativa de ingresos, lo cual permite a los agricultores cubrir sus necesidades básicas y realizar inversiones en la educación y bienestar de sus hijos (Núñez-Pastrana et al., 2019). La diversidad fenotípica del chayote en Veracruz, que incluye variedades como el Verde liso y el Negro Xalapa, amplía las oportunidades de mercado y fomenta un comercio más robusto (Gutiérrez-León, 2022).

Generación de empleo y movilización económica: la producción de chayote genera empleos directos e indirectos en la región. Las labores de cultivo, cosecha y manejo postcosecha requieren una cantidad considerable de mano de obra, lo cual contribuye a la reducción de la migración hacia áreas urbanas (Ramírez-Rodas et al., 2023). Adicionalmente, el procesamiento y la distribución del chayote han impulsado el desarrollo de cadenas de suministro que apoyan a la economía local y generan empleos en áreas de transporte y venta al por mayor y al por menor (Núñez-Pastrana et al., 2019).

Desarrollo de agroindustrias: el chayote no solo es consumido fresco, sino que también es procesado en diversas formas, incluyendo productos deshidratados y jugos, lo cual ha fomentado la creación de pequeñas agroindustrias en la región. Estas iniciativas han mejorado la estabilidad económica de los productores y han promovido un modelo de desarrollo basado en la colaboración y sostenibilidad (Beltrán-Morales, 2022). Las agroindustrias locales permiten agregar valor al producto y ampliar su presencia en el mercado, favoreciendo el desarrollo rural y la diversificación económica (Núñez-Pastrana et al., 2019).

Retos y oportunidades: a pesar de sus ventajas económicas, el cultivo del chayote enfrenta retos significativos, como la viviparidad de los frutos y la susceptibilidad a enfermedades durante la postcosecha, lo cual puede afectar su calidad y valor comercial (Núñez-Pastrana et al., 2019). Sin embargo, la implementación de tecnologías de manejo postcosecha y el desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles representan oportunidades para mejorar la producción y prolongar la vida útil del producto (Ramírez-Rodas et al., 2023).

Desafíos postcosecha y preservación: uno de los principales desafíos en la producción del chayote es su limitada vida útil, ya que tiende a germinar rápidamente y es susceptible a enfermedades fúngicas tras la cosecha. De acuerdo con Núñez-Pastrana et al. (2019) para mantener su frescura y calidad, se están implementando prácticas de conservación como: a) control del ambiente: almacenamiento en condiciones controladas para reducir la germinación y minimizar el riesgo de hongos; y, b) reguladores de crecimiento: el ácido abscísico y el ácido giberélico han demostrado ser efectivos en la extensión de la vida útil del chayote.

Economía circular y producción sustentable de chayote: la economía circular emerge como una alternativa clave para optimizar el uso de recursos y minimizar los desechos en la producción del chayote. Para la recuperación de nutrientes del suelo el compostaje de los restos de chayote y su reutilización como fertilizante orgánico contribuyen a la salud del mismo y reducen la dependencia de fertilizantes sintéticos; este ciclo regenerativo mejora su fertilidad y promueve prácticas de agricultura sostenible (Negrón-Ríos, 2020). Además, el cultivo intercalado del chayote como planta de cobertura protege el suelo, fomenta la biodiversidad y reduce la erosión, particularmente en las áreas montañosas de Veracruz, donde el suelo es propenso a la degradación (Córdova-Preciado et al., 2021).

De igual manera, el desarrollo de programas de capacitación permite a los agricultores aprender técnicas de economía circular y agricultura sostenible, lo que optimiza el uso de recursos y minimiza los desechos (Córdova-Preciado et al., 2021). Asimismo, la creación de cooperativas facilita la formación de redes entre agricultores, quienes pueden compartir conocimientos y experiencias sobre prácticas sustentables y acceder a mejores oportunidades de financiamiento y comercialización (Beltrán-Morales, 2022).

Desarrollo de redes de comercialización sustentable: la creación de redes de abastecimiento local permite que el chayote producido de manera sostenible llegue directamente a mercados locales, restaurantes, y tiendas especializadas en productos orgánicos, promoviendo el comercio justo y la reducción de emisiones al minimizar el transporte (Ramírez-Rodas et al., 2023).

Conexión con iniciativas de turismo sostenible: el chayote es también un recurso valioso para el desarrollo del turismo rural y agroecológico. Los visitantes pueden participar en experiencias agroturísticas que los involucren en la cosecha y en la elaboración de productos derivados del chayote, proporcionando ingresos adicionales a los agricultores y promoviendo prácticas sostenibles (Gutiérrez-León, 2022). Las rutas turísticas centradas en el cultivo del chayote y sus prácticas agroecológicas ofrecen a los visitantes una experiencia única y fomentan la conciencia ambiental, al tiempo que fortalecen el sentido de identidad local y ayudan a conservar el patrimonio agrícola de Veracruz (Córdova-Preciado et al., 2021).

Prospectiva. El cultivo de chayote en las Altas Montañas de Veracruz está lleno de oportunidades, pero también presenta desafíos significativos que deben ser abordados de manera integral y estratégica. Este cultivo no solo tiene el potencial de ser rentable para los agricultores locales, sino que también representa un modelo

de agricultura sostenible, adaptable y culturalmente relevante (Beltrán-Morales, 2022). Para aprovechar estas oportunidades, es esencial impulsar la tecnificación de los sistemas de cultivo y mejorar la infraestructura de postcosecha, lo cual permitiría un almacenamiento más prolongado y la posibilidad de comercializar el chayote en mercados nacionales e internacionales de productos frescos y procesados (Núñez-Pastrana et al., 2019).

El desarrollo de programas de investigación centrados en la resiliencia del chayote ante las variaciones climáticas podría jugar un papel crucial en su sostenibilidad. Dado que esta hortaliza es particularmente sensible al cambio climático, con condiciones extremas como heladas y sequías que afectan su rendimiento, es fundamental estudiar y desarrollar variedades que sean más resistentes a condiciones adversas (Ramírez-Rodas et al., 2023). Además, la implementación de prácticas agroecológicas podría mitigar los efectos del cambio climático, al reducir la dependencia de insumos externos y proteger la salud del suelo, lo que beneficiaría la calidad y productividad del chayote (Córdova-Preciado et al., 2021).

En cuanto a la comercialización, existe un gran potencial para expandir el mercado del chayote, particularmente en segmentos que buscan productos saludables y orgánicos. Los consumidores de países como Estados Unidos y Canadá han mostrado interés creciente en vegetales con propiedades funcionales, y el chayote podría posicionarse como un producto exótico con beneficios nutracéuticos (Riviello-Flores et al., 2018). Para facilitar la entrada de este producto a mercados internacionales, es necesario mejorar los procesos de certificación y promoción, además de desarrollar productos derivados, como jugos, conservas y suplementos a base de extractos de chayote, que diversifiquen las opciones de consumo y agreguen valor al producto (Gutiérrez-León, 2022).

La inclusión del chayote en el turismo rural y agroalimentario también representa una oportunidad única. Veracruz, con su rica herencia cultural y biodiversidad, tiene el potencial de desarrollar rutas agroturísticas que promuevan el cultivo del chayote y eduquen a los visitantes sobre sus beneficios y usos tradicionales. Las iniciativas de turismo agroalimentario pueden generar ingresos adicionales y fomentar un sentido de identidad y orgullo entre los productores locales, al mismo tiempo que contribuyen a la conservación del patrimonio agrícola de la región (Guadarrama-Chávez, 2018). Al integrar el chayote en programas de “Pueblos Mágicos” y otros esfuerzos de turismo sostenible, se podría fortalecer la economía local y promover la preservación de la biodiversidad agrícola (Osuna-Flores, 2024; Beltrán-Morales, 2022).

Finalmente, para asegurar el futuro del chayote en Veracruz, se debe promover la formación de cooperativas y redes de productores, que permitan a los agricultores acceder a mejores oportunidades de financiamiento, capacitación y comercialización. El fortalecimiento de estas redes facilitaría la adopción de nuevas tecnologías que mejoren las prácticas de cultivo y la capacidad de los productores para competir en mercados más amplios y especializados (Negrón-Ríos, 2020). A largo plazo, el chayote puede convertirse en un ejemplo de cómo un cultivo tradicional puede adaptarse y prosperar en un mundo moderno, contribuyendo a la sostenibilidad, la seguridad alimentaria y el bienestar económico de las comunidades veracruzanas (Nataren-Velázquez et al., 2020).

REFERENCIAS

- Beltrán-Morales, N. N. (2022). La etnografía en los estudios turísticos: *El caso del tianguis tradicional de Coscomatepec de Bravo, Veracruz*. Colegio de Postgraduados.
- Cadena-Iñiguez, J., Olguín-Hernández, G., Aguirre-Medina, J. F., Arévalo-Galarza, Ma. De L., Cadena-Zamudio, D. A., Ruiz-Posadas, L. del M., Avendaño-Arrazate, C. H. & Cisneros-Solano, V. M. (2024). Reduction of pest organisms and improvement of the quality and biosecurity of edible fruits of chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.). In S. K. Saxena (Ed.), *One Health Approach - Advancing Global Health Security With the Sustainable Development Goals* (pp. 1–21). IntechOp.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.114383>
- Cheng, S., Su, L., Guo, X., Shao, D., Qin, Y., Liu, X., Chu, Q., Zhou, X., & He, Z. (2024). Genome-wide development of simple sequence repeats markers and genetic diversity analysis of chayote. *BMC Plant Biology*, 24(1).
<https://doi.org/10.1186/s12870-024-05317-9>
- Córdova-Preciado, M. L., Salgado-Beltrán, L., & Bravo-Díaz, B. (2021). Economía circular y su situación en México. *Indiciales*, 1(1), 25–37. <https://doi.org/10.52906/ind.v1i1.7>
- González-Lucas, J., Báez-Santacruz, J., Serna-Lagunes, R., Llarena-Hernández, R. C., Núñez-Pastrana, R. y Reynoso-Velasco, D. (2019). Chinchas fitófagas (hemiptera: heteroptera) asociadas al cultivo de chayote (*Sechium edule* Jacq.) en el centro de Veracruz, México. *Entomología Mexicana*, 6, 170-176.
- Guadarrama-Chávez, J. (2018). Agroindustria rural como estrategia de valor agregado para la comercialización de chayote erizo (*Nigrum spinosum*) en Acatzingo, Tenancingo, Estado de México. *Tesis de maestría*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Gutiérrez-León, R. I. (2022). Aplicación de modelos de economía circular en México y Colombia: Estudio de caso. *Interconectando Saberes*, 7(14), 203-218.
<https://doi.org/10.25009/is.v0i14.2762>
- Jiménez-Martínez, E., González-Medrano, B. J., & Centeno-Leiva, Á. J. (2020). Diversidad de insectos plagas y benéficos asociados al cultivo de Chayote en Matagalpa, Nicaragua.

- Ciencia e Interculturalidad*, 26(01), 175–191.
<https://doi.org/10.5377/rci.v26i01.9893>
- Montecinos-Pedro, L. A., Arévalo-Galarza, M. de L. C., García-Osorio, C., Cadena-Iñiguez, J., & Ramírez-Guzmán, M. E. (2019). Calidad poscosecha de frutos de chayote almacenados a baja temperatura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(5), 1157–1166.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v10i5.1437>
- Nataren-Velazquez, J., del Angel-Pérez, A. L., Megchún-García, J. V., Ramirez-Herrera, E., Hernandez-Estrada, C. A., & Meneses-Marquez, I. (2020). Caracterización del cultivo de chayote (*Sechium edule* Jacq.) (Swartz) en la zona de Altas Montañas del estado de Veracruz. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, 5(1), 134–152.
- Negrón-Ríos, G. (2020). *La economía circular*. <https://naturalezasintoxicos.wordpress.com/wp-content/uploads/2020/02/cc-economc3ada-circular.pdf>
- Núñez-Pastrana, R., Silverio-García, L., Rojas-Avelizapa, L. I., Llerena-Hernández, R. C., Serna-Lagunes, R., Solano-Báez, A. R., & Cruz-Cruz, C. A. (2019). Postharvest behavior of *Sechium edule* and expression of ACS4, ETR1 and MAPK4 in fruits of different developmental stages. *Mexican Journal of Biotechnology*, 4(3), 41–56.
<https://doi.org/10.29267/mxjb.2019.4.3.41>
- Osuna-Flores, I. (2024). Situación actual del turismo sustentable en México. *Revista Científica Arbitrada de la Fundación MenteClara*, 9(373).
<https://doi.org/10.32351/rca.v9.373>
- Ramírez-Rodas, Y. C., Arévalo-Galarza, M. L., Cadena-Iñiguez, J., Soto-Hernández, R. M., Peña-Valdivia, C. B., & Guerrero-Analco, J. A. (2023). Chayote fruit (*Sechium edule* var. *virens levis*) development and the effect of growth regulators on seed germination. *Plants*, 12(108).
<https://doi.org/10.3390/plants12010108>
- Riviello-Flores, M. L., Arévalo-Galarza, M. L., Cadena-Iñiguez, J., Soto-Hernández, R. M., Ruiz-Posadas, L. Del M. & Gómez-Merino, F. C. (2018). Nutraceutical characteristics of the extracts and juice of chayote (*Sechium edule*) fruits. *Beverages*, 4(37), 1–11.
<https://doi.org/10.3390/beverages4020037>
- Salam, S. A., Muzira, I. M., Mugabi, R., & Muyanja, C. (2023). Preservation of Chayote (*Sechium edule* L.) Using Different Drying Methods. *Journal of Food Research*, 12(4), 45.
<https://doi.org/10.5539/jfr.v12n4p45>
- Shi, M., Wang, Y., Olvera-Vazquez, S. G., Iñiguez, J. C., Thein, M. S., & Watanabe, K. N. (2023). Comparison of chayote (*Sechium edule* (Jacq.) Sw.) Accessions from México, Japan, and Myanmar using reproductive characters and microsatellite markers. *Plants (Basel, Switzerland)*, 12(3), 476.
<https://doi.org/10.3390/plants12030476>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023). Acciones y programas: Cierre de la producción agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Vázquez-Martín, A. E., Aguilar-Rivera, N., Díaz-José, J., Torres-Cantú, G., Andres-Meza, P., & Ávalos, D. A. (2024a). Evidence on the sustainable management of native agrobiodiversity in traditional Mexican markets. *Environment, Development and Sustainability*, 0123456789, 1–32.
<https://doi.org/10.1007/s10668-024-05052-z>
- Vázquez-Martín, A. E., Aguilar-Rivera, N., & Torres-Cantú, G. (2024b). Implications of native flora as a sustainable food resource: a case study within a traditional agricultural system in southeast Mexico. *Sustainability Science*, 1–18.
<https://doi.org/10.1007/s11625-024-01598-z>

AGRICULTURA DE SUBSISTENCIA EN LAS ZONAS DE INFLUENCIA DE LAS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS EN TAMAULIPAS

SUBSISTENCE AGRICULTURE IN THE ZONES OF INFLUENCE OF NATURAL PROTECTED AREAS IN TAMAULIPAS

Victor Manuel Toribio-Solis[✉], Yolanda del Rocio Moreno-Ramírez[✉], §Mario Rocandio-Rodríguez[✉]

Universidad Autónoma de Tamaulipas-Facultad de Ingeniería y Ciencias. Mariano Matamoros s/n, Zona Centro, Ciudad Victoria, Tamaulipas. México. C.P. 87000. §Autor de correspondencia: (mrocandio@docentes.uat.edu.mx).

Introducción. Las áreas naturales protegidas (ANPs) son reconocidas como las unidades centrales más importantes para la conservación *in situ*. Se consideran como un método de conservación de ecosistemas, al ser declaradas reservas ecológicas de grandes extensiones con el objetivo de conservar y proteger la biodiversidad existente de un lugar en específico y detener el crecimiento urbano (Hensler y Marcon, 2020). Ayudan a mantener los procesos ecológicos y ecosistémicos, sus recursos naturales y culturales asociados para el bienestar de la sociedad, presentan un alto grado de importancia para las comunidades que colindan con ellas, en donde se ven beneficiadas de los ecosistemas y recursos naturales lo que significa que aumenta la biodiversidad local y se crea o mantiene la conectividad entre las comunidades y zonas naturales (Bonfiglio et al., 2021).

Las instituciones gubernamentales implementan decretos regulatorios y lineamientos que no son bien gestionados y al no comprender las deficiencias y las problemáticas económicas, sociales y ambientales de los agricultores afectan directamente las ideologías propuestas por las comunidades para el manejo y conservación de sus cultivos, dejando a un lado la estabilización del entorno tanto de las personas y sus cultivos (Vallejo y Rodríguez, 2022).

Dentro de los factores causantes en la disminución de la diversidad se encuentra la escasa precipitación y el incremento de las altas

temperaturas, que afectan la disminución de la productividad agrícola y la escasa disponibilidad de alimentos, estas variaciones climatológicas traen como consecuencia la reducción de producción en cultivos agrícolas y la elevación de riesgos alimentarios a largo plazo (Jarma et al., 2023). Son los agricultores de temporal los más expuestos a este tipo de efectos, por ello es importante el desarrollo de estrategias para la conservación y el aprovechamiento de la productividad de cultivos agrícolas en regiones conurbadas con las ANPs.

En México, los agricultores tradicionales cubren sus necesidades de alimentación, al consumir lo que cultivan y poco frecuente comercializan lo que producen, llevando a cabo su autosuficiencia alimentaria, no obstante, el detrimento del sistema tradicional de cultivos, frente a políticas rurales del país que impulsan la producción de cultivos comerciales compromete la seguridad alimentaria de los agricultores de subsistencia.

En Tamaulipas existen nueve ANPs, dos de ellas destacan por albergar comunidades cercanas que practican actividades agrícolas a pequeña escala sin afectar los ecosistemas: i) la primera es la Reserva de la Biosfera "El Cielo", ubicada en Gómez Farías, Ocampo, Jaumave y Llera, establecida en 1985 y ii) la Reserva de la Biosfera "Sierra de Tamaulipas", decretada en 2016, que cubre los municipios de Aldama, Casas, González, Llera y Soto la Marina. Para este análisis de información además de las dos ANPs señaladas, se

involucró a la Sierra de San Carlos, conformada por los municipios de San Carlos, Burgos, San Nicolás, Cruillas y Jiménez, por ser un área de interés, en la cual se sigue practica la agricultura de temporal, con cultivos nativos en las comunidades cercanas en la superficie que la constituye.

La selección de estas ANPs, principalmente de las áreas de influencia aledañas a las ANP subyace en la amplia diversidad de cultivos nativos que sostienen la denominada agricultura de subsistencia, suscitada en las cercanías e interior de estos sitios de agrobiodiversidad. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue a través del ejercicio de análisis de revisión de la literatura sobre el estado de uso, aprovechamiento y conservación de la agrobiodiversidad mantenida en zonas de influencia de dos ANPs y una zona de interés agrícola.

Desarrollo. La conservación *in situ* y la utilización de los cultivos nativos para la seguridad alimentaria: la diversidad agrícola es afectada por el incremento de especies invasoras, cambio climático, actividades agrícolas y ganaderas a grandes escalas, desplazamiento de comunidades rurales, rotaciones intensivas de cultivos y, el mal uso y manejo de los agroquímicos (Reyes y Cano, 2022), lo que repercute directamente a las especies vegetales, las cuales son aprovechadas por la población, de ahí, la importancia de la conservación *in situ* que ofrece la capacidad de mantener la conservación de una amplia diversidad de especies y genes dentro de un ambiente único, en donde se cumplen etapas vegetativas sin inconvenientes, permitiendo por tanto, que estas especies continúen evolucionando y adaptándose a las futuras condiciones climatológicas.

La investigación participativa contribuye a diseñar estrategias de conservación *in situ* de especies, mediante este método se pueden realizar talleres y la aplicación de métodos participativos con los habitantes de las comunidades agrícolas y así mismo se pueden identificar amenazas para las especies agrícolas de interés (Gerritsen et al., 2022).

La humanidad depende enteramente de la producción y mantenimiento de los recursos fitogenéticos, son la base principal de la alimentación, sostenida por una amplia diversidad y variabilidad genética de cultivos y parientes silvestres que han evolucionado en diferentes ambientes con grados de intervención distinta y que son fuente de genes para la mejora genética.

Las semillas, y en particular las semillas de variedades nativas son depósitos no sólo de diversidad genética sino también de formas de conocimientos y prácticas agrícolas, que reflejan la identidad de una comunidad (Sandström et al., 2024). En este sentido, la seguridad alimentaria de las generaciones futuras depende crucialmente de la diversidad genética agrícola, adicionalmente, otros elementos de igual relevancia como el libre acceso, mejora nutricional, educación cultural, enfoque de género, sostenibilidad alimenticia y el derecho a la alimentación contribuyen a su papel.

En el estado de Tamaulipas existe una inestabilidad económica que afecta severamente a la población, especialmente a aquellas que se encuentran en zonas rurales y aisladas que presentan riesgos de disponibilidad de alimentos y demás servicios, por lo que se ven obligados a incorporar ciertas medidas a corto y largo plazo para hacer frente a esos escenarios impredecibles. Las medidas empleadas por parte de los integrantes de las familias se consideran conforme a sus recursos disponibles, al establecer sus sembradíos en lotes pequeños pero con una amplia variedad de cultivos, empleando técnicas tradicionales como labranza cero, utilización de semilla nativa (maíces, frijoles, calabazas, tomates y chiles) que no necesitan ser tratadas tanto en la siembra como en su desarrollo con algún producto químico, el manejo y cosecha del cultivo por lo general se lleva a cabo con mano de obra propia de los integrantes de las familias, que además de mantener relaciones de tipo familiar, social, cultural y alimenticio, no se emplean gastos adicionales para el establecimiento de los cultivos.

En este caso las especies vegetales tienden a ser sometidas de manera natural a una prueba de supervivencia en donde las especies que sigan soportando las condiciones climatológicas adversas sobrevivirán a comparación de las que por falta de capacidad de adaptación y baja productividad tendrán a ir desapareciendo al pasar de los años. Las comunidades rurales tienen como retos: incrementar la producción sin ampliar las extensiones de cultivo, atender e identificar las características deseables a través de la visión de los agricultores identificando poblaciones sobresalientes, aprovechando todo el material genético disponible y útil (Toribio-Solis et al., 2022). De tal manera que, si las especies vegetales llegaran a desaparecer, los programas de mejoramiento tendrán que utilizar sus parientes silvestres para generar variedades adaptables a las condiciones climatológicas actuales, resistentes a plagas y enfermedades para volver a restablecer los cultivos no solo para las comunidades rurales sino a la población en general.

Hoy en día la agricultura tradicional tiende desarrollarse con los pocos recursos naturales disponibles en donde su enfoque no solo es producir alimentos de buena calidad, sino de eficientizar el uso de los recursos naturales como lo es el agua, suelo y energía solar para incrementar la producción y aprovechar los cultivos disponibles para que esas técnicas y normas que ellos mismos establecen sean transmitidas a las nuevas generaciones y sea de su interés seguir con las actividades familiares.

Fortalecimiento de la conservación *ex situ* en las comunidades agrícolas: en la actualidad el deterioro ecológico ha provocado un desequilibrio en aspectos como la temperatura y precipitación, lo que provoca la pérdida acelerada de las especies vegetales, por lo que se considera de importancia el tomar medidas para la recuperación y conservación de dichas especies, una de ellas es el método de conservación *ex situ* en donde se extrae el material genético para almacenarlos en bancos de germoplasma (Escárraga et al., 2020). Estas condiciones favorecen la conservación de las

características de calidad fisiológica de las semillas para un exitoso desarrollo de las semillas a futuro, conservando características morfológicas como: largo, ancho, grosor y la misma adaptación a las condiciones climáticas y altitudinales de donde se recolectaron. Por lo tanto, para mitigar la disminución de las especies vegetales en las comunidades y accesibles a la población es necesario proponer y elaborar bancos comunitarios de semillas, con el objetivo de contar con el germoplasma en caso de desastres naturales, para tener disponibilidad de semilla para ciclos siguientes y al mismo tiempo fortalecer el intercambio comunitario de semilla, lo cual mantendrá la diversidad de los recursos fitogenéticos locales.

Para la recolección de las especies, se realizan muestreos sistemáticos, entre los que destacan el muestreo bola de nieve, el cual ha mostrado eficiencia para la recolección de especies, en donde la colaboración de los habitantes de la zona de evaluación es fundamental al proporcionar información, la cual es obtenida mediante encuestas aplicadas a los habitantes que aun establecen cultivos con poblaciones nativas, además también se facilita la recopilación de datos pasaporte de los agricultores y sus especies cultivadas (Delgado, 2020). México tiene la presencia de una amplia diversidad de especies vegetales que son de interés para la población pero que aún no son aprovechados en su totalidad a consecuencia de los drásticos cambios ambientales y culturales de la diversidad generando una erosión genética de los recursos fitogenéticos, por lo que es necesario el establecer programas para su selección, caracterización y caracterización (Mastretta-Yanes et al., 2019).

Por su uso en agricultura de subsistencia donde se mantiene la agrobiodiversidad cuyo potencial podría incidir en estrategias de soberanía y seguridad alimentaria a nivel de agroregión, requiere de exploración para generar conocimiento de sus dinámicas, junto al resto de cultivos nativos de la región, por ejemplo, el sistema milpa, donde constata el amplio conocimiento de los

agricultores acerca del policultivo y los beneficios tanto nutricionales a las dietas como al suelo donde se establece maíz, frijol, calabaza, chile y otros cultivos de menor frecuencia, añadiendo que cada una de estas especies tienen un espacio geográfico y ecológico que les ayuda hacer frente a factores adversos de naturaleza biótica y abiótica (Castro, 2022).

En el estado de Tamaulipas la conservación de la diversidad agrícola no solo debe enfrentar las condiciones climatológicas cambiantes, sino también problemas sociales como lo es la inseguridad que va en aumento, a medida que existen más comunidades deterioradas por los efectos de este problema (Gutarra y Jurado, 2022).

Rosendo-Chávez et al. (2019) mencionan que, en la mayoría de los casos, las poblaciones emigran de sus comunidades debido a la imposibilidad de sostener sus condiciones de vida frente a determinadas problemáticas, lo que genera una disminución en su calidad de vida al tener que abandonar su patrimonio, principalmente sus viviendas y parcelas, en las cuales realizaban actividades productivas esenciales, como la agricultura. Este desplazamiento dificulta el reinicio de sus actividades económicas en nuevos lugares, obligándolos, en muchos casos, a reorientarse hacia otras actividades productivas o económicas, adaptándose a nuevas realidades y contextos socioeconómicos.

La inseguridad es otro factor contribuyente a la disminución de la diversidad en algunas regiones del estado, es de poco interés por parte de las autoridades al no tomar las medidas necesarias para su erradicación, lo que genera que algunas comunidades sean afectadas directamente en la conservación de la diversidad de especies agrícolas, al quedar en total abandono y toda esa diversidad de cultivos existente tenga que ir desapareciendo al quedarse sin algún responsable para su cultivo y manejo lo que repercute en la conservación de dicha diversidad. Añadiendo los malos gestionamientos de los programas sociales por parte de las autoridades competentes al campo

agrícola, es fácil detectar que se necesita la atención suficiente para el fortalecimiento y conservación de los recursos fitogenéticos para el bien de quienes dependen de ellos.

Conservación de la diversidad agrícola y su relación con la soberanía alimentaria: los gobiernos locales para apoyar correctamente la soberanía alimentaria deben tomar en cuenta las opiniones de la población dejando abierta la participación tanto para hombres y mujeres, la transparencia en la tomas de decisiones e incorporar técnicas del uso intensivo del conocimiento agrícola para la solución de problemas, respaldado por el ámbito científico y las técnicas creadas por parte de la población en épocas pasadas respetando las costumbres y culturas en donde se enfoca principalmente al objetivo de desarrollo sostenible “hambre cero” (Torres e Iriondo., 2022).

La agricultura tradicional contribuye a la conservación de la diversidad agrícola, formando en el ambiente paisajes a corto plazo y proporcionando alimentos a la población constituyendo un patrimonio cultural importante a nivel mundial en el cual se proveen combinaciones vitales de servicios sociales, culturales, ecológicos y económicos (Bocco et al., 2019). Con los agricultores de las comunidades rurales es en donde se concentra la mayor diversidad fenotípica de cultivos, sus habitantes establecen métodos de manejo y la asocian con otros cultivos, practican rotación de cultivos, diferentes tipos de labranza, estas técnicas las han conservado a través de generaciones y continúan implementándolas para producir alimentos a bajo costo fortaleciendo la seguridad y soberanía alimentaria para transmitir las a sus siguientes generaciones (Serralta-Batun et al., 2023).

Estudios como los de González-Santos et al. (2023) y Ku-Pech et al. (2023) mencionan que las caracterizaciones ecogeográficas tomando en cuenta variables climáticas, geofísicas y edáficas permiten con facilidad identificar especies tolerantes a las altas temperaturas y mínimas precipitaciones que pueden ser propuestas en

programas de mejoramiento genético. Para realizar dicha caracterización se realizan exploraciones en campo y recolección de especies e información participativa por parte de los agricultores y para complementar un análisis multivariado de componentes principales para asociar variables de interés y las especies (González-Santos et al., 2023).

Para la ciudadanía el tener acceso a una alimentación adecuada de buena calidad en cantidad suficiente forma parte de la supervivencia, la salud y el crecimiento del desarrollo de la población, al no disponer de estos alimentos traerá en si consecuencias negativas en el desarrollo y esto ocasionara la aparición de enfermedades crónicas para las personas en general (Amaya-Hernández et al., 2021).

Por lo tanto se puede entender que la soberanía alimentaria contribuye como una guía que conecta a los suelos de cultivo a través de semillas y los alimentos en donde abarcan las ideologías de las personas especialmente aquellas que desarrollan actividades agrícolas de subsistencia donde se identifican al producir alimentos y se sienten orgullosas de lo que producen de las actividades y alimentos que los mantiene saludables, libertad de poner sus propias reglas para la producción y la finalidad de tener campos de cultivos sanos y con una amplia diversidad, para así poder seguir produciendo, intercambiando y comercializando sus productos hasta llegar al reconocimiento de sus consumidores al contar con una amplia metodología para el desarrollo de sus actividades (Ramírez-Juárez, 2023).

La soberanía alimentaria está en decadencia debido a que hoy en día la producción solo se basa principalmente a la comercialización de los productos alimenticios, tratando de identificar a quien, como, cuando y para quien producir dejando por un lado los saberes tradicionales y la vocación productiva de la mayoría de las regiones agrícolas del país, afectando directamente a los pequeños agricultores quienes al tratar de subsistir de sus productos sufren los abusos por parte de

intermediarios al hacerles creer sobre precios falsos en productos tradicionales como maíz y frijol (López y De la Torre, 2022).

En Tamaulipas aun hace falta que se tomen las medidas necesarias para darle la importancia que se requiere a el campo en dimensiones pequeñas, para que poco a poco vaya fortaleciéndose y la producción de alimentos sea abundante para que la población de ciertos lugares no padezca de ellos y sufra de cierta forma la adquisición de ellos debido a los precios elevados que son establecidos por los propios productores, a la par de la semilla que por ser considera de calidad tienda a contar con ciertos estándares de calidad y sus precios puedan variar dependiendo de la región y para su objetivo requerido.

Prospectiva. Las áreas naturales protegidas además de ser reservorios de flora, fauna, microorganismos, diversidad de paisajes, climas y suelos, en sus zonas colindantes al ser beneficiadas por esas condiciones pueden desarrollarse cultivos agrícolas sin problema alguno, en el cual dicho desarrollo va acompañado del manejo que la población que conforman las comunidades, y el aprovechamiento de los recursos naturales se ve reflejado desde el establecimiento de los cultivos que se utilizan en sistemas tradicionales de producción, la siembra se hace de forma manual en donde tanto el hombre como las mujeres realizan esta actividad en conjunto, además de que la semilla no es tratada químicamente para evitar daños por plagas, así mismo el manejo sea hace de forma manual realizando deshierbes, aporques de forma manual y con implementos como yuntas jaladas por animales, no aplican tratamientos químicos para plagas o enfermedades, esto hace que sus semillas vayan adquirido resistencias a través de la selección a este tipo problemas, el futuro de la agricultura de temporal denominada de subsistencia se encuentra en declive debido a factores ambientales y el poco interés hacia los tomadores de decisiones, quienes al no conocer los requerimientos de las comunidades establecen programas que no son bien gestionados y por lo tanto no logran cumplir el objetivo por el cual fueron establecidos.

Es necesario implementar estrategias en donde la agricultura tradicional tenga el impulso necesario para seguir conservando la amplia diversidad de especies nativas que contribuyen para beneficio de la misma sociedad, además de conservar las técnicas ancestrales que se han estado practicando para el desarrollo de estas comunidades, como la implementación de bancos comunitarios de semillas, talleres participativos de técnicos con las comunidades en las que se resalte la importancia de la agrobiodiversidad y que esta puede mejorarse con técnicas de mejoramiento para incrementar la producción de sus poblaciones nativas.

REFERENCIAS

- Amaya-Hernández, A., Ortega-Luyando, M. y Mancilla-Díaz, J.M. (2021). Cómo, qué y por qué ocuparnos de la alimentación. *Journal of Behavior and Feeding*, 1(1), 51-59. <https://doi.org/10.32870/jbf.v1i1.15>
- Bocco, G., Solis-Castillo, B., Orozco-Ramírez, Q. y Ortega-Iturriaga, A. (2019). La agricultura en terrazas en la adaptación a la variabilidad climática en la Mixteca Alta, Oaxaca, México. *Journal of Latin American Geography*, 18(1), 141-168. 10.1353/lag.2019.0006
- Bonfiglio, L.E.T., Fernández, L.A.P. y Vázquez, F. G. (2021). Factores que condicionan la viabilidad del ecoturismo con comunidades mayas en áreas naturales protegidas de la Península de Yucatán, México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 18, 1-24.
- Castro, C. L. (2022). Biodiversidad de semillas comunes e inseparables de su comunalidad. *Revista Mexicana de Sociología*, 84(3), 625-652.
- Delgado, D. C. (2020). La actitud de los agricultores hacia la conservación de los recursos naturales en González, Tamaulipas. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 17(3), 457-472. <https://doi.org/10.22231/asyd.v17i3.1366>
- Escárraga, T. L. J., Gutiérrez, M. I., Van, E. J., Ramírez, A. F., y Sibelet, N. (2020). ¿Por qué se pierde la agrobiodiversidad?: caso de la chagra inga en la Amazonía colombiana. *Mundo Amazónico*, 11(1), 11-38. <https://doi.org/10.15446/ma.v11n1.82839>
- Gerritsen, P., Mastache, S.E.A. y Ramírez P.R.E. (2022). Fortalecimiento agroecológico para la conservación *in situ* de la agrobiodiversidad en la comunidad indígena de Cuzalapa, suroeste del estado de Jalisco, México. *Agroecología*, 16, 17-29. <https://doi.org/10.59187/revistaagroecologia.v16i1.29>
- González-Santos, R., Hernández-Sandoval, L., Hernández-Puente, K.N. y Ortega-Paczka, R. (2023). Distribución y caracterización ecogeográfica de maíces nativos de Querétaro, México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 46(4), 341-348. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.4.341>
- Gutarra, R. R. J., y Jurado, F. V. D. (2022). Influencia de los espacios públicos deteriorados en la percepción de inseguridad en el polígono “La Joya” Tamaulipas, México. *Revista Doxa Digital*, 12(22), 46-67. <https://doi.org/10.52191/rdojs.2022.227>
- Hensler, L. y Merçon, J. (2020). Áreas Naturales Protegidas como territorios en disputa: intereses, resistencias y acciones colectivas en la gestión compartida. *Sociedad y Ambiente*, 22, 180-211. <https://doi.org/10.31840/sya.vi22.2101>
- Jarma, O. A., Ariza, G. A., Jaraba, N. J., Rodríguez, P. L., Combatt, C. E., Guzmán, C. J. C., Díaz, R. D., Jiménez, C. Y., Ramírez, C. W. y Leal, G. N. (2023). Recursos fitogenéticos nativos de la región de La Mojana: una poderosa estrategia de resiliencia de los pequeños productores para mejorar la productividad ante los efectos de la variabilidad climática. *Naturaleza y Sociedad. Desafíos Medioambientales*, 7, 66-86. <https://doi.org/10.53010/nys7.02>
- Ku-Pech, E. M., Mijangos-Cortés, J. O., Islas-Flores, I., Sauri-Duch, E., Latournerie-Moreno, L., Rodríguez-Llanes, Y. y Simá-Gómez, J. L. (2023). Diversidad del maíz en tres zonas geomorfológicas de Yucatán, México. *Tropical*

- and Subtropical Agroecosystems*, 26(3), 078.
<http://doi.org/10.56369/tsaes.4853>
- López, S. R. y De La Torre, V. H. C. (2022). Soberanía alimentaria en México: el reto inconcluso. *Revista de Economía, Política y Sociedad*, 18(54), 65-99.
- Mastretta-Yanes, A., Bellon, M., Acevedo, F., Burgeff, C., Piñero, D. y Sarukhán, J. (2019). Un programa para México de conservación y uso de la diversidad genética de las plantas domesticadas y sus parientes silvestres. *Revista Fitotecnía Mexicana*, 42(4), 321-334.
<https://doi.org/10.35196/rfm.2019.4.321>
- Ramírez-Juárez, J. (2023). Régimen alimentario y agricultura familiar. Elementos para la soberanía alimentaria. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(29), e3533.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v14i29.3533>
- Reyes, P. S. E. y Cano, C. D. M. (2022). Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(1), 53-64.
<http://dx.doi.org/10.18271/ria.2022.328>
- Rosendo-Chávez, A., Herrera-Tapia, F., Vizcarra-Bordi, I. y Baca-Tavira, N. (2019). Desarrollo territorial rural: agricultura y migración en el sur del Estado de México. *Economía, Sociedad y Territorio*, 19(59), 1243-1274.
<https://doi.org/10.22136/est20191207>
- Sandström, E., Ortman, T., Watson, C. A., Bengtsson, J., Gustafsson, C. and Bergkvist, G. (2024). Saving, sharing and shaping landrace seeds in commons: unravelling seed commoning norms for furthering agrobiodiversity. *Agriculture and Human Values*, 41(2), 1-16.
<https://doi.org/10.1007/s10460-024-105814>
- Serralta-Batun, L.P., Jimenez-Osornio, J.J., Munguía-Rosas, M.Á. y Rodríguez-Robayo, K.J. (2023). Amenazas al paisaje agrícola tradicional del sur de Yucatán, México: una mirada desde el análisis socioecológico. *Revista de Economía e Sociología Rural*, 62(1), e265073. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.265073>
- Toribio-Solís, V.M., Castillo-Guillén, M.A., Rocandio-Rodríguez, M., Moreno-Ramírez, Y. del R., Delgado-Martínez, R. y Chacón-Hernández, J. C. (2022). Potencial agronómico de poblaciones sobresalientes de la raza Ratón evaluadas en condiciones de secano en el sur de Tamaulipas. *Universitas Agri*, 1(1), 30-30.
- Torres, E. e Iriondo, J. M. (2022). La conservación de los parientes silvestres de los cultivos y la necesidad de publicar datos según los principios FAIR. *Conservación Vegetal*, 26, 3-6.
<https://revistas.uam.es/conservacionvegetal/article/view/16403>
- Vallejo, R. J. y Rodríguez, T. J. C. (2022). Áreas naturales protegidas y cogestión: aspectos críticos en el Parque Nacional Cofre de Perote (Veracruz, México). *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 31, 25-41.
<https://doi.org/10.17141/letrasverdes.31.2022.5059>