



Revista Mexicana de Agroecosistemas
Vol. 10 Núm. (2), Diciembre, 2023, ISSN: 2007-9559

Revista Mexicana de Agroecosistemas

Volumen 10, Número (2), 2023

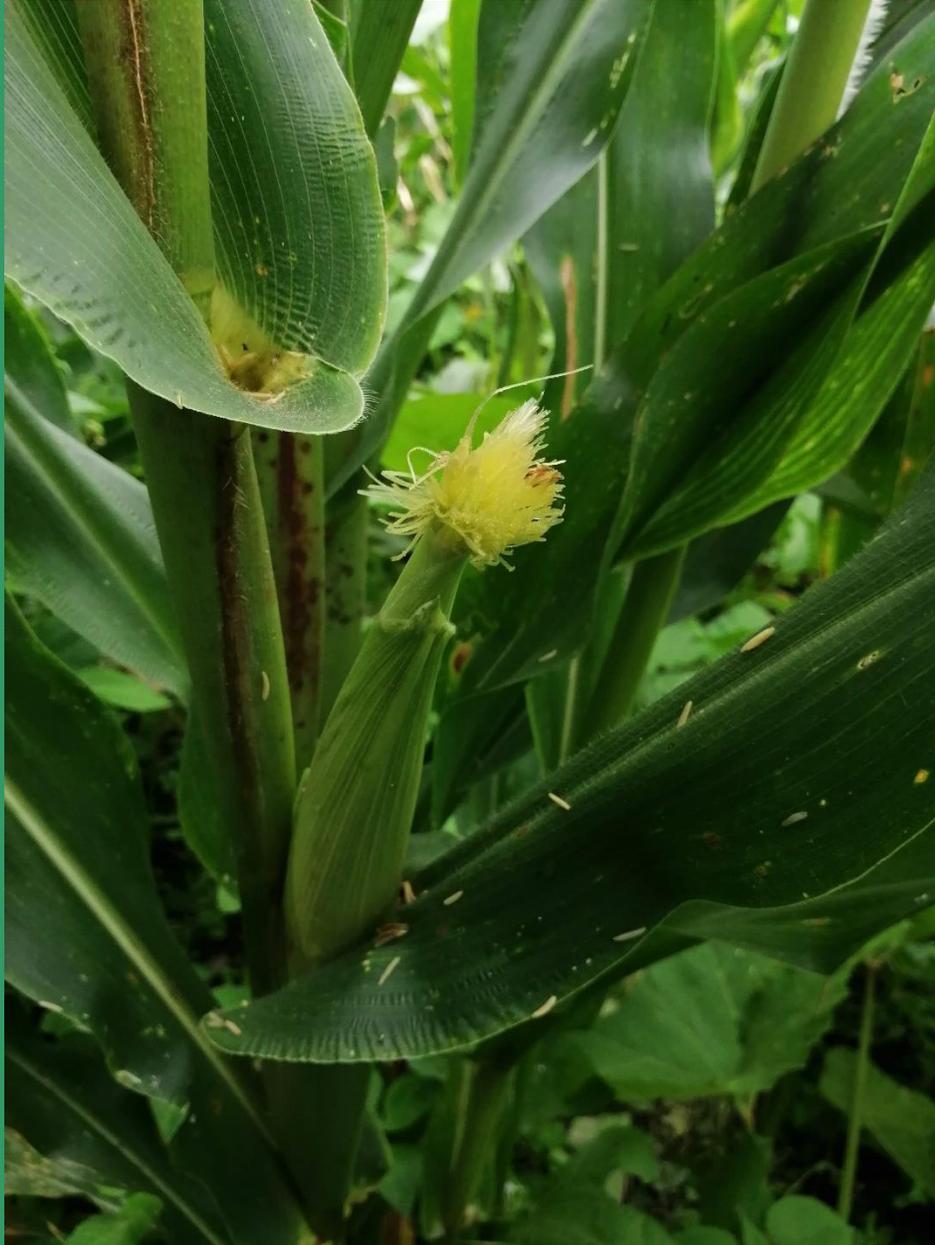


Foto: *Maíz Clotán*



REVISTA MEXICANA DE AGROECOSISTEMAS, Vol. 10(2), 2023 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 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. 04-2014-060211581800-203 e ISSN 2007-9559, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número en la División de Estudios de Posgrado e Investigación: Dr. Gerardo Rodríguez-Ortiz, Dra. Gisela Margarita Santiago Martínez, 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) 5170444 y 5170788, <https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/index>, rmae@voaxaca.tecnm.mx, rmae.itvo@gmail.com. Fecha de última modificación, 15 de diciembre de 2023.

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 gen y poblaciones en maíz, frutos de *Dasyliirion* spp. y diversidad vegetal en bosques de oyamel; se integran “**artículos de revisión (review)**” en aspectos de economía circular del agua y gravedad específica de la madera, con aplicación en proyectos de secuestro de carbono. Finalmente, se incluye una “**carta el editor**”, que hace la reseña del libro de Perezgrovas-Garza, R., Camacho, E. M.A. & Juárez, C.A. (2020). El guajolote nativo: estudios recientes y perspectivas.



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

Dra. Gisela Margarita Santiago Martínez

Dr. José Raymundo Enríquez del Valle

Dr. Yuri Villegas Aparicio

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.
Artículos científicos	
EXPRESIÓN DEL GEN ANTIFÚNGICO ZEAMATINA EN COLEÓPTILOS DE MAÍZ ARROCILLO ANTE INFECCIÓN POR <i>Aspergillus</i> / EXPRESSION OF THE ANTIFUNGAL GENE ZEAMATIN IN ARROCILLO MAIZE COLEOPTILES BEFORE INFECTION BY <i>Aspergillus</i> ¹ Patricia Vásquez-Luis  , ³ María del Socorro Pina-Canseco  , ² Alma Dolores Pérez-Santiago  , ² Diana Matías-Pérez  , ² Iván Antonio García-Montalvo  , ³ José Luis Hernández-Morales  , ² Marco Antonio Sánchez-Medina 	68-77
MORFOLOGÍA DE LOS FRUTOS DE <i>Dasyliirion</i> spp. PROCEDENTES DE LA MIXTECA OAXAQUEÑA / MORPHOLOGY OF <i>Dasyliirion</i> spp. FRUIT FROM MIXTECA OAXAQUEÑA ¹ Adriana Ortiz-López  , ² Vicente Arturo Velasco-Velasco  , ³ Gabino Alberto Martínez-Gutiérrez  , ² Gisela Virginia Campos-Angeles  , ² Gerardo Rodríguez-Ortiz 	78-89
DIVERSIDAD VEGETAL DEL SOTOBOSQUE EN RODALES DE OYAMEL EN AQUIXTLA, PUEBLA, MÉXICO / UNDERSTORY VEGETATION DIVERSITY IN SACRED-FIR STANDS IN AQUIXTLA, PUEBLA, MÉXICO ¹ Pedro A. Plateros-Gastélum  , ² Valentín J. Reyes-Hernández  , ³ Gisela V. Campos-Ángeles  , ² Patricia Hernández-de la Rosa  , ² Alejandro Velázquez-Martínez  , ² Daisy Barrera-Ortega 	90-105
VARIACIÓN FENOTÍPICA ENTRE POBLACIONES PRECOCES DE MAÍZ NATIVO DE OAXACA / PHENOTYPIC VARIATION BETWEEN EARLY POPULATIONS OF NATIVE MAIZE FROM OAXACA ¹ Prisciliano Diego-Flores  , ¹ Erika Padilla-Cortes  , ¹ Laura Martínez-Martínez  , ² José Cruz Carrillo-Rodríguez  , ¹ José Luis Chávez-Servia 	106-117
Artículos de revisión (review)	
GRAVEDAD ESPECÍFICA, BIOMASA Y VOLUMEN DE ESPECIES ARBÓREAS PARA PROYECTOS DE CARBONO / SPECIFIC GRAVITY OF WOOD IN TREE SPECIES FOR CARBON PROJECTS ¹ Yazmin Pérez-Alavez  , ² Gerardo Rodríguez-Ortiz  , ³ Wenceslao Santiago-García  , ² Gisela Virginia Campos-Angeles  , ⁴ Meredith P. Martín  , ² Salvador Lozano-Trejo  ..	118-140
ECONOMÍA CIRCULAR DEL AGUA, RELACIÓN CON LOS ODS, BARRERAS Y PRÁCTICAS PARA SU TRANSICIÓN / CIRCULAR WATER ECONOMY, RELATIONSHIP WITH THE SDGs, BARRIERS AND PRACTICES FOR ITS TRANSITION	



§Ethnice Dehonor-Márquez¹, Noel Enrique Rodríguez-Maya², Eduardo López-Sandoval³
, Irna Zukeyt Garduño-Jaimes⁴ 141-158

Carta al editor

ENTRE PLUMAS: MUJERES RURALES EN EL MUNDO DE LA AVICULTURA /
BETWEEN FEATHERS: RURAL WOMEN IN THE WORLD OF POULTRY
FARMING

¹Duilio García-Martínez¹, ²Martha P. Jerez-Salas², ³Marco A. Camacho-Escobar³, ²José
C. Carrillo-Rodríguez⁴, ²Marco A. Vásquez-Dávila⁵ 159-160



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

Dra. Gisela Margarita Santiago Martínez (gisela.ms@voaxaca.tecnm.mx) - Editor Asociado 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) 5170444, 5170788

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

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



EXPRESIÓN DEL GEN ANTIFÚNGICO ZEAMATINA EN COLEÓPTILOS DE MAÍZ ARROCILLO ANTE INFECCIÓN POR *Aspergillus*

EXPRESSION OF THE ANTIFUNGAL GENE ZEAMATIN IN ARROCILLO MAIZE COLEOPTILES BEFORE INFECTION BY *Aspergillus*

¹Patricia Vásquez-Luis , ³María del Socorro Pina-Canseco , ²Alma Dolores Pérez-Santiago , ²Diana Matías-Pérez , ²Iván Antonio García-Montalvo , ³José Luis Hernández-Morales , ²Marco Antonio Sánchez-Medina 

^{1,2} Estudiante, investigador. Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Oaxaca (ITO). Avenida Ing. Víctor Bravo Ahuja No. 125, esquina Calzada Tecnológico. C.P. 68030, Oax. Méx. ³Centro de Investigación, Facultad de Medicina (UNAM-UABJO), Av. San Felipe del Agua (2,69 km). CP 68020, Oax. Méx. [§]Autor de correspondencia: (marco.s.medina@itoaxaca.edu.mx).

RESUMEN

Los hongos productores de micotoxinas responsables de la pudrición de la mazorca en campo y almacenamiento incluyen algunas especies del género *Aspergillus* de importancia económica en México y otros países donde se cultiva el maíz. El objetivo de la presente investigación fue evaluar la expresión del gen *zlp* en tres muestras de maíz arrocillo ante la infección por *Aspergillus parasiticus* entre los meses de agosto a diciembre de 2022 en el Centro de Investigación Facultad de Medicina UNAM-UABJO, Oaxaca. Las muestras infectadas con *A. parasiticus* presentaron cambios morfológicos en comparación con las muestras control o sin infección como oscurecimiento y marchites en los meristemos apicales de coleóptilos y radícula. La calidad e integridad del ARN extraído fue aceptable. El análisis de la expresión mediante RT-PCR semicuantitativa de las muestras analizadas mostró que arrocillo blanco control fue la muestra que exhibió mayor expresión de *zlp*, e incluso fue mayor a la muestra infectada con *Aspergillus* con una diferencia de 18.42 %. La muestra arrocillo amarillo control e inoculado presentó una baja expresión del gen, mientras que arrocillo azul inoculado mostró inducción en un 11.81 % comparado con el control, posterior a la infección fúngica. La expresión del gen de *zlp* se correlacionó con el desarrollo de los coleóptilos, las muestras de color blanco y azul presentaron mejor crecimiento a

diferencia de la muestra de color amarillo. Los resultados obtenidos sugieren la expresión del gen *zlp* como respuesta a la infección de *A. parasiticus* en la primera etapa de desarrollo del maíz.

Palabras clave: *Aspergillus parasiticus*, expresión génica, gen *zlp*, maíz nativo.

ABSTRACT

Mycotoxin-producing fungi responsible for ear rot in the field and in storage include some species of the *Aspergillus* genus of economic importance in Mexico and other countries where corn is grown. The objective of the present investigation was to evaluate the expression of the *zlp* gene in three arrocillo maize samples in response to infection by *Aspergillus parasiticus* between the months of August to December 2022 at the UNAM-UABJO Faculty of Medicine Research Center, Oaxaca. Samples infected with *A. parasiticus* presented morphological changes compared to control or uninfected samples, such as darkening and wilting in the apical meristems of coleoptiles and radicle. The quality and integrity of the extracted RNA was acceptable. The expression analysis by semiquantitative RT-PCR of the samples analyzed showed that control white arrocillo was the sample that exhibited the highest expression of *zlp*, and was even higher than the sample infected with *Aspergillus* with a difference of 18.42 %. The control and inoculated yellow arrocillo sample

presented a low expression of the gene, while the inoculated blue arrocillo showed induction of 11.81 % compared to the control, after the fungal infection. The expression of the *zlp* gene was correlated with the development of coleoptiles, the white and blue samples presented better growth unlike the yellow sample. The results obtained suggest the expression of the *zlp* gene in response to *A. parasiticus* infection in the first stage of maize development.

Index words: *Aspergillus parasiticus*, gene expression, *zlp* gene, native maize.

INTRODUCCIÓN

El maíz es el cultivo de mayor importancia en México (López y Becerra, 2018), cerca del 75 % proviene de semillas nativas mientras que el 25 % restante es de origen comercial (Orozco-Ramírez, Perales & Hijmans, 2017). En el país se han reportado alrededor de 64 razas, de las cuales 59 son consideradas nativas y a su vez, diferentes poblaciones de teocintle, parientes silvestres del maíz (Torres-Peña et al., 2015; CONABIO, 2011). Estos maíces han estado en resguardo de las comunidades rurales quienes las seleccionan a través de su conocimiento, preferencias y prácticas adaptadas de acuerdo a sus necesidades, manteniendo así la diversidad de este importante cultivo (Escalante y Trigo, 2018) Dentro de las variedades de maíces nativos de mayor producción en el estado se encuentra la raza arrocillo, caracterizada por presentar mazorcas delgadas y cónicas con un gran número de hileras de granos por mazorca y una diversidad de colores que van de blanco hasta azul. En Oaxaca, esta raza está distribuida en las zonas altas de la Sierra Sur (CONABIO, 2020; Aragón et al., 2006).

Durante su crecimiento y almacenamiento el maíz está expuesto a sufrir infecciones que derivan en la pudrición de la mazorca y el grano causada por fitopatógenos, entre ellos las especies *A. flavus* y *A. parasiticus*. *Aspergillus* en condiciones óptimas de crecimiento produce metabolitos secundarios denominados aflatoxinas que son

altamente tóxicos para quienes consumen granos contaminados. A la fecha, se han realizado estudios con la finalidad de identificar germoplasmas que presenten resistencia a la infección de este hongo y su contaminación por aflatoxinas (Álvarez-Días et al., 2022; Shabeer et al., 2022; Sarma et al., 2017) representando una solución viable y económica para contrarrestar esta problemática (Sheoran et al., 2022; Mwamahonje et al., 2021; Luo et al., 2011).

Con ayuda de nuevos estudios moleculares se han identificado múltiples genes y sus proteínas en líneas puras e híbridos comerciales con resistencia, sin embargo, estos análisis se han realizado en otros países (Brown et al., 2010). Actualmente, son pocas las investigaciones que se han realizado con la finalidad de identificar genes y/o proteínas en maíces nativos de México (Varapizuela-Sánchez, 2020; Sandoval-Flores, 2016; Sánchez-Medina, 2016) y los teocintles (Hernández-Morales, 2022), que respondan ante la infección causada por *Aspergillus flavus* y *A. parasiticus*. Las razas nativas que se han evaluado son: bolita, conejo, tuxpeño, zapalote, elotes cónicos, vandeño, tepecintle, serrano, y arrocillo; mientras que los genes evaluados son; *ZmCOR*, *glx-I*, *perI* y *zlp*.

Los cuatro genes son catalogados como genes de resistencia, sin embargo, por la actividad de su proteína, *zlp* sintetiza una proteína con actividad antifúngica aislada de maíz (Shatters et al., 2006; Schimoler-O'Rourke et al., 2001; Roberts et al., 1996) mientras que *ZmCOR*, *glx-I* y *perI* sintetizan proteínas relacionadas al estrés. En bioensayos, la proteína *zlp* provocó la permeabilización de la membrana plasmática en el ápice de las hifas de *Aspergillus* (Batalia, Monzingo, Ernst, Roberts & Robertus, 1996; Roberts & Selitrennikoff, 1990;), desde su descubrimiento se ha usado también contra otros patógenos, como: *Neurospora crassa*, *Candida*, *Trichoderma*, *Fusarium*, *Rhizoctonia* y *Chaetomium* (Perri et al., 2009, Roberts et al., 1996).



Figura I. Muestras de maíz de la raza arrocillo: a) blanco, b) amarillo y c) azul.

Por lo anterior, es de suma importancia conocer la respuesta de estos genes de resistencia y sus proteínas en razas de maíces nativos debido a la importancia cultural y económica que tienen en México. El objetivo de la investigación fue evaluar la expresión del gen *zlp* en coleóptilos de maíz arrocillo ante la infección causada por *A. parasiticus*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras de maíz

Las tres muestras de la raza arrocillo (blanco, amarillo y azul) fueron obtenidas por colecta directa en el municipio de Santa María Lachixio, distrito Sola de Vega, Oaxaca, donde se han identificado poblaciones del material para su conservación in situ al presentar las versiones más puras de esta raza en el estado (Aragón et al., 2006). Las características de las mazorcas son: mazorcas delgadas y cortas, cónicas, con un número mediano de hileras; promedio de 15.4 hileras. Granos del tipo reventador, pequeños, muy angostos y delgados, redondeados, en forma de cuña, endospermo muy córneo, aleurona sin color; pericarpio sin color (Figura I).

Preparación del inoculo e infección de coleóptilos de maíz

Para los ensayos se utilizó una cepa de *A. parasiticus*, ATCC I6992 caracterizada por su alta producción de aflatoxinas. Se inocularon placas con medio PDA con 100 μL de una suspensión concentrada de esporas y se incubaron siete días en una incubadora INDELAB a 28 ± 2 °C. La recuperación de esporas se llevó a cabo en agua estéril con tritón al 0.01 % y se conservaron en tubos de vidrio a temperatura de refrigeración (4 °C) hasta su utilización.

Para la obtención de coleóptilos de maíz, 60 semillas de cada muestra se desinfectaron en alcohol etílico al 70 % durante 10 min, se enjuagaron tres veces con agua destilada estéril y se colocaron 10 semillas en una caja Petri estéril con papel filtro y algodón humedecidos, siendo estos una unidad experimental. Tres placas se utilizaron como control positivo (sin infección fúngica) inoculados con 50 μL de agua estéril y tres más se inocularon con 50 μL de una suspensión de esporas de *A. parasiticus* a una concentración de 1×10^6 esporas mL^{-1} . Las placas se etiquetaron de la siguiente manera: arrocillo blanco (Ablc y Ablí), arrocillo amarillo (Aamc y Aami) y arrocillo azul (Aazc y Aazi), control e infectado. Finalmente, se incubaron a 28 ± 2 °C durante 8 días (Varapizuela-Sánchez et al., 2022), y se determinó el porcentaje de germinación de los granos con y sin inoculación a partir del quinto día de incubación.

Extracción y cuantificación de ARN

La extracción del ARN total de los coleóptilos de maíz se realizó con base en la metodología comercial de TRIzol™ (Invitrogen). Se pesaron 100 mg de tejido y se maceraron con 1 mL de TRIzol en un mortero frío, posteriormente se pasó la muestra a un tubo eppendorf y se centrifugó a 11,000 rpm a 4 °C por 10 min. El sobrenadante se transfirió a un tubo nuevo y se adicionaron 200 µL de cloroformo frío, se agitó vigorosamente y se centrifugó nuevamente por 15 min bajo las mismas condiciones. La fase acuosa se transfirió a un tubo nuevo evitando la interfase y se adicionaron 500 µL de isopropanol frío para la precipitación del ARN, se agitó y centrifugó por 10 min con las mismas condiciones. Se descartó el sobrenadante y se realizaron tres lavados con 1 mL de alcohol etílico al 75 %, centrifugando a 7500 rpm por 5 min y se llevó a baño maría por 10 min a 57 °C para evaporar los restos de alcohol. El pellet se resuspendió en 40 µL de agua ultrapura. Se realizó la cuantificación y verificación de la pureza del ARN obtenido en un equipo NanoDrop (NanoDrop 2000c, ThermoScientific™) y se verificó la integridad por electroforesis en gel de agarosa al 1 % en buffer TAE IX.

Expresión génica por PCR con transcriptasa inversa (RT-PCR) semicuantitativa

La síntesis de la primera cadena de ADN se obtuvo usando el kit ADNc RevertAid (ThermoScientific™) en un termociclador BIO-RAD MyCycler siguiendo las instrucciones del proveedor y utilizando una concentración final de 25 ng de ARN como plantilla para la reacción.

La síntesis de las siguientes cadenas de ADN se realizó por reacción en cadena de la polimerasa (PCR), utilizando el kit GoTaq® Green Master Mix (Promega). Para la amplificación del gen *zlp*, se diseñó el juego de oligonucleótidos “*zlp*” Forward 5' GGTAGTGAAGCCTCGAAGG 3' y Reverse 5' GCATTACTACATCCTAGCACAGC 3', utilizando el software Primer3 (v. 0.4.0). Para la

amplificación del gen de referencia *actina* (*MAcI*) se usó el juego de oligonucleótidos reportado por Baker et al. (2009) (Forward 5' GTGACAATGGCACTGGAATG 3' y Reverse 5' GACCTGACCATCAGGCATCT 3'). El termociclador se programó de la siguiente manera: desnaturalización inicial a 95 °C por 2 min, 30 ciclos; con desnaturalización a 95 °C por 1 min, alineamiento de 53 °C por 30 seg para ambos oligonucleótidos y extensión a 72 °C por 39 y 51 seg para *zlp* y *MAcI*, respectivamente. La extensión final fue de 72 °C por 5 min.

Los productos obtenidos de la PCR se corrieron por electroforesis en geles de agarosa al 1 % con buffer TAE IX a 70 volts por 30 min y las imágenes se obtuvieron en un transiluminador con luz UV (Kodak Gel Logic 200 Imaging System). El análisis fue por triplicado. Las imágenes de los productos de PCR se analizaron por densitometría con el programa ImageJ® (Schneider, Rasband & Eliceiri, 2012), la imagen se ajustó a escala de grises de 8 bits, el brillo y contraste se ajustaron en modo automático y se invirtió a blanco y negro utilizando la herramienta invert LUT del mismo programa. Los resultados obtenidos por densitometría de la expresión del gen *zlp* se compararon mediante un análisis de varianza y la prueba de medias (Tukey, 0.05) utilizando el software Minitab (Versión 18), expresando el área de cada producto en porcentaje.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las muestras control o sin infección germinaron, el 100 % de las semillas (las tres unidades experimentales). Los coleóptilos y radículas mostraron un color amarillo hialino, con vigorosidad y así mismo raíces seminales abundantes (Figura 2a); por su parte, las muestras infectadas con el patógeno *A. parasiticus* presentaron un 70 % de germinación, en los tejidos de coleóptilo y radícula se observó oscurecimiento causado por la infección (Figura 2b), además, el 20 % de las plántulas presentaron marchitamiento en los ápices. Estas características son similares a las reportadas por Varapizuela

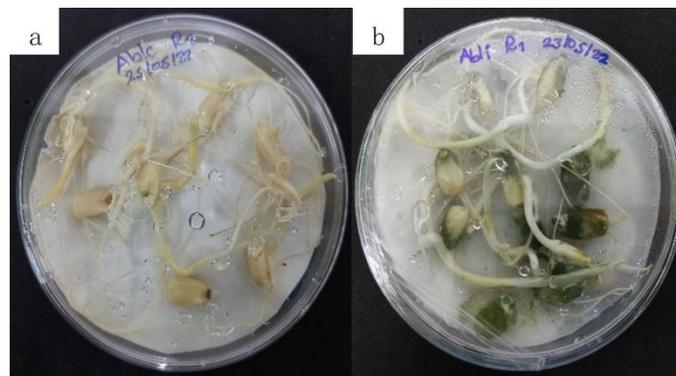


Figura 2. Coleóptilos de maíz. a) control, b) inoculado con *Aspergillus parasiticus*.

et al. (2022) en el que se infectaron muestras de maíz nativo con *A. flavus*, otra especie productora de aflatoxinas. El daño en el tejido de los coleóptilos también se ha reportado por otros hongos, y en teocintle, se presentó marchitamiento y clorosis en coleóptilos inoculados con el hongo fitopatógeno *Ustilago maydis* (Pérez et al., 2017).

El ARN total obtenido presentó las bandas características 28s y 18s bien definidas y sin trazas de material degradado, además de tener valores aceptables de calidad, pureza e integridad de acuerdo con los parámetros reportados (Vennapusa et al., 2020; Conde et al., 2012). Se comparó la expresión del gen *zlp* en coleóptilos control (Ablc, Aamc y Aazc) e inoculados con *A. parasiticus* (Abli, Aami y Aazi). De acuerdo con los resultados obtenidos por densitometría de los productos de RT-PCR, la muestra Ablc presentó la mayor expresión génica de *zlp* y gen de referencia *MAC1* de todas las muestras analizadas. Los niveles de expresión obtenidos de Ablc superaron significativamente a la muestra infectada (Abli) con un 18.42 % y 5.35 % para el gen *zlp* y al gen de referencia *MAC1* respectivamente. Por otra parte, la mayor inducción estadísticamente superior en coleóptilos infectados se presentó en la muestra Aazi con un valor de 11.81 % superior al control, mientras que en la muestra Aam no hubo diferencia significativa en la expresión génica entre el control y el coleóptilo infectado (Figura 3).

En un estudio realizado por Sajjad et al. (2016) se analizó la expresión del gen *zlp* ante la infección

por *Aspergillus niger* en tejidos de hojas jóvenes de maíces híbridos, encontrando una transcripción baja respecto al gen de referencia gliceraldehído 3-fosfato deshidrogenasa (GAPDH), pero obteniendo una mayor expresión de *zlp* en muestras infectadas en comparación con las muestras sanas, datos similares a los obtenidos en este trabajo de investigación, donde en dos de las tres muestras infectadas presentaron respuesta ante la infección fúngica, siendo Aaz la muestras que tuvo una mejor inducción en la expresión del gen.

En otro estudio en donde se analizó la expresión de los genes *ZmCOR* y *zlp* ante la infección por *A. flavus* en embriones de maíz nativo elotes cónicos negro (susceptible a la infección por *Aspergillus*), elotes cónicos rojo (resistente) y B73 línea endogámica susceptible formada en Estados Unidos, no se identificaron transcritos del gen *zlp* en ninguna de las muestras analizadas (Sandoval-Flores, 2016). Estos resultados difieren con los obtenidos en la presente investigación, en la cual se observó transcripción del gen en las tres muestras de arrozillo tanto sanas como inoculadas con *A. parasiticus*, lo cual podría deberse a que se evaluaron en etapas de desarrollo diferente. Por otra parte, Sánchez-Medina (2016) evaluó la expresión de tres genes relacionados con la resistencia a la infección de *A. parasiticus* en razas de maíces nativos, entre ellas dos muestras de arrozillo, reportando niveles significativos de la expresión de estos genes en dos muestras (morado y blanco) que, además, presentaron niveles bajos de concentración de aflatoxina BI por kilogramo de

maíz. Los estudios en la raza arrocillo proporcionan evidencia de la respuesta positiva que tiene este maíz nativo ante la infección fúngica.

La actividad de la proteína zeamatina fue analizada como respuesta al estrés causado por *A. flavus* y *Fusarium moniliforme* en genotipos de maíz resistente (GT-MAS: gk y Mp420) y susceptibles (Pioneer 3154 y Deltapine G-4666). En ambos bioensayos, se inhibió el crecimiento de hifas en los discos de cultivo, paralelamente se identificó mayor actividad antifúngica en ensayos con granos germinados a las 72 h, en contraste con los no germinados, sugiriendo una resistencia asociada a la germinación (Guo et al., 1997). Una investigación adicional identificó mayores concentraciones de la proteína zeamatina en el germen del grano en comparación con el endospermo (Guo et al., 1999). Posteriormente, Chen et al (2001) reportaron altos niveles de zeamatina y otras proteínas antifúngicas en embriones de genotipos de maíz resistentes a *A. flavus* respecto a las semillas no germinadas de genotipos susceptibles. Considerando la importancia de la actividad de la proteína en la

etapa germinativa, las muestra de Abl y Aaz podrían tener una buena respuesta en el suelo ante la presencia de hongos fitopatógenos.

Si bien, estudios previos reportan el aislamiento del gen y la proteína zeamatina en diferentes tejidos del maíz y su aplicaciones en tratamientos contra diferentes especies fúngicas con fines terapéuticos (Perri et al., 2009; Wilson et al., 2000; Selitrennikoff et al., 1992), su aplicación para el control de especies del género *Aspergillus* en cultivos de importancia económica como el maíz ha sido escasa, así como la identificación de germoplasma nativo con resistencia a la infección *Aspergillus* y acumulación de aflatoxinas. Si bien la resistencia es un fenómeno multigénico (Singh et al., 2023; Chen et al., 2015;), los resultados de esta investigación sugieren la participación del gen *zlp* como respuesta a la infección de *A. parasiticus* en la primera etapa de desarrollo del maíz como se observó en la muestra Ablc, ya que presentó una alta expresión constitutiva y en el caso de la muestra Aazi donde se indujo la expresión del gen ante la presencia del hongo, en ambos casos con mecanismos de defensa presentes en el maíz nativo.

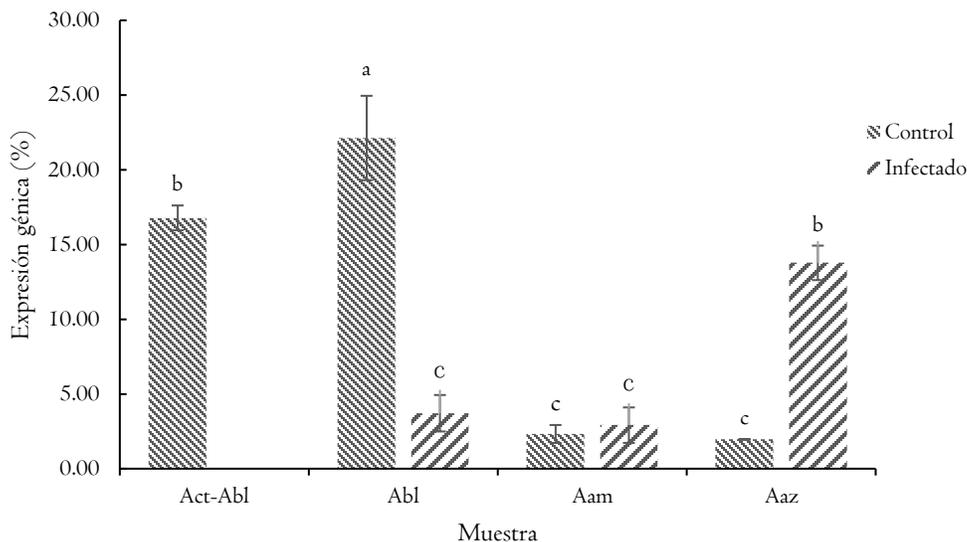


Figura 3. Porcentaje de expresión génica de *zlp* en muestras de maíz nativo arrocillo. *Actina* (*MAc I*) de arrocillo blanco (Act-Abl), arrocillo blanco (Abl), arrocillo amarillo (Aam), arrocillo azul (Aaz). Letras distintas presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05). Las líneas verticales sobre las barras representan el error estándar.

Se ha considerado de gran relevancia conocer los mecanismos de resistencia natural en este importante cultivo que puede servir como punto de partida para estudios similares en otros cultivos de importancia agrícola (Spencer-Smith et al., 2019; Cary et al., 2011), incluso se ha considerado el uso de la biotecnología en el cultivo de maíz para resolver el grave problema de la contaminación con aflatoxinas (Bhatnagar-Mathur et al., 2015).

CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó la expresión del gen *zlp* en coleóptilos de tres muestras de maíz nativo de la raza arrocillo ante la infección causada por *A. parasiticus*. De estos, la muestra Aaz presentó la mayor inducción del gen tras la infección del patógeno, la cual fue estadísticamente significativa en comparación al control (sin infección). Por otra parte, la expresión constitutiva de la muestra Abl no inoculada fue estadística y numéricamente superior a la muestra con infección. La expresión de este gen puede favorecer la germinación y desarrollo de la planta de maíz frente a la infección por *A. parasiticus* en los coleóptilos de las muestras de maíz arrocillo de color blanco y azul.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca de doctorado número 732413.

REFERENCIAS

- Álvarez-Días, F., Torres-Parga, B., Valdivia-Flores, A.G., Quezada-Tristán, T., Alejos-De La Fuente, J.I., Sosa-Ramírez, J. & Rangel-Muñoz, E.J. (2022). *Aspergillus flavus* and total aflatoxins occurrence in dairy feed and aflatoxin MI in bovine milk in Aguascalientes, Mexico. *Toxins*, 14(5), 292. <https://doi.org/10.3390/toxins14050292>
- Aragón, C.F., Taba, S., Hernández, J.M., Figueroa, J.D. y Serrano, V. (2006). *Actualización de la información sobre los maíces criollos de Oaxaca*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. CS002 México D. F. 119 p.
- Batalia, M.A., Monzingo, A.F., Ernst, S., Roberts, W. & Robertus, J.D. (1996). The crystal structure of the antifungal protein zeamatin, a member of the thaumatin-like, PR-5 protein family. *Nature Structural Biology*, 3(1), 19-22. <https://doi.org/10.1038/nsb0196-19>
- Bhatnagar-Mathur, P., Sunkara, S., Bhatnagar-Panwar, M., Waliyar, F. & Sharma, K.K. (2015). Biotechnological advances for combating *Aspergillus flavus* and aflatoxin contamination in crops. *Plant Science*, 234, 119-132. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.02.009>
- 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>
- Cary, J.W., Rajasekaran, K., Brown, R.L., Luo, M., Chen, Z.Y. & Bhatnagar, D. (2011). Developing resistance to aflatoxin in maize and cottonseed. *Toxins*, 3(6), 678-696. <https://doi.org/10.3390/toxins3060678>
- Chen, Z.Y., Rajasekaran, K., Brown, R.L., Saylor, R.J. & Bhatnagar, D. (2015). Discovery and confirmation of genes/proteins associated with maize aflatoxin resistance. *World Mycotoxin Journal*, 8(2), 211-224. <https://doi.org/10.3920/WMJ2014.1732>
- Chen, Z.Y., Brown, R.L., Cleveland, T.E., Damann, K.E. & Russin, J.S. (2001). Comparison of constitutive and inducible maize kernel proteins of genotypes resistant or susceptible to aflatoxin production. *Journal of Food Protection*, 64(11), 1785-1792. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-64.11.1785>
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2011). *Proyecto global "Recopilación, generación, actualización y análisis de*

- información acerca de la diversidad genética de maíces y sus parientes silvestres en México". <http://www.biodiversidad.gob.mx/genes/proyecto-Maices>
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2020). *Raza arrocillo*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas/grupo-conico/arrocillo>
- Conde, M.C.M., Nedel, F., Campos, V.F., Smith, A.J., Nör, J.E., Demarco, F.F. & Tarquinio, S.B.C. (2012). Odontoblast RNA stability in different temperature-based protocols for tooth storage. *International Endodontic Journal*, 45(3), 266-272. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2011.01971.x>
- Escalante, L.N. y Trigo, Y.C.M. (2018). Campesinos maiceros en Tlaxcala: viabilidad, caracterización y respuestas ante el maíz transgénico. *Sociedad y Ambiente* 16(6): 179-206.
- Guo, B.Z., Cleveland, T.E., Brown, R.L., Widstrom, N.W., Lynch, R.E. & Russin, J.S. (1999). Distribution of antifungal proteins in maize kernel tissues using immunochemistry. *Journal of Food Protection*, 62(3), 295-301. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-62.3.295>
- Guo, B.Z., Chen, Z.Y., Brown, R.L., Lax, A.R., Cleveland, T.E., Russin, J.S., Mehta, A.D., Selitrennikoff, C.P. & Widstrom, N.W. (1997). Germination induces accumulation of specific proteins and antifungal activities in corn kernels. *Phytopathology*, 87(11), 1174-1178. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1997.87.11.1174>
- Hernández-Morales, J.L. (2022). Identificación de los genes *glx-1*, *TI 14-kD* y *pr-10* relacionados a la resistencia a aflatoxinas, en *Zea diploperennis*, *Zea mays* ssp. *parviglumis* y *Zea luxurians*. Tesis de Doctorado. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Oaxaca (ITO).
- López, R.L.F. y Becerra L.A. (2018). Eficiencia de los productores de maíz en Sinaloa: una propuesta metodológica. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9(3): 651-664. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i3.1222>
- 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>
- Mwamahonje, A., Eleblu, J.S.Y., Ofori, K., Deshpande, S., Feyissa, T. & Tongoona, P. (2021). Drought tolerance and application of marker-assisted selection in sorghum. *Biology*, 10(12), 1249. <https://doi.org/10.3390/biology10121249>
- Orozco-Ramírez, Q., Perales, H. & Hijmans, R.J. (2017). Geographical distribution and diversity of maize (*Zea mays* L. subsp. *mays*) races in Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 64, 855-865. <https://doi.org/10.1007/s10722-016-0405-0>
- Pérez, D.M.C., Medina, M.A.S., Canseco, M.D.S.P., Campos, E.P., García-Montalvo, I.A. & Santiago, A.D.P. (2017). Inducción de infección en Teosinte (*Zea diploperennis*) con el fitopatógeno *Ustilago maydis*. *Journal of Negative and No Positive Results: JONNPR*, 2(1), 17-22.
- Perri, F., Della P., S., Rufini, F., Patamia, M., Bonito, M., Angiolella, L. & Vitali, A. (2009). Antifungal-protein production in maize (*Zea mays*) suspension cultures. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 52(4), 273-281. <https://doi.org/10.1042/BA20080060>
- Roberts, W.K., Selitrennikoff, C.P., Laue, B.E. and Potter, S.L. (1996). *Synergistic antifungal protein and compositions containing same*. U.S. Patent, 5,521,153.
- Roberts, W.K. & Selitrennikoff, C.P. (1990). Zeamatin, an antifungal protein from maize with membrane-permeabilizing activity. *Microbiology*, 136(9), 1771-1778.

- <https://doi.org/10.1099/00221287-136-9-177>
- Sajjad, A.M., Bahsiri, T., Saeed, S., Iqbal, M., Ahmad, S. & Islam, S. (2016) Zeamatin like protein (*zlp*) gene is associated with resistance against *A. niger* in maize (*Zea mays* L.). *Cercetări Agronomice în Moldova* XLIX, 2(166):29–39.
<https://doi.org/10.1515/cerce-2016-0013>
- Sánchez-Medina, M.A. (2016). *Identificación de la expresión de los genes *glx-1*, *per1* y *ZmCOR* ante la presencia de *Aspergillus parasiticus* en coleóptilos de maíces criollos de Oaxaca*. Tesis de Doctorado. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Oaxaca (ITO).
- Sandoval-Flores, V. (2016). *Identificación de razas de maíz criollo del Valle de Oaxaca resistente y susceptible a la acumulación de Aflatoxina BI producida por *Aspergillus flavus* y la expresión de los genes: *ZmCOR*, *Zeamatin*, *afIR* y *norB**. Tesis de Maestría, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), Unidad Irapuato. Repositorio Institucional- Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), Unidad Irapuato.
- Sarma, U.P., Bhetaria, P.J., Devi, P. & Varma, A. (2017). Aflatoxins: implications on health. *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 32, 124-133.
- Schimoler-O'Rourke, R., Richardson, M. & Selitrennikoff, C. P. (2001). Zeamatin inhibits trypsin and α -amylase activities. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(5), 2365-2366.
<https://doi.org/10.1128/AEM.67.5.2365-2366.2001>
- Selitrennikoff, C.P., Vigers, A.J. & Roberts, W.K. (1992). Antifungal proteins from plants: a possible new source of human therapeutics. In *New Approaches for Antifungal Drugs*, 88-113. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-6729-9_6
- Shabeer, S., Asad, S., Jamal, A. & Ali, A. (2022). Aflatoxin contamination, its impact and management strategies: an updated review. *Toxins*, 14(5), 307.
<https://doi.org/10.3390/toxins14050307>
- Shatters, R.G., Boykin, L.M., Lapointe, S.L., Hunter, W.B. & Weathersbee, A.A. (2006). Phylogenetic and structural relationships of the PR5 gene family reveal an ancient multigene family conserved in plants and select animal taxa. *Journal of Molecular Evolution*, 63, 12-29. <https://doi.org/10.1007/s00239-005-0053-z>
- Sheoran, S., Kaur, Y., Kumar, S., Shukla, S., Rakshit, S. & Kumar, R. (2022). Recent advances for drought stress tolerance in maize (*Zea mays* L.): present status and future prospects. *Frontiers in Plant Science*, 13, 872566.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.872566>
- Singh, A., Sharma, S., Choudhir, G. & Kumar, S. (2023). Fungal pathogen-induced modulation of structural and functional proteins in *Zea mays* L. In *Maize Improvement: Current Advances in Yield, Quality, and Stress Tolerance under Changing Climatic Scenarios* (pp. 303-322). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21640-4_14
- Schneider, C. A., Rasband, W. S. & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature methods*, 9(7), 671-675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Spencer-Smith, J., Paul-Williams, W. & Windham, G. L. (2019). Aflatoxin in maize: a review of the early literature from “moldy-corn toxicosis” to the genetics of aflatoxin accumulation resistance. *Mycotoxin Research*, 35, 111-128.
<https://doi.org/10.1007/s12550-018-00340-w>
- Torres-Peña, G., De la Cruz-Larios L., Sánchez-González, J.J., Ruíz-Corral, J.A., Castañeda-Nava J.J., Santacruz-Ruvalcaba, F. y Miranda-Medrano, R. (2015). Relaciones entre poblaciones de teocintle (*Zea* spp.) de México, Guatemala y Nicaragua. *Acta Botánica*

Mexicana III: 17-45.
<https://doi.org/10.21829/abmIII.2015.185>

- Varapizuela-Sánchez, C.F., Sánchez-Medina, M.A., Pina-Canseco, M.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 del Zulia*, 39(4). [https://doi.org/10.47280/RevFacAgron\(LUZ\).v39.n4.01](https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v39.n4.01)
- Varapizuela-Sánchez, C.F. (2020). *Análisis de la actividad de glioxalasa I (GLX-I) como respuesta a la infección por Aspergillus flavus in vitro en maíces nativos del estado de Oaxaca*. Tesis de Doctorado. Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Oaxaca (ITO).
- Vennapusa, A.R., Somayanda, I.M., Doherty, C.J. & Jagadish, S.K. (2020). A universal method for high-quality RNA extraction from plant tissues rich in starch, proteins and fiber. *Scientific Reports*, 10(1), 16887. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73958-5>
- Vigers, A.J., Roberts, W.K. & Selitrennikoff, C.P. (1991). A new family of plant antifungal proteins. *Mol Plant Microbe Interact*, 4(4), 315-323. <https://doi.org/10.1094/mpmi-4-315>
- Wilson, S., Mahiou, B., Reiger, R., Tentler, S., Schimoler, R., Orndorff, S. & Selitrennikoff, C.P. (2000). Pilot-scale purification of zeamatin, an antifungal protein from maize. *Biotechnology Progress*, 16(1), 38-43. <https://doi.org/10.1021/bp9901365>

MORFOLOGÍA DE LOS FRUTOS DE *Dasyllirion* spp. PROCEDENTES DE LA MIXTECA OAXAQUEÑA

MORPHOLOGY OF *Dasyllirion* spp. FRUIT FROM MIXTECA OAXAQUEÑA

¹Adriana Ortiz-López , ^{2§}Vicente Arturo Velasco-Velasco , ³Gabino Alberto Martínez-Gutiérrez ,
²Gisela Virginia Campos-Angeles , ²Gerardo Rodríguez-Ortiz 

^{1,2}Estudiante, investigador, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO). Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México. C.P. 71233. ³Instituto Politécnico Nacional (IPN), Centro de Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Oaxaca. Oaxaca, México. C.P 71230. [§]Autor de correspondencia: (vicente.vv@voaxaca.tecnm.mx).

RESUMEN

La especie *Dasyllirion* spp. tiene importancia para las zonas áridas y semiáridas, con diversos usos. Se requieren estudios del crecimiento, la reproducción, la fisiología de las plantas y otros aspectos que permitan examinar a la especie. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación fue analizar caracteres morfológicos de frutos de *Dasyllirion* spp. (especie sin identificar), de la Mixteca oaxaqueña, como base para su proceso reproductivo. Se recolectaron escapos florales femeninos en San Andrés (SA), en San Jerónimo (SJ) y en Nochixtlán (Nx). Los ejes florales (tallo floral) midieron de 1.64 a 3.11 m y la inflorescencia midió de 0.99 a 1.38 m; el número de racimos por inflorescencia varió de 79 a 91 unidades y se cuantificó entre 48 y 365 frutos por racimo. Las plantas de SA mostraron 10 640 frutos por escapo y las de SJ mostraron 46 733; el color predominante fue rojo púrpura. El peso de 1000 frutos fluctuó de 0.69 a 2.22 g; el número de frutos kg^{-1} fue de 9 504 a 146 563, el número de frutos dependió de su peso, esto es, a mayor número de frutos menor peso; los frutos presentaron de 5.1 a 6.8 mm de diámetro polar y de 3.2 a 4.7 mm de diámetro ecuatorial; coeficiente de forma de 0.6 a 0.7 mm. La variabilidad morfológica observada, con base a la literatura, es atribuido a las condiciones ambientales en las que crecieron, su comportamiento sexual dioico y su polinización libre y cruzada.

Palabras clave: cucharilla, eje floral, inflorescencia, pericarpio, sotol.

ABSTRACT

Dasyllirion spp. is important for arid and semi-arid zones, with diverse uses. Studies of growth, reproduction, plant physiology and other aspects are required to examine the species. For this reason, the objective of this research was to analyze morphological characters of fruits of *Dasyllirion* spp. (unidentified species), from the Oaxacan Mixteca, as a basis for its reproductive process. Female flower spikes were collected in San Andrés (SA), San Jerónimo (SJ) and Nochixtlán (Nx). The floral axes (flower stalk) measured from 1.64 to 3.11 m and the inflorescence measured from 0.99 to 1.38 m; the number of racemes per inflorescence varied from 79 to 91 units and between 48 and 365 fruits per raceme were quantified. SA plants showed 10 640 fruits per scape and SJ plants showed 46 733; the predominant color was purplish red. The weight of 1000 fruits ranged from 0.69 to 2.22 g; the number of fruits kg^{-1} was from 9 504 to 146 563, the number of fruits depended on weight, that is, the greater the number of fruits the lesser the weight; the fruits presented from 5.1 to 6.8 mm of polar diameter and from 3.2 to 4.7 mm of equatorial diameter; shape coefficient from 0.6 to 0.7 mm. The morphological variability observed, based on the literature, is attributed to the environmental conditions in which they grew, their

dioecious sexual behavior and their free and cross pollination.

Index words: cucharilla, floral axis, inflorescence, pericarp, sotol.

INTRODUCCIÓN

En la Mixteca oaxaqueña existe una planta conocida comúnmente como cucharilla, atribuido a que la parte basal de sus hojas que se insertan en el tallo tiene forma de cuchara, se utilizan como adorno en diversas festividades religiosas. Perteneció al género *Dasyllirion* y su hábitat árido y semiárido presenta periodos de sequías, lluvias intensas, vientos, altas temperaturas y cambios bruscos ambientales (CONABIO, 2022). Esta planta tiene importancia ecológica, artesanal, comestible y económica en las zonas donde crecen (PROFEPA, 2020; Duarte y Alvarado, 2019; SADER, 2015; Haeckel, 2008). El género *Dasyllirion*, se caracteriza por presentar una gran variabilidad intraespecífica, tanto en las características de la inflorescencia como del fruto, las diferencias morfológicas en los individuos son atribuidas a la posible existencia de plantas híbridas (Sierra-Tristán y Mendoza-Castillo, 2005). Las semillas de este género están contenidas dentro de una estructura llamada pericarpio (cápsula trivalva), cubierta que impide la germinación (Rodríguez-Trejo et al., 2019), por lo cual se convierte en una forma de latencia (Paulsen et al., 2013), de manera que la semilla viable no germina aun en condiciones favorables, estas características que presentan las semillas determinan las condiciones para la germinación (Finch-Savage & Leubner-Metzger, 2006).

Las características anatómicas de las plantas se adaptan a los factores ambientales, las especies heteromórficas han desarrollado adaptaciones para su dispersión y latencia (Seale & Nakayama, 2020; Novoplansky, 2019). Las semillas con pericarpio han evolucionado para protección ante diversos factores externos (Paulsen et al., 2013). La

plasticidad de los frutos está relacionada con la respuesta a la temperatura y la supervivencia en suelos con pendientes y pedregosos, además, es su protección para resistir a los agentes de dispersión (gravedad, agua, viento o animales) (Arshad et al., 2019; Pinales-Quero et al., 2017; Nathan et al., 2008). La capacidad y el tipo de dispersión que presenta una especie en sus semillas es uno de los factores que determina la estructura y la dinámica de población, ya que es un proceso físico en el que las semillas o frutos se mueven de un lugar a otro, asimismo, está ligada con el tipo de latencia que pueden presentar (Seale & Nakayama, 2020).

Dada su importancia de la cucharilla, tanto ecológica, artesanal, medicinal, comestible y económica, y una deficiente investigación de la especie, se requiere de información técnica y científica que permita conocer a mayor detalle esta planta (PROFEPA, 2020; Duarte y Alvarado, 2019; Reyes-Valdés et al., 2019; SADER, 2015). Por tal razón, el objetivo de este trabajo fue analizar caracteres morfológicos de los frutos de *Dasyllirion* spp. recolectados en tres sitios de la Mixteca oaxaqueña como base para el proceso reproductivo de la especie y evitar su extinción local a corto plazo. Con la hipótesis de que existe una variabilidad morfológica intraespecífica, probablemente atribuido a las condiciones ambientales en las que crecieron, su comportamiento sexual dioico y su polinización.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Se recolectó una inflorescencia por planta de cucharilla (*Dasyllirion* spp.), en San Andrés Lagunas (SA) y San Jerónimo Villa de Tamazulapam del Progreso durante julio y agosto del 2022, y una muestra compuesta de frutos recolectados en Asunción Nochixtlán (Nx) en el 2021; estas localidades pertenecen a la región de la Mixteca alta de Oaxaca, México (Tabla I).

Tabla I. Datos de los sitios de recolección de las plantas madre de *Dasyllirion* spp.

Municipio	Sitio	Planta	Coordenadas	Altitud (m)
San Andrés (SA)	S1	P1		2371
		P2	17°34'21"N	2396
		P3	97°31'17"O	2242
	S2	P4	17°34'21"N	2271
		P5	97°31'17"O	2286
San Jerónimo (SJ)	S3	P6	17°38'06"N	2230
		P7	97°32'37"O	2244
Nochixtlán (Nx)	S4	---	17°27'26"N 97°13'30"O	2080

Características morfológicas de la inflorescencia

Debido a que Nx fue una muestra compuesta de frutos con un año de resguardo, no se contaba con los datos de las plantas madre, es por eso que se obtuvieron datos morfológicos de las recolectadas en SA y SJ para las siguientes variables: la longitud del eje floral, se midió desde la base de la planta hasta el ápice; la longitud de inflorescencia, desde el inicio de los fascículos racimosos hasta el ápice, ambas longitudes se midieron con un flexómetro (Truper gripper®); número de racimos por planta, se realizó el conteo en cada inflorescencia; número de frutos por racimo, de manera aleatoria se seleccionaron 10 racimos de cada inflorescencia para su conteo.

Características morfológicas en frutos

Se determinaron algunas características físicas y morfológicas de los frutos, según el sitio y progenitor, cada fruto contiene una semilla. La determinación del color del pericarpio de los frutos se realizó a los dos días después del corte en 100 frutos frescos, recolectados en SA y SJ, con base en la tabla de colores de la Carta Munsell (Munsell, 2012) para tejidos vegetales; textura, ésta se determinó al tacto con las manos. Se formaron 10 grupos de 100 frutos por planta, cada grupo se pesó (g) en una balanza analítica (Sartorius con aproximación a 0.0001), y se contabilizaron los frutos que contenían semillas y los frutos sin semilla (vacío). De esta forma se obtuvo el peso de 1000 frutos y el porcentaje de frutos con semilla y sin semilla. Diámetro polar

(DP , mm) y diámetro ecuatorial (DE , mm), estos valores se obtuvieron con un vernier digital (Steren®) en 100 frutos por planta. Así mismo, con estos datos se estimó el coeficiente de forma: $CF = DE/DP$ (Rodríguez-Vásquez et al., 2018), cuando los valores tienden a 1.0 la forma es circular, y los valores alejados de la unidad representan formas alargadas. Las variables se midieron en muestras de frutos de SA, SJ y Nx, excepto el color, el cual no se realizó en los frutos (Nx) de un año de resguardo.

Análisis estadístico

Los datos se analizaron con pruebas de comparación de medias (Tukey, 0.05) en el programa computacional Statistical Analysis System 9.4 (SAS, 2013). Se realizaron análisis de correlación (Spearman, 0.05) entre las variables morfológicas de las inflorescencias. Se obtuvieron modelos de regresión polinómica y lineal para estimar peso de frutos por planta, número de racimos y longitud de la inflorescencia con base a otras variables de la inflorescencia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Morfología de la inflorescencia

Los ejes florales que presentaron las plantas de cucharilla (*Dasyllirion* spp.) midieron de 1.0 m a 3.67 m de longitud, y las inflorescencias racimosas de 0.52 m hasta 2.0 m; el número de racimos por planta fue de 32 a 150, y de 55 a 594 frutos por racimo, con un peso de 33 a 673 g de frutos por

Tabla 2. Características morfológicas en inflorescencias de *Dasyllirion* spp., recolectadas en la Mixteca oaxaqueña.

Localidad y planta	Longitud del eje floral (m)	Longitud de la inflorescencia (m)	Núm. de racimos por planta	Frutos por racimo	Peso de frutos por planta (g)
San Andrés					
Planta 1	3.67	1.46	118	55	33
Planta 2	2.04	0.52	41	42	10
Planta 3	1.19	0.58	61	257	108
Planta 4	1.35	0.66	62	162	61
Planta 5	2.40	0.67	65	245	116
San Jerónimo					
Planta 6	2.90	0.72	32	137	46
Planta 7	3.33	2.00	150	594	673

planta. Las inflorescencias recolectadas variaron en su capacidad para crecer y producir semillas en las siete muestras de la Mixteca (Tabla 2). Debido a que los diferentes ambientes, durante el desarrollo de la semilla, provocan cambios en el rendimiento de la planta y la semilla, el sitio de recolección fue un factor determinante (He et al., 2014). El tipo de reproducción (asexual o sexual) en las plantas, hace referencia a su capacidad de colonización y el potencial de adaptación (Johnson et al., 2010). Al ser una planta con comportamiento sexual dioico (masculinas y femeninas), de polinización libre (Hernández-Quintero et al., 2015; Reyes-Valdés et al., 2012), propicia un alto polimorfismo (Pinales-Quero et al., 2017; Grivet et al., 2009; Bogler, 1994).

Las características que presentan las plantas progenitoras influyen en la dispersión natural de las semillas, ya que, entre más altura, aumenta la

distancia del área de dispersión (Augspurger et al., 2016). A su vez, el crecimiento de la población en conglomerados está relacionada con esta dispersión (CONAFOR, 2004), por ser mayormente anemocoria (viento) (Pinales-Quero et al., 2017; Grivet et al., 2009; Bogler, 1994), y barocoria (gravedad) (Rodríguez Trejo et al., 2019). La correlación de las variables morfológicas mostró que la longitud de la inflorescencia se incrementó cuando aumentó la longitud del eje floral. También, presentaron mayor número de racimos por planta y número de frutos por racimo, y como consecuencia, un incremento del peso de frutos por planta (Tabla 3).

El número de racimos y peso de frutos por planta explican más del 90 % ($R^2 > 0.9$) de la variación existente en el número de racimos por planta y peso de frutos/planta (Figura 1).

Tabla 3. Correlación de Spearman ($\alpha = 0.05$) entre las variables morfológicas florales en plantas de *Dasyllirion* spp., recolectadas en la Mixteca oaxaqueña.

	Longitud de la inflorescencia	No de racimos por planta	No de frutos por racimo	Peso de frutos por planta
Longitud del eje floral	0.752*	0.597 ^{ns}	0.166 ^{ns}	0.359 ^{ns}
Longitud de la inflorescencia		0.950**	0.631 ^{ns}	0.790*
No de racimos por planta			0.636 ^{ns}	0.758*
No de frutos por racimo				0.955**

^{ns} valores no significativos ($p > 0.05$); *valores significativos ($p \leq 0.05$), **valores altamente significativos ($p \leq 0.01$).

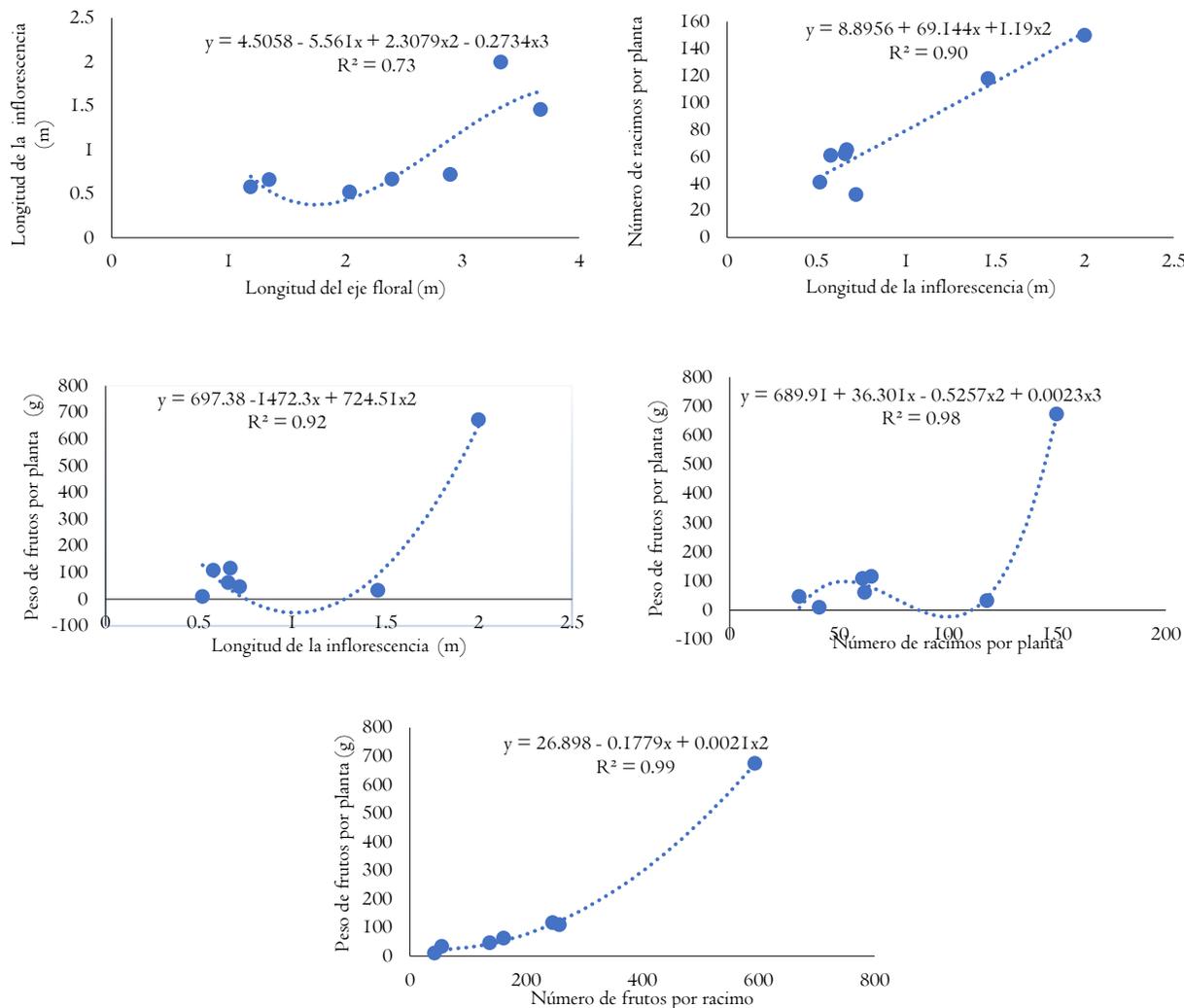


Figura I. Modelos con mejor ajuste ($R^2 > 0.73$), que estiman variables de inflorescencia.

Descripción del color y textura en frutos

El color rojo púrpura predominó en 67 % de los frutos, y el color verde amarillento en 33 %, cada uno con ligeras variaciones en claridad y pureza (Tabla 4). El color rojo coincide con lo reportado con Rodríguez-Trejo et al. (2021) en *Dasyllirion lucidum*. La acumulación de pigmentos en los frutos determinan el color del mismo. Las antocianinas y flavonoides se les atribuye el predominio del color rosa, el púrpura o el azul; además, el polimorfismo de color puede estar asociada con la diversidad ambiental, tolerancia al estrés, una mejor tolerancia al frío y a patógenos fúngicos.

Los tallos y flores más pigmentados, están más expuestas a condiciones estresantes que las plantas con menor capacidad para sintetizar antocianinas, debido a que se desempeñan favorablemente en condiciones de sequía (Sudheeran et al., 2020; Warren & Mackenzie, 2001). Los carotenoides son responsables de los pigmentos amarillos, anaranjados y rojos en frutas y verduras (Meléndez-Martínez et al., 2004), también juegan diferentes papeles en la fotoprotección, el crecimiento, la arquitectura de la planta y la tolerancia al estrés y patógenos (Moreno & Al-Babili, 2023).

Tabla 4. Identificación del color y textura de los frutos de plantas de cucharilla (*Dasyllirion* spp.).

Localidad y planta	Color	Interpretación	Frutos (%)	Textura
San Andrés				
Planta 1	2.5GY 5/8	Verde amarillento 2.5 Claridad 5/pureza 8	60	Lisa
	5RP 3/2	Rojo púrpura 5 Claridad 3/pureza 2	40	Lisa
Planta 2	5RP 3/8	Rojo púrpura 5 Claridad 3/pureza 8	50	Lisa
	5RP 3/4	Rojo-púrpura 5 Claridad 3/pureza 4	50	Lisa
Planta 3	2.5GY 5/8	Verde amarillento 2.5 Claridad 5/pureza 8	70	Lisa
	5RP 3/8	Rojo púrpura 5 Claridad 3/pureza 8	30	Lisa
Planta 4	2.5GY 5/8	Verde amarillento 2.5 Claridad 5/pureza 8	50	Lisa
	5RP 3/2	Rojo púrpura 5 Claridad 3/pureza 2	50	Lisa
Planta 5	2.5GY 8/6	Verde amarillento 2.5 Claridad 8/pureza 6	100	Lisa
San Jerónimo				
Planta 6	5RP 3/2	Rojo púrpura 5 Claridad 3/pureza 2	100	Lisa
Planta 7	2.5GY 8/6	Verde amarillento 2.5 Claridad 8/pureza 6	53	Lisa
	5RP 3/2	Rojo púrpura 5 Claridad 3/pureza 2	47	Lisa

Las plantas han desarrollado un mecanismo para inhibir factores externos extremos (Eshel et al., 2022), por lo que es probable que exista la acumulación de alguno de estos pigmentos en las brácteas y frutos de *Dasyllirion*. Las inflorescencias presentaron frutos trialados de textura lisa al tacto y plasticidad, la cual, suele ser una respuesta a la temperatura, supervivencia a suelos con pendientes y pedregosos, y es una protección para su dispersión (gravedad, agua, viento o animales) (Arshad et al., 2019; Pinales-Quero et al., 2017; Nathan et al., 2008).

Características morfológicas de los frutos

Los resultados de la prueba de comparación de medias mostraron diferencias estadísticas ($p \leq$

0.05) para el peso de 1000 frutos, que fueron de 0.6 g a 2.2 g, e influyó en el número de frutos kg^{-1} , el cual fue de 146,563 a 46,420, respectivamente, con una media de 84,777 frutos kg^{-1} (Tabla 5). El tamaño promedio de los frutos fue de 5.1 a 6.8 mm de diámetro polar, lo cual representó lo largo del fruto, y de 3.2 a 4.8 mm de diámetro ecuatorial. Las plantas de Nx obtuvieron el mayor diámetro polar y diámetro ecuatorial, estas fueron estadísticamente superiores a las medias de SA y SJ, es decir, fueron los frutos de mayor tamaño. Estos resultados permitieron estimar el coeficiente de forma de los frutos, que tendieron a la forma alargada. Tanto la estructura, forma, tamaño y peso e incluso la elasticidad que presentan los frutos, tienen el objetivo de facilitar la dispersión de las semillas, y dependiendo de la

Tabla 5. Características físicas y morfológicas en frutos de *Dasyliirion* spp., recolectados en la Mixteca oaxaqueña.

Planta/ localidad	Características físicas y morfológicas				
	Peso de 1000 frutos (g)	Frutos kg ⁻¹	Diámetro polar (mm)	Diámetro ecuatorial (mm)	Coefficiente de forma
P1SA	1.1±0.06 ^d	95041±8271 ^c	6.7±0.65 ^{ab}	3.7±0.65 ^{cbd}	0.63±0.12 ^b
P2SA	1.0±0.03 ^d	99173±3036 ^c	5.6±0.07 ^{abc}	4.1±3.88 ^b	0.74±0.82 ^b
P3SA	1.9±0.10 ^{ab}	53116±2727 ^{dc}	6.1±0.06 ^{abc}	3.9±0.05 ^{cb}	0.66±0.00 ^{ab}
P4SA	0.6±0.01 ^e	146563±399 ^a	5.1±0.06 ^c	3.7±0.04 ^{cbd}	0.73±0.01 ^{ab}
P5SA	1.5±0.03 ^c	64946±1461 ^d	5.4±0.06 ^{bc}	3.3±0.04 ^{cd}	0.60±0.00 ^b
P6SJ	2.2±0.13 ^a	46420±2768 ^c	5.3±0.08 ^c	3.4±0.04 ^c	0.65±0.01 ^{ab}
P7SJ	1.8±0.06 ^b	53485±1919 ^{dc}	5.2±0.06 ^c	3.2±0.04 ^d	0.63±0.01 ^b
C8Nx	0.8±0.00 ^{dc}	119476±131 ^b	6.8±0.55 ^a	4.8±0.05 ^a	0.77±0.01 ^a

Letras distintas en la misma columna representan diferencias significativas (Tukey, 0,05). La media se acompaña ± error estándar. Los valores son promedios de 100 frutos.

forma aumenta el rango de distribución, lo cual puede tener un efecto adaptativo positivo en la distribución y de los riesgos asociados (Gan et al., 2022; Ya-Fei et al., 2022; Yang et al., 2021).

Producción de frutos por planta

Se encontraron inflorescencias que presentaron entre 1 % y 79 % de frutos con semillas, siendo el complemento del 99 % y 21 % de frutos sin semillas (Tabla 6). El proceso de polinización puede diferir dependiendo del clima, características y topografía del lugar (Frisk et al., 2023; Aboulaich et al., 2013). Es probable que *Dasyliirion*, al proliferar en zonas áridas, las condiciones climáticas desfavorables (CONABIO, 2022), son una amenaza para su reproducción sexual, debido a que interfieren para la maduración o dispersión del polen, las sequías frecuentes e intensas y las altas temperaturas, aumentan la esterilidad del polen por causa de daño celular (Schermer et al., 2020; Najeeb et al., 2019; Huang et al., 2015; Alonso et al., 2012). Para una fecundación exitosa se requiere polen funcional (Carrizo-García et al., 2017; Hormaza & Herrero, 1995), y debido a que las estructuras reproductivas, especialmente el polen, son altamente sensibles a los cambios drásticos del ambiente (Bykova et al., 2018), puede ser uno de

los muchos factores que influyan en el porcentaje de frutos vacíos que presentaron las inflorescencias recolectadas. Sin embargo, se desconoce si tiene algún otro tipo de polinización, debido a que las flores masculinas son más vistosas (amarillo intenso), lo que es una característica para los polinizadores, ya que son parte de los atrayentes visuales (Wessinger, 2021; Renoult et al., 2014).

Las plantas obtuvieron entre 100 a 45708 número de frutos con semillas por inflorescencia, comparado con lo que reporta Rodríguez-Trejo et al. (2019) de 2 600 semillas por inflorescencia. La gran cantidad de producción de frutos se justifica como una estrategia reproductiva, lo cual beneficia su dispersión y capacidad adaptativa para su propagación natural, aunado a su latencia (por el fruto) (Leslie et al., 2017; Rubio et al., 2017). Esta última, está relacionado con la competencia (Huss & Gierlinger, 2021; Paulsen et al., 2013), el desarrollo, y la dispersión de las semillas, (Nathan et al., 2008) y juega un papel de control ante climas desfavorables y competencia alta (Volis & Bohrer, 2013) entre la planta madre y sus plántulas, coordinando la emergencia de estas, asegurando las condiciones ambientales favorables para su crecimiento (Smith & Weller, 2020; Finch-Savage & Footitt, 2017).

Tabla 6. Producción de frutos con semilla y sin semilla de plantas de cucharilla (*Dasyliirion* spp.) recolectados en la Mixteca oaxaqueña.

Localidad y planta	Frutos con semillas (%)	Frutos sin semillas (%)	Frutos totales por planta	No de frutos con semillas por planta	No de frutos sin semilla por planta
San Andrés (SA)					
Planta 1	5.0	95.0	6466	323	6143
Planta 2	10.0	90.0	1734	173	1561
Planta 3	17.0	83.0	15671	2664	13007
Planta 4	1.0	99.0	10019	100	9919
Planta 5	29.0	71.0	15951	4626	11325
San Jerónimo (SJ)					
Planta 6	79.0	21.0	4381	3461	920
Planta 7	51.3	48.7	89100	45708	43392
Nochixtlán (Nx)	45.0	55.0	-	-	-

CONCLUSIONES

La planta de cucharilla (*Dasyliirion* spp.) recolectada en San Jerónimo presentó características superiores de inflorescencia, con eje floral de 3.33 m de longitud y 2.0 m en la inflorescencia, 150 racimos y 594 frutos por racimo, mostrando 89 085 frutos, los cuales pesaron 673 g, con 45 019 frutos con semilla y, por lo tanto, un 50 % sin semilla. La correlación de las variables morfológicas mostró que la longitud de la inflorescencia se incrementó cuando aumentó la longitud del eje floral y, además, presentaron mayor número de racimos por planta, y mayor número de frutos por racimo, como consecuencia un incremento del peso de frutos por planta.

El color predominante en los frutos fue el rojo púrpura (67 %), y verde amarillento (33 %). Presentaron textura lisa al tacto en todas las variantes evaluadas y tendieron a una forma alargada. Los frutos procedentes de Nx tuvieron mayor tamaño, seguidos de SJ y por último los de SA, estos últimos presentaron menor peso (0.6 g) y como consecuencia, el mayor número de frutos kg⁻¹ (146 563); los frutos procedentes de SJ fueron los más pesados (2.2 g), obteniendo el menor número de frutos kg⁻¹ (46 420). La extracción de

plantas de poblaciones silvestres, sin regulación y sin el manejo adecuado, puede ocasionar la extinción local de la especie a corto plazo, por lo que surge la necesidad de ampliar el conocimiento y resaltar la importancia de la especie para las zonas áridas y semiáridas, dando pautas para su conocimiento, manejo y conservación.

REFERENCIAS

- Aboulaich, N., Achmakh, L., Bouziane, H., Trigo, M.M., Recio, M., Kadiri, M., Cabezudo, B., Riadi, H. & Kazzaz, M. (2013). Effect of meteorological parameters on Poaceae pollen in the atmosphere of Tetouan (*NW Morocco*). *International Journal of Biometeorology*, 57(2), 197–205. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0566-2>
- Alonso, C., Herrera, C.M. & Ashman, T.L. (2012). A piece of the puzzle: A method for comparing pollination quality and quantity across multiple species and reproductive events. *New Phytologist*, 193(2), 532–542. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03932.x>
- Arshad, W., Sperber, K., Steinbrecher, T., Nichols, B., Jansen, V.A.A., Leubner-Metzger, G. & Mummenhoff, K. (2019). Dispersal biophysics and adaptive significance of dimorphic

- diaspores in the annual *Aethionema arabicum* (Brassicaceae). *New Phytologist*, 221(3), 1434–1446.
<https://doi.org/10.1111/nph.15490>
- Augspurger, C.K., Franson, S.E., Cushman, K.C. & Muller-Landau, H.C. (2016). Intraspecific variation in seed dispersal of a Neotropical tree and its relationship to fruit and tree traits. *Ecology and Evolution*, 6(4), 1128–1142.
<https://doi.org/10.1002/ece3.1905>
- Bogler, D.J. (1994). *Taxonomy and phylogeny of Dasyliirion (Nolinaceae)*. Doctoral dissertation, University of Texas at Austin, Austin, USA.
- Bykova, O., Limousin, J.M., Ourcival, J.M. & Chuine, I. (2018). Water deficit disrupts male gametophyte development in *Quercus ilex*. *Plant Biology*, 20(3), 450–455.
<https://doi.org/10.1111/plb.12692>
- Carrizo-García, C., Nepi, M. & Pacini, E. (2017). It is a matter of timing: asynchrony during pollen development and its consequences on pollen performance in angiosperms—a review. *Protoplasma*, 254(1), 57–73.
<https://doi.org/10.1007/s00709-016-0950-6>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2004). *Inventario nacional forestal y de suelos*.
<https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Inventario-Nacional-Forestal-y-de-Suelos.Pdf>
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2022). *taxa_EncicloVida*.
<https://enciclovida.mx/>
- Duarte, M.J. y Alvarado, A. (2019). El manual del sotol. *Editorial. Mixlab, Chihuahua, Chihuahua*. 42 p.
- Eshel, G., Duppen, N., Wang, G., Oh, D.H., Kazachkova, Y., Herzyk, P., Amtmann, A., Gordon, M., Chalifa-Caspi, V., Oscar, M.A., Bar-David, S., Marshall-Colon, A., Dassanayake, M. & Barak, S. (2022). Positive selection and heat-response transcriptomes reveal adaptive features of the Brassicaceae desert model, *Anastatica hierochuntica*. *New Phytologist*, 236(3), 1006–1026.
<https://doi.org/10.1111/nph.18411>
- Finch-Savage, W.E. & Footitt, S. (2017). Seed dormancy cycling and the regulation of dormancy mechanisms to time germination in variable field environments. *Journal of Experimental Botany*, 68(4), 843–856.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erw477>
- Finch-Savage, W.E. & Leubner-Metzger, G. (2006). Seed dormancy and the control of germination. *New Phytologist*, 171(3), 501–523.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01787.x>
- Frisk, C.A., Apangu, G.P., Petch, G.M., Creer, S., Hanson, M., Adams-Groom, B. & Skjoth, C.A. (2023). Microscale pollen release and dispersal patterns in flowering grass populations. *Science of the Total Environment*, (880), 163345.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163345>
- Gan, S.R., Guo, J.C., Zhang, Y.X., Wang, X.F. & Huang, L.J. (2022). Phoenix in Flight: an unique fruit morphology ensures wind dispersal of seeds of the phoenix tree (*Firmiana simplex* (L.) W. Wight). *BMC Plant Biology*, 22(1), <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03494-z>
- Grivet, D., Sebastiani, F., González-Martínez, S. C. & Vendramin, G.G. (2009). Patterns of polymorphism resulting from long-range colonization in the Mediterranean conifer *Aleppo pine*. *New Phytologist*, 184(4), 1016–1028.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03015.x>
- Haeckel, I.B. (2008). The Arco Floral: ethnobotany of *Tillandsia* and *Dasyliirion* spp. in a Mexican religious adornment. *Economic Botany*, 62(1), 90–95.
- He, H., De Souza, V.D., Basten, S.L., Schnabel, S., Nijveen, H., Hilhorst, H. & Bentsink, L. (2014). Interaction between parental environment and genotype affects plant and seed performance in *Arabidopsis*. *Journal of Experimental Botany*, 65(22), 6603–6615.
<https://doi.org/10.1093/jxb/eru378>
- Hernández-Quintero, J.D., Reyes-Valdés, M.H., Mendoza-Rodríguez, D.V., Gómez-Martínez, M. y Rodríguez-Herrera, R. (2015). Estudio de los cromosomas mitóticos y meióticos del

- sotol (*Dasyliirion cedrosanum* Trel.). *Revista Internacional de Botánica Experimental*, 84, 107–112.
- Hormaza, J.I. & Herrero, M. (1995). El polen como individuo interactivo. *Unidad de Fruticultura*, 7, 5–18.
- Huang, H., Ye, R., Qi, M., Li, X., Miller, D.R., Stewart, C.N., Dubois, D.W. & Wang, J. (2015). Wind-mediated horseweed (*Conyza canadensis*) gene flow: Pollen emission, dispersion, and deposition. *Ecology and Evolution*, 5(13), 2646–2658. <https://doi.org/10.1002/ece3.1540>
- Huss, J.C. & Gierlinger, N. (2021). Functional packaging of seeds. *New Phytologist*, 230(6), 2154–2163. <https://doi.org/10.1111/nph.17299>
- Johnson, M.T. J., Smith, S.D. & Rausher, M.D. (2010). Effects of plant sex on range distributions and allocation to reproduction. *New Phytologist*, 186(3), 769–779. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03201.x>
- Leslie, A.B., Beaulieu, J.M. & Mathews, S. (2017). Variation in seed size is structured by dispersal syndrome and cone morphology in conifers and other nonflowering seed plants. *New Phytologist*, 216(2), 429–437. <https://doi.org/10.1111/nph.14456>
- Meléndez-Martínez, A.J., Vicario, I.M. y Heredia, F.J. (2004). Estabilidad de los pigmentos carotenoides en los alimentos. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 54(2), 209–215.
- Moreno, J.C. & Al-Babili, S. (2023). Are carotenoids the true colors of crop improvement? *New Phytologist*, 237(6), 1946–1950. <https://doi.org/10.1111/nph.18660>
- Munsell. (2012). *Munsell planta tissue color Book with genuine Munsell color chips*. 4300 44th Street. Grand Rapids MI 49512.
- Najeeb, U., Tan, D.K.Y., Sarwar, M. & Ali, S. (2019). Adaptation of crops to warmer climates: Morphological and physiological mechanisms. In *Sustainable Solutions for Food Security: Combating Climate Change by Adaptation*, 38(6), 1011–1022. <https://doi.org/10.1111/pce.12474>
- Nathan, R., Schurr, F.M., Spiegel, O., Steinitz, O., Trakhtenbrot, A. & Tsoar, A. (2008). Mechanisms of long-distance seed dispersal. *Trends in Ecology and Evolution*, 23 (11), 638–647. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.08.003>
- Novoplansky, A. (2019). What plant roots know? *Seminars in Cell & Developmental Biology*, (92), 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.semdb.2019.03.00>
- Paulsen, T.R., Colville, L., Kranner, I., Daws, M. I., Högstedt, G., Vandvik, V. & Thompson, K. (2013). Physical dormancy in seeds: A game of hide and seek? *New Phytologist*, 198(2), 496–503. <https://doi.org/10.1111/nph.12191>
- Pinales-Quero, I., González-Vázquez, V.M., Castillo, F.R., Aguilar, C.N., Reyes-Valdés, M.H. & Rodríguez-Herrera, R. (2017). Genetic diversity of sotol (*Dasyliirion cedrosanum* Trel.) at different elevations. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(11), 201. <https://doi.org/10.19136/era.a4n11.941>
- PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente) (2020). El sotol y la pata de elefante, especies protegidas por la ley. <https://www.gob.mx/profepa/articulos/el-sotol-y-la-pata-de-elefante-especies-protegidas-por-la-ley?idiom=es#:~:text=Ha%20sido%20utilizada%20desde%20hace,con%20tronco%20elevado%20%20recostado.>
- Renoult, J.P., Valido, A., Jordano, P. & Schaefer, H.M. (2014). Adaptation of flower and fruit colours to multiple, distinct mutualists. *New Phytologist*, 201(2), 678–686. <https://doi.org/10.1111/nph.12539>
- Reyes-Valdés, M.H., Benavides-Mendoza, A. & Villarreal-Quintanilla, J.A. (2012). Biología e importancia del sotol (*Dasyliirion* spp.). Parte I: sistemática, genética y reproducción. *Planta*, 7, 11–13.
- Reyes-Valdés, H.M., Palacios, R., Rivas-Martínez, E.N., Robledo-Olivo, A., Antonio-

- Bautista, A., Valdés-Dávila, C. M., Villarreal-Quintanilla, J.Á. & Benavides-Mendoza, A. (2019). The Sustainability of Mexican Traditional Beverage Sotol: Ecological, Historical, and Technical Issues. *Processing and Sustainability of Beverages*, 103–137. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815259-1.00004-5>
- Rodríguez-Trejo, D.A. (2021). *Dasyllirion lucidum* Rose (Aspagaseae). In: Semillas de Especies Forestales. *División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de Méx.* pp. 88-94.
- Rodríguez-Trejo, D.A., García-Pascual, E., Quiahua B.L. y Reyes-Valdovinos, E.Y. (2019). Germinación de semillas de *Dasyllirion lucidum* Rose y *Beaucarnea gracilis* Lemaire de matorral xerófilo. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 7(20), <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2019.20.68365>
- Rodríguez-Vásquez, M.E., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J.R., Velasco-Velasco, V.A. & Ramírez-Sánchez, S.E. (2018). Caracterización y escarificación de semillas de *Bursera glabrifolia* Kunth colectadas de diferentes árboles semilleros. *CIENCIA Ergo-Sum*, 25(2), 1–16.
- Rubio, de C.R., Willis, C.G., Pearse, W.D., Baskin, C.C., Baskin, J.M. & Cavender-Bares, J. (2017). Global biogeography of seed dormancy is determined by seasonality and seed size: a case study in the legumes. *New Phytologist*, 214(4), 1527–1536. <https://doi.org/10.1111/nph.14498>
- SAS. (2013). Manual de usuario de Estadística Versión 9.4. Instituto SAS Inc., Cary.
- Schermer, É., Bel-Venner, M.C., Gaillard, J.M., Dray, S., Boulanger, V., Le Roncé, I., Oliver, G., Chuine, I., Delzon, S. & Venner, S. (2020). Flower phenology as a disruptor of the fruiting dynamics in temperate oak species. *New Phytologist*, 225(3), 1181–1192. <https://doi.org/10.1111/nph.16224>
- Seale, M. & Nakayama, N. (2020). From passive to informed: mechanical mechanisms of seed dispersal. *New Phytologist*, 225(2), 653–658. <https://doi.org/10.1111/nph.16110>
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). (2015). *Sotol, bebida célebre del desierto*. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/sotol-bebida-celebre-del-desierto-orgullodemexico>
- Sierra-Tristán, J.S. y Mendoza-Castillo, A. (2005). Contribución al conocimiento y distribución de las especies de *Dasyllirion* spp. (Sotol) en Chihuahua, México. *Rev. Ciencia Forestal en México*, (28), 93.
- Smith, S.M. & Weller, J.L. (2020). Seasonal control of seed germination. *New Phytologist*, 225(5), 1821–1823. <https://doi.org/10.1111/nph.16254>
- Sudheeran, P.K., Ovadia, R., Galsarker, O., Maoz, I., Sela, N., Maurer, D., Feygenberg, O., Oren Shamir, M. & Alkan, N. (2020). Glycosylated flavonoids: fruit's concealed antifungal arsenal. *New Phytologist*, 225(4), 1788–1798. <https://doi.org/10.1111/nph.16251>
- Volis, S. & Bohrer, G. (2013). Joint evolution of seed traits along an aridity gradient: Seed size and dormancy are not two substitutable evolutionary traits in temporally heterogeneous environment. *New Phytologist*, 197(2), 655–667. <https://doi.org/10.1111/nph.12024>
- Warren, J. & Mackenzie, S. (2001). Why are all colour combinations not equally represented as flower-colour polymorphisms?. *New Phytologist*, 151, 231–241.
- Wessinger, C.A. (2021). From pollen dispersal to plant diversification: genetic consequences of pollination mode. *New Phytologist*, 229(6), 3125–3132. <https://doi.org/10.1111/nph.17073>
- Ya-Fei, S., Shan-Heng, S., Ying-Sha, J. & Jia, L. (2022). A global synthesis of fire effects on soil seed banks. *Global Ecology and Conservation*, 36, e02132. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02132>
- Yang, Y.Z., Zhang, R., Gao, R.H., Chai, M.W., Luo, M.X., Huang, B.H. & Liao, P.C. (2021). Heterocarpy diversifies diaspore propagation

of the desert shrub *Ammopiptanthus mongolicus*. *Plant Species Biology*, 36(2), 198–207. <https://doi.org/10.1111/1442-1984.12308>

DIVERSIDAD VEGETAL DEL SOTOBOSQUE EN RODALES DE OYAMEL EN AQUIXTLA, PUEBLA, MÉXICO

UNDERSTORY VEGETATION DIVERSITY IN SACRED-FIR STANDS IN AQUIXTLA, PUEBLA, MÉXICO

¹Pedro A. Plateros-Gastélum , ²Valentín J. Reyes-Hernández , ³Gisela V. Campos-Ángeles , ²Patricia Hernández-de la Rosa , ²Alejandro Velázquez-Martínez , ²Daisy Barrera-Ortega 

^{1,2} Estudiante, investigador; Colegio de Postgraduados. Postgrado en Ciencias Forestales. Km. 36.5 Carr. Mex-Tex, Montecillo, Estado de México CP 56264. ³Tecnológico Nacional de México, Campus Valle de Oaxaca (ITVO). Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México. C.P. 71233. ⁴Autor de correspondencia: (vreyes@colpos.mx)

RESUMEN

La vegetación del sotobosque representa el mayor componente de biodiversidad en la mayoría de los ecosistemas forestales, y tiene un papel clave en su funcionamiento. El objetivo fue evaluar cómo la estructura del dosel y la disponibilidad de luz, influyen en la diversidad del sotobosque en rodales puros de *Abies religiosa* (oyamel) en Aquixtla, Puebla. Se establecieron 16 unidades de muestreo en masas puras de oyamel, ubicando cinco cuadrantes de 1 m² en cada unidad, en los que se colectaron, registraron, y determinaron las plantas presentes; se estimaron la riqueza de especies, y los índices de diversidad de Shannon y Simpson. Se evaluaron también el ambiente lumínico y la estructura del dosel con fotografías hemisféricas. La relación entre las variables de estudio se determinó con el coeficiente de correlación de Pearson y con regresión lineal simple. El índice de diversidad de Shannon-Wiener presentó valores de entre 0.98 y 2.52, mientras que el índice de Simpson de 0.48 a 0.89. La riqueza de especies tuvo una relación lineal positiva con la fracción de apertura del dosel ($R^2 = 0.68$; $p < 0.001$), con el índice de diversidad de Shannon-Wiener ($R^2 = 0.51$; $p < 0.01$) y con el índice de Simpson ($R^2 = 0.34$; $p < 0.05$). Se concluye que la estructura del dosel influye en la diversidad del sotobosque de diversas maneras. Un aumento en la apertura tendrá un efecto positivo al incrementarse la heterogeneidad y disponibilidad de la luz,

promoviendo la presencia de especies con diferentes necesidades de luz.

Palabras clave: *Abies religiosa*, apertura del dosel, fotografías hemisféricas, índices de diversidad.

ABSTRACT

Understory vegetation represents the greatest biodiversity component in most forest ecosystems, with a key role in their functioning. The objective was to assess how the canopy structure and light availability influence understory vegetation diversity in pure *Abies religiosa* stands (oyamel), in Aquixtla, Puebla. Sixteen sampling units were set up in pure stands of oyamel, locating five quadrats 1 m² in size within each sampling unit, where all vegetation was collected and registered. We estimated species richness, as well as Shannon-Weiner and Simpson diversity indices. Canopy structure and light environment were also evaluated with hemispherical photography. Analysis included the use of Pearson correlation coefficient and linear regression. Shannon-Weiner diversity index ranged from 0.98 to 2.52, whereas Simpson index fluctuated from 0.48 to 0.89. Species richness showed a significant relationship with gap fraction ($R^2 = 0.68$, $p < 0.001$), with Shannon-Weiner index ($R^2 = 0.51$; $p < 0.01$), and with Simpson index ($R^2 = 0.34$; $p < 0.05$). We conclude that canopy structure has a significant positive effect on understory diversity, since it

increases light availability and heterogeneity, which would promote the presence of species with different light requirements.

Index words: *Abies religiosa*, canopy openness, hemispherical photography, diversity indices.

INTRODUCCIÓN

El sotobosque contiene la mayor proporción de diversidad biológica existente en bosques templados y boreales, además de ser hábitat de diversas especies de insectos y mamíferos y dar origen a diversos productos forestales no maderables (Ampoorter et al., 2014). Es determinante también en la composición y estructura de ecosistemas forestales (Hansen et al., 1991), ya que interviene en el flujo de energía, dinámica del carbono y ciclo de nutrientes (Kimmins, 2004), así como en la composición y estructura del dosel, a pesar de su relativa baja contribución a la biomasa forestal total (McIntosh, Macdonald & Quideau., 2016).

La diversidad vegetal del sotobosque se relaciona con la heterogeneidad ambiental, estructural y biológica del dosel, y con características del suelo (Chávez & Macdonald, 2010), lo que establece complejas relaciones entre los componentes del ecosistema (Kern et al., 2013) que mantienen su funcionalidad y contribuyen a su estabilidad y productividad (Gustafsson et al., 2012; Lefcheck et al., 2015). Así, la diversidad del sotobosque se explica a partir del incremento en la heterogeneidad del microambiente como de la vegetación (Reich et al., 2012).

En particular, la radiación solar es uno de los principales recursos limitantes para el establecimiento de especies vegetales bajo el dosel, por lo que incrementos en la disponibilidad de luz influyen en la abundancia de las especies vegetales, sobre todo por efecto de la competencia, lo que afecta la riqueza de especies (Tinya & Ódor,

2016). La radiación solar, directa y difusa, que incide en un sitio influye los procesos fisiológicos, morfológicos y reproductivos de los organismos, y los procesos químicos y físicos del ecosistema (Promis et al., 2009). El balance entre la radiación solar incidente en el dosel y el sotobosque, y su distribución espacial y temporal, dependerán de la transmisión e intercepción de la radiación por y a través de la cubierta vegetal (Webster et al., 2016), lo que está determinado por la densidad, tamaño y distribución de las copas de los árboles (i.e. su estructura) (Saavedra-Romero et al., 2016).

En este estudio, se evaluó la estructura del dosel con fotografías hemisféricas (FH), para estimar regímenes de iluminación (Seidel et al., 2011) por medio de índices de transmisión de radiación, frecuencia y duración de haces de luz, y proporción de luz directa y difusa (Frazer, 1999). Además, se analizó la riqueza de especies y diversidad alfa del sotobosque como respuesta a la heterogeneidad lumínica (Gilliam, 2014). El objetivo principal fue evaluar cómo la estructura del dosel y la disponibilidad de luz, influyen en la diversidad del sotobosque en rodales puros de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. en el municipio de Aquixtla, Puebla.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio y muestreo

El estudio se realizó en La Reserva Forestal Multifuncional “El Manantial” S. C. (PRF “El Manantial”) ubicada en la “Sierra Norte” de Puebla (Fig. 1), con una superficie total de 266.8 ha, entre los 19° 42' 27.4" y 19° 44' 37.6" norte y los 98° 00' 43.9" y 97° 58' 56.5" oeste, en los municipios de Aquixtla e Ixtacamaxtitlán. La reserva se encuentra dentro de la Región Hidrológica No. 27 Tuxpan-Nautla, tiene topografía accidentada con pendientes de 20 a 60 %, y con 2650 a 3178 m de altitud (Castaños-Martínez & Castro-Zavala, 2014).

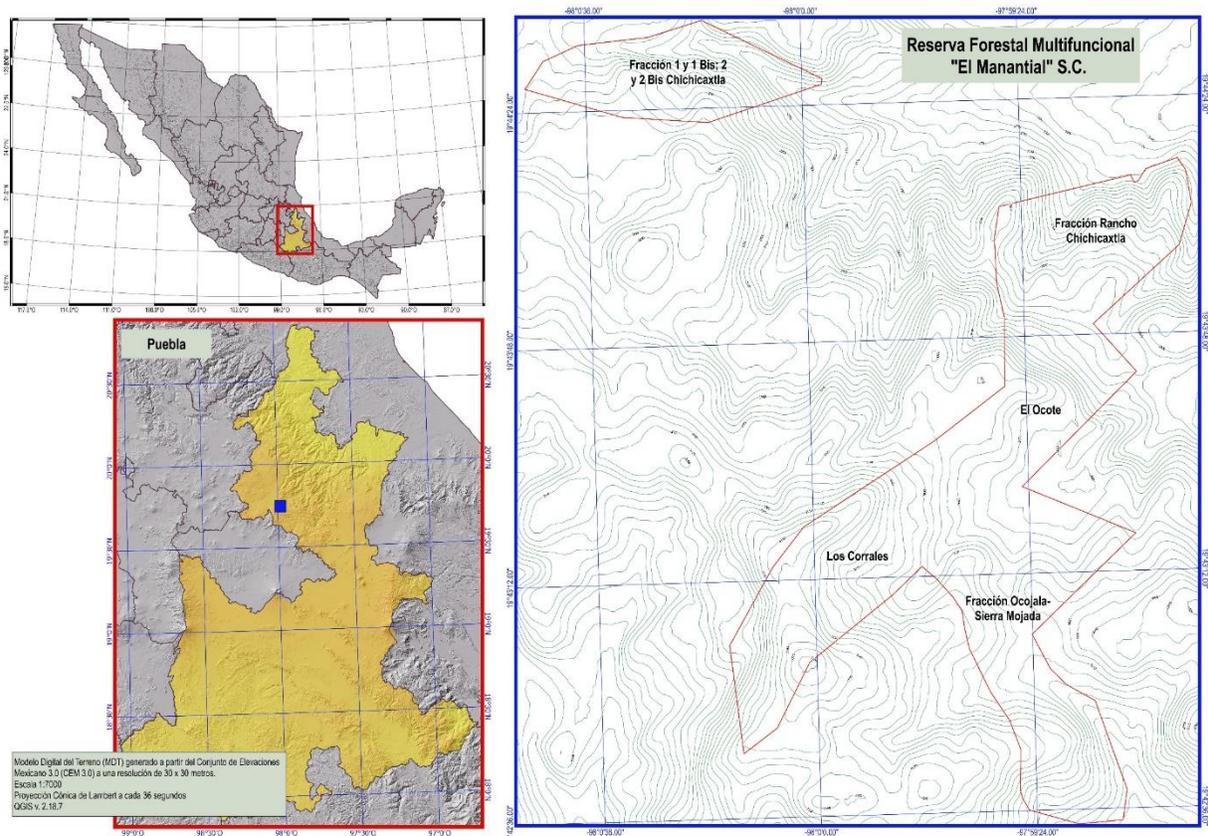


Figura I. Ubicación del Conjunto Predial Reserva Forestal "El Manantial", Aquixtla, Puebla.

Se identifican dos tipos de climas: 1) templado subhúmedo con lluvias en verano $C(w_1)$ por debajo de la cota de los 3000 m, con temperatura media anual de 12° a 18°C , y precipitación total de 600 a 1000 mm anuales; 2) templado subhúmedo de mayor humedad $C(w_2)$ por arriba de 3000 msnm, y precipitación total de 700 a 1500 mm anuales. La vegetación dominante son bosques mezclados de pino (*Pinus patula*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite* var. *veitchii*, *P. rudis* y *P. teocote*) y oyamel en diferentes proporciones, y masas puras de pino (*P. patula*) y de oyamel. En el estrato arbustivo dominan *Arbutus xalapensis* y *Baccharis conferta* (Castaños-Martínez & Castro-Zavala, 2014).

Se establecieron 16 parcelas de 500 m^2 (UM) (2.3 % de intensidad de muestreo) del área que

ocupa el bosque de oyamel en el predio, en las cuales se registró a los árboles con diámetro normal (1.3 m) igual o mayor a 0.05 m, se les estimó su altura (m, H) y se midió su diámetro normal (cm, d_n). Se delimitaron cinco sub-unidades de 1 m^2 ($n = 80$), a 10 m de distancia partir del centro de cada UM (Goslee, 2006) hacia los cuatro puntos cardinales con una sub-unidad en el centro de la UM. En cada sub-unidad se identificaron y cuantificaron las especies vasculares del sotobosque, de las no vasculares (e.g. briofitas) solo se registró su presencia. Se colectaron muestras de los individuos que no fue posible determinar taxonómicamente, para después identificarlos y depositarlos en el Herbario de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo. Las actividades de campo se realizaron en agosto y septiembre de 2017.

Tabla I. Variables suministradas para análisis de fotografías hemisféricas con el software GLA©.

Variable	Valor
Índice de nubosidad	0.50
Fracción del espectro electromagnético	0.45
Fracción de la radiación directa incidente	0.50
Coefficiente de transmisión bajo cielo claro (μm)	0.65
Valor de la constante solar ($W.m^2$)	1367
Intensidad del sol en condiciones de cielo nublado	UOC

UOC = Universal Overcast Sky, que considera que en condiciones de cielo nublado uniforme la radiación incidente es isotrópica (Schleppi & Paquette, 2017).

Estimación de estructura del dosel y régimen de luz

En cada UM se ubicaron cinco puntos para tomar fotografías hemisféricas (FH), estimar radiación solar y fracción de cielo visible, y establecer su relación con índices de diversidad (Tinya & Ódor, 2016). Se capturaron 80 fotografías con una cámara digital Canon® EOS SLI APS-C sensor CMOS de 18 megapíxeles, provista de una lente hemisférica “ojo de pescado” Rokinon® 8 mm F3.5 HD, y nivel de burbuja Polaroid® de doble eje. El equipo se montó en un trípode a 1.30 m sobre el nivel del suelo, para facilitar su nivelación horizontal y orientación hacia el norte.

Se usaron protocolos estándar (Zhang Chen, & Miller., 2005) para lo cual se controla la apertura del lente y la velocidad de obturación (Leblanc & Fournier, 2014). La apertura del lente fue de f5.6 con velocidad de obturación de 1/125 segundos, y sensibilidad ISO 400 (1/4 de segundo). La calidad de las imágenes fue de 5184 x 3456 píxeles con resolución vertical y horizontal de 350 ppp (puntos por pulgada) en formato JPEG a color y RAW.

El procesamiento y análisis de las FH se realizó con el software Gap Light Analyzer© (GLA) v.2.0 conforme al procedimiento descrito en el manual del usuario (Nobis & Hunziker, 2005). Para analizar cada fotografía se suministró información

del sitio de captura (i.e. latitud, longitud, altitud, exposición y pendiente), además del período de análisis (365 días). En la configuración previa se proporcionaron parámetros de ajuste (Tabla I) (Schleppi & Paquette, 2017).

Con GLA© se estimaron la fracción de apertura del dosel (FAD) e índice de área foliar (IAF) como indicadores de estructura (Plateros-Gastélum et al., 2018). Se calcularon también luz directa (TransDir) y luz difusa (TransDif) transmitidas a través del dosel como estimadores de luminosidad en función de la radiación incidente por encima del dosel (Seidel, Fleck, & Leuschner., 2012), duración promedio acumulada de haces de luz (DAS), duración media de un haz de luz (DPS) y frecuencia relativa de haces de luz (FRH) para describir la duración en minutos de la radiación solar susceptible de alcanzar un punto en el sotobosque (Hu et al., 2010).

La distribución de frecuencia relativa de haces de luz se realizó utilizando la clasificación propuesta por (Smith & Berry, 2013), que divide a los episodios de radiación solar de la siguiente forma: haz de luz (sunflecks), intensidad menor al 100 % y duración menor a 8 minutos (SF), parche o mancha de luz (sunpatch), episodios con intensidades del 100 % y mayores a 8 minutos (SP), claro de luz (sungap) episodios mayores a 60 minutos (SG), y claros (clearing) episodios mayores a 120 minutos (CL).

También, con GLA© se estimaron porcentajes de radiación incidente directa, difusa y total transmitida a través de claros, y porcentaje de radiación transmitida a través de claros, lo que en conjunto se denomina índice de transmisión de luz (GLI).

El GLI es similar al índice de luz en claros (Gap Light Index - GLI) (Canham, 1988), que especifica el porcentaje de Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) incidente, transmitida a través de un claro hacia cualquier punto sobre el sotobosque durante un período de tiempo, y permite relacionar el tamaño y la forma de un claro con la transmisión de RFA tanto directa como difusa a cualquier punto dentro o fuera del claro.

$$GLI = [(T_{difusa} P_{difusa}) + (T_{directa} P_{directa})] [100]$$

Donde, P_{difusa} y $P_{directa}$ son las proporciones de RFA incidente en la parte superior del dosel como radiación difusa y radiación directa, respectivamente ($P_{difusa} = 1 - P_{directa}$); y T_{difusa} y $T_{directa}$ son las proporciones de radiación difusa y directa transmitidas a través de un claro. GLI toma valores de cero cuando no está definido un claro visible en el dosel y un máximo de 100 que corresponde a un sitio con ausencia de dosel o a cielo abierto (Bartemucci, Messier & Canham., 2006).

Estimación de la biodiversidad del sotobosque

Se utilizó el conteo directo del número de especies en muestras de igual tamaño (5.0 m² por UM) como alternativa al uso de índices de riqueza (S), sin considerar la proporción y distribución de cada especie. La riqueza de especies no muestra cómo se encuentra distribuida u organizada la diversidad dentro de la comunidad, pero es un parámetro útil para comparar localidades diferentes (Roswell, Dushoff & Winfree., 2021).

Se estimaron también los índices de Shannon-Wiener (H') y el de dominancia de Simpson (D_{SI}), ya que éstos permiten incorporar la riqueza y densidad de especies. El primero combina información de riqueza y la equidad (Magurran, 2004), y el segundo se considera un buen estimador de la diversidad en muestras pequeñas, además de capturar la varianza de las abundancias de las especies. Cada índice de diversidad se calculó por UM, con el paquete R© a través de Vegan 2.4-5 desarrollado para cálculos de diversidad biológica (Oksanen, 2013).

Análisis estadístico

Éste se realizó con R© (R Core Team, 2000) (Venables & Smith, 2017). Para cada variable de estructura del rodal, del dosel, y de la duración y distribución de la radiación solar, se calcularon valores promedio, desviación estándar y coeficiente de variación por UM. Se realizó un análisis de correlación de Pearson entre variables estructurales y las de disponibilidad de luz, para ajustar modelos de asociación entre ellas con regresión lineal simple. Los modelos de regresión que se presentan, corresponden a las relaciones que fueron significativas ($p < 0.01$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Riqueza y diversidad del sotobosque

Se colectó un total de 44 especies de plantas en el sotobosque analizado (Tabla 2). Del total no se pudo identificar a siete ejemplares, ya que se encontraban en etapa juvenil durante la colecta y carecían de diferenciación morfológica clara para su identificación.

La riqueza entre unidades de muestreo tuvo una variación de entre 6 y 19 especies vasculares y de briofitas. La riqueza total de especies en el bosque estudiado ($S = 44$), fue mayor a la reportada por Castro-Luna (2013) ($S = 39$) para bosques de oyamel en el Estado de México, pero menor a la obtenida por Sánchez González et al. (2006) para transectos altitudinales de 3000 a 3500 m en el

Tabla 2. Taxones registrados e identificados en las sub-unidades de muestreo.

División	Clase	Familia	Especie
POLYPODIOPHYTA			
POLYPODIOPSISIDA			
		Polypodiaceae	<i>Polypodium polypodioides</i> (L.) Watt
		Aspleniaceae	<i>Asplenium monanthes</i> L.
PINOPHYTA			
PINOPSISIDA			
		Pinaceae	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham.
MAGNOLIOPHYTA			
LILIOPSISIDA			
		Poaceae	<i>Brachypodium mexicanum</i> (Roem. et Schult.) Link <i>Piptochaetium fimbriatum</i> (Kunth) Hitchc
		Orchidaceae	<i>Deiregyne eriophora</i> (B.L. Rob. y Greenm.) Garay
MAGNOLIOPSISIDA			
		Asteraceae	<i>Baccharis conferta</i> Kunth <i>Archibaccharis serratifolia</i> (Kunth) S.F. Blake <i>Erigeron galeottii</i> (A.Gray) Greene <i>Senecio callosus</i> Sch.Bip. <i>Stevia monardifolia</i> Kunth <i>Bidens odorata</i> Cav. <i>Bidens pilosa</i> L. <i>Ageratina glabrata</i> (Kunth) R.M. King y H. Rob. <i>Gnaphalium viscosum</i> Kunth <i>Roldana platanifolia</i> (Benth.) H. Rob. y Brettell
		Rosaceae	<i>Alchemilla procumbens</i> Rose <i>Acaena elongata</i> L. <i>Rubus pringlei</i> Rydb.
		Solanaceae	<i>Cestrum elegans</i> (Brongn.) Schltdl. <i>Solanum nigrescens</i> M. Martens y Galeotti
		Fagaceae	<i>Quercus</i> sp.

Caryophyllaceae	<i>Arenaria lanuginosa</i> (Michx.) Rohrb
Ericaceae	<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth <i>Pernettya ciliata</i> (Schltdl. ety Cham.) Small
Grossulariaceae	<i>Ribes ciliatum</i> Humb. et Bonpl. ex Roem. et Schult.
Lamiaceae	<i>Salvia elegans</i> Vahl. <i>Lepechinia caulescens</i> (Ortega) Epling
Oxalidaceae	<i>Oxalis alpina</i> (Rose) R.Knuth
Rubiaceae	<i>Didymaea alsinoides</i> (Cham. et Schltdl.) Standl. <i>Galium hypocarpium</i> (L.) Endl. ex Griseb. <i>Hamelia patens</i> Jacq.
Plantaginaceae	<i>Plantago australis</i> Lam.
Pyrolaceae	<i>Monotropa uniflora</i> L.
Caprifoliaceae	<i>Lonicera mexicana</i> (Kunth) Rehder.
Geraniaceae	<i>Geranium seemannii</i> Peyr. <i>Geranium lilacinum</i> R. Knuth

oriente del Estado de México ($S = 137$); en este trabajo, las UM se distribuyeron en un intervalo altitudinal menor (2860 a 3157 m).

La riqueza obtenida fue también menor a la reportada en otros trabajos en Jalisco ($S = 64$) (Cuevas-Guzmán et al., 2011), Veracruz ($S = 122$) (Narave, 1985) y Coahuila ($S = 73$) (Encina-Domínguez et al., 2008). Sin embargo, es pertinente señalar que dichos trabajos se realizaron en bosques mezclados de oyamel con elementos de bosque mesófilo en Jalisco, o de pino, encino y *Pseudotsuga* sp. en el resto de las localidades, lo cual pudo ser factor para obtener mayor riqueza en comparación con el presente estudio, además de variaciones en la superficie de muestreo.

Las especies colectadas pertenecen a 19 familias (Fig. 2), siendo la más numerosa Asteraceae con nueve géneros (*Ageratina*, *Stevia*, *Bidens*, *Baccharis*, *Roldana*, *Erigeron*, *Senecio*, *Archibaccharis* y *Gnaphalium*), seguida de Ericaceae y Rosaceae con tres géneros cada una. Las familias Rubiaceae, Poaceae, Solanaceae, y Lamiaceae presentaron dos géneros cada una, mientras que el resto solo uno, que es el caso de Aspleniaceae, Orchidaceae, Apiaceae, Grossulariaceae, Plantaginaceae, Polypodiaceae, Oxalidaceae, Pinaceae, Fagaceae, Caryophyllaceae, Caprifoliaceae y Geraniaceae (ésta última con dos especies). Los géneros y especies registrados en este estudio son frecuentes en bosques de oyamel de otras áreas de México, y coincide la familia Asteraceae como la más numerosa en cuanto a

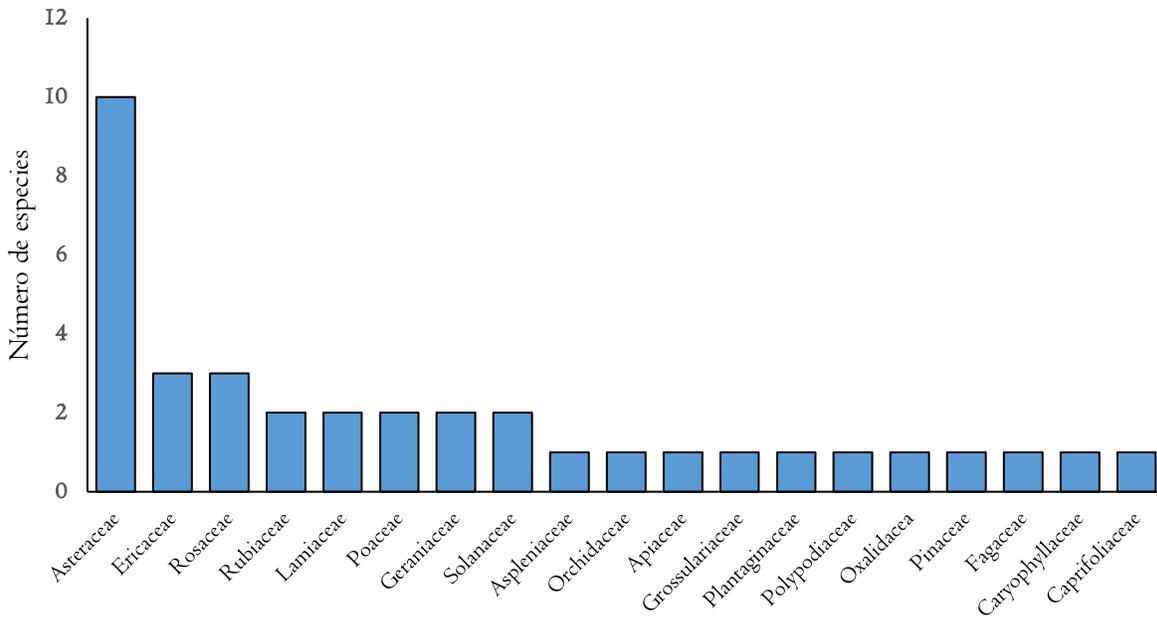


Figura 2. Distribución de especies por familia taxonómica bajo el dosel de bosques de oyamel en Aquixtla, Puebla.

géneros (Cuevas-Guzmán et al., 2011; Sánchez-González, López-Mata & Granados-Sánchez., 2005; Sánchez, López & Vibrans., 2006). Esto se relaciona con la amplia presencia y diversidad de esta familia en México, ya que cuenta con 3,113 especies de las cuales 3,050 son nativas y 1,988 (63.9 %) endémicas, y cabe resaltar que los géneros *Ageratina* y *Stevia* reportados en este estudio, destacan por su componente endémico de especies (Villaseñor, 2018).

La composición florística de bosques de oyamel de la franja Volcánica Transversal de México, se caracteriza porque una proporción pequeña de familias agrupa a la mayoría de géneros y especies presentes (Sánchez-González et al., 2005). Los resultados de este estudio coinciden con esta aseveración, ya que el 59 % de las especies se concentró en ocho familias, que concuerdan con las reportadas para otros bosques de oyamel en la faja volcánica transmexicana (Sánchez et al., 2006). Asimismo, el 29.6 % de las especies identificadas, a saber, *Abies religiosa*, *Baccharis conferta*, *Geranium seemanni*, *Arbutus xalapensis*, *Ribes ciliatum*, *Monotropa uniflora*, *Brachypodium mexicanum*, *Rubus pringle* Rydb,

Didymaea alsinoides, *Arenaria lanuginosa*, *Senecio callosus*, *Alchemilla procumbens* y *Acaena elongata*, coinciden con las especies reportadas como las más frecuentes en bosques de oyamel de esta región florística (Sánchez-González et al., 2005).

El índice de Shannon-Wiener (H') presentó valores de 0.98 a 2.52, de un valor de máxima diversidad esperada $H'_{máx.} = 3.78$ para $S = 44$; mientras que el índice de Simpson (D_{Sj}) tuvo valores en un intervalo de 0.48 a 0.89. Para bosques de oyamel de los Parques Nacionales Zoquiapan e Iztacihuatl-Popocatepetl, se reportan valores entre 0.62 y 2.59 para el índice de Shannon-Wiener (Castro-Luna, 2013), que están dentro del intervalo obtenido en este estudio aun cuando la intensidad de muestreo fue menor. El índice de Simpson tuvo valores más altos a los reportados en bosques mezclados de pino, con intervalos de 0.09 a 0.32, pero semejantes a los encontrados en bosques de oyamel en el PN Zoquiapan e Iztacihuatl-Popocatepetl con D_{Sj} de 0.08 y 0.71 (Castro-Luna, 2013).

Relación entre diversidad y estructura del dosel

Alrededor del 70 % de la riqueza de especies (S) se explica por la apertura del dosel (FAD) ($R^2 = 0.68$; $p < 0.001$), o por el área foliar del rodal (IAF) ($R^2 = 0.69$; $p < 0.001$). El índice de Shannon-Wiener (H') tuvo una relación lineal positiva con FAD ($R^2 = 0.51$; $p < 0.01$) y negativa con el IAF ($R^2 = 0.55$; $p < 0.001$); de igual forma, el índice de Simpson (D_{SI}) presentó relación lineal positiva con FAD ($R^2 = 0.34$; $p < 0.05$) y negativa con el IAF ($R^2 = 0.39$; $p < 0.01$).

La relación entre el índice de Shannon-Wiener con FAD se describe con el modelo lineal $H' = 3.6285 \cdot \text{FAD} + 0.9814$ ($R^2 = 0.51$, $p < 0.01$) (Fig. 3a), mientras que su relación con el IAF se describe con $H' = -0.937 \cdot \text{IAF} + 3.3821$ ($R^2 = 0.55$, $p < 0.001$) (Fig. 3b). La relación entre la diversidad y la cobertura se ha descrito también para bosques caducifolios de Norteamérica con coberturas $< 50\%$ y valores de $H' = 2.5$ (McEwan & Muller, 2011).

Los resultados coinciden con el supuesto de que la composición y estructura de los rodales es determinante para las comunidades vegetales del sotobosque (Fahey & Puettmann, 2007). Dada la

influencia del dosel en la riqueza y diversidad, variaciones en la densidad arbórea expresada por la apertura o el índice de área foliar, afectarán de manera determinante a las comunidades vegetales que integran al sotobosque (Macdonald & Fenniak, 2007). Un incremento en la apertura del dosel de estos bosques tendría efectos positivos sobre la riqueza y la diversidad del sotobosque, al incrementar la heterogeneidad y disponibilidad de luz promoviendo diferencias en la distribución espacial local de especies (Kern et al., 2013).

Esto tiene implicaciones al reducir la cobertura arbórea con prácticas silvícolas, lo que podría incrementar o disminuir la heterogeneidad horizontal y vertical del ambiente lumínico del sotobosque en función de la intensidad de corta (Comeau, 2002). Podría promoverse el establecimiento de especies tolerantes o intolerantes, tanto arbóreas como herbáceas, para orientar el desarrollo futuro del rodal a partir de la tasa de reclutamiento de especies ya presentes o de otras. Por otro lado, incrementos en el índice de área foliar implicarían modificaciones del ambiente lumínico al disminuir la capacidad de transmisión de radiación, lo que afectaría a la composición vegetal del sotobosque.

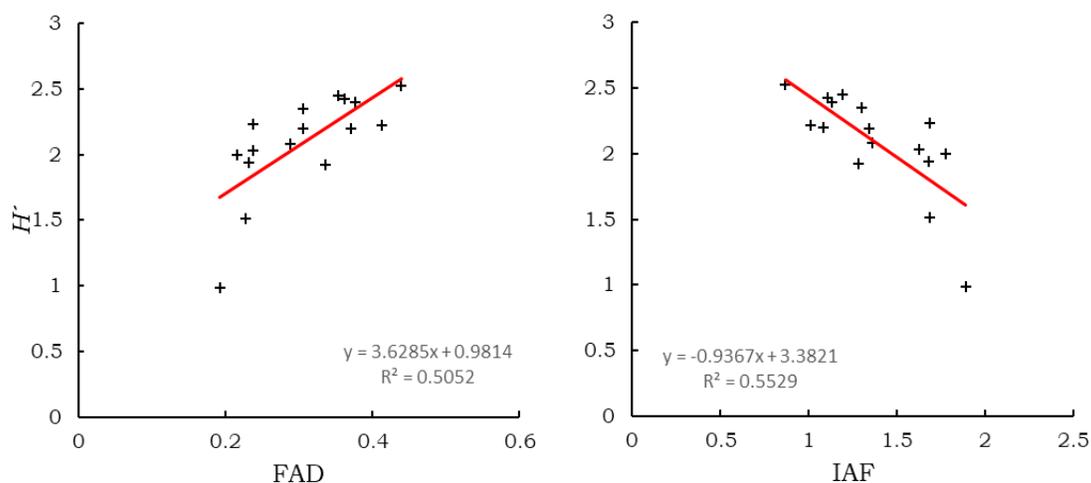


Figura 3. Relación entre el índice de diversidad de Shannon-Wiener (H'), a) con la fracción de apertura del dosel (FAD) y b) con el índice de área foliar (IAF).

Relación entre diversidad y transmisión de radiación solar

Los parámetros de transmisión de luz explican entre 70 y 76 % de la riqueza de especies: radiación directa transmitida (TransDir) ($R^2 = 0.76$; $p < 0.001$) (Fig. 4a), radiación difusa transmitida (TransDif) ($R^2 = 0.69$; $p < 0.001$) (Fig. 4b) e índice de transmisión de luz (GLI) ($R^2 = 0.74$; $p < 0.001$) (Fig. 4c). La relación del índice de Shannon-Wiener (H') con la radiación directa transmitida (TransDir) es positiva ($R^2 = 0.65$; $p < 0.001$) (Fig. 4d), con la luz difusa transmitida (TransDif) ($R^2 = 0.52$; $p < 0.001$) (Fig. 4e) y con el índice de transmisión de luz (GLI) ($R^2 = 0.60$; $p < 0.001$) (Fig. 4f).

El índice de Simpson (D_{SI}) fue el que presentó las correlaciones más bajas, aunque significativas, con parámetros de transmisión de luz, y menos de la mitad de la variación en D_{SI} se explica por cambios en algunos de estos parámetros: TransDir ($R^2 = 0.47$; $p < 0.001$) (Fig. 4g), TransDif ($R^2 = 0.37$; $p < 0.05$) (Fig. 4h) y GLI ($R^2 = 0.43$, $p < 0.01$) (Fig. 4i).

Relaciones entre diversidad y régimen de luz

Entre el 37 % y el 77 % de la variación en índices de diversidad y riqueza se explica con parámetros que moldean el régimen de luz bajo el dosel. La duración acumulada media de haces de luz (DAS) explica el 77 % de la riqueza ($p < 0.001$) (Fig. 5a), la duración media de un haz de luz (DPS-no presentada) el 41 % ($p < 0.01$), y la incidencia de haces o destellos de luz (SF-no presentada) el 37 % ($p < 0.05$).

Con el resto de parámetros, la riqueza tuvo una relación baja, aunque significativa, a saber, con parches o machas de luz (SP-no presentada) ($R^2 = 0.33$; $p < 0.05$); claros de luz (SG-no mostrada) ($R^2 = 0.30$; $p < 0.05$) y claros (CL- no presentada) ($R^2 = 0.30$; $p < 0.05$).

El análisis de regresión entre el índice de Shannon-Wiener (H') estableció la existencia de una relación significativa ($p < 0.001$) con la duración acumulada media de haces de luz (DAS) ($R^2 = 0.67$) (Fig. 5b); mientras que con la duración media de un haz de luz (DPS-no mostrada) ($R^2 = 0.27$) y parches o manchas de luz (SP- no mostrada) ($R^2 = 0.27$), ambas significativas ($p < 0.05$); y negativa para la incidencia de haces o destellos de luz (SF- no mostrada) ($R^2 = 0.28$).

No se encontraron relaciones significativas ($p > 0.05$) con ningún índice de diversidad o riqueza con CG (eventos lumínicos entre 60 y menos de 120 min) y CL (eventos lumínicos mayores o iguales a 120 min). Finalmente, el índice de Simpson (D_{SI}) solo se relacionó de manera significativa y positiva con la duración acumulada media de haces de luz (DAS) ($R^2 = 0.49$; $p < 0.01$) (Fig. 5c). Con el resto de parámetros del régimen y distribución de luz (e.g. DPS, SF, SP, SG y CL) no hubo relaciones significativas.

Así, el índice de Shannon-Wiener (H') y la riqueza (S) fueron más sensibles a las variaciones en el régimen de luz bajo dosel que el índice de Simpson. En particular, S mostró relación con variaciones en el régimen de radiación, debido a que incrementos en la distribución de eventos lumínicos con diversos periodos de duración da como resultado ambientes lumínicos heterogéneos, que crean diferentes nichos susceptibles de ser ocupados por especies con requerimientos específicos, incrementando la riqueza del sotobosque (Scanga, 2014).

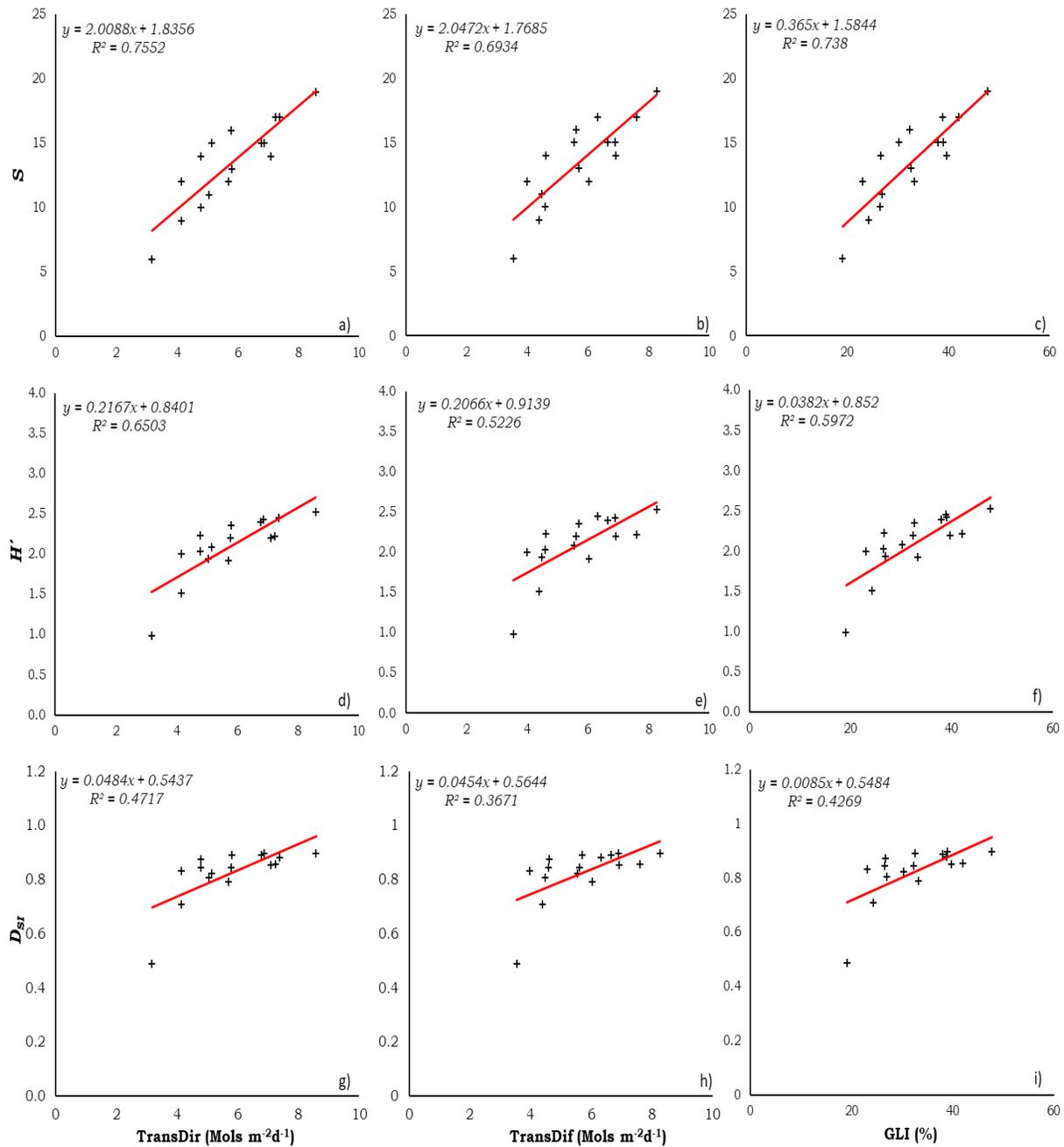


Figura 4. Relación entre riqueza de especies (S) gráficas a, b, c, índice de diversidad de Shannon-Wiener (H'), gráficas d, e, f; e índice de Simpson (D_{sr} , gráficas g, h, i, con los parámetros de transmisión de luz: radiación directa transmitida a través del dosel (TransDir), radiación difusa transmitida (TransDif) e índice de transmisión de luz (GLI).

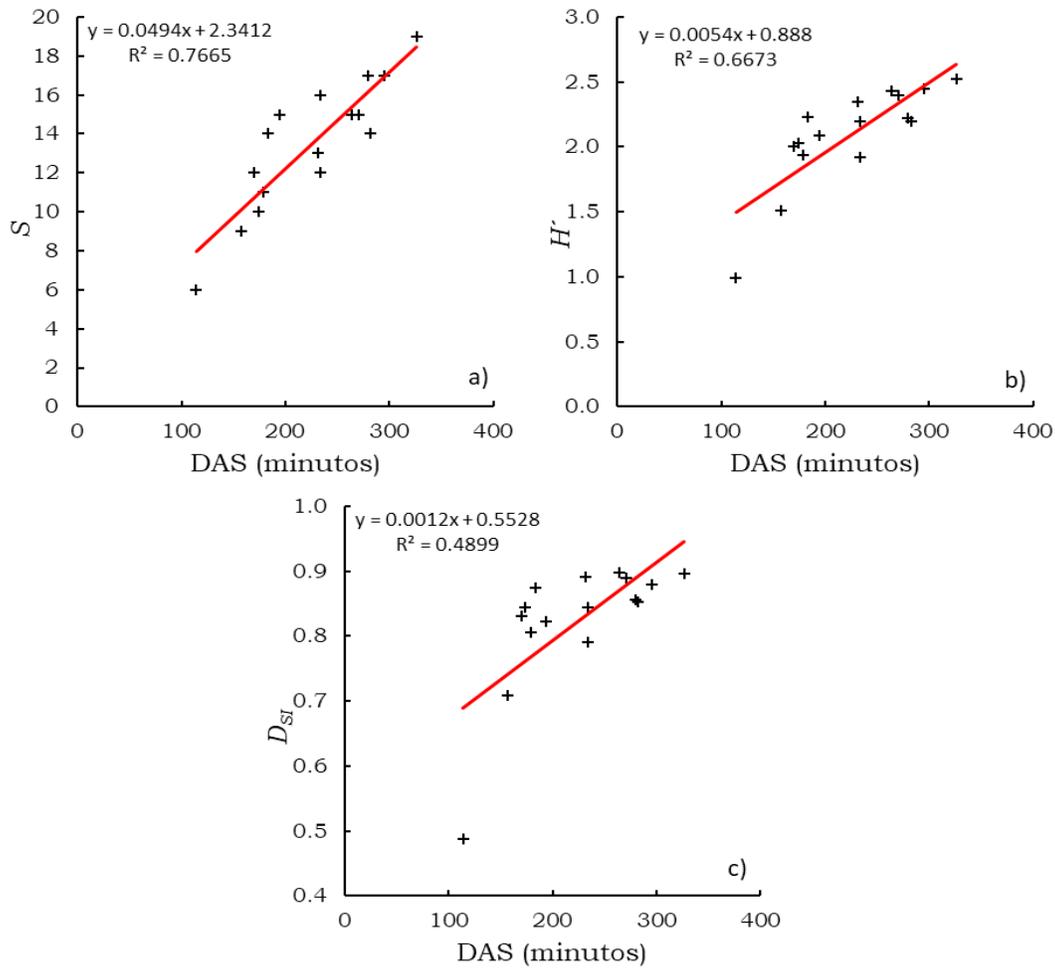


Figura 5. Relación entre la riqueza de especies (S), a) índice de diversidad de Shannon-Wiener (H'), b), y Simpson (D_{St}), c) con el parámetro de duración acumulada de luz (DAS), bajo el dosel de *Abies religiosa*.

La variación en la riqueza de especies se explica por condiciones abióticas, biomasa, disturbio y radiación solar (Grace & Pugsek, 1997), por lo que es posible sustentar que la luz no es el único factor determinante en la diversidad vegetal bajo el dosel forestal; esto se observa en parte en los valores de correlación entre medidas de diversidad con parámetros de frecuencia y distribución de radiación solar en este estudio. Es decir, valores bajos pueden anticiparse dada la influencia de múltiples factores micro-ambientales y de otra índole sobre la biodiversidad del sotobosque.

Sin embargo, es pertinente resaltar también que, al menos el 30 % de la variación total en la diversidad vegetal encontrada en los rodales analizados se explica por variaciones en regímenes lumínicos en el sotobosque. Los resultados obtenidos muestran que la duración acumulada media de haces de luz por día (*i.e.* de radiación directa) contribuye de manera significativa a incrementar tanto la riqueza como la diversidad bajo el dosel, debido en parte a que la radiación solar es uno de los principales factores limitantes para la vegetación forestal y la riqueza de especies.

Lo anterior se explica en parte porque incrementos en la disponibilidad de luz diaria, es decir, en la densidad del flujo de fotones (PFD) ($\mu\text{mol m}^{-2}/\text{día}$), se relacionan con la tasa de fotosíntesis diaria ($\mu\text{mol m}^{-2}/\text{día}$), que a su vez, se refleja en la tasa de crecimiento relativo ($\text{g g}^{-1}/\text{año}$). Así, la DAS tiene una influencia significativa en los procesos de crecimiento, sobrevivencia y reproducción de las comunidades vegetales permitiendo la coexistencia de diversas especies (Chen, 2003). Es posible entonces aceptar una relación entre riqueza y diversidad del sotobosque con la duración acumulada media de haces de luz por día (*i.e.* acumulación de eventos lumínicos), lo que representa mayor disponibilidad de luz bajo el dosel.

CONCLUSIONES

Los modelos de regresión lineal simple, ajustados para explicar y estimar de manera sencilla la riqueza de especies y la diversidad a partir de parámetros de estructura del dosel y del régimen de luz, explican la variación en riqueza y en menor grado la diversidad, particularmente para el índice de Shannon-Weiner. La apertura del dosel, índice de área foliar y duración media acumulada de luz pueden utilizarse para explicar parte de la variación en riqueza de especies, lo que sugiere la factibilidad de que parámetros de estructura del dosel y régimen de luz, obtenidos mediante fotografías hemisféricas, sean usados para proveer estimaciones de riqueza y diversidad bajo el dosel de oyamel.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por la beca otorgada al primer autor para sus estudios de Postgrado; a los Ing. León Jorge Castaños Martínez y Salvador Castro Zavala por el apoyo recibido para realizar esta investigación en la RMF El Manantial, S.C.

REFERENCIAS

- Ampoorter, E., Baeten, L., Koricheva, J., Vanhellemont, M., & Verheyen, K. (2014). Do diverse overstoreys induce diverse understoreys? Lessons learnt from an experimental–observational platform in Finland. *Forest Ecology and Management*, 318, 206-215. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.01.030>
- Bartemucci, P., Messier, C., & Canham, C.D. (2006). Overstory influences on light attenuation patterns and understory plant community diversity and composition in southern boreal forests of Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(9), 2065-2079. <https://doi.org/10.1139/X06-088>
- Canham, C. D. (1988). An index for understory light levels in and around canopy gaps. *Ecology*, 69(5), 1634-1638. <https://doi.org/10.2307/1941664>
- Castaños-Martínez, L., & Castro-Zavala, S. (2014). Manejo forestal: Reserva Forestal Multifuncional “El Manantial” SC Conceptos, Conductas y Acciones. *Zapopan, México: Comisión Nacional Forestal*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Castro-Luna, M. (2013). *Registro de la riqueza herbácea y arbustiva en el bosque de Abies religiosa de la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Izta-Popo y el Parque Nacional Zoquiapan* Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores “Zaragoza”, UNAM 179 p].
- Chávez, V., & Macdonald, S. (2010). The influence of canopy patch mosaics on understory plant community composition in boreal mixedwood forest. *Forest ecology and management*, 259(6), 1067-1075. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.12.013>
- Chen, H. Y. (2003). Characteristics of Light Availability under Forest Canopies and its Influences on Photosynthesis of Understory Plants. *Forest Ecosystems*, 5(3), 54-62.

- Comeau, P.G. (2002). Relationships between stand parameters and understorey light in boreal aspen stands. *Journal of Ecosystems and Management*, 1(2), 8. <https://doi.org/10.22230/jem.2002v1n2a240>
- 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*, 8(4), 1219-1233.
- Encina-Domínguez, J.A., Encina-Domínguez, F.J., Mata-Rocha, E., & Valdes-Reyna, J. (2008). Aspectos estructurales, composición florística y caracterización ecológica del bosque de oyamel de la Sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*(83), 13-24.
- Fahey, R.T., & Puettmann, K.J. (2007). Ground-layer disturbance and initial conditions influence gap partitioning of understorey vegetation. *Journal of Ecology*, 1098-1109. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01283.x>
- Frazer, G. (1999). Gap light analyzer (GLA). *Users Manual and program Documentation, Version 2.0*, 36.
- Gilliam, F. (2014). *The herbaceous layer in forests of eastern North America*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199837656.001.0001>
- Goslee, S.C. (2006). Behavior of vegetation sampling methods in the presence of spatial autocorrelation. *Plant Ecology*, 187(2), 203-212. <https://doi.org/10.1007/s11258-005-3495-x>
- Grace, J.B., & Pugsek, B.H. (1997). A structural equation model of plant species richness and its application to a coastal wetland. *The American Naturalist*, 149(3), 436-460. <https://doi.org/10.1086/285999>
- Gustafsson, L., Baker, S.C., Bauhus, J., Beese, W.J., Brodie, A., Kouki, J., . . . Messier, C. (2012). Retention forestry to maintain multifunctional forests: a world perspective. *BioScience*, 62(7), 633-645. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.7.6>
- Hansen, A.J., Spies, T.A., Swanson, F.J., & Ohmann, J.L. (1991). Conserving biodiversity in managed forests. *BioScience*, 41(6), 382-392. <https://doi.org/10.2307/1311745>
- Hu, L., Yan, B., Wu, X., & Li, J. (2010). Calculation method for sunshine duration in canopy gaps and its application in analyzing gap light regimes. *Forest ecology and management*, 259(3), 350-359. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.10.029>
- Kern, C.C., Montgomery, R.A., Reich, P.B., & Strong, T.F. (2013). Canopy gap size influences niche partitioning of the ground-layer plant community in a northern temperate forest. *Journal of Plant Ecology*, 6(1), 101-112. <https://doi.org/10.1093/jpe/rts016>
- Kimmins, J.P. (2004). Forest ecology. In T.G. Northcote & G.F. Hartman (Eds.), *Fishes and forestry: Worldwide watershed interactions and management* (pp. 17-43). Blackwell, Oxford, United Kingdom.
- Leblanc, S., & Fournier, R. (2014). Hemispherical photography simulations with an architectural model to assess retrieval of leaf area index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 194, 64-76. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.03.016>
- Lefcheck, J.S., Byrnes, J.E., Isbell, F., Gamfeldt, L., Griffin, J.N., Eisenhauer, N., . . . Duffy, J.E. (2015). Biodiversity enhances ecosystem multifunctionality across trophic levels and habitats. *Nature communications*, 6(1), 1-7. <https://doi.org/10.1038/ncomms7936>
- Macdonald, S.E., & Fenniak, T.E. (2007). Understorey plant communities of boreal mixedwood forests in western Canada: natural patterns and response to variable-retention harvesting. *Forest Ecology and Management*, 242(1), 34-48. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.029>

- Magurran, A.E. (2004). Measuring biological diversity. *African journal of aquatic science*, 29(2), 285-286. <https://doi.org/10.2989/16085910409503825>
- McEwan, R.W., & Muller, R.N. (2011). Dynamics, diversity, and resource gradient relationships in the herbaceous layer of an old-growth Appalachian forest. *Plant Ecology*, 212, 1179-1191. <https://doi.org/10.1007/s11258-011-9896-0>
- McIntosh, A.C., Macdonald, S.E., & Quideau, S.A. (2016). Understory plant community composition is associated with fine-scale above-and below-ground resource heterogeneity in mature lodgepole pine (*Pinus contorta*) forests. *PloS one*, 11(3), e0151436. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151436>
- Narave, H. (1985). La vegetación del cofre de Perote, Veracruz, Mexico. *Biótica*, 10(1), 35-64.
- Nobis, M., & Hunziker, U. (2005). Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection. *Agricultural and forest meteorology*, 128(3-4), 243-250. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.10.002>
- Oksanen, J. (2013). Vegan: ecological diversity. *R project*, 368, 1-11.
- Plateros-Gastélum, P.A., Reyes-Hernández, V.J., Velázquez-Martínez, A., Hernández-de la Rosa, P., & Campos-Ángeles, G.V. (2018). Disponibilidad de luz bajo dosel en rodales de *Abies religiosa*. *Madera y bosques*, 24(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431711>
- Promis, A., Schindler, D., Reif, A., & Cruz, G. (2009). Solar radiation transmission in and around canopy gaps in an uneven-aged *Nothofagus betuloides* forest. *International Journal of Biometeorology*, 53, 355-367. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0222-7>
- Reich, P.B., Frelich, L.E., Voldseth, R.A., Bakken, P., & Adair, E.C. (2012). Understorey diversity in southern boreal forests is regulated by productivity and its indirect impacts on resource availability and heterogeneity. *Journal of Ecology*, 100(2), 539-545. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01922.x>
- Roswell, M., Dushoff, J., & Winfree, R. (2021). A conceptual guide to measuring species diversity. *Oikos*, 130(3), 321-338. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/oik.07202>
- Saavedra-Romero, L.D.L., Alvarado-Rosales, D., Patricia, H.R., Martínez-Trinidad, T., Mora-Aguilera, G., & Villa-Castillo, J. (2016). Condición de copa, indicador de salud en árboles urbanos del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México. *Madera y bosques*, 22(2), 15-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.21829/myb.2016.2221321>
- Sánchez-González, A., López-Mata, L., & Granados-Sánchez, D. (2005). Semejanza florística entre los bosques de *Abies religiosa* (HBK) Cham. & Schltdl. de la Faja Volcánica Transmexicana. *Investigaciones geográficas*(56), 62-76.
- Sánchez G.A., López M.L., & Vibrans, H. (2006). Composición y patrones de distribución geográfica de la flora del bosque de oyamel del Cerro Tláloc, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*(79), 67-78.
- Scanga, S.E. (2014). Population dynamics in canopy gaps: nonlinear response to variable light regimes by an understory plant. *Plant Ecology*, 215(8), 927-935. <https://doi.org/10.1007/s11258-014-0344-9>
- Schleppi, P., & Paquette, A. (2017). Solar radiation in forests: theory for hemispherical photography. *Hemispherical photography in forest science: theory, methods, applications*, 15-52.
- Seidel, D., Fleck, S., & Leuschner, C. (2012). Analyzing forest canopies with ground-based laser scanning: A comparison with

- hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 154-155, 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.10.006>
- Seidel, D., Fleck, S., Leuschner, C., & Hammett, T. (2011). Review of ground-based methods to measure the distribution of biomass in forest canopies. *Annals of Forest Science*, 68(2), 225-244. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0040-z>
- Smith, W.K., & Berry, Z.C. (2013). Sunflecks? *Tree physiology*, 33(3), 233-237. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt005>
- Tinya, F., & Ódor, P. (2016). Congruence of the spatial pattern of light and understory vegetation in an old-growth, temperate mixed forest. *Forest Ecology and Management*, 381, 84-92.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.027>
- Venables, W., & Smith, D. (2017). *An Introduction to R*. doi: 10.1016.
- Villaseñor, J.L. (2018). Diversidad y distribución de la familia Asteraceae en México. *Botanical Sciences*, 96(2), 332-358.
- Webster, C., Rutter, N., Zahner, F., & Jonas, T. (2016). Measurement of incoming radiation below forest canopies: A comparison of different radiometer configurations. *Journal of Hydrometeorology*, 17(3), 853-864.
<https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0125.1>
- Zhang, Y., Chen, J. M., & Miller, J. R. (2005). Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1-4), 166-181.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.09.009>

VARIACIÓN FENOTÍPICA ENTRE POBLACIONES PRECOCES DE MAÍZ NATIVO DE OAXACA

PHENOTYPIC VARIATION BETWEEN EARLY POPULATIONS OF NATIVE MAIZE FROM OAXACA

¹Prisciliano Diego-Flores , ¹Erika Padilla-Cortés , ¹Laura Martínez-Martínez , ²José Cruz Carrillo-Rodríguez , ³José Luis Chávez-Servia 

¹Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-Oaxaca, Hornos 1003, Col. Noche Buena, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México, C.P. 71230. ²Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, Exhacienda de Nazareno, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México, C.P.71230. ³Autor de correspondencia: (jchavez@ipn.mx).

RESUMEN

La selección y preservación de variedades locales de maíz que hacen cada año los agricultores en sus parcelas, modifican la estructura genética poblacional en direcciones diversas como es la precocidad a floración, rápido llenado de grano y cosecha. El objetivo fue evaluar la variación de caracteres agromorfológicos en cuatro poblaciones nativas clasificadas dentro de las razas Bolita y Zapalote Chico, mediante siembra y cultivo en tres localidades de Oaxaca, México. Las poblaciones evaluadas están en un proceso de selección masal (segundo ciclo) y se establecieron bajo un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones, en terrenos de agricultores de Santa Lucia Miahuatlán, Coatecas Altas y Villa de Zaachila, Oaxaca, esta última bajo riego y las primeras en temporal. En los análisis de varianza se registraron diferencias significativas entre poblaciones y localidades para todas las variables, excepto en días a floración masculina entre localidades, y las interacciones localidades-poblaciones no presentaron diferencias significativas en ocho de catorce variables evaluadas. En Zaachila, se registraron valores fenotípicos de mayor magnitud, pero entre localidades de temporal la respuesta fue baja y semejante. En floración masculina, grosor de 10 granos y peso de 500 granos, se estimaron valores altos de varianza genotípica o poblacional y en heredabilidad en sentido amplio. El análisis de componentes principales fue útil para describir y discriminar la variación fenotípica diferencial entre

las poblaciones evaluadas, principalmente con una mayor contribución explicativa de altura de planta y mazorca, volumen y peso de 500 granos.

Palabras clave: Conservación *in situ*, heredabilidad, razas de maíz, sistema milpa, varianzas fenotípicas.

ABSTRACT

The selection and preservation of the maize local varieties which farmers done every year in their parcels, modify the genetic structure of the populations on many addresses such as precocity to flowering, fast grain filling and harvest. The agromorphological traits variation was evaluate in four native populations classified within from the Bolita and Zapalote Chico races, throughout the sow and cultivation in three locations of Oaxaca, Mexico. The evaluated populations were under a mass selection process (second cycle) and were evaluated under a randomized complete block design with four replicates, in parcels of farmers from Santa Santa Lucia Miahuatlan, Coatecas Alta and Villa de Zaachila, Oaxaca, last one with irrigation and two first in rainfall conditions. Significant differences were determined between populations and locations over all variables, except in days to male flowering between locations. The location-population interactions presented significant differences in eight from fourteen evaluated variables. At Zaachila locations, irrigated condition, the highest values were recorded. Hight values of genotypic or population variance and

broad sense heritability were recorded in days to male flowering, thickness of 10 grains and weight of 500 grains, and the principal component analysis was useful to describe and discriminate the evaluated total variability, where plant and cob height, volume and weight of 500 grain contributed significantly.

Index words: *In situ* conservation, heritability, races of maize, milpa system, phenotypic variances.

INTRODUCCIÓN

El maíz sigue en evolución bajo domesticación, en manos de pequeños agricultores. Esto favorece una mayor diversidad genética y fenotípica de la especie en México que se preserva *in situ*, en parcelas y traspatios de comunidades de agricultores. En diferentes reportes se ha evidenciado que los agricultores hacen selección tradicional de sus semillas usando sus propios criterios y de manera continua, ciclo tras ciclo (Magdaleno-Hernández et al., 2016), y esos eventos de selección tienden a modificar las estructuras genéticas y fenotípicas de su poblaciones cultivadas, a tal punto que generan diferenciaciones genéticas entre y dentro de poblaciones aun cuando se cultiven dentro de la misma comunidad o parcelas continuas (Pressoir y Berthaud, 2004), y a veces las distinguen usando nombres locales como violentos, precoces, rápidos, por color de grano, forma de grano, tamaño de mazorca, altura de planta, zona de cultivo o del nicho agroecológico donde la siembran (ejemplo: tierra caliente, zona baja, zona alta, serrano, etc.) (Castillo-Nonato y Chávez-Mejía, 2013).

Desde la introducción del concepto de raza de maíz por Anderson y Cluter (1942), formalización en México por Wellhausen, Roberts y Hernández (1952) y posteriores análisis genéticos y fenotípicos, siempre se asoció una relación biocultural directa entre la conservación *in situ* de las razas nativas con los grupos originarios o étnicos, porque parte de la evolución de las razas actuales tiene una fuerte influencia de la selección humana y un efecto ambiental de adaptación a

nichos y/o micronichos agroecológicos regionales (Perales y Golicher, 2014). En este sentido, las razas Bolita y Zapalote Chico son emblemas bioculturales de la gastronomía y cultura alimentaria de Oaxaca; por ejemplo, Bolita se distingue para la elaboración de tlayudas y téjate en los Valles Centrales, y Zapalote para los tradicionales totopos del Istmo de Tehuantepec, y ambas tienen una distribución ecogeográfica restringida, principalmente en las regiones donde se utiliza, aunque se han reportado en otras regiones de Oaxaca y de México. En ambos casos se han identificado variantes poblacionales con porte bajo, precoces a la floración y de mazorcas medianas (Ramírez-Jaspeado et al., 2013; Cabrera-Toledo et al., 2019).

Los maíces nativos pigmentados de México son foco de atención en la industria alimentaria por su aportación de compuestos bioactivos y efecto preventivo de diferentes enfermedades asociadas con la alimentación. Salinas-Moreno et al. (2012) identificaron hasta 15 tipos de antocianinas y antocianindinas en granos rojo-azules de maíces de las razas Bolita, Chalqueño y Elotes Cónicos; y Herrera-Sotero et al. (2020) evaluaron el efecto antiproliferativo de antocianinas extraídas de tortilla de maíces de la raza Chalqueño de la Mixteca, sobre líneas celulares mutagénicas, y determinaron un efecto preventivo de proliferación de células cancerígenas de próstata y mama. No obstante, estas poblaciones con uso potencial en salud pueden alterar sus mecanismos adaptativos, producción de compuestos bioactivos y de respuesta ante los efectos del cambio climático. Ureta et al. (2020) señalan que los maíces nativos mexicanos más vulnerables ante el cambio climático son aquellos que se siembra en condiciones de temporal e indica que las estaciones restrictivas en precipitación y/o con incrementos de temperatura ocasionan fuertes decrementos en rendimientos y una posible pérdida de poblaciones nativas. Esto implicaría que los agricultores tendrían frecuentes pérdidas de cosechas por años de bajas precipitaciones o sequías intraestivales prologadas, lo que agudiza el estrés con incrementos de temperaturas.

La sequía, escasez o irregularidad de lluvias, generan pérdidas parciales o totales de la cosecha de maíz, y tienen efectos socioeconómicos mayores cuando ocurren en terrenos de familias tradicionales con escasos recursos económicos y de subsistencia. Este es un fenómeno recurrente anual en Oaxaca y se evidencia en diferentes regiones del país o del mundo como parte de los efectos de cambios climáticos (Ureta et al., 2020; Woodmansee, 2022). Una estrategia de respuesta desde el mejoramiento genético es, recurrir a los acervos genéticos de los bancos de germoplasma para generar variedades mejoradas o recurrir a la evaluación de poblaciones nativas preservadas *in situ* en manos de los agricultores e iniciar una selección recurrente. Así, desde hace décadas se busca seleccionar genotipos tolerantes o con ciertos mecanismos de resistencia o escape a la sequía, aunque en campo es difícil separar individuos o plantas resistentes. Por tanto, la estrategia más recurrente es la selección por precocidad a la floración, sincronía floral y rápido llenado de grano como un medio de escape a la sequía o buscar mayor eficiencia de aprovechamiento de la escasa lluvia estacional y errática (Mercer y Perales, 2019; Nelimor et al., 2019; Nelimor et al., 2020). En este contexto, se evaluó la variación agromorfológica de cuatro poblaciones nativas agrupadas dentro de las razas Bolita y Zapalote Chico, mediante la siembra y cultivo en tres localidades de Oaxaca, México, en terrenos de agricultores tradicionales que practican el sistema milpa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Poblaciones nativas y localidades de evaluación

Con base en recorridos comunitarios y de colecta, se integró una colección de cuatro poblaciones previamente reconocidas como precoces; dos (Zapalote Chico 1 y 2) fueron colectada en comunidades de Santo Domingo Tehuantepec en altitudes de 61 y 82 m, y se complementaron con

dos poblaciones de los Valles Centrales de Oaxaca, una de Cuilapam de Guerrero (Bolita 1) y otra de Coatecas Altas (Bolita 2) con altitudes de 1546 y 1560 m, respectivamente. Estas poblaciones estaban en un segundo ciclo de selección masa visual al momento del experimento. La siembra experimental se realizó en terrenos de agricultores tradicionales de tres localidades distantes de 40 a 100 km: La Cofradía municipio de Santa Lucia Miahuatlán (julio 12, 2018), cabecera municipal de Coatecas Altas (junio 25, 2018) y terrenos del municipio de Villa de Zaachila (febrero 5, 2019). En Santa Lucia Miahuatlán y Coatecas Alta la siembra y cultivo fueron en condiciones de temporal y Zaachila en condiciones de riego (Tabla I).

Diseño y manejo experimental

Los ensayos en cada localidad se establecieron bajo un diseño experimental de bloque al azar y cuatro repeticiones, con una parcela experimental de cinco surcos de 10 m de largo y 0.8 m entre surcos. La fórmula de fertilización utilizada fue de 120-80-60 de N, P y K, respectivamente, con división del nitrógeno de 60 kg a la primera escarda y 60 kg a la floración masculina. El control de malezas y plagas se hizo de forma tradicional con yunta, manual y herbicida comerciales. La caracterización y evaluación de las poblaciones se realizó con referencia en las variables descritas y criterios de trabajos previos (Chávez-Servia et al., 2011, 2012; Torres-Escamilla et al., 2019). En diez plantas por parcela se midió la altura de planta y mazorca, también en diez mazorcas se registró la longitud y diámetro de mazorca, diámetro de olote, número de hileras y número de granos por hilera; los días después de la siembra a floración masculina y femenina se registraron por parcela experimental; el ancho, longitud y grosor se evaluó en hileras de 10 granos; se estimó el volumen y peso de 500 granos; y complementariamente se evaluó el peso de grano y olote de 10 mazorcas.

Tabla I. Características eco-geográficas, edáficas y climáticas de las localidades de evaluación en Coatecas Altas, Santa Lucia Miahuatlán y Villa de Zaachila, Oaxaca.

Descriptor de localidad	Coatecas Altas (2018)	La Cofradía, Santa Lucía Miahuatlán (2018)	Villa de Zaachila (2019)
Longitud oeste (LO)	96° 40'20.7"	96° 37' 6.5"	96° 44' 58"
Latitud norte (LN)	16° 31'40.2"	16° 07' 25.7"	16° 57' 04"
Altitud (m)	1524	853	1560
Temperatura máxima (°C)	22	24	20.7
Temperatura mínima (°C)	16	18	11.1
Temperatura media (°C)	19	20	18.9
Precipitación media anual (mm)	500	800-1324	675
Humedad relativa (%)	65	75	68
Suelos frecuentes (clasificación FAO/UNESCO)	Regosol, Cambisol y Phaeozem.	Regosol, Luvisol y Leptosol	Luvisol y vertisol
Clima	Semiseco semicálido con lluvias en verano	Semiseco semicálido a semicálido subhúmedo con lluvias en verano	Semicálido húmedo con lluvias en verano

Análisis estadístico

Con la información de las variables evaluadas se integró una base de datos y se realizaron análisis de varianzas combinados mediante el modelo lineal de bloques al azar con el propósito de determinar las diferencias entre poblaciones, localidades de evaluación e interacción poblaciones-localidades, donde el efecto de repeticiones se consideró anidado en localidades. Cuando hubo diferencias entre factores principales o interacción, se hicieron comparaciones múltiples de medias por el método de Tukey ($p \leq 0.05$). Complementariamente, se estimaron los componentes de varianza por el método de máxima verosimilitud restringida (REML) mediante el procedimiento VARCOMP del paquete estadístico SAS (2006) y a partir de esos valores de varianzas (σ^2), se calculó la heredabilidad en sentido amplio (H^2) mediante la expresión $H^2 = \sigma^2_{\text{Poblaciones}} / (\sigma^2_{\text{Localidades}} + \sigma^2_{\text{Poblaciones}} + \sigma^2_{\text{Localidades-Poblaciones}} + \sigma^2_{\text{error}})$, donde los subíndices indican los efectos, y se acotó sólo en aquellas variables con interacciones localidades-poblaciones significativas. Posteriormente, con los promedios de la interacción localidades-poblaciones se realizó un análisis descriptivo de componentes principales a partir de datos estandarizados y mediante la matriz de varianzas-

covarianzas con el propósito de identificar las diferencias genotípicas o poblacionales a través de localidades y variables de mayor valor descriptivo. Todos los análisis se hicieron con el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS, 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Entre comunidades de agricultores tradicionales oaxaqueños la adopción de variedades mejoradas no supera el 10 % y cuando esto ocurre se realiza entre agricultores de agricultura intensiva, de riego o buen temporal y porque la venta del maíz es su objetivo, pero no entre agricultores de subsistencia (Luna-Mena et al., 2016). Un contexto incluido en evaluación dos localidades en condiciones de temporal y una condición de riego, las que ofrecen respuestas diferentes dentro de la siembras tradicionales y objeto de estudio. Esto ha permitido que, las dinámicas de las poblaciones de maíz continúen su evolución en terrenos de agricultores y se preserve una alta diversidad como muestran López-Romero et al. (2010) y González-Castro et al. (2013) en poblaciones de Zapalote Chico del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca donde se preserva una alta variabilidad genética. En este trabajo, el análisis de varianza combinado mostró diferencias significativas entre localidades

Tabla 2. Significancia de cuadrados medios de los análisis de varianza de caracteres agromorfológicos en poblaciones de maíces precoces razas Bolita y Zapalote Chico de Oaxaca.

Fuentes de variación	Localidades (L)	Poblaciones (Po)	L x Po	Rep./ L	Error	C.V. (%)
Altura de planta	301903**	41840**	1525**	2542**	395	16.0
Altura de mazorca	125259**	9150**	891**	1123**	265	22.4
Longitud de mazorca	594.5**	181.8**	4.1 ^{ns}	11.5**	2.3	15.7
Diámetro de mazorca	55.96**	6.54**	0.10 ^{ns}	0.99**	0.15	10.1
Diámetro de olote	13.94**	4.70**	0.22*	0.33**	0.08	13.7
Número de hileras	31.01**	45.31**	2.35 ^{ns}	1.96 ^{ns}	2.08	13.8
Número de granos por hilera	2861.6**	283.7**	6.8 ^{ns}	110.1**	16.7	19.6
Días a floración masculina ¹	0.19 ^{ns}	46.78**	18.30**	7.96*	2.81	2.6
Días a floración femenina	234.1**	24.3*	1.8 ^{ns}	7.1 ^{ns}	5.55	3.2
Ancho de 10 granos	4.26**	12.12**	0.12 ^{ns}	0.43 ^{ns}	0.31	5.8
Longitud de 10 granos	13.37**	18.13**	0.84 ^{ns}	1.58 ^{ns}	0.87	8.3
Grosor de 10 granos	1.47**	4.07**	0.11*	0.04 ^{ns}	0.04	5.6
Pesos de 500 granos	12114.8**	30799.2**	800.3**	313.4**	346.6	13.4
Volumen de 500 granos	20742.9**	62435.7**	903.0 ^{ns}	1472.6 ^{ns}	1403.2	18.9
Peso de grano/10 mazorcas	963604**	195471**	13308 ^{ns}	15720 ^{ns}	8401	15.0
Peso de olote/10 mazorcas	73.9**	38.3**	1.1 ^{ns}	1.0 ^{ns}	1.08	10.9

^{ns} No significativo ($p > 0.05$); * significativo a $p \leq 0.05$; ** significativo a $p \leq 0.01$; C.V. = coeficiente de variación; ¹días después de la siembra.

de evaluación y poblaciones para todas las variables evaluadas, con excepción de días a floración femenina donde no hubo diferencias significativas entre localidades. En la interacción localidades-poblaciones (L × Po) se registraron diferencias significativas en altura de planta y mazorca, diámetro de olote, días a floración masculina, grosor de 10 granos, peso de 500 granos, peso de grano y olote de 10 mazorcas. También se registró que la varianza debida al efecto de localidades y/o poblaciones fue significativamente superior al efecto de la interacción L × Po, e indica que la magnitud de los efectos principales es mayor e independientes de la interacción (Tabla 2).

Entre localidades de evaluación se presentaron diferencias significativas con alta variabilidad y patrones diferenciales entre siembras de temporal y la localidad de riego, en todas las variables evaluadas. Esto es, la localidad Villa de Zaachila (riego) presentó promedios de variables que difieren significativamente del promedio registrado en Coatecas Altas y Santa Lucía Miahuatlán, incluyendo precocidad a floración femenina, 69.9 días después de la siembra (*ddt*) y hubo sincronía floral con la floración masculina

(64.6 *ddt*). La ausencia de diferencias significativas en días a floración femenina, entre localidades, señalan coincidencias para posibles programas de cruzamiento, pero también muestra que el riego no favorece una mayor precocidad porque también coincidió con altas temperaturas en la localidad de riego semejante a las localidades seca (Coatecas) y húmeda (Miahuatlán). Por otro lado, no se registraron diferencias significativas en la respuesta promedio de las poblaciones al cultivarse en Coatecas Altas y Santa Lucía Miahuatlán, ambas bajo un sistema tradicional de cultivo en temporal, excepto en peso de grano y olote de 10 mazorcas donde el patrón fue Zaachila > Coatecas > Miahuatlán. Es de señalar que no indica pérdida de cosecha en los ambientes de temporal sino un menor rendimiento de grano o productividad. En los diferentes patrones se muestra que, las condiciones de temporal de Coatecas y Miahuatlán favorecieron valores bajos en todas las variables evaluadas en comparación con la condición de riego (Zaachila), y en este caso se expresó una mayor valor fenotípico o valores altos de respuesta en las variables evaluadas, y esas diferencias fueron evidentes en altura de planta y

Tabla 3. Efecto de localidades de evaluación y comportamiento medio de poblaciones nativas de maíz en tres ambientes de cultivo de Oaxaca.

Variables evaluadas	Localidades de cultivo, Oaxaca			Poblaciones nativas evaluadas			
	Coatecas Alta-2018	Míahuatlán -2018	Zaachila-2019	Bolita I	Bolita 2	Zapalote Chico I	Zapalote Chico 2
Altura de planta (cm)	98.8 b ¹	98.8 b	174.0 a	141.3 a ¹	137.9 a	113.2 b	103.1 c
Altura de mazorca (cm)	56.5 b	56.5 b	104.9 a	75.1 b	82.3 a	71.7 b	61.3 c
Longitud de mazorca (cm)	8.5 b	8.5 b	11.8 a	11.1 a	10.1 b	8.8 c	8.4 c
Diámetro de mazorca (cm)	3.4 b	3.4 b	4.4 a	4.1 a	3.8 b	3.6 c	3.5 c
Diámetro de olote (cm)	1.9 b	1.9 b	2.4 a	2.34 a	2.01 b	1.90 c	1.97 bc
Número de hileras	10.2 b	10.2 b	11.0 a	10.0 c	9.9 c	11.2 a	10.7 b
Número de granos por hilera en mazorca	18.3 b	18.3 b	25.7 a	19.2 c	20.6 b	22.9 a	20.5 bc
Días a floración masculina	64.4 a	64.4 a	64.6 a	64.6 b	64.4 b	66.9 a	62.1 c
Días a floración femenina	76.5 a	76.5 a	69.9 b	74.5 ab	76.2 a	73.7 ab	72.8 b
Ancho de 10 granos (cm)	9.3 b	9.3 b	10.2 a	10.7 a	10.1 b	8.6 c	8.8 c
Long. de 10 granos (cm)	10.7 b	10.7 b	12.3 a	11.9 a	12.6 a	10.7 b	9.8 b
Grosor de 10 granos (cm)	3.6 b	3.6 b	4.1 a	4.4 a	3.9 b	3.1 c	3.4 c
Volumen de 500 granos (mL)	175.3 b	175.3 b	242.3 a	286.1 a	225.6 b	137.5 c	137.7 c
Pesos de 500 granos (g)	120.6 b	120.6 b	171.9 a	196.0 a	164.8 b	93.4 c	94.6 c
Peso de grano/10 mazorcas (g)	386.9 c	574.3 b	873.4 a	751.0 a	687.9 a	515.7 b	491.5 b
Peso de olote/10 mazorcas (g)	60.3 c	85.9 b	145.0 a	141.7 a	111.3 b	65.5 c	69.7 c

¹En renglón, entre localidades y entre poblaciones, medias con la misma letra no difieren significativamente (prueba de Tukey, $p \leq 0.05$).

mazorca, precocidad a floración femenina, peso y volumen de 500 granos, entre otros (Tabla 3). En términos de manejo agronómico se registró de manera constante que el riego mejora la productividad como parte de la respuesta a una disponibilidad constante de humedad y aprovechamiento de las fertilizaciones y mejores condiciones de cultivo en las poblaciones nativas.

Madeiras-Barbosa et al. (2021) proponen el uso de germoplasma tropical y subtropical de maíz nativo para contrarrestar el efecto de la intensidad y frecuencia de la sequía, como parte de las consecuencias del cambio climático. En este sentido, las poblaciones evaluadas nativas fueron significativamente diferentes y altamente variables, donde el patrón recurrente, a través de los caracteres evaluados, fue una diferenciación a favor de las poblaciones agrupadas en la raza Bolita con mayores valores fenotípico en relación con las poblaciones de Zapalote Chico. Por ejemplo, en altura de planta y mazorca, características de mazorca y grano de Bolita I y 2, fueron significativamente mayores que los valores

registrados en las poblaciones de Zapalote I y 2 (Tabla 3). La referencia de todas las poblaciones es la precocidad a la floración masculina y femenina, promedios de 64.4 a 76.2 ddt en Bolita y de 62.1 a 73.7 ddt en Zapalote, estas floraciones difieren de las registradas (95 a 113 ddt) por Chávez-Servia et al. (2011) entre complejos raciales de zonas altas en San Martín Huamelúlpam, Oaxaca; respetando las diferencias altitudinales de 853-1560 y 2200 m de evaluación y germoplasma evaluado, respectivamente.

Los resultados descritos en las poblaciones evaluadas, se encuentran dentro de los valores registrados por Cabrera-Toledo et al. (2019) en una colección de 18 poblaciones de Zapalote, cultivadas en el Istmo (San Pedro Comitancillo, Oaxaca), de 45.6 a 51.1 días a floración masculina y/o femenina, y la misma tendencia se registró en altura de planta y mazorca con variaciones de 184.2 a 214.2 cm y de 64.2 a 95.5 cm, respectivamente; esto comparado con la variación de 103.1 a 113.2 cm en altura de planta y de 61.3 a 71.7 cm en altura de mazorca, en este trabajo. En

peso de grano de 10 mazorcas el patrón fue Bolita 1 = Bolita 2 > Zapalote 1 = Zapalote 2 y en peso de olote de 10 mazorcas fue Bolita 1 > Bolita 2 > Zapalote 1 = Zapalote 2 e indica alta variabilidad productividad de grano en mazorcas cuya relación grano:olote es 5.3-7.9:1; es decir, una alta conversión en grano (Tabla 3). Es de resaltar que, las poblaciones de Zapalote están fuera de su ambiente de origen y cultivo, pero no es el caso de las poblaciones de Bolita que muestran mayor adaptación y valores promedio de respuesta en Zaachila, Coatecas Altas y Miahuatlán por estar cercanas a sus orígenes y ambientes usuales de cultivo. Además, no se descarta que parte de la selección masal practicada a estas poblaciones ya tienen un efecto incipiente.

En ancho, longitud y grosor de 10 granos se registraron diferencias marcadas en las poblaciones de la raza Bolita respecto a las de Zapalote Chico y denotan fuertemente el efecto racial descrito previamente por Wellhausen et al. (1952) Aragón et al. (2006). En esta evaluación, las poblaciones de Bolita presentaron significativamente mayor ancho, longitud y grosor de grano, o bien un grano más grande que las poblaciones de Zapalote (grano pequeño), características asociadas a menor tamaño de mazorca. Los resultados muestran un alto efecto racial y con menor efecto las diferencias entre poblaciones dentro de cada raza.

Arellano-Vázquez et al. (2003) evaluaron dos poblaciones de la raza bolita en cinco localidades de Puebla, Estado de México y Tlaxcala, y determinaron en promedio 104 días a floración femenina con 141 cm en altura de planta. Estos resultados difieren en floración femenina de los registros del presente trabajo (74.5 a 76.2 días), pero semejantes en altura de planta (137.9 a 141.3 cm). En este sentido, las poblaciones de maíz descritas por Sierra-Macías et al. (2014), clasificadas como raza Bolita de Veracruz, registraron características de mazorca (13.7 y 4.4 cm de largo y ancho) semejantes a los promedios estimados en estos experimentos reportados (Tabla 3). Como consecuencia de esta similitudes y diferencias; es de pensar que, los ambientes de

evaluación modifican características morfológicas de planta como altura, pero se pueden mantener como precoces y semejantes características de mazorca y grano.

Por otro lado, Cabrera-Toledo et al. (2019) determinaron variaciones de 9.4 a 13.3 y 3.7 a 4.4 cm en largo y diámetro de mazorca con promedios de 9.9 a 16.4 hilera y de 23.0 a 28.5 granos por hilera, en 18 poblaciones nativas de maíz de la raza Zapalote Chico, promedios superiores al registro del presente trabajo, en largo y diámetro de mazorca (8.4 a 8.8 y 3.5 a 3.6 cm) y granos por hilera (20.5 a 22.9), pero semejantes en número de hileras (11.7 a 11.2). No obstante, las diferencias se encuentran dentro de los parámetros de las características descritas de la raza Zapalote Chico, enunciadas por Wellhausen et al. (1952) y Aragón et al. (2006). Las poblaciones agrupadas dentro de Zapalote Chico y Bolita se diferenciaron significativamente en peso y volumen de 500 granos, peso de grano y olote de 10 mazorcas con valores mayores o cerca del doble en Bolita. En forma general se muestra que, en caracteres asociados con rendimiento de grano Bolita 1 y 2 presentaron los mayores valores fenotípicos, pero Zapalote Chico 2 la mayor precocidad y porte bajo (Tabla 3), este último puede ser útil como una estrategia de escape a la sequía que es común en los Valles Centrales de Oaxaca.

En la interacción localidades-poblaciones nativas no se registraron diferencias significativas en longitud y diámetro de mazorca, número de hileras por mazorca, granos por hilera, días a floración femenina, largo y ancho de grano, volumen de 500 granos, peso de grano y olote de 10 mazorcas. En este caso, los rangos de variación en las variables registradas fueron: 7.4 a 13.9 cm en longitud y 3.2 a 4.8 cm de diámetro de mazorca, 9.5 a 11.7 hileras en la mazorca, 16.4 a 27.5 granos por hileras, días a floración femenina de 68.5 a 78.0, ancho promedio de 10 granos 8.4 a 11.4 cm, longitud promedio de 10 granos 9.0 a 12.8 cm, y volumen de 500 granos de 110.0 a 326.0 mL. En peso de grano y olote de 10 mazorcas se registraron variaciones de 274.3 a

1057.5 g y de 42.5 a 214.5 g, respectivamente. Parte de la ausencia de diferencias significativas, es indicador de una alta variabilidad dentro de cada población evaluada y es constante a través de localidades de evaluación. Este efecto puede estar relacionado con el proceso de selección masal en que se encuentran las poblaciones, aun cuando no pueden considerarse uniformes.

En altura de planta y mazorca, diámetro de olote, días a floración masculina, grosor de 10 granos y peso de 500 granos, se registraron diferencias significativas en la interacción localidades-poblaciones y se observó un patrón diferencial entre poblaciones evaluadas de localidad a localidad. Por ejemplo, en altura de planta, diámetro de olote, grosor de 10 granos y peso de 500 granos Zapalote Chico 1 y 2 presentaron los valores más bajos en las tres localidades de evaluación y el comportamiento opuesto fue para Bolita 1 y 2. En días a floración masculina, Zapalote Chico 1 se registró como tardío y similar a Bolita 1 a través de localidades. En consecuencia, los materiales sobresalientes en densidad y grosor de grano fueron Bolita 1 y con mejor comportamiento en Zaachila, Zapalote Chico 2 precoz y con menor altura de plantas y mazorca (Tabla 4). Esto indica que, entre poblaciones evaluadas la mayor productividad está en Bolita, y en Zapalote Chico mayor precocidad. Entre las observaciones de campo, se registró mayor frecuencia de plantas con dos mazorcas en las poblaciones de Zapalote Chico e indica que es un material con respuesta agronómica favorable en los Valles Centrales de Oaxaca, aun cuando es originario del Istmo.

En el análisis de componentes de varianza se estimó que la varianza ambiental o de localidades de evaluación ($\sigma^2_{\text{Localidades}}$) fue mayor que la genotípica o de poblaciones ($\sigma^2_{\text{Poblaciones}}$) y de interacción localidades-poblaciones ($\sigma^2_{L \times P_0}$) en altura de planta y mazorca y diámetro de olote. En contraste, en días a floración masculina, grosor de 10 grano y peso de 500 granos, la $\sigma^2_{\text{Poblaciones}}$ fue mayor que la $\sigma^2_{\text{Localidades}}$ y $\sigma^2_{L \times P_0}$. Estos patrones de mayor efecto ambiental y genotípico se reflejan

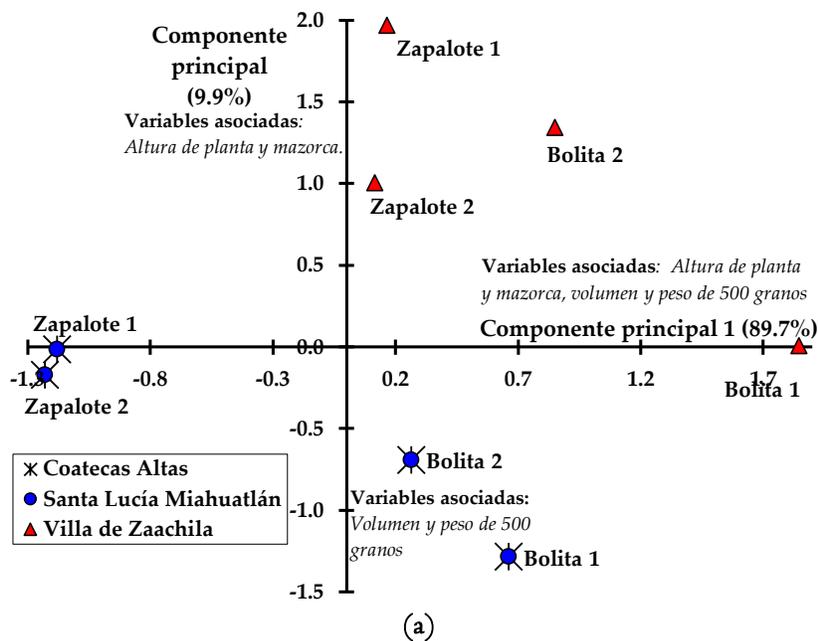
directamente en los valores de heredabilidad en sentido amplio (H^2); en el primer patrón los valores de H^2 varían de 0.06 a 0.18 (H^2 , baja) e indican un mayor efecto ambiental, pero en el segundo fue de 0.30 a 0.69 (H^2 , media a alta) que hacen referencia al efecto genotípico y comportamiento constante de localidad a localidad o mayor transferencia o repetibilidad de progenitores a progenie en las poblaciones aquí evaluadas, principalmente en grosor de 10 granos y peso de 500 granos (Tabla 4). En peso de grano y de olote de 10 mazorcas, se registraron heredabilidades (H^2) de 0.18 (baja) y 0.33 (media), respectivamente. Estos efectos de mayores valores en $\sigma^2_{\text{Poblaciones}}$ también fueron registradas por López-Romero et al. (2005) en días a floración femenina, grosor de grano y peso de 100 granos entre poblaciones de Zapalote del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. Los resultados muestran indicios de que los maíces tipo Zapalote Chico del Istmo o Bolita de Valles Centrales son candidatos a un proceso de selección masal o selección familiar, esto último a partir de la selección de individuos deseables (por ejemplo, selección familiar mazorca por surco) por alta heredabilidad en peso de grano.

En el análisis descriptivo de componentes principales (CP) se determinó que al segundo componente se acumuló un 99.6.% de la varianza fenotípica total donde los dos primeros componentes incluyeron a altura de planta y mazorca, volumen y peso de 500 granos, y número de granos por hilera como las variables de mayor valor explicativo. En la Figura 1 se representa la dispersión gráfica de las interacciones poblaciones-localidades, donde se observa una diferenciación de comportamiento de los dos grupos de poblaciones (Zapalote Chico y Bolita) en función del sitio de evaluación. Por ejemplo, las poblaciones de Bolita y Zapalote Chico presentaron su mayor expresión fenotípica en la localidad de Zaachila, pero en Miahuatlán o Coatecas Altas fue menor la respuesta, aun cuando se notan diferencias poblacionales de comportamiento. En la misma Figura 1 también se graficó las diferencias entre poblaciones respecto

Tabla 4. Interacciones significativas localidad-poblaciones nativas de maíz, heredabilidad y varianzas poblacional (genotípica), ambiental e interacción localidad-población, en respuesta a la evaluación en tres localidades de Oaxaca.

Localidades y poblaciones	Altura de planta (cm)	Altura de mazorca (cm)	Diámetro de olote (cm)	Días a floración masculina	Grosor de 10 granos (cm)	Peso de 500 granos (g)
Coatecas Altas (P.V. 2018):						
Bolita 1	117.6 d ¹	61.4 cd	2.1 c	64.7 a-c	4.2 b	172.5 b
Bolita 2	115.5 d	66.8 c	1.8 d	63.2 bc	3.9 bc	161.2 b
Zapalote 1	82.9 e	51.6 de	1.8 d	68.5 a	2.9 e	74.7 c
Zapalote 2	79.2 e	46.0 e	1.8 d	61.2 c	3.1 de	73.7 c
La Cofradía, Santa Lucía Miahuatlán (P.V. 2018):						
Bolita 1	117.6 d	61.4 cd	2.1 c	64.7 a-c	4.2 b	172.5 b
Bolita 2	115.5 d	66.8 c	1.8 d	63.2 bc	3.9 bc	161.2 b
Zapalote 1	82.9 e	51.6 de	1.8 d	68.5 a	2.9 e	74.7 c
Zapalote 2	79.2 e	46.0 e	1.8 d	61.2 c	3.1 de	73.7 c
Villa de Zaachila (P.V. 2019):						
Bolita 1	188.6 a	102.4 ab	2.8 a	64.2 bc	4.9 a	233.5 a
Bolita 2	182.7 ab	113.5 a	2.4 b	66.7 ab	4.0 bc	171.9 b
Zapalote 1	173.9 b	111.7 a	2.1 c	63.7 bc	3.6 cd	130.6 b
Zapalote 2	150.9 c	92.1 b	2.3 bc	63.7 bc	3.8 bc	136.2 b
Componentes de varianza (método REML) y heredabilidad en sentido amplio:						
σ^2 -Localidades (L)	1877.4	777.3	0.086	0.00	0.09	708.8
σ^2 -Poblaciones (Po)	336.0	68.8	0.037	2.75	0.33	2474.7
σ^2 -L x Po	27.2	15.2	0.003	2.42	0.02	121.4
σ^2 -error	436.6	281.5	0.085	4.10	0.04	338.3
Heredabilidad en sentido amplio (H^2) ²	0.13	0.06	0.18	0.30	0.69	0.68

¹ En columna, entre interacciones localidad-población, medias con la misma letra no difieren significativamente (Tukey, $p \leq 0.05$); $H^2 = \sigma^2$ -Poblaciones (Po) / [σ^2 -Localidades (L) + σ^2 -Poblaciones (Po) + σ^2 -L x Po + σ^2 -error].



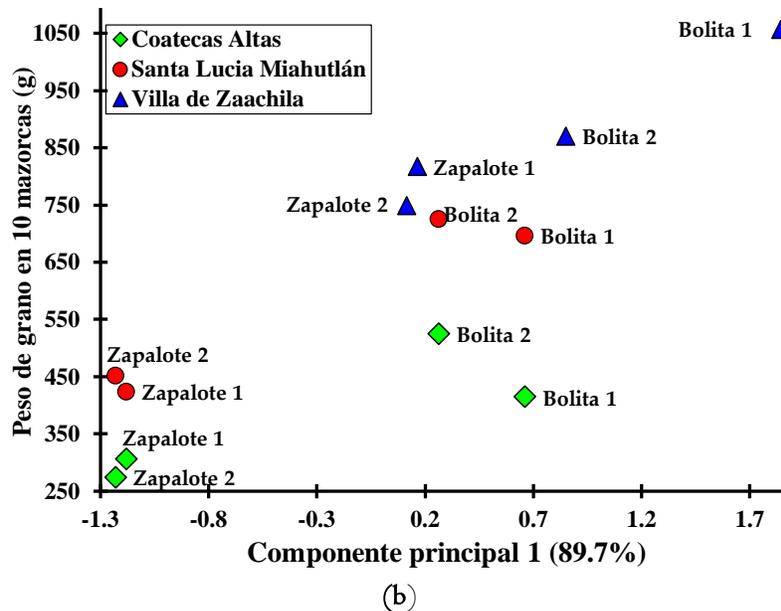


Figura I. Dispersión de interacción poblaciones-localidades de evaluación en función de los dos primeros componentes principales (a) y su discriminación con base en el primer componente principal y peso de grano de 10 mazorcas (b).

al peso de grano en 10 mazorcas y primer componente principal (a manera de índice), y se observó que Bolita y Zapalote Chico difieren fenotípicamente y presentan diferencias relevantes en peso de grano a través de localidades de evaluación. Esto es, tanto fenotípicamente como agronómicamente se diferencian las poblaciones de ambas razas evaluadas.

CONCLUSIONES

La evaluación de cuatro poblaciones de maíz precoz en tres localidades o ambientes de cultivo mostró que, las poblaciones presentaron alta variabilidad y diferencias significativas en caracteres agromorfológicos, con mayores valores fenotípicos en las poblaciones agrupadas dentro de la raza Bolita. Las condiciones agroecológicas de las localidades de cultivo influyeron significativamente en la respuesta de las poblaciones, donde la condición de riego favoreció una mayor expresión de caracteres relacionados con rendimiento (por ejemplo: características de grano, volumen y peso de 500 granos) que en las dos localidades de temporal. La población Bolita I de Cuilapam de Guerrero se mostró como promisorio para posteriores evaluaciones o iniciar

un programa de mejoramiento, presentó significativamente los mayores valores de caracteres de mazorca, grano, peso y volumen de grano. La varianza genotípica o poblacional y los valores de heredabilidad en sentido amplio (H^2) fueron mayores que el efecto ambiental o de localidad en días a floración, grosor de 10 granos y peso de 500 granos ($0.30 \leq H^2 \leq 0.69$). La mayor precocidad de las poblaciones de Zapalote Chico (menos de 74 días a floración femenina) muestran indicios que pueden utilizarse como una estrategia de escape a sequía en las siembras de los Valles Centrales de Oaxaca.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de los agricultores de Villa de Zaachila, Coatecas Altas y Santa Lucía Miahuatlán quienes nos permitieron hacer uso de sus terrenos para el establecimiento de los experimentos de campo. Esta investigación fue financiada por el Instituto Politécnico Nacional a través del proyecto SIP-20230580.

REFERENCIAS

- Aragón, F., Taba, S., Hernández, J.M., Figueroa, J.D., Serrano, V. y Castro, F.H. (2006). *Catálogo de Maíces Criollos de Oaxaca*. INIFAP-SAGARPA. Libro Técnico No. 6. Oaxaca, México. 344 p.
- Anderson, E. and Cutler, H.C. (1942). Races of *Zea mays*: I. Their recognition and classification. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 29(2), 69–88. <https://doi.org/10.2307/2394331>.
- Arellano-Vázquez, J.L., Tut-Couoh, C., María-Ramírez, A., Salinas-Moreno Y. y Taboada-Gaytán, O.R. (2003). Maíz azul de los Valles Altos de México. I. Rendimiento de grano y caracteres agronómicos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26(2), 101-107.
- Cabrera-Toledo, J.M., Carballo-Carballo, A., Mejía-Contreras, J.A., García-de los Santos, G. y Vaquera-Huerta, H. (2019). Caracterización de poblaciones sobresalientes de maíz de la raza Zapalote Chico. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42(3), 269–279.
- Castillo-Nonato, J. y Chávez-Mejía, C. (2013). Caracterización campesina del manejo y uso de la diversidad de maíces en San Felipe del Progreso, Estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 10, 23–38.
- Chávez-Servia, J.L., Diego-Flores, P. y Carrillo-Rodríguez, J.C. (2011). Complejos raciales de poblaciones de maíz evaluadas en San Martín Huamelulpan, Oaxaca. *Ra Ximhai*, 7(1), 107–115.
- Chávez-Servia, J.L., Diego-Flores, P. y Carrillo-Rodríguez, J.C. (2012). Variación fenotípica de una muestra de maíces de la región de Chalcatongo de Hidalgo, Oaxaca. *Ciencia Ergo Sum*, 19(3), 51–257.
- González-Castro, M.E., Palacios-Rojas, N., Espinoza-Banda A. y Bedoya-Salazar, C.A. (2013). Diversidad genética en maíces nativos mexicanos tropicales. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(Supl. 3-A), 329-338.
- Herrera-Sotero, M.Y., Cruz-Hernández, C.D., Oliart-Rosa, R.M., Chávez-Servia, J.L., Guzmán-Gerónimo, R.I., González-Covarrubias, V., Cruz-Burgos, M. and Rodríguez-Dorantes, M. (2020). Anthocyanins of blue corn and tortilla arrest cell cycle and induce apoptosis on breast and prostate cancer cells. *Nutrition and Cancer*, 72(5), 768–777. <https://doi.org/10.1080/01635581.2019.1654529>.
- López-Romero, G., Santacruz-Varela, A., Muñoz-Orozco, A., Castillo-González, F. Córdova-Téllez, L. y Vaquera-Huerta, H. (2005). Caracterización morfológica de poblaciones nativas de maíz del Istmo de Tehuantepec, México. *Interciencia*, 30(5), 284-290.
- López-Romero, G., Santacruz-Varela, A., Muñoz-Orozco, A., Castillo-González, F., Córdova-Téllez, J. y Vaquera-Huerta, H. (2010). Perfil isoenzimático de maíces nativos del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México. I. Caracterización de grupos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(1), 1-10.
- Luna-Mena, B.M., Altamirano-Cárdenas, J.R., Santoyo-Cortés, V.H. y R. Rendón-Medel, R. (2016). Factores e innovaciones para la adopción de semillas mejoradas de maíz en Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15, 2995-3007.
- Madeiras-Barbosa, P.A., Fritsche-Neto, R., Andrade, M.C., Petrolí, C.D., Burgueño, J., Galli, G., Willcox, M.C., Sonder, K., Vidal-Martínez, V.A., Sifuentes-Ibarra, E. and Molnar, T.L. (2021). Introgression of maize diversity for drought tolerance: subtropical maize landraces as sources of new positive variants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 6912311. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.691211>.
- Magdaleno-Hernández, E., Mejía-Contreras, A., Martínez-Saldaña, T., Jiménez-Velázquez, M.A., Sánchez-Escudero, J. y García-Cué, J.L. (2016). Selección tradicional de semilla de maíz criollo. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 13, 437–447.
- Mercer, K.L. and Perales, H. (2019). Structure of local adaptation across the landscape: flowering time and fitness in Mexican maize (*Zea mays* L. subsp. *mays*) landraces. *Genetic Resources*

- and Crop Evolution*, 66, 27–45.
<https://doi.org/10.1007/s10722-018-0693-7>.
- Nelimor, C., Badu-Apraku, B., Tetteh, A.Y. and N'guetta, A.S.P. (2019). Assessment of genetic diversity for drought, heat and combined drought and heat stress. *Plants*, 8, 518. <https://doi.org/10.3390/plants8110518>.
- Nelimor, C., Badu-Apraku, B., Tetteh, A.Y., Garcia-Oliveira, A.L., and N'guetta, A.S.P. (2020). Assessing the potential of extra-early maturing landraces for improving tolerance to drought, heat, and both combined stresses in maize. *Agronomy*, 10, 318. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030318>.
- Perales, H. and Golicher, D. (2014). Mapping the diversity of maize races in Mexico. *PLoS ONE*, 9(12), e114657. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114657>.
- Pressoir, G. and Berthaud, J. (2004). Population structure and strong divergent selection shape phenotypic diversification in maize landraces. *Heredity*, 92, 95–101.
- Ramírez-Jaspeado, A., García-de los Santos, G., Carballo-Carballo, A., Castillo-González, F., Serrato, J.A. y Cadena-Iñiguez, J. (2013). Caracterización morfológica de una muestra etnográfica de maíz (*Zea mays* L.) raza bolita de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(6), 895–907.
- Torres-Escamilla, F., Chávez-Servia, J.L., Diego-Flores, P. y J.C. Carrillo-Rodríguez, J.C. (2019). Variabilidad agromorfológica entre poblaciones de maíz azul y rojo de la Mixteca oaxaqueña, México. *e-CUCBA*, 6(12), 29-48.
- Salinas-Moreno, Y., Pérez-Alonso, J.J. Vázquez-Carrillo, G., Aragón-Cuevas, F. y Velázquez-Cardelas, G.A. (2012). Antocianinas y actividad antioxidante en maíces (*Zea mays* L.) de las razas chalqueño, elotes cónicos y bolita. *Agrociencia*, 46, 693–706.
- SAS Institute Inc. (SAS). (2006). *Base SAS®9.1.3 Procedures Guide*, Volume I. 2nd ed.; SAS Institute Inc. Cary, NC, USA,
- Sierra-Macías, M., Andrés-Meza, P., Palafox-Caballero, A., Meneses-Márquez, I., Francisco-Nicolás, N., Zambada-Martínez, A., Rodríguez-Montalvo, F., Espinosa-Calderón, A. y Tadeo-Robledo, A. (2014). Variación morfológica de maíces nativos (*Zea mays* L.) en el estado de Veracruz, México. *Agro Productividad*, 7(1), 58-65.
- Ureta, C., González, E.J., Espinosa, A., Trueba, A., Piñeiro-Nelson, A. and Álvarez-Buylla E.R. (2020). Maize yield in Mexico under climate change. *Agricultural Systems*, 177, 102697. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102697>.
- Wellhausen, E. J., Roberts, L.M. y Hernández, X.E. (1952). *Razas de Maíz en México, su Origen, Características y Distribución*. Folleto Técnico Núm. 5. Oficina de Estudios Especiales, Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, D F. 237 p.
- Woodmansee, A. (2022). Maize landraces and drought: seed systems in San Miguel del Valle, Oaxaca, Mexico. *Journal of Ethnobiology*, 42(4), 477–496. <https://doi.org/10.2993/0278-0771-42.4.477>.

GRAVEDAD ESPECÍFICA, BIOMASA Y VOLUMEN DE ESPECIES ARBÓREAS PARA PROYECTOS DE CARBONO

SPECIFIC GRAVITY OF WOOD IN TREE SPECIES FOR CARBON PROJECTS

¹Yazmin Pérez-Alavez , ²Gerardo Rodríguez-Ortiz , ³Wenceslao Santiago-García ,
²Gisela Virginia Campos-Angeles , ⁴Meredith P. Martín , ²Salvador Lozano-Trejo 

^{1,2} Estudiante, investigador, Tecnológico Nacional de México, Campus Valle de Oaxaca (ITVO). División de Estudios de Posgrado e Investigación. Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México. C.P. 71233. ³ Universidad de la Sierra Juárez, División de Estudios de Postgrado-Instituto de Estudios Ambientales, Ixtlán de Juárez Oaxaca, México. C. P. 68725. ⁴ Yale School of Forestry & Environmental Studies, 284 Graham Avenue, Brooklyn, NY, 11211, USA. ⁵Autor de correspondencia: (yazminprz720@gmail.com).

RESUMEN

Una de las preocupaciones mundiales que más ha destacado es la concentración del dióxido de carbono, afectando la atmosfera de la Tierra. Uno de los componentes importantes para conocer la calidad y dureza de la madera es la gravedad específica (*GE*, densidad básica de la madera), además es una propiedad hereditaria de gran importancia comercial, que se utiliza para estimar montos de carbono (C) en ecosistemas forestales. El objetivo del presente trabajo fue documentar información de la *GE*, biomasa y volumen de especies arbóreas y arbustivas para proyectos de secuestro de C. Se realizó una revisión bibliográfica en artículos científicos, de investigación y revistas de divulgación científica para conocer las diferentes ecuaciones alométricas que mayormente se utilizan para cuantificar la cantidad de biomasa, C y *GE* de diferentes especies del género pino, encino, arbustos y otras arbustivas. La *GE* se utiliza para estimar los montos de biomasa y C a partir del volumen maderable de las especies; esto es de gran utilidad en los proyectos de secuestro de C de comunidades forestales para que puedan incursionar en el Mercado Voluntario de Carbono. La Reserva de Acción Climática (CAR) utiliza la *GE* para poder realizar los cálculos correspondientes, siendo un factor importante en todo México para las diferentes especies existentes.

Recibido: 14/09/2023
Aceptado: 18/10/2023

Palabras clave: biomasa, densidad básica, gases de efecto invernadero, modelos de volumen.

ABSTRACT

One of the most prominent global concerns is the concentration of carbon dioxide, the greenhouse gas that most affects the atmosphere of Earth. One of the most important components to know the quality and hardness of wood is the specific gravity (*SG*, basic density of wood), it is also a hereditary property of great commercial importance, which is used to estimate amounts of carbon (C) in forest ecosystems. The objective of this work was to document information on the *SG*, biomass and volume of tree and shrub species for C sequestration projects. A bibliographic review was carried out in different scientific and research articles, popular science magazines to know the different allometric equations that are most used to know the amount of biomass, carbon and *SG* of different species of the pine genus, oak, shrubs and some shrubs. The *SG* is used to estimate the amounts of biomass and C from the timber volume of the species, this is very useful in projects to sequester C from forest communities so that they can enter the Voluntary Carbon Market. The Climate Action Reserve (CAR) uses the *SG* to be able to carry out the corresponding calculations, being an important factor throughout Mexico for the different existing species.

Index words: biomass, basic density, greenhouse gases, volume models.

conservación y recuperación de los bosques (Ranero y Covaleda, 2018).

INTRODUCCIÓN

La concentración de gas de efecto invernadero (GEI) ha aumentado considerablemente, provocando la disminución de la materia orgánica, la humedad del suelo, temperatura, biomasa microbiana, calidad del suelo y cultivo (Chen et al., 2020; Haque et al., 2020; Li et al., 2020; IPCC, 2013; Usepa, 2013; Montzka et al., 2011); estos gases contribuyen al cambio climático atribuido directa o indirectamente a la actividad que el humano está provocando, lo cual altera la composición de la atmósfera global y al incremento de la temperatura atmosférica (Andrade-Castañeda et al., 2016; Torres et al., 2011; Concha et al., 2007). Una forma de mitigar los efectos que genera el CO₂ es capturarlo y mantenerlo el mayor tiempo posible en la biomasa de las plantas y en el suelo (Mendoza-de Armas y Jiménez-Narváez, 2017; Saynes-Santillán et al., 2016; Torres et al., 2011).

En el 2013 comenzó en México el mercado voluntario de carbono (*MVC*), permitiendo a empresas convertir sus servicios y productos en carbono (C) neutral. Esto significa que la huella de C del producto o servicio ha sido compensada con la compra de bonos de C, neutralizando su impacto ambiental (Lucatello, 2012). El mercado de bonos de C es uno de los mecanismos que ha utilizado la economía ambiental para tratar de mitigar las emisiones de GEI a nivel mundial, cada bono de C representa una tonelada de CO₂ equivalente reducida o removida de la atmósfera (Doherty-Bigara y His, 2021). La denominación de bonos de C generalmente se utiliza para identificar las unidades de C que se transmiten a través de mercados voluntarios. Los bonos de C se generan cuando se realizan acciones para mitigar el cambio climático, es decir evitando una deforestación y permitiendo que el bosque siga con la cantidad de árboles en pie, generando ingresos para los productores e integrándolos a la

Los ecosistemas forestales conforman uno de los reservorios de C más importantes a escala mundial, pues son importantes en la regulación del clima (Cortés-Pérez et al., 2021; Kurz et al., 2016), constituyen el almacén de C más importante porque son fuentes de mitigación y reducción de GEI, en particular de CO₂, tienen la capacidad tanto para emitir como secuestrar CO₂, un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático. El proceso de la fotosíntesis ayuda a absorber en los árboles el CO₂ de la atmósfera y lo almacenan como C en su biomasa, (tronco, hojas, ramas, raíces y suelo) (Carvajal-Agudelo y Andrade, 2020; IPCC, 2013). En la vegetación forestal la mayor acumulación de biomasa y de C se encuentran en el estrato arbóreo y herbáceo; su almacenamiento y captura dependen del clima, la densidad, la humedad, la especie, y la calidad del sitio. Los principales componentes de la biomasa aérea del estrato arbóreo son el fuste, las ramas y el follaje (Ordóñez-Díaz et al., 2015).

Los ecosistemas forestales son de gran importancia ya que su vegetación y suelo intercambian el 80 % C con la atmósfera, gracias a este proceso almacenan cantidades de C en la biomasa de sus hojas, ramas, tallos y raíces, mientras liberan oxígeno hacia la atmósfera, actuando como sumideros de C (Casiano-Domínguez et al., 2018; Pardos, 2010). El C almacenado se encuentra en la biomasa de los árboles y corresponde a la materia orgánica producida en un bosque, destacándose cuatro tipos de biomasa: biomasa viva, biomasa subterránea, materia orgánica muerta y biomasa en el suelo (FAO, 2002). Por esta razón, se han implementado políticas gubernamentales y acuerdos internacionales que proporcionan mecanismo de flexibilidad; uno de ellos el proyecto llamado mecanismo de desarrollo limpio (Concha, Alegre y Pocomucha, 2007), como forma de compensar a los países que protegen sus bosques y aquellos que reducen las emisiones de GEI (Torres et al., 2011). El Protocolo Forestal para México

(PFM) de la Reserva de Acción Climática (CAR) ayuda a incrementar el conocimiento al sector forestal para secuestrar, almacenar y emitir CO₂, obteniendo beneficios positivos con los bosques, ante el cambio climático, facilitando el rol positivo que los bosques pueden tener ante el cambio climático.

El peso y la dureza son componentes importantes para la gravedad específica (*GE*) o densidad de la madera, está se define como la relación entre la masa y la unidad de volumen, depende de la cantidad y tipo de elementos celulares que constituyen a cada especie, pero también se ve influenciada por el grosor de la pared celular de dichos elementos (Návar, 2011; Přemyslovská et al., 2007; Chavé et al., 2005). Por otra parte, la mayoría de las propiedades físicas y mecánicas de la madera como dureza, peso y resistencia al impacto y a la abrasión están directamente relacionadas con la *GE*; a su vez esta característica se asocia con las condiciones climáticas que prevalecen en la región donde los individuos crecen (Rodríguez et al., 2015).

En México el consumo de leña a nivel residencial ocupa el tercer lugar como energético (SENER, 2012; Chavé, 2002). El objetivo de la investigación fue documentar información de la gravedad específica, biomasa y volumen de especies arbóreas y arbustivas para proyectos de secuestro de C.

DESARROLLO

Gravedad específica de la madera

Uno de los componentes más importantes para conocer la calidad y dureza de la madera es la *GE* (densidad básica de la madera), además es una propiedad hereditaria de gran importancia comercial (De Lima-Costas et al., 2020). Los bosques conformados de pino-encino son los árboles más representativos y económicamente importantes de los ecosistemas templados de México y de todo el mundo, siendo estas las que forman la mayor parte forestal comercial del país,

de tal manera que en estos bosques se concentra la mayor cantidad de C por la gran cantidad de celulosa y hemicelulosas que estos generan (Martin et al., 2021; Uribe-Salas et al., 2019). Algunos factores que afectan la *GE* de la madera y la corteza son la ubicación geográfica de los árboles, el contenido de humedad, la especie, el diámetro a la altura del pecho (*DN*), la edad y la posición del tallo (Miles et al., 2009); la información en México de la densidad básica de la madera es escasa (Velázquez et al., 2004).

Una de las formas para determinar la gravedad específica propuesta por Smith (1954) y tomada por Vázquez-Cuecuecha et al (2015), es la siguiente; $Db = \frac{1}{\frac{Ps-Pa}{Pa} + \frac{1}{1.53}}$, en donde, *Db* = densidad básica de la madera (g cm⁻³), *Ps* = peso saturado (g), *Pa* = peso anhidro (g), 1.53 = constante de la densidad (peso específico) de la madera.

Por otro lado, Giraldo-Charria et al (2014) y Ruiz-Díaz et al (2014) utilizaron la formula $Db = \frac{ps(kg)}{v(m^3)}$, en donde: *ps* = peso seco de la muestra (kg), *v* = volumen (m³). Valencia-Manzo y Vargas-Hernández (1997) utilizaron tres diferentes métodos para calcular la densidad de la madera:

I. Método empírico que considera a las muestras como un cilindro perfecto y con los valores de longitud del diámetro interior de 5 mm se obtiene el volumen de cada sección de las muestras de madera. Se emplea $Vv = \pi D^2 \times \frac{L}{4}$ donde: *Vv* = volumen estimado del cilindro de madera (cm³) *D* = diámetro interior del cilindro del taladro Pressler (0.5 cm) *L* = largo de la muestra de madera (cm). Posterior a ello se debe calcular el peso anhidro (*Po*) de las muestras en una balanza analítica después de deshidratarse en una estufa a 105-110°C hasta alcanzar peso constante. Con los datos de peso anhidro (*Po*) y volumen verde (*Vv*) se obtiene el valor de densidad básica de la madera (*Db*): $Db = \frac{Po(g)}{Vv(cm^3)}$.

2. Método de desplazamiento de agua, colocando muestras en un recipiente con agua, por siete días hasta obtener su peso constante; el volumen por desplazamiento en agua se obtiene colocando un recipiente con agua sobre una balanza; enseguida se introduce cada muestra de madera sin tocar las paredes en el fondo del recipiente, de modo que se obtiene el peso del agua desplazada, mismo que corresponde al volumen de la muestra (Vv).

3. Método de máximo contenido de humedad (MCH), la fórmula para obtener la densidad de la madera con este método fue presentada por Smith (1954) y tomada por Valencia-Manzo y Vargas-Hernández (1997), es la siguiente: $Db = \frac{1}{\frac{Ps-Po}{Po} + \frac{1}{Dr}}$ Donde: Db = densidad básica de la madera ($g\ cm^{-3}$), Ps = peso de la muestra saturada

(g) Po = peso de la muestra anhidra (g) Dr = densidad de la pared celular seca (1.53).

La GE es una característica sumamente importante para la obtención de la biomasa ya que este es un factor clave en la misma, para su obtención solo se necesita su peso seco y su volumen fresco (Cutini, Chianucci y Manetti, 2013). Al utilizar una variable de fácil medición (dn) se obtiene el volumen utilizando las fórmulas de los sistemas biométricos para Oaxaca o utilizando algún otro modelo para la especie, posterior a ello se calcula la gravedad específica de la especie y el producto de ambos genera la biomasa por individuo; cabe mencionar que la gravedad específica, aunque las especies sean las mismas, cambian dependiendo del lugar en donde se encuentren, esto se debe al clima, altitud, y exposición (Tablas I, 2, 3).

Tabla I. Gravedad específica (GE) de la madera de diferentes especies del género *Pinus*.

Lugar	Especie	GE ($g\ cm^{-3}$)	Fuente
Durango	<i>P. arizonica</i> Engelm., 1878	0.500	De la Paz-Pérez y Olvera, 1981
México	<i>P. ayacahuite</i> C. Ehrenb. Ex Schltl., 1838	0.420	Fuentes, 1998;
Puebla	<i>P. ayacahuite</i> C. Ehrenb. Ex Schltl., 1838	0.352-0.389	Quiñones, 1974
Veracruz	<i>P. ayacahuite</i> C. Ehrenb. Ex Schltl., 1838	0.368	Quiñones, 1974
México	<i>P. caribaea</i> Morelet, 185	0.340-0.680	Chudnoff, 1980
México	<i>P. cembroides</i> Zucc., 1832	0.560-0.650	Eguiluz, 1978
Nuevo León	<i>P. cembroides</i> Zucc., 1832	0.533	Wolf, 1985
México	<i>P. contorta</i> Douglas ex Loudon, 1838	0.360	Fuentes, 1998
Baja California	<i>P. contorta</i> Douglas ex Loudon, 1838	0.362	Romero et al., 1982
México	<i>P. coulteri</i> Lamb. Ex D. Don, 1838	0.420	Fuentes, 1998
México	<i>P. coulteri</i> Lamb. Ex D. Don, 1838	0.419	Sotomayor, 2014
Baja California	<i>P. coulteri</i> Lamb. Ex D. Don, 1838	0.416	Romero et al., 1982
Chiapas	<i>P. chiapensis</i> (Martínez) Andersen, 1964	0.524-0.639	Miranda, 2015
Guerrero	<i>P. chiapensis</i> (Martínez) Andersen, 1964	0.330	Camacho, 1988
Zacatecas	<i>P. chihuahuana</i> Engelm., 1848	0.540	Eguiluz, 1978
Zacatecas	<i>P. chihuahuana</i> Engelm., 1848	0.440	Camacho, 1988
México	<i>P. chiapensis</i> Lindl., 1839	0.500	Fuentes, 1998;
México	<i>P. chiapensis</i> Lindl., 1839	0.390-0.470	Wright, 1999
México	<i>P. chiapensis</i> Lindl., 1839	0.570-0.700	Salazar y Soihet, 2001
México	<i>P. chiapensis</i> Lindl., 1839	0.450	Zanne et al., 2010

Michoacán	<i>P. chiapensis</i> Lindl., 1839	0.430-0.450	Echenique-Manrique y Díaz, 1969
México	<i>P. douglasiana</i> Martínez, 1943	0.420	Fuentes, 1998
Michoacán	<i>P. douglasiana</i> Martínez, 1943	0.420-0.490	Echenique-Manrique y Díaz, 1969
Durango	<i>P. durangensis</i> Martínez, 1942	0.530	Silva-Arredondo y Nívar-Chaidez, 2010
México	<i>P. edulis</i> Engelm., 1848	0.500	Zanne et al., 2010
Durango	<i>P. engelmannii</i> Carrière, 1854	0.511	Camacho, 1988
México	<i>P. flexilis</i> E. James, 1823	0.370	Zanne et al., 2010
Hidalgo	<i>P. greggii</i> Engelm. ex Parl., 1868	0.304-0.394	García, 2005
Nuevo León	<i>P. greggii</i> Engelm. ex Parl., 1868	0.443-0-509	López y Valencia-Manzo, 2001
México	<i>P. halepensis</i> Mill., 1768	0.460	Zanne et al., 2010
México	<i>P. hartwegii</i> Lindl., 1839	0.410	Fuentes, 1998
México	<i>P. hartwegii</i> Lindl., 1839	0.410-0.480	Zanne et al., 2010
México	<i>P. hartwegii</i> Lindl., 1839	0.410	Sotomayor y Ramírez, 2013
Ciudad de México	<i>P. hartwegii</i> Lindl., 1839	0.421	Quiñones, 1974
Ciudad de México	<i>P. hartwegii</i> Lindl., 1839	0.460-0.490	Echenique-Manrique y Becerra, 1981
Estado de México	<i>P. hartwegii</i> Lindl., 1839	0.355	Quiñones, 1974
Puebla	<i>P. hartwegii</i> Lindl., 1839	0.411	Quiñones, 1974
Michoacán	<i>P. herrerae</i> Martínez, 1940	0.550	Camacho, 1988
México	<i>P. jeffreyi</i> Balf., 1853	0.380	Fuentes, 1998
México	<i>P. jeffreyi</i> Balf., 1853	0.380	Sotomayor y Ramírez, 2013
Baja California	<i>P. jeffreyi</i> Balf., 1853	0.381	Romero et al., 1982
México	<i>P. johannis</i> Rob. -Pass., 1978	0.350	Fuentes, 1998
México	<i>P. johannis</i> Rob. -Pass., 1978	0.350	Sotomayor y Ramírez, 2013
Baja California	<i>P. johannis</i> Rob. -Pass., 1978	0.350	Romero et al., 1982
México	<i>P. lawsonii</i> Roetzl ex Gordon, 1862	0.470	Fuentes, 1998
Michoacán	<i>P. lawsonii</i> Roetzl ex Gordon, 1862	0.470-0.510	Echenique-Manrique y Díaz, 1969
Michoacán	<i>P. lawsonii</i> Roetzl ex Gordon, 1862	0.670	Camacho, 1988
México	<i>P. leiophylla</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.440-0.460	Sotomayor y Ramírez, 2013
Estado de México	<i>P. leiophylla</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.440	Quiñones, 1974
Michoacán	<i>P. leiophylla</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.450	Quiñones, 1974
Puebla	<i>P. leiophylla</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.419	Quiñones, 1974
Durango	<i>P. lumholtzii</i> B. L. Rob. y Fernald, 1895	0.690	Camacho, 1988
México	<i>P. maximinoi</i> H. E. Moore, 1966	0.430	Sotomayor y Ramírez, 2013
México	<i>P. monophylla</i> Torr. y Frém., 1845	0.560	Martínez, 1948
México	<i>P. montezumae</i> Lamb., 1832	0.420	Sotomayor y Ramírez, 2013
Veracruz	<i>P. montezumae</i> Lamb., 1832	0.420	Dávalos, Echenique-Manrique y Sánchez, 1978
México	<i>P. oocarpa</i> Schiede ex Schltdl., 1838	0.550	Chudnoff, 1980
México	<i>P. patula</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.400-0.500	Chudnoff, 1980
Hidalgo	<i>P. patula</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.487	Quiñones, 1974

Oaxaca	<i>P. patula</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.510	Martínez y Martínez-Pinillos, 1996;
Puebla	<i>P. patula</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.470	Quiñones, 1974
Veracruz	<i>P. patula</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.470-0.480	Dávalos, Echenique-Manrique y Sánchez, 1978
México	<i>P. ponderosa</i> Lawson y C. Lawson, 1836	0.380	Fuentes, 1998
Baja California	<i>P. ponderosa</i> Lawson y C. Lawson, 1836	0.368-0.410	Quiñones, 1974
México	<i>P. pringlei</i> Shaw, 1905	0.471-0.500	Sotomayor y Ramírez, 2013
México	<i>P. pseudostrobus</i> Lindl., 1839	0.540	Fuentes, 1998;
México	<i>P. quadrifolia</i> Parl. ex Sudw., 1897	0.410	Fuentes, 1998
Baja California	<i>P. quadrifolia</i> Parl. ex Sudw., 1897	0.411	Romero et al., 1982
México	<i>P. radiata</i> D. Don, 1836	0.380	Echenique-Manrique y Robles, 1993
Michoacán	<i>P. rzedowskii</i> Madrigal y Caball. Del., 1969	0.520-0.740	Eguiluz, 1978
México	<i>P. teocote</i> Schltdl. y Cham., 1830	0.510	Fuentes, 1998;
Durango	<i>P. teocote</i> Schltdl. y Cham., 1830	0.570	Silva-Arredondo y Návar-Chaidez, 2012
Oaxaca	<i>P. teocote</i> Schltdl. y Cham., 1830	0.490	Martínez y Martínez Pinillos, 1996;
Veracruz	<i>P. teocote</i> Schltdl. y Cham., 1830	0.460-0.470	Dávalos, Echenique-Manrique y Sánchez, 1978

Tabla 2. Gravedad específica (*GE*) de la madera de diferentes especies del género *Quercus*.

Lugar	Especie	<i>GE</i> (g cm ⁻³)	Fuente
Michoacán	<i>Q. candicans</i>	0.707	Herrera-Fernández et al., 2017
Michoacán	<i>Q. laurina</i> Humb. Y Bonpl	0.664	Herrera-Fernández et al., 2017
Michoacán	<i>Q. rugosa</i> Née	0.543	Herrera-Fernández et al., 2017
Durango, México	<i>Q. spp</i>	0.470	Silva-Arredondo y Návar-Cháidez, 2012
Sierra de Álvarez, SLP, México	<i>Q. thinkami</i>	0.735	Bárceñas-Pazos et al., 2008
Sierra de Álvarez, SLP, México	<i>Q. sebifera</i>	0.678	Bárceñas-Pazos et al., 2008
Guadalajara	<i>Q. castanea</i> Née	0.790	Guzmán, 1992
El Salto, Durango.	<i>Q. laeta</i> Liemb	0.680	Nájera, 2005
Linares, Nuevo León, México	<i>Q. mexicana</i>	0.870	Martínez, 2012
Linares, Nuevo León, México	<i>Q. muehlenbergii</i>	1.130	Martínez, 2012

Tabla 3. Gravedad específica (GE) de la madera de otras especies.

Lugar	Especie	GE ($g\ cm^{-3}$)	Fuente
México	<i>Abies concolor</i> (Gordon y Glend.) Lindl. Ex Hildebr., 1861	0.360	Fuentes, 1998
Baja California	<i>Abies concolor</i> (Gordon y Glend.) Lindl. Ex Hildebr., 1861	0.360	Romero et al., 1982
Durango	<i>Abies durangensis</i> Martínez, 1942	0.390	Camacho, 1988
Michoacán	<i>Abies flinckii</i> Rushforth, 1989	0.400	Herrera, Gómez-Nava y Herrera, 1976
Ciudad de México	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. y Cham., 1830	0.350-0.380	Echenique-Manrique y Becerra, 1981
Estado de México	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. y Cham., 1830	0.370	Camacho, 1988
México	<i>Acer negundo</i> L., 1753	0.416	Zanne et al., 2010
Michoacán	<i>Acer negundo</i> L., 1753	0.500	López, 1997
Michoacán	<i>Acer pseudoplatanus</i> L., 1753	0.508-0.510	Zanne et al., 2010
México	<i>Acer saccharum</i> Marshall, 1785	0.560	Zanne et al., 2010
México	<i>Amphipterygium adstringens</i> (Schltld.) Standl., 1923	0.410	Zanne et al., 2010
Jalisco	<i>Amphipterygium adstringens</i> (Schltld.) Standl., 1923	0.410	Barajas-Morales, 1987
Morelos	<i>Amphipterygium adstringens</i> (Schltld.) Standl., 1923	0.390	Orduño, 1998
México	<i>Anacardium occidentale</i> L., 1753	0.410-0.500	Zanne et al., 2010
México	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	0.720	Tamarit-Urias, 1996
México	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	0.730-1.200	Zanne et al., 2010
México	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	0.961	Horne, 2013
Campeche	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	0.800	Huerta y Becerra, 1974
Chiapas	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	0.800	Torelli, 1994
Chiapas	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	0.610	Martínez y Martínez-Pinillos, 1996;
Jalisco	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	1.200	Barajas-Morales, 1987
Quintana Roo	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	0.800	Torelli, 1994
México	<i>Calocedrus decurrens</i> (Torr.) Florin, 1956	0.360	Fuentes, 1998
México	<i>Calocedrus decurrens</i> (Torr.) Florin, 1956	0.400	Salazar y Soihet, 2001
Chiapas	<i>Comocladia mollissima</i> Kunth, 1824	1.100	Rodríguez, 1985;
México	<i>Comocladia mollissima</i> Kunth, 1824	0.790	Zanne et al., 2010
Jalisco	<i>Comocladia mollissima</i> Kunth, 1824	0.790	Barajas-Morales, 1987
Hidalgo	<i>Cupressus benthamii</i> Endl., 1847	0.390	Camacho, 1988
México	<i>Cupressus lusitanica</i> Mill., 1768	0.430	Chudnoff, 1980
Estado de México	<i>Cupressus lusitanica</i> Mill., 1768	0.390	Herrera, Gómez-Nava y Herrera, 1976
México	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartw., 184	0.400	Zanne et al., 2010
México	<i>Cupressus sempervirens</i> L., 1753	0.380-0.490	Zanne et al., 2010
México	<i>Chamaecyparis lawsoniana</i> (A. Murray) Parl., 1864 [1865]	0.390-0.410	Zanne et al., 2010
Oaxaca	<i>Cyrtoarpa procera</i> Kunth, 1824	0.480	Abundiz, 1999
Puebla	<i>Cyrtoarpa procera</i> Kunth, 1824	0.480	Abundiz, 1999
Coahuila	<i>Dasyliirion cedrosanum</i> Trel., 1911	0.168-0.302	Ríos-Camey et al., 2018
México	<i>Euterpe precatoria</i> Mart., 1842	0.273-0.540	Zanne et al., 2010
Puebla	<i>Guadua aculeata</i> Rupr. Ex E. Fourn., 1886	0.590-0.660	Zaragoza, 2012

Veracruz	<i>Guadua amplexifolia</i> J. Presl, 1830	0.360-0.419-0.475	Ordóñez y Bárcenas-Pazos, 2014
México	<i>Iresine arbuscula</i> Uline y W. L. Bray, 1896	0.480	Zanne et al., 2010
Veracruz	<i>Iresine arbuscula</i> Uline y W. L. Bray, 1896	0.480	Barajas-Morales, 1987
México	<i>Juniperus deppeana</i> Steud., 1840	0.480	Zanne et al., 2010
México	<i>Juniperus 125láccida</i> Schltldl., 1838	0.557	Sotomayor, 2014
México	<i>Mangifera indica</i> L., 1753	0.480-0.680	Zanne et al., 2010
México	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.850	INIF, 1977
México	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.800	Tamarit-Urias, 1996
México	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.590-0.600	Zanne et al., 2010
Campeche	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.698	Richter et al., 2012
Chiapas	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.770	Torelli, 1994
Quintana Roo	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.770	Torelli, 1994
Quintana Roo	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.799	Bárcenas-Pazos et al., 2003
Quintana Roo	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.698	Richter et al., 2012
Durango	<i>Picea chihuahuana</i> Martínez, 1942	0.530	Camacho, 1988
México	<i>Picea engelmannii</i> Parry ex Engelm., 1863	0.330	Zanne et al., 2010
Ciudad de México	<i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco, 1949 ó <i>Thuja orientalis</i> L., 1753	0.502-0.532	Zanne et al., 2010
México	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco, 1950	0.400-0.453	Zanne et al., 2010
México	<i>Podocarpus guatemalensis</i> Standl., 1924	0.400	Zanne et al., 2010
México	<i>Podocarpus matudae</i> Lundell, 1937	0.700	Zanne et al., 2010
Puebla	<i>Podocarpus matudae</i> Lundell, 1937	0.510	Camacho, 1988
México	<i>Podocarpus oleifolius</i> D. Don ex Lamb., 1824	0.440-0.460	Zanne et al., 2010
Chiapas	<i>Taxodium mucronatum</i> Ten., 1853	0.464	Miranda, 2015
Estado de México	<i>Saurauia serrata</i> DC., 1822	0.500	Aguilar-Rodríguez, 1996;
México	<i>Saurauia yasicae</i> Loes., 1896	0.435	Zanne et al., 2010
Veracruz	<i>Saurauia yasicae</i> Loes., 1896	0.400-0.470	Barajas-Morales, 1987

Estimación de biomasa

La biomasa está constituida por los componentes leñosos (árboles en pie) y el sotobosque: pastos, hierbas, hojarasca, mantillo, necromasa y el suelo (INTECO, 2016; Herrera et al., 2001; Husch, 2001; Nadler et al., 2001; IPCC, 1996). Los bosques son una de las fuentes más importantes en la captura de C ya que absorben el 30 % de las emisiones de CO₂ en un año (Cutini et al., 2013; Pan et al., 2011; Schlegel, 2001;), cuando llevan un manejo adecuado fijan la mayor cantidad de CO₂, todo esto se encuentra en función de varios factores como la edad del rodal, altura total, calidad de sitio, composición de especies, densidad, condiciones climáticas, edáficas, topográficas y tratamiento silvícola (Graciano-Ávila et al., 2019; Fonseca-González, 2017;

Soriano-Luna et al., 2015; Nívar, 2010; Avendaño et al., 2009; Antonio et al., 2007; Nívar et al., 2005). La densidad arbórea es un indicador que permite caracterizar la acumulación de la biomasa en los ecosistemas forestales, ya que presentan gran cantidad de árboles y se conoce realmente la vegetación existente (Hernández et al., 2013).

Existen diferentes metodologías para la obtención de la captura de carbono, uno de ellos es el método directo o destructivo que es utilizado para la construcción de ecuaciones alométricas y consiste en recolectar la biomasa de todos los árboles en un área conocida, secarla y pesarla, además se miden componentes básicos de un árbol como diámetro a la altura del pecho (*DN*, cm), altura total (*AT*, m), diámetro de copa (*DC*, m) y

longitud de copa (LC , m) (Soriano-Luna et al., 2015; Ruíz- Díaz et al., 2014; Birdsey et al., 2013; Somogyi et al., 2006). Las ecuaciones alométricas de biomasa sirven para conocer la cantidad de biomasa por árbol con variables de fácil medición (Cuevas-Cruz et al., 2022).

Las ecuaciones se realizan a partir de análisis de regresión, donde se estudian las relaciones entre la masa de los árboles y sus datos dimensionales (Rügnitz, León y Porro, 2009).

Díaz-Lezcano y Heyn-Chaparro (2022) utilizaron las siguientes fórmulas para la obtención de la biomasa: $BF = (V \times Pe)/1000$, donde BF = biomasa del fuste ($t\ ha^{-1}$), V = volumen del fuste ($m^3\ ha^{-1}$) Pe = densidad aparente de la madera ($kg\ m^{-3}$); para la biomasa total (BT , $t\ ha^{-1}$) $BT = BF \times FEB$; BF = biomasa del fuste (t); FEB = factor de expansión de biomasa, se utiliza valor de 3.4 para todas las especies de árboles. Biomasa total (BT , $t\ ha^{-1}$) $BT = 0.069 \times (DN^2 \times AT)^{0.9932}$; DN = diámetro a la altura del pecho (1.30 m), AT = altura total (m).

Otro método es el indirecto, consiste en cubicar y calcular el volumen de las trozas con fórmulas dendrométricas; el volumen total del fuste se obtiene con el crecimiento diamétrico, el área basal y la densidad específica de la madera (Francis, 2000). El análisis dimensional o alometría consiste en el estudio del cambio de proporción de varias partes de un organismo (Acosta-Mireles et al., 2002; Brown, 2001). La fórmula más utilizada para este método es la de Brown (1997) y consultada por los siguientes autores: Díaz-Lezcano y Heyn-Chaparro (2022), Quiceno-Urbina et al. (2016), Díaz-Ruíz et al. (2014), Brown (2002), es la siguiente $B = VC \times D \times FEB$, donde: B = biomasa seca ($t\ ha^{-1}$) VC = volumen comercial ($m^3\ ha^{-1}$), D = promedio de densidad de la madera (verde y peso seco) ($t\ m^{-3}$), FEB = factor de expansión de biomasa (relación entre la biomasa sobre el suelo secada en horno de los árboles y el volumen comercial de la biomasa secada en horno), sin dimensión.

En ramas, hojas y raíces, Rodríguez-Ortiz et al. (2019) utilizaron el factor de conversión $B = \frac{(Pv/Ps) \times (Pt)}{1000}$, donde: B = biomasa (kg), Ps = peso seco de la muestra (g), Pv = peso fresco de la muestra (g), Pt = peso total del componente/árbol (g), la biomasa total del árbol es la suma de la biomasa de los componentes estructurales (fuste + corteza, ramas, follajes y raíces). En las tablas 4, 5 y 6 se encuentran algunos de los modelos más utilizados para el género *Pinus*, *Quercus*, *Abies religiosa* y otras hojosas.

Estimación del volumen maderable

El volumen existente de los bosques se encuentra disponible para el abastecimiento de madera, es también un indicador importante sobre el potencial económico del bosque (FAO, 2004; Husch, 2001), de ahí la importancia de cuantificar el contenido de volumen, biomasa y carbono en ecosistemas forestales. La forma de conocer el volumen de madera de un árbol en pie, rollo o madera aserrada es mediante la cubicación, es un procedimiento en el que se toman datos reales de las dimensiones de los árboles en pie (diámetro a la altura del pecho (cm), altura total (m), madera aserrada (ancho, largo y espesor), utilizando un instrumento de medida (flexómetro o clinómetro) (Revilla-Chávez et al., 2021).

Quiceno-Urbina et al. (2016), para calcular el volumen maderable en latifoliadas, utilizaron la siguiente fórmula $V = \frac{1}{4} (3.1416) \times DN^2 \times AT \times Ff$, donde V = volumen del fuste ($m^3\ ha^{-1}$), DN = diámetro a la altura del pecho (cm), AT = altura total (m), Ff = factor de forma (0.70 en latifoliadas y 0.47 en pino; se suman todos los volúmenes y se infiere a hectárea).

Tabla 4. Ecuaciones alométricas más utilizadas para calcular biomasa en diferentes especies del género *Pinus*.

Especie	Modelo	R ² _{adj}	Parámetros	Autor	Lugar
<i>P. ayacahuite</i>	$B = \text{Exp}(\beta_0) \times DN^{\beta_1}$	0.96	$\beta_0 = -3.066$ $\beta_1 = 2.646$	Návar-Cháidez, 2010	Noroeste de México
<i>P. cooperi</i>	$B = \text{Exp}(\beta_0) \times DN^{\beta_1}$	0.91	$\beta_0 = 1.922$ $\beta_1 = 2.231$		
<i>P. durangensis</i>	$B = \text{Exp}(\beta_0) \times DN^{\beta_1}$	0.83	$\beta_0 = -2.108$ $\beta_1 = 2.375$		
<i>P. leiophylla</i>	$B = \text{Exp}(\beta_0) \times DN^{\beta_1}$	0.87	$\beta_0 = -3.549$ $\beta_1 = 2.787$		
<i>P. teocote</i>	$B = \text{Exp}(\beta_0) \times DN^{\beta_1}$	0.86	$\beta_0 = -3.182$ $\beta_1 = 2.702$		
<i>P. pseudostrobus</i> Lind	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.93	$\beta_0 = 0.1549$ $\beta_1 = 2.3572$	Hernández-Moreno et al., 2020	Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca San Juan
<i>P. chiapensis</i> (Mart.) Andresen	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1} \times (AT)^{\beta_2}$	0.95	$\beta_0 = 0.2362$ $\beta_1 = 1.9717$ $\beta_2 = 0.4810$	Chávez-Pascual et al., 2013	Tabaá de la Sierra Norte de Oaxaca
<i>P. pseudostrobus</i> Lind	$\text{Ln}(B) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(DN)$	0.98	$\beta_0 = -3.164$ $\beta_1 = 2.599$	Rodríguez-Laguna et al., 2007	Sierra Madre Occidental
	$B = \beta_0 + \beta_1 \times (DN^2 \times AT)$	0.99	$\beta_0 = 19.21$ $\beta_1 = 0.016$		
	$B = \beta_0 + (\beta_1 \times DN^2 + (\beta_2 \times AT) + (\beta_3 \times DN^2 \times AT))$	0.99	$\beta_0 = -24.15$ $\beta_1 = 0.018$ $\beta_2 = 2.580$ $\beta_3 = 0.015$		
	$B = \beta_0 + (\beta_1 \times DN + (\beta_2 \times AT) + (\beta_3 \times DN^2 \times AT))$	0.99	$\beta_0 = -28.04$ $\beta_1 = 0.959$ $\beta_2 = 1.982$ $\beta_3 = 0.015$		
<i>P. maximinoi</i> H. E. Moore	$B = \beta_0 + (\beta_1 \times DN^2 \times AT + (\beta_2 \times AT) + \beta_3 \times DN \times AT^2)$	0.99	$\beta_0 = -18.37$ $\beta_1 = 0.015$ $\beta_2 = 2.393$ $\beta_3 = 0.0$	Pimienta- de la torre et al., 2019	Las Margaritas Chiapas
	$B = \beta_0 + (\beta_1 \times DN + (\beta_2 \times DN \times AT) + \beta_3 \times DN^2 \times AT)$	0.99	$\beta_0 = -6.66$ $\beta_1 = 0.015$ $\beta_2 = 0.104$ $\beta_3 = 0.014$		
	$B = \beta_0 \ln(DN) - \beta_1$	0.88	$\beta_0 = 88.118$ $\beta_1 = 263.74$		
<i>P. patula</i>	$B = \beta_0(DN) - \beta_1$	0.90	$\beta_0 = 1.6093$ $\beta_1 = 13.534$	Oliva et al., 2017	Amazonas, Perú
	$B = \beta_0 e^{\beta_1(DN)}$	0.91	$\beta_0 = 21.431$ $\beta_1 = 0.022$		
	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.91	$\beta_0 = 0.6575$ $\beta_1 = 1.1794$		
	$B = \beta_0(DN^2) + \beta_1(DN) - \beta_2$	0.90	$\beta_0 = 0.0028$ $\beta_1 = 1.919$ $\beta_2 = 21.762$		

B = biomasa (kg), DN = diámetro normal (cm), AT = altura total (m), EXP = exponencial, Ln = logaritmo natural, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ = parámetros de regresión.

Tabla 5. Ecuaciones alométricas más utilizadas para calcular biomasa en diferentes especies del género *Quercus*.

Especie	Modelo	R ² _{adj}	Parámetros	Autor	Lugar
<i>Q. magnoliaefolia</i> Née	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.98	$\beta_0 = 0.0345$ $\beta_1 = 2.9334$	Gómez-Díaz et al., 2011	Sierra de Huautla, Morelos
<i>Q. laurina</i> Humb. Y Bonpl	$B = Exp[-\beta_0 + \beta_1 \ln(DN^2 \times AT)]$	0.9914	$\beta_0 = 4.3375$ $\beta_1 = 1.0760$	Ruiz-Aquino et al., 2014	Ixtlán de Juárez, Oaxaca
<i>Q. crassifolia</i> Humb. y Bonpl	$B = Exp[-\beta_0 + \beta_1 \ln(DN^2 \times AT)]$	0.9825	$\beta_0 = 2,8664$ $\beta_0 = 0,927$		
<i>Q. rugosa</i> Née	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.92	$\beta_0 = 0.0342$ $\beta_0 = 2.759$	Aguilar et al., 2012	Centro de México
<i>Q. crassifolia</i> Humb. y Bonpl	$B = \beta_0(DN^2 \times AT)^{\beta_1}$	0.96	$\beta_0 = 0.283$ $\beta_0 = 0.807$	Ayala-López et al., 2001	Meseta central de Chiapas
<i>Q. sideroxila</i>	$B = Exp(\beta_0) \times DN^{\beta_1}$	0.91	$\beta_0 = -2.592$ $\beta_0 = 2.585$	Návar- Cháidez, 2010	Noroeste de México
<i>Q. obtusata</i>	$B = \beta_0 \times DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2}$	0.98	$\beta_0 = -2.592$ $\beta_0 = 2.585$	Rodríguez- Laguna et al., 2007	Sierra madre Occidental

B = biomasa (kg), DN = diámetro normal (cm), AT = altura total (m), EXP = exponencial, Ln = logaritmo natural, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$, = parámetros de regresión.

Tabla 6. Ecuaciones alométricas más utilizadas para calcular biomasa en otras especies.

Especie	Modelo	R ²	Parámetros	Autor	Lugar
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.960	$\beta_0 = 0.034$ $\beta_1 = 2.7169$	Hernández- Moreno et al., 2020	Ejido Chincua, Senguio, Michoacán
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$B_{fuste} = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.928	$\beta_0 = 0.0173$ $\beta_1 = 2.7459$	Flores-Nieves et al., 2011	Cerro Tlálloc, Texcoco, Estado de México.
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$B_{ramas} = \beta_0 e^{\beta_1(DN)}$	0.617	$\beta_0 = 1.5842$ $\beta_1 = 0.044$	Flores-Nieves et al., 2011	Cerro Tlálloc, Texcoco, Estado de México.
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$B_{follaje} = \beta_0 e^{\beta_1(DN)}$	0.588	$\beta_0 = 0.841$ $\beta_1 = 0.039$	Flores-Nieves et al., 2011	Cerro Tlálloc, Texcoco, Estado de México.
<i>Gmelina arborea</i>	$B = Exp(\beta_0 + \beta_1 \times \log_{10}(DN^2))$	0.930	$\beta_0 = 0.641384$ $\beta_1 = 2.75382$	Fonseca- González et al., 2021	San Pablo
<i>Alnus acuminata</i> Kunth	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.9515	$\beta_0 = 0.0012$ $\beta_1 = 1.7877$	Díaz-Ríos et al., 2016	Ixayoc, Texcoco, México
<i>Alnus acuminata</i> (Kunth)	$B = Exp(\beta_0 + \beta_1 \times \ln(DN))$	0.9933	$\beta_0 = -2.62104$ $\beta_1 = -2.51036$	Fonseca et al., 2013	Costa Rica
<i>Cupressus</i> <i>lusitanica</i> Mill	$B = Exp(\beta_0 + \beta_1 \times \ln(DN))$	0.970	$\beta_0 = -8.72393$ $\beta_1 = 2.31663$	Fonseca- González et al., 2023	Costa Rica

<i>Clethra mexicana</i>	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.950	$\beta_0 = 0.4632$ $\beta_1 = 1.8168$	Acosta, Carrillo y Gómez, 2011	Sierra-Huasteca, Hidalgo.
<i>Alnus arguta</i> (Schltdl) Spach	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.970	$\beta_0 = 0.1649$ $\beta_1 = 2.2755$	Acosta, Carrillo y Gómez, 2011	Sierra-Huasteca, Hidalgo.

B = biomasa (kg), DN = diámetro normal (cm), AT = altura total (m), EXP = exponencial, Ln = logaritmo natural, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$, = parámetros de regresión.

Díaz-Lezcano y Heyn-Chaparro (2022) utilizan $V = G \times Ff \times AT$ V = volumen del fuste (m³), G = área basal (m²), Ff = factor de forma de Hutchinson (0.775) (4) y AF = altura

de fuste (m). En México se han desarrollado modelos de volumen para las principales especies comerciales arbóreas (Tabla 7) principalmente de clima templado-frío, pero la información es escasa para especies vegetales de clima cálido-húmedo.

Tabla 7. Ecuaciones alométricas más utilizadas para calcular volumen en diferentes especies del género *Pinus*.

Especie	Modelo	R ² _{adj}	Parámetros	Autor	Lugar
<i>P. patula</i> Schl et. Cham	$V = \beta_0 + \beta_1(DN^2) + \beta_2 \times AT + \beta_3(DN^2) \times AT$	0.98	$\beta_0 = 0.2775$ $\beta_1 = 0.1432$ $\beta_2 = 0.4391$ $\beta_3 = 2.8510$	Díaz-Franco et al., 2007	Tlaxcala
<i>P. montezumae</i> Lamb.	$V = e^{\beta_0} \times (DN^2 \times AT)^{\beta_1}$	0.99	$\beta_0 = -0.772$ $\beta_1 = 1.0105$	Muñoz-Flores et al., 2012	Michoacán
<i>P. chiapensis</i> (Mart.) Andresen	$V = \beta_0(DN^2 \times AT)^{\beta_1}$		$\beta_0 = 0.000227$ $\beta_1 = 0.9105$	Chávez-Pascual et al., 2013	San Juan Tabaa de la Sierra Norte de Oaxaca
<i>P. pseudostrobus</i> Lindl.	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.97	$\beta_0 = 0.000264$ $\beta_1 = 2.0603$ $\beta_2 = 0.3521$	Vásquez-Fabián et al., 2017	Villa Sola de Vega, Oaxaca
<i>P. ayacahuite</i>	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.99	$\beta_0 = 0.00817$ $\beta_1 = 1.5928$ $\beta_2 = -0.4072$	Miguel-Martínez et al., 2016	Sierra Norte, Oaxaca
<i>P. ayacahuite</i>	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.99	$\beta_0 = 0.000024$ $\beta_1 = 1.6254$ $\beta_2 = 0.85500$	Rojas-García et al., 2015	
<i>P. teocote</i> Schl et. Cham	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.98	$\beta_0 = 0.00064$ $\beta_1 = 2.145567$ $\beta_2 = 0.668856$	Vásquez-Fabián et al., 2017	Villa Sola de Vega, Oaxaca
<i>P. teocote</i> Schl et. Cham	$V = \beta_0 + \beta_1(DN^2 \times AT)$	0.95	$\beta_0 = 0.00187$ $\beta_1 = 0.4936$	Contreras y Navar, 2002	Durango
<i>P. teocote</i> Schl et. Cham	$V = \beta_0 + \beta_1(DN^2 \times AT)$	0.95	$\beta_0 = 0.04679$ $\beta_1 = 0.4796$	Contreras y Navar, 2002	Durango
<i>P. chiapensis</i>	$V = \beta_0 + \beta_1(DN^2 \times AT)$	0.99	$\beta_0 = 0.04191$ $\beta_1 = 0.00003$	Melchor-Marroquín et al., 2010	Veracruz y Puebla
<i>P. chiapensis</i>	$V = \beta_0 + \beta_1(DN^2) + \beta_2 \times AT + \beta_3(DN^2 \times AT)$	0.98	$\beta_0 = -0.0345$ $\beta_1 = 0.000041$ $\beta_2 = 0.000328$ $\beta_3 = 0.000031$	Melchor-Marroquín et al., 2010	Veracruz y Puebla

<i>P. chiapensis</i>	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.99	$\beta_0 = 0.00003$ $\beta_1 = 1.98050$ $\beta_2 = 0.96080$	Melchor-Marroquín et al., 2010	Veracruz y Puebla
<i>P. chiapensis</i>	$V = \beta_0(DN^2 \times AT)^{\beta_1}$	0.99	$\beta_0 = 0.000039$ $\beta_1 = 0.987700$	Melchor-Marroquín et al., 2010	Veracruz y Puebla
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. Et Cham	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.98	$\beta_0 = 0.00004$ $\beta_1 = 1.50678$	Guzmán-Santiago et al., 2020	Guerrero
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$V = \beta_0(DN \times AT)^{\beta_1}$	0.96	$\beta_0 = 0.00003$ $\beta_1 = 1.55023$	Guzmán-Santiago et al., 2020	Hidalgo
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. Et Cham	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.96	$\beta_0 = 0.00007$ $\beta_1 = 1.81731$ $\beta_2 = 0.96656$	Guzmán-Santiago et al., 2020	Jalisco
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.96	$\beta_0 = 0.00007$ $\beta_1 = 1.79199$ $\beta_2 = 1.01380$	Guzmán-Santiago et al., 2020	México
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$V = \beta_0(DN \times AT)^{\beta_1}$	0.93	$\beta_0 = 0.00003$ $\beta_1 = 1.54884$	Guzmán-Santiago et al., 2020	Michoacán
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.96	$\beta_0 = 0.00006$ $\beta_1 = 1.75637$ $\beta_2 = 1.06774$	Guzmán-Santiago et al., 2020	Puebla
<i>Swietenia macrophylla</i> King	$V = \beta_0 \times (DN^2 \times AT)^{\beta_1} + e$	0.97	$\beta_0 = 0.000046$ $\beta_1 = 0.973468$ $e = 0.001$	Hernández-Ramos et al., 2018	Centro y sur de Quintana Roo
<i>Swietenia macrophylla</i> King	$V = \beta_0 \times DN^{\beta_1}(DN^2 \times AT^{\beta_2}) + e$	0.97	$\beta_0 = 0.000024$ $\beta_1 = 0.560998$ $\beta_2 = 0.744073$ $e = 0.001$	Hernández-Ramos et al., 2018	Centro y sur de Quintana Roo

V = volumen (m^3), DN = diámetro normal (cm), AT = altura total (m), Ln = logaritmo natural, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ = parámetros de regresión.

Estimación de carbono aéreo

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (*MDL*) es un procedimiento contemplado en el Protocolo de Kyoto por el que países desarrollados pueden financiar proyectos de mitigación de emisiones de *GEI* y recibir a cambio certificados de reducción de emisiones aplicables a su propio compromiso de reducción (Mercado-García y Molina-Rodríguez, 2021; INECC, 2016). Los países dedicados a los proyectos se benefician reduciendo sus emisiones, generando bonos de carbono que se utilizan para cubrir sus compromisos ante el Protocolo, o bien, venderlos en el mercado abierto (Karakosta et al., 2009).

Ésta es la instancia, en la que países como México pueden participar en la reducción global de emisiones y ser parte del mercado de los bonos de carbono (Fronti y García-Fronti, 2013; UNFCC, 2011). Los proyectos de *MDL* aprobados producen reducciones certificadas de emisión (*CER*), pueden ser negociadas con instituciones, empresas, industrias o países que no están alcanzando sus propias metas de emisión de CO_2 . Un *CER* representa una tonelada de carbono que deja de emitirse a la atmósfera, aunque su precio varía según el tipo de proyecto, el valor por unidad actualmente es aproximadamente de 13 euros o 6.5 dólares (Sendeco, 2011).

Por otro lado, el Protocolo Forestal para México (PFM) de la Reserva ayuda a incrementar la capacidad del sector forestal para secuestrar, almacenar y emitir CO₂, facilitando el buen manejo que los bosques pueden llegar a tener ante el cambio climático, lo cual permite que aquellos propietarios manejen sus bosques y sean compensados directamente, aumentando los acervos de carbono. Las empresas e instalaciones con calderas industriales y comerciales cuentan ahora con un modo eficiente, y flexible para generar créditos de carbono utilizados en el Mercado Voluntario de Carbono. Para determinar el C, se debe obtener la diferencia de C en biomasa y el suelo en un tiempo determinado y la diferencia es el C secuestrado (CAR, 2013).

COMENTARIOS FINALES

La densidad básica de la madera (*DB*) es una característica de alta heredabilidad en árboles y, al mismo tiempo, un indicador de la dureza, resistencia y contenido de celulosa y hemicelulosas; estos últimos son cadenas de carbohidratos donde se almacena con el tiempo el carbono estructural a través del proceso fotosintético y se reducen los niveles de CO₂ en el ambiente. Esta relación estrecha entre la *DB* de la madera y el contenido de carbohidratos permite inferir en los montos de C y otros nutrimentos contenidos en la biomasa maderable, solo con el conocimiento del volumen maderable y su *DB*. Una ventaja de esta metodología es que todos los proyectos de manejo maderable utilizan necesariamente el volumen para medir la productividad, por ello, las estimaciones de secuestro de C de un ecosistema pueden conocerse al tener disponibles los valores de *DB*. De esta manera, la utilidad de la presente revisión es tener acceso a la información para estimaciones de C, y facilitar que comunidades poseedoras de recursos forestales maderables entren al Mercado Voluntario de Carbono.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se llevó a cabo con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

(CONACYT) a través del número de becario 677525 con el tema de investigación de tesis doctoral.

REFERENCIAS

- Abundiz, B.L. A.M. (1999). *Anatomía de la madera en árboles y arbustos del matorral xerófilo de Tehuacán, Puebla*. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). D. F. México.
- Acosta, M., Carrillo F. y Gómez. R. (2011). Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 529-543.
- Acosta-Mireles, M., Vargas-Hernández, J., Velásquez-Martínez A. y Etchevers-Barra, J.D. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36(6), 725-736.
- Aguilar-Hernández, L., García-Martínez, R., Gómez-Miraflor, A. y Martínez-Gómez, O. (2016). Estimación de biomasa mediante la generación de una ecuación alométrica para madroño (*Arbutus xalapensis*). In: *IV Congreso Internacional y XVIII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Aguilar, R., Ghilardi, A., Vega, E., Skutsch, M. & Oyama, K. (2012). Sprouting productivity and allometric relationships of two oak species managed for traditional charcoal making in central Mexico. *Biomass and Bioenergy*, 36, 192–207.
- Aguilar-Rodríguez, S. (1996). *Descripción de la madera y anatomía ecológica de las especies arbóreas de un bosque mesófilo de México*. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). D. F., México.
- Andrade-Castañeda, H. J., Arteaga-Céspedes, C.C. y Segura-Madrígal, M.A. (2016). Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia). *Ciencia y Tecnología*

- Agropecuaria*, 18(1), 103-112. doi:10.21930/rcta.vol18_num1_art:561
- Antonio, N., Tomé, M., Tomé, J., Soares, P. & Fontes, L. (2007). Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 895- 906. DOI:10.1139/x06-276
- Avendaño, H.D.M., Acosta, M.M., Carrillo, A.F. y Etchevers, B.J.D. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32, 233-238.
- Ayala-López, R.S., Bergsma-de Jong, B.H.J. y Ramírez-Maldonado, H. (2001). Ecuaciones para estimar biomasa en la meseta central de Chiapas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7, 153-157.
- Barajas-Morales, J. (1987). Wood specific gravity in species from two tropical forests in Mexico. *IAWA Bulletin*, 8(2), 143-148.
- Bárceñas-Pazos, G.M., Ríos-Villa, R., Aguirre-Rivera, J.R., Juárez, F.B.I. y Honorato, S.J.A. (2008). Composición química y densidad básica relativa de la madera de dos especies arbustivas de encino blanco de la Sierra de Álvarez, S.L.P., México. *Madera y Bosques*, 14(3), 81-94.
- Bárceñas-Pazos, G.M., Zárate, M.R.P., Ordóñez, C.V.R., Guerrero, B.A. y Honorato, S.J.A. (2003). Correlación de los resultados de impacto o tenacidad de 16 maderas mexicanas utilizando dos métodos de prueba. *Madera y Bosques*, 9(1), 55-70.
- Birdsey, R., Angeles, P.G., Kurz, W.A., Lister, A., Olguin, M., Pan, M., Wayson, C., Wilson, B. & Johnson, K. (2013). Approaches to Monitoring Changes in Carbon Stocks for REDD+. *Carbon Management*, 4, 519-537.
- Brown, S. (1997). Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. In: *Congreso Forestal Mundial*. Antalya Turquía.
- Brown, S. (2001). Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116, 363-372.
- Brown, S. (2002). Measuring carbon in forest: Current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116(3), 363-372.
- Carvajal-Agudelo, B.N. y Andrade, H.J. (2020). Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso del suelo, municipio de Yopal, Casanare, Colombia. *Orinoquia*, 24(1), 13-22. <https://doi.org/10.22579/20112629.587>
- Casiano-Domínguez, M., Paz-Pellat, F., Rojo-Martínez, M., Covalada-Ocon, S. y Aryal, D.R. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera y Bosques*, 24(spe), e2401894. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401894>
- Camacho, U.D. (1988). *La madera estudio anatómico y catálogo de especies mexicanas*. Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). D. F., México.
- Concha, Y.J., Alegre, C.J. y Pocomucha, V. (2007). *Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de Theobroma cacao L. en el Departamento de San Martín Perú*. Tesis Profesional. Fac. Ecología Aplicada, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Contreras, J.C. y Návar, J. (2002). Ecuaciones aditivas para estimar componentes de volumen para *Pinus teocote* de Durango, México. *Ciencia Forestal en México*, 27, 67-82.
- Cortés-Pérez, M., León-González, F.D., Paz-Pellat, F., Leyva-Pablo, T., Santiago-García, W., Ponce-Mendoza, A. y Fuentes-Ponce, M. (2021). Almacenamiento de carbono aéreo en un bosque templado de Oaxaca: manejo de alta y baja intensidad. *Madera y Bosques*, 27(spe), e2742440. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742440>
- Cuevas-Cruz, J.C., Aquino-Ramírez, M., Cruz-Kú, C. R., & Morales-Sosa, I.J. (2022). Ecuaciones alométricas aditivas para estimar biomasa aérea y concentración de carbono de *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. *Madera y Bosques*, 28(3), e2832356. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2832356>

- Cutini, A., Chianucci, F. & Manetti, M.C. (2013). Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*P. pinea* L.) in Italian coastal stands. *iForest Biogeosciences and Forestry*, 6, 331-337. DOI: 10.3832/ifer094I-006
- Chavé, J. (2002). *Medición de densidad de madera en árboles tropicales*. Manual de campo. Pan-Amazonia. 7 p.
- Chavé, J., Andalo, C. S., Brown, M.A, Cairns, J.Q., Chambers, J.Q., Eamus, D., Fölster H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B. & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99.
- Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Carrillo-Rodríguez, J.C., Enríquez-del Valle, J.R., Chávez-Servia, J.L. & Campos-Ángeles, G.V. (2013). Factores de expansión de biomasa aérea para *P. chiapensis* (Mart.) Andresen. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(spe6): 1273-1284.
- Chen, L., Chen, Z., Ja, G., Zhon, J., Zhao, J., & Zhang, Z. (2020). Influence of forest on soil freeze-thaw dynamics and greenhouse gas emissions through the regulation of snow regimes: A comparison study of the farmland and forest plantation. *Science of The Total Environment*, 726, 138-403. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138403
- Chudnoff, M. (1980). *Tropical timbers of the world*. U. S. Forest Service, United States Department of Agriculture (USDA). USA.
- Dávalos, S. R., Echenique-Manrique, R. y Sánchez, V.J. (1978). Características mecánicas de tres especies de pino del Cofre de Perote, Veracruz. *Biótica*, 3(1), 37-55.
- De Lima-Costas, E.S., Cavalcante-do Santos, R., Baptista-Vidaurre, G., Vinícius- Oliveira, C.R., Gonçalves-Rocha, M.S., Lorenzato-Carneiro, R. & Trugilho, F.P. (2020). The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones. *Forest Ecology and Management*, 45(8), 117-807. doi:10.1016/j.foreco.2019.117807
- Díaz-Lezcano, M.I. y Heyn-Chaparro, J.M. (2022). Estimación del contenido de carbono en la cobertura forestal de un bosque secundario del distrito de Curuguaty, Paraguay. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 27(2), 55-71. <https://doi.org/10.32480/rscp.2022.27.2.55>
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E. y Etchevers-Barra, J.D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25-34. <https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311233>
- Díaz-Ríos, M.J., Vázquez-Alarcón, A., Uribe-Gómez, M., Sánchez-Vélez, A., Lara- Bueno, A. y Cruz-León, C.A. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en aile obtenidas mediante un método no destructivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(spe16), 3235-3249.
- Doherty-Bigara, J. y His, S. (2021). *¿Son los mercados de carbono un mecanismo sólido para asegurar el éxito del Acuerdo de París?*. 23 de mayo de 2022, de Banco Interamericano de Desarrollo
- Eguiluz, P. T. (1978). *Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género Pinus en México*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México, México.
- Echenique-Manrique, R. y Becerra, M.J. (1981). *Algunas características fisicomecánicas de la madera de tres especies de la Cordillera Neovolcánica*. Nota Técnica. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF), Subsecretaría Forestal y de la Fauna (SFF), Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). México.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2004). *Actualización de la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales a 2005*. Términos y Definiciones (Versión Definitiva). Programa de

- Evaluación de los Recursos Forestales. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. 35 p.
- FAO. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://goo.gl/64uVDj>.
- Fonseca-González W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 51, 91-109, <http://dx.doi.org/10.15359/rca.51-2.5>
- Fonseca, W., Ruíz, L., Rojas, M. y Alice, F. (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 4(46). <https://doi.org/10.15359/rca.46-2.4>
- Fonseca-González, W., Rojas-Vargas, M., Villalobos-Chacón, R. y Alice-Guier, F. (2023). Estimación de biomasa y carbono en árboles de *Cupressus lusitanica* Mill. en Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 57(2), 1-17. <https://doi.org/10.15359/rca.57-2.6>
- Fonseca-González, W., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C., Rojas-Vargas, M. y Spínola-Parallada, R.M. (2021). Modelos de biomasa y carbono para árboles de *Gmelina arborea* en plantaciones clonales. *Ciencias Ambientales*, 143-159. <http://dx.doi.org/10.15359/rca.55-1.7>.
- Flores-Nieves, P., López-López, M.M, Ángeles-Pérez, G., de la Isla-Serrano, M.L. & Calva-Vásquez, G. (2011). Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham: en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8), 9-20.
- Francis, J. K. (2000). Estimating biomass and carbon content of saplings in Puerto Rican secondary forests. *Caribbean Journal of Science*, 36(3-4), 346-350.
- Fronti, L. y García-Fronti, I. (2013). Viabilidad y cuestiones contables de los proyectos de mecanismo de desarrollo limpio en Argentina. *Visión de Futuro*, 17(1), 30-48.
- Fuentes, S. M. (1998). Propiedades tecnológicas de las maderas mexicanas, de importancia en la construcción. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 41(1), 221-229.
- García, V. A. N. (2005). *Contribución de las propiedades físicas de la madera de Pinus greggii proveniente de dos plantaciones en Hidalgo*. Tesis de licenciatura, Instituto de Ciencias Agropecuarias (ICAP), Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). Hidalgo, México.
- Giraldo-Charria, D. L., Nieto-Rodríguez, V.M., Sarmiento, M. y Borralho, N. (2014). Estimación indirecta de la densidad de la madera mediante el uso de pilodyn en la selección de clones de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Colombia Forestal*, 17(2), 181-192.
- Gómez-Díaz, J.D., Etchevers-Barra, D.J., Monterrosos-Rivas, A.I., Campo-Alvez, J. y Tinoco-Rueda, J.A. (2011). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Q. magnoliaefolia*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2), 261-272. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.117>
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O.A., González-Tagle, M.A., Treviño-Garza, E.J., Mora-Olivo, A. y Buendía-Rodríguez, E. (2019). Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de Durango, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(2), 119-127.
- Guzmán-Santiago, J.C., Aguirre-Calderón, O.A., Jiménez-Pérez, J. y Vargas-Larreta, B. (2020). Estimación de volumen de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en diferentes entidades federativas de México. *Colombia Forestal*, 23(2), 99-113.
- Guzmán, H.L. (1992). *Las cactáceas de la Sierra de Manantlán, Jalisco*. Tesis de licenciatura, Facultad de Agronomía, Universidad de Guadalajara (U de G). Jalisco, México.
- Haque, F., Santos, M.R. & Chiang, W.Y. (2020). CO₂ sequestration by wollastonite-amended agricultural soils-An Ontario field study.

- International Journal of Greenhouse Gas Control*, 97, 103017. DOI: 10.1016/j.ijggc.2020.103017.
- Hernández-Moreno, J.A., Velázquez-Martínez, A., Fierros-González, A.M., Gómez-Guerrero, A., Reyes-Hernández, V.J. y Vera-Castillo, J.A.G. (2020). Estimación de biomasa aérea y carbono, en rodales con y sin manejo forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. *Madera y Bosques*, 26(1), e2611802. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611802>
- Hernández-Ramos, J., Hernández-Ramos, A., García-Cuevas, X., Tamarit-Urias, J.C., Martínez-Ángel, L. y García-Magaña, J. (2018). Ecuaciones de volumen total y de razón para estimar el volumen comercial de *Swietenia macrophylla* King. *Colombia Forestal*, 21(1), 34-46.
- Hernández, R.J., García, M.J.J., Muñoz, F.H.J., García, C.X., Sáenz, R.T., Flores, L.C., Hernández, R.A. (2013). Guía de densidad para manejo de bosques naturales de *P. teocote Schlecht.* et Cham. en Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19), 62-77. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i19.379>
- Herrera, A., del Valle J. y Alonso, S.O. (2001). Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques tropicales primarios y secundarios de Colombia. En *Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. Valdivia, Chile. 18 p.
- Herrera-Fernández, A.C., Carrillo-Parra, A., Pedraza-Bucio, F.E., Correa-Méndez, F., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P. y Rutiaga Quiñones, J.G. (2018). Densidad, composición química y poder calorífico de la madera de tres especies de encinos (*Quercus candicans*, *Q. laurina* y *Q. rugosa*). *Ciencia Nicolaita*, (72), 136-154. <https://doi.org/10.35830/cn.v0i72.345>
- Herrera, R.J.A., Gómez-Nava, M.S. y Herrera, B.A. (1976). *Durabilidad natural de la madera de especies forestales mexicanas*. Boletín Técnico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF), Subsecretaría Forestal y de la Fauna (SFF), Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). México.
- Horne, J. (Coord.). (2013). A guide to lesser known tropical timber species. Global Forest & Trade Network (GFTN); World Wildlife Fund (WWF). Switzerland.
- Huerta, C.J. y Becerra, M.J. (1974). *Anatomía macroscópica y algunas características físicas de diecisiete maderas tropicales mexicanas*. Boletín divulgativo. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF), Subsecretaría Forestal y de la Fauna (SFF), Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). México.
- Husch, B. (2001). Estimación del contenido de carbono de los bosques. In: *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*, 18-30 de octubre de 2001. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile, 87-92.
- INECC. (2016). El Mecanismo de Desarrollo Limpio. <http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/sectpriv/cc/actoresdelprocesomdl>.
- INIF (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales). (1977). *Algunas características tecnológicas de maderas tropicales mexicanas*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF). México.
- INTECO (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica). (2016). *Metodología para la cuantificación y reporte de remociones de gases de efecto invernadero producto de actividades forestales* INTE/ DN03:2016. San José, Costa Rica.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2013). *Cambio climático: bases físicas*. Contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. IPCC, Ginebra, Suiza.
- IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) (1996). *Report of the twelfth session of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Reference manual and workbook of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories. México.
- Karakosta, Ch., Doukas, H. y Psarras, J. (2009). Directing clean development mechanism

- towards developing countries' sustainable development priorities. *Energy for Sustainable Development, 13*, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2009.04.001>
- Kurz, W.A., Birdsey, R., Mascorro, V., Greenberg, D., Dai, Z., Olgún, M. & Colditz, R. (2016). *Modelización y evaluación integradas de la dinámica del carbono forestal en América del Norte: herramientas para monitorear, registrar en informes y proyectar emisiones y remociones de gases de efecto invernadero en el sector forestal*. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, 24 p.
- Lucatello, S. (2012). Los mercados voluntarios de carbono en Norteamérica y su gobernanza: ¿qué reglas aplican para el comercio internacional de emisiones en la región? *Norteamérica, 7*(spe), 107-128.
- Li, Ch., Xiong, Y., Haung, Q., Xu, X. & Huang, G. (2020). Impact of irrigation on fertilization regimes on greenhouse emission from soil of mulehng cultivated maize (*Zea mays* L.) field in the upper reaches of Yellow River, China. *Journal of Cleaner Production, 259*, 120873. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120873>
- López, L. M. y Valencia-Manzo, S. (2001). Variación de la densidad relativa de la madera de *Pinus greggii* Engelm. del norte de México. *Madera y Bosques, 7*(1), 37-46.
- Martin, M. P., Peters, C.M., Asbjornsen, H. & Ashton, M.S. (2021). Diversity and niche differentiation of a mixed pine–oak forest in the Sierra Norte, Oaxaca, Mexico. *Ecosphere, 12*(4), e03475. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3475>
- Martínez, R. J.J. (2012). *Propiedades físicas y mecánicas de la madera de las especies Quercus mexicana y Quercus muehlenbergii*. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Nuevo León, México.
- Martínez, C. J. L. y Martínez-Pinillos, C. E. (1996). Características de maquinado de 32 especies de madera. *Madera y Bosques, 2*(1), 45-61.
- Martínez, M. 1948. *Los pinos mexicanos*. Ediciones Botas. México.
- Melchor-Marroquín, J.I., Hernández, A., Acosta, M. y García, J.J. (2010). *Tabla de volumen para Pinus chiapensis*. INIFAP, México.
- Mendoza-de Armas, C. y Jiménez-Narváez, G. (2017). Relación entre el efecto invernadero y el cambio climático desde la perspectiva del sector agrario. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 70*(2), 8120-8122.
- Mercado-García, A. y Molina-Rodríguez, C.B. (2021). América Central en el mercado de emisiones: una evaluación multicriterio de proyectos del Mecanismo de Desarrollo Limpio. *Problemas del Desarrollo, 52*(204), 35-58. <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2021.204.69648>
- Miguel-Martínez, A., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J.R., Pérez-León, M. I., Castañeda-Hidalgo, E., y Santiago-García W. (2016). Factores de expansión de biomasa aérea para *P. ayacahuite* del norte de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 7*(7), 1575-1584.
- Miles, P., Smith, D. & Brad, W. (2009). *Specific gravity and other properties of wood and bark for 156 tree species found in North America*. Res. Note NRS-38. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 35 p. <https://doi.org/10.2737/NRS-RN-38>
- Miranda, F. (2015). *La vegetación de Chiapas*. Tomo 2. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH). Chiapas, México.
- Montzka, S.A., Dlugokencky, E.J. & Butler & J.H. (2011). Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. *Nature, 476*, 43-50.
- Muñoz, F.J., Aguilar, M.R., Madrigal, S.H., García, J.M., Lara, M. y Madrigal, L.H. (2002). *Elaboración de una tabla de volúmenes de Pinus montezumae en la región oriente de Michoacán*. Ficha tecnológica. INIFAP-SAGARPA. Uruapan, Michoacán. 2 p
- Muñoz-Flores, H.J., García-Magaña, J., Orozco-Gutiérrez, G., Coria-Avalos, V.M. y Muñoz-Vega, Y.Y. (2012). Evaluación dasométrica de

- un área semillera de *Pinus montezumae* cordero. A 13 años de su establecimiento en el Municipio de Zacapu, Michoacán. *Foresta Veracruzana*, 14(2), 1-8.
- Nadler, C., Meza, A., Torres, R. y Jara, M.A. (2001). Medición del carbono almacenado en los bosques de la reserva nacional Malleco. IX Región, Chile. In: *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile*.
- Nájera, L.J., Zacarías, V.A., González, M. J. y Luna, G. J. (2005). Propiedades físicas y mecánicas de la madera en *Quercus laeta* Liemb. de El Salto, Durango. *Ra Ximhai*, 1(3), 559-576.
- Návar, J. (2011). *Probabilidad y estadística aplicadas al manejo de recursos naturales y medio ambiente*. McGraw Hill, México, D.F.
- Návar, J. (2010). Measurement and Assessment Methods of Forest Aboveground biomass: A Literature Review and the Challenges Ahead. In: *Biomass*. Maggy Ndombo Benteke Momba (Ed.). Agosto, 2010. Rijeka, Croatia. InTech. pp. 27-64
- Návar-Cháidez J.J. (2010). Biomass allometry for tree species of Northwestern Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12, 507-519.
- Návar C.J.J., González, N. & Graciano, J. (2005). Carbon stocks and fluxes in reforested sites of Durango, Mexico. *Madera y Bosques*, 11, 15-34.
<http://dx.doi.org/10.21829/myb.2005.1121254>
- Oliva, M., Culqui, M., Leiva, L., Collazos, S., Salas, R., Vásquez, R., Héctor, V. y Quintana, J.L. (2017). Reserva de carbono en un sistema silvopastoril compuesto de *Pinus patula* y herbáceas nativas. *Scientia Agropecuaria*, 8(2), 149-157. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.02.07>
- Ordóñez, C. V. R. y Bárcenas-Pazos, G. M. (2014). Propiedades físicas y mecánicas de tres especies de guadas mexicanas (*Guadua aculeata*, *G. amplexifolia* y *G. velutina*). *Madera y Bosques*, 20(2), 111-125.
- Ordóñez-Díaz, J.A.B., Rivera-Vázquez, R., Tapia-Medina, M.E. y Ahedo-Hernández, L.R. (2015). Contenido y captura potencial de carbono en la biomasa forestal de San Pedro Jacuaro, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(32), 7-16.
- Orduño, C. A. (1998). *Anatomía de la corteza de cuatro especies de la selva baja caducifolia del estado de Morelos: origen, desarrollo y regeneración*. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados (COLPOS), Campus Montecillo. México, México.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. DOI: 10.1126/science.1201609.
- Pardos, J.A. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. *Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Ministerio de Ciencia e Innovación*. Madrid, España. <https://goo.gl/FD9PUu>.
- Pimienta-de la Torre, D.deJ., Reyes-Reyes, J., Rodríguez-Morales, J. A. y Marroquín-Morales, P. (2019). Estimación de biomasa aérea total y contenido de carbono de *Pinus maximinoi* H. E. Moore en Las Margaritas, Chiapas, México. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 23(2), 31-41.
- Přemyslovská, E., Slezingerová, J., Rybníček, M., Gryc, V., Vavrčík, H. & Praus, L. (2007). Basic density of wood in different forest type. In: K. Přemyslovská, J. Škvřenina y M. Blaženc, eds. *Bioclimatology and natural hazards. International Scientific Conference, Poľanad Detvou, Slovakia*, 17-20.
- Quiceno-Urbina, N.J., Tangarife-Marín, G.M. y Álvarez-León, R. (2016). Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chigüiro-Chátare de Barrancominas, departamento del Guainía (Colombia). *Luna*

- Azul, 43, 171-202. DOI: 10.17151/luaz.2016.43.9.
- Quiñones, O.J. (1974). *Características físicas y mecánicas de la madera de 5 especies mexicanas*. Boletín Técnico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF), Subsecretaría Forestal y de la Fauna (SFF), Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). México
- Ranero, A. y Covalada, S. (2018). El financiamiento de los proyectos de carbono forestal: Experiencias existentes y oportunidades en México. *Madera y Bosques*, 24(spe), e2401913.
<https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401913>
- Revilla-Chávez, J.M., Abanto-Rodríguez, C., Guerra-Arévalo, W.F., García-Soria, D., Guerra-Arévalo, H., Domínguez-Torrejón, G., & Gabriel da- Silva Carmo, I.L. (2021). Modelos alométricos para estimar el volumen de madera de *Guazuma crinita* en plantaciones forestales. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 25-31.
<https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.003>
- Richter, H.G., Silva, G.J.A., Fuentes, T.F.J., Rodríguez, A.R. y Torres, A.P.A. (2012). *Industrialización, comercialización y manejo sostenible de diez especies nativas mexicanas*. Universidad de Guadalajara (U de G); Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); Comisión Nacional Forestal (CONAFOR); Organización Internacional de las Maderas Tropicales (OIMT). México.
- Ríos-Camey, J.M., López-López, B., Méndez, G.J., Ramírez, D.J.A. y Aguirre, C.Ó.A. (2018). Propiedades físicas y mecánicas de escapos florales de sotol (*Dasyllirion cedrosanum* Trel.) en el sureste de Coahuila. *Agraria*, 15(2), 79-84.
- Rojas-García, F. y Villers-Ruíz, L. (2005). Comparación de dos métodos para estimar la densidad de la madera de *Pinus hartwegii* Lindl. del Volcán La Malinche. *Madera y Bosques*, 11(1), 63-71.
<https://doi.org/10.21829/myb.2005.1111262>
- Rojas-García, F., De Jong, B.H.J. y Martínez-Zurimendí, P. (2015). Base de datos de 478 ecuaciones alométricas para estimar biomasa de árboles y bosques mexicanos. *Annals of Forest Science*, 72, 835-864.
<https://doi.org/10.1007/s13595-015-0456-y>
- Rodríguez, C.R.M. (1985). *Descripción anatómica de 20 especies de maderas de la colección del Dr. Faustino Miranda*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). D. F., México.
- Rodríguez, A.R., Ramírez, A.M., Palacios, H.J., Fuentes, F.J.T., Silva, J.A.G. y Saucedo, A.R.C. (2015). Características anatómicas, físico-mecánicas y de maquinado de la madera de mezquite (*Prosopis velutina* Wooton). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(28), 156-173.
- Rodríguez-Ortiz, G., García-Aguilar, J.Á., Leyva-López, J.C., Ruiz-Díaz, C., Enríquez-del Valle, J.R. y Santiago-García, W. (2019). Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matarrasa. *Madera y Bosques*, 25(1), e2511713.
<https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>
- Rodríguez-Ortiz, G., De los Santos-Posadas, H.M., González-Hernández, V.A., Aldrete, A., Gómez-Guerrero, A. y Fierros-González, A.M. (2012). Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques*, 18(1), 25-41.
<https://doi.org/10.21829/myb.2012.1811116>
- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. y Jurado-Ybarra, E. (2007). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino y pino en Iturbide, N. L. *Ciencia Forestal en México*, 32, 39-56.
- Romero, A.C., de la Paz-Pérez, O.C. y Corral, L.G. (1982). *Características anatómicas y físico-mecánicas de ocho especies de coníferas de Baja California Norte*. Boletín Técnico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF), Subsecretaría Forestal y de la Fauna

- (SFF), Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). México
- Ruiz-Aquino, F., Valdez-Hernández, J.I., Manzano-Méndez, F., Rodríguez-Ortiz, G., Romero-Manzanares, A. y Fuentes-López, M.E. (2014). Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca. *Madera y Bosques*, 20(2), 33-48. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.202162>
- Ruiz-Díaz, C., Rodríguez-Ortiz, G., Leyva-López, J. C. y Enríquez-del Valle, J.R. (2014). Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales en México. *Naturaleza y Desarrollo*, 12(1), 28-45.
- Rügnitz, T.M., León, M.C. y Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. Manual técnico II, Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)/ Consorcio Iniciativa Amazonica (IA). Lima, Perú.
- Salazar, R. y Soihet, C. (2001). *Manejo de semillas de 75 especies forestales de América Latina*. Volumen II. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Costa Rica.
- Saynes-Santillán, V., Etchevers-Barra, J.D., Paz-Pellat, F. y Alvarado-Cárdenas, L.O. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 83-96.
- SENDECO. (2011). www.sendeco2.com
- SENER (Secretaría de Energía). (2012). *Prospectiva de energías renovables 2012-2026*. SENER, Gobierno Federal. México. 156 p.
- Silva-Arredondo, F. M. y Návar-Cháidez, J. J. (2012). Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. *Madera y Bosques*, 18(1), 77-88.
- Soriano-Luna, M.Á., Ángeles-Pérez, G., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F.O. y Razo-Zárate, R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423-438.
- Somogyi, Z., Cienciala, E., Mäkipää, R., Muukkonen, P., Lehtonen, A. & Weiss, P. (2006). Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. *Eur. Journal of Forest Research*, 126, 197-207.
- Schlegel, B. (2001). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. In: *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. Valdivia, Chile.
- Smith, M.D. (1954). *Maximum moisture content method for determining specific gravity of small samples*. Forest Products Laboratory, Forest Service. U.S. Department of Agriculture. Report No. 2014. Madison WI. E.U.A. 8 p.
- Sotomayor, C.J.R. (2014). *Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). México, Michoacán.
- Sotomayor, C. J. R. y Ramírez, P. M. (2013). Densidad y características higroscópicas de maderas mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 9(3), 1-27.
- Tamarit-Urias, J.C. (1996). Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas latifoliadas. *Madera y Bosques*, 2(2), 29-41.
- Torres, J., Espinoza, W., Reddiar, L. y Vázquez, A. (2011). Secuestro de carbono en potreros arbolados, potreros sin árboles y bosque caducifolio de Huatusco, Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(3), 543-549.
- Torelli, N. (1994). Characteristics and prospects for rational use (harvesting) of Mexican tropical forest. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 52(5), 337-341.
- Uribe-Salas, D., España-Boquera, M.L. y Torres-Miranda, A. (2019). Aspectos biogeográficos y ecológicos del género *Quercus* (Fagaceae) en Michoacán, México. *Acta Botánica Mexicana*, (126), e1342. <https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1342>

- Usepa (U. S. Environmental Protection Agency). (2013). *Inventory of U. S. Greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2011*. Washington, dc, EE. UU.: [nscep] National Service Center for Environmental Publications.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention On Climate Change). (2011). *Protocolo de Kioto*. http://unfccc.int/portal_espanol/essential_background/Kioto_protocol/items/3329.php
- Vázquez-Cuecuecha, O.G., Zamora-Campos, E.M., García-Gallegos, E. y Ramírez-Flores, J.A. (2015). Densidad básica de la madera de dos pinos y su relación con propiedades edáficas. *Madera y Bosques*, 21(1), 129-138.
- Vásquez-Fabián, S.A., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J.R., Campos-Angeles, G.V. y Santana-Flores, A. (2017). Volumen y biomasa aérea de *Pinus pseudostrobus* y *P. teocote* del sur de Oaxaca. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 4(2), 164-172.
- Valencia-Manzo, S. y Vargas-Hernández, J. (1997). Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques*, 3(1), 81-87.
- Velázquez, M., Ángeles, A.G., Llanderal, O.T., Román, A.R. y Reyes, V. (2004). *Monografía de Pinus patula*. Conafor, Colpos, Semarnat. México, D.F. 124 p.
- Wolf, F. (1985). Algunas propiedades de la madera de *Pinus cembroides* Zucc. Flores, L. J. E.; Cantú, A. C. M. & Marroquín, de la F. J. S. (Eds.). *Memorias Ier Simposium Nacional sobre pinos piñoneros*. Facultad de Silvicultura y Manejo de Recursos Renovables, Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). México. pp. 69-82.
- Wright, J. A. (1999). *Utilización y calidad de los productos mejorados de Pinus patula en plantaciones manejadas sosteniblemente*. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México, México.
- Zanne, A.E., Westoby, M., Falster, D.S., Ackerly, D. D., Loarie, S.R. Arnold, S.E. Coomes & D.A. (2010). Angiosperm wood structure: global patterns in vessel anatomy and their relation to wood density and potential conductivity. *Am. Journal Botanic*, 97(2), 207215.
- Zaragoza, H. I. (2012). *Anatomía y propiedades físico-mecánicas de culmo de bambú (Guadua aculeata Rupr.) de la región nororiental del estado de Puebla*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México.

ECONOMÍA CIRCULAR DEL AGUA, RELACIÓN CON LOS ODS, BARRERAS Y PRÁCTICAS PARA SU TRANSICIÓN

CIRCULAR WATER ECONOMY, RELATIONSHIP WITH THE SDGs, BARRIERS AND PRACTICES FOR ITS TRANSITION

§Ethnice Dehonor-Márquez^{id}, Noel Enrique Rodríguez-Maya^{id}, Eduardo López-Sandoval^{id}, Irna Zukeyt Garduño-Jaimes^{id}

Tecnológico. Nacional de México (TecNM)-Instituto Tecnológico de Zitácuaro (ITZ), División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI), Zitácuaro, México. §Autor de correspondencia: (ethnice.dm@zitacuaro.tecnm.mx).

RESUMEN

La creciente preocupación por la disponibilidad del agua a nivel local, regional y mundial para satisfacer las diversas necesidades humanas hace necesario el análisis e implementación de estrategias, así como la adopción de prácticas y la superación de barreras que garanticen el derecho a este recurso vital y su sostenibilidad en el tiempo para garantizar la permanencia de futuras generaciones. La economía circular hasta el momento es el único paradigma para la economía actual (extraer, procesar y desechar) tanto en manufactura como en consumo, que se continúa actualmente. En muchos países como México aún se presentan diversas barreras en la transformación a procesos de economía circular y en el caso del agua, eje de las actividades humanas, no es la excepción. Este trabajo de investigación mixta, es el resultado de una revisión sistemática de literatura y de una encuesta a estudiantes de nivel superior. Pretende brindar un panorama actual e informativo a esta problemática, su relación con los objetivos de desarrollo sostenible, las barreras y las perspectivas a considerar desde el punto de vista de los autores para aportar al desarrollo sostenible, mediante acciones que permitan una mejor gestión del agua, así como terminar con costumbres que impactan negativamente al medioambiente mediante la adopción de prácticas que ayuden a minimizar la contaminación y la degradación del planeta.

Palabras clave: actividades antropogénicas, cambio climático, desarrollo sostenible, gestión del agua, impacto ambiental.

ABSTRACT

The growing concern about the availability of water at a local, regional and global level to satisfy diverse human needs makes it necessary to analyze and implement strategies, as well as the adoption of practices and overcoming barriers that guarantee the right to this vital resource and its sustainability over time to guarantee the permanence of future generations. The circular economy so far is the only paradigm for the current economy (extract, process and dispose) both in manufacturing and consumption, which continues today. In many countries like Mexico, there are still various barriers in the transformation to circular economy processes and in the case of water, the axis of human activities, it is no exception. This mixed research work is the result of a systematic review of literature and a survey of higher-level students. It aims to provide a current and informative overview of this problem, its relationship with the sustainable development objectives, the barriers and the perspectives to be considered from the point of view of the authors to contribute to sustainable development, through actions that allow better management of the water, as well as ending customs that negatively impact the environment by adopting practices that help minimize pollution and degradation of the planet.

Index words: anthropogenic activities, climate change, sustainable development, water management, environmental impact.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para la supervivencia de todos los seres vivos que habitan el planeta. Sin embargo, la creciente demanda de agua dulce provocada por el crecimiento de la población humana, su contaminación, su desperdicio, su sobreexplotación, el cambio climático, la deforestación y el desarrollo industrial, han causado una crisis global del agua poniendo en riesgo la disponibilidad del recurso hídrico y por tanto la permanencia de las generaciones futuras. Así como la salud humana y el desequilibrio del planeta debido al inadecuado manejo de las aguas residuales, tanto municipales como industriales que agravan la contaminación de los cuerpos de agua en los que se descargan, rebasando la velocidad de depuración natural del recurso hídrico (Dan et al., 2022; Papadaki, 2021; Pietrzak et al., 2020). El problema que pone en riesgo la salud humana y de los diferentes ecosistemas, se ha agravado con el aumento en el consumo de medicamentos, de productos de limpieza, desinfectantes y personales, dando origen a los contaminantes emergentes, muchos de los cuales pueden ser tóxicos persistentes y no biodegradables, por lo que son complejos de tratar mediante los procesos tradicionales (Dan et al., 2023; Chen; Lin & Zhuang., 2022).

No obstante, el agua es esencial para todo tipo de actividad humana, es decir, el agua es el vector de movimiento principal en todos los ámbitos de la vida y en consecuencia los seres humanos son los responsables del contexto actual debido a las actividades que realizan desde la industrialización del planeta y el aumento en su demanda derivado del crecimiento de habitantes, actualmente alrededor de 8,000 millones, que requieren el recurso hídrico para satisfacer sus necesidades (Ajayi, 2023; INEGI, 2023; UN, 2023). Por tanto, la especie humana también es responsable de disminuir la velocidad de degradación del entorno

y de ser posible, revertir el deterioro que se ha ocasionado al planeta, primeramente concientizarse y participar mediante la creatividad, la innovación, la ciencia y la tecnología, pero principalmente la solidaridad y colaboración a desarrollar y mejorar estrategias rápidas que permitan convertirlas en mejores prácticas para el manejo del agua a través de las cuales se pueda alcanzar el objetivo, “el bienestar común” (Munaro & Tavares, 2023; Khajuria et al., 2022; Koop et al., 2022) y cuya guía nos da la agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), mediante los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

En concordancia con ello, este trabajo pretende brindar un panorama sobre la importancia de migrar hacia la economía circular del agua, así como identificar algunas barreras para su ejecución con la finalidad de superarlas y mostrar perspectivas para mejorar la gestión del agua, promover su cuidado y mejorar la eficiencia de su uso, para lograr una cultura de cuidado del agua, provocar el cambio en actitudes de las personas en general, hacia un mayor interés e involucramiento con el recurso hídrico y de forma general con los recursos naturales y el cuidado del medio ambiente.

DESARROLLO

El trabajo de investigación se fundamentó en la revisión de literatura arbitrada por pares, así como en una encuesta realizada a estudiantes de una institución de nivel superior (IES). Como primera etapa de la investigación, se realizó la búsqueda del material de trabajo del año 2020 al 2023, cuyo tema fue la reducción, el reúso, reciclaje y recuperación del agua, economía circular del agua, estrategias, objetivos de desarrollo sostenible, barreras y desarrollo sostenible; palabras clave con las cuales se realizó la búsqueda mediante bases de datos como Redalyc, Google académico y Science Direct. En la segunda etapa se llevó a cabo una selección del material encontrado. Mediante la relación de la información buscada con el objetivo plasmado en el documento. Como tercera fase se evaluó cada documento para incluirlo en la presente investigación. Como cuarta y última fase se realizó

una encuesta de preguntas cerradas a una población de 48 estudiantes del nivel superior del estado de Michoacán, específicamente del Instituto Tecnológico de Zitácuaro, en septiembre del 2023, donde la mayoría se encuentra entre los 18 a 23 años y una minoría por arriba de esa edad.

Agenda 2030 de la ONU y la gestión del agua

Para hacer frente a esta situación, la problemática se ha abordado con gran preocupación a nivel mundial a través de la agenda 2030 y sus ODS de la ONU se ha extendido con el tiempo a todos los países y sus esferas públicas (instituciones gubernamentales, educativas, científicas y tecnológicas), privadas (industria y sus derivadas de investigación y desarrollo) y de la sociedad civil, a través del desarrollo de planes o agendas estratégicas en alineación con ellos. Los diecisiete ODS asociados 169 metas de la ONU, están basados en cinco

pilares que son: las personas, el planeta, la prosperidad, la paz y la solidaridad (Khajuria et al., 2022; UN, 2022). Toda esta maquinaria está diseñada para soportar a los tres elementos principales del desarrollo: el social, el medioambiental y el económico (Figura 1).

El objeto de estudio, se aborda específicamente en el ODS número 6 “agua limpia y saneamiento” (garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos), aunque se sabe que los diecisiete ODS (Figura 2) se encuentran interrelacionados al igual que los elementos del desarrollo, por lo que un ODS repercute en muchos más y en el caso del agua es un factor decisivo para el resto de los ODS (Khajuria et al., 2022; ONU, 2015). Referente al ODS 6, este se encuentra íntimamente relacionado con los ODS 2, 9, 11, 12, 13, 14 y 15 y 17 no obstante, de manera menos íntima con el resto.



Figura 1. Pilares de los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030 de la ONU (Khajuria et al., 2022).



Figura 2. Objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030 de la ONU (ONU, 2015).

La economía circular

Las consecuencias del actual manejo inadecuado de los desechos ponen en riesgo la salud de todo tipo de seres vivos y ecosistemas, por mencionar deterioros de suelo, aire y de la vida marina derivado de la contaminación. La economía circular (*EC*), se ha propuesto como un enfoque que promueve la sostenibilidad basado inicialmente en tres principios imprescindibles para el manejo de residuos “3R”: uso eficiente (reducir), reusar y reciclar; y que ha evolucionado con el paso del tiempo hasta llegar a 10 principios imperativos “10R”: rechazar, repensar, reducir, reutilizar, reparar, reacondicionar, reprocesar, reusar, reciclar y recuperar (Chrispim, Mattsson, & Ulvenblad, 2023; Ho, Gajanayake, & Usha, 2023; Morsetto, 2023; Neves & Marques, 2022). Lo anterior, contrario al enfoque de economía lineal vigente hoy día en los procesos productivos y de consumo, basados en extraer, producir y tirar, contribuye así la *EC* al logro de los *ODS* de la agenda 2030 (Ching-Chi, 2023; Sanusi, Oke & Bello, 2023; Akter et al., 2022; Khajuria et al., 2022; Marjamaa & Mäkelä, 2022). Específicamente el recurso hídrico, se refiere a la economía circular del agua (Koseoglu-Imer et al., 2023; Meiryani et al., 2022; Brears, 2020). Si a la *EC* adicionamos un indicador del uso del agua, esto es, un indicador de la eficiencia de uso del recurso, como lo son para el caso del agua la medición de la huella hídrica (*HH*) derivada de la metodología de la Water Footprint Network (*WFN*) (Ruiz-Pérez, Alba-Rodríguez, & Marrero, 2022; Deepa, Anandhi, & Alhashim, 2021; Feng et al., 2021), o de la huella de agua (*HA*) (Pierrat et al., 2023; Nika et al., 2022) basada en la metodología de la norma ISO 14046, entre otros indicadores existentes (Li et al., 2022; Meiryani et al., 2022), se tendrá un manejo de los recursos hídricos que permita un futuro sostenible (Hoekstra, 2016).

La *HH* se enfoca en la gestión del recurso, excluye el impacto del uso del agua por las actividades humanas o antropogénicas y se divide en tres tipos de huella: la azul, verde (según las fuentes, para la primera proveniente de ríos lagos o

subterránea y la segunda proveniente de la lluvia) y gris (según los impactos en la calidad del agua, es decir el agua contaminada generada que requiere cierto volumen de agua limpia para diluir los contaminantes para poder devolverla al ambiente) (Li et al., 2022; Ruiz-Pérez et al., 2022; Deepa et al., 2021; Feng et al., 2021). Mientras que la *HA* a través del método del análisis del ciclo de vida (*ACV*), proporciona el impacto potencial al medio ambiente mediante diversas categorías del agua como son la eutrofización, la acidificación y la ecotoxicidad (Deepa et al., 2021; Feng et al., 2021; Pietrzak et al., 2020; Hoekstra, 2016).

Tanto la *HH* como la *HA* son medidas de utilización del agua que sirven como indicadores de desempeño y ayudan a mejorar la eficiencia de su uso. Dichas huellas, son las más abordadas y se han convertido en una herramienta importante para evaluar los impactos ambientales de las actividades humanas. Además de ser usadas para el desarrollo de estrategias en la gestión del agua (Yang, et al., 2023; Ruiz-Pérez et al., 2022; Deepa et al., 2021; Feng et al., 2021; Hoekstra, 2016), sin embargo, hace falta mayor difusión y aplicación de estas en todos los sectores sociales. Su relevancia radica en la premisa, "lo que no se define no se puede medir, lo que no se mide, no se puede mejorar, lo que no se mejora, se degrada siempre" acuñada por William Thomson Kelvin (Lord Kelvin), físico y matemático británico (1824 – 1907) (Fernández & Tamaro, 2004). La cuantificación del agua es una herramienta primordial para su manejo, ya que aporta información sobre el uso, distribución y agotamiento del recurso en un determinado lugar o empresa (Germann et al., 2023; Li et al., 2022).

Los indicadores *HH* y *HA*, de entre muchos otros han tomado importancia debido a la creciente preocupación por la disponibilidad del agua de forma mundial, aunado al impacto del cambio climático en los recursos hídricos, tiene aplicación en la gestión organizacional y en la toma de decisiones gubernamentales que involucran el manejo del agua, para garantizar el derecho al agua (Meiryani et al., 2022; Ruiz-Pérez et al., 2022; Deepa et al., 2021; Feng et al., 2021; ONU, 2015).

Además de otros beneficios, como ayudar al desarrollo social y económico, sin descuidar el medio ambiente, esto es, promover la producción de energías renovables, como lo son la energía hidroeléctrica y la energía solar térmica, involucran en este sentido el *ODS7* “energías renovables y no contaminantes” (Mannina, Gulhan, & Bing-Jie, 2022; Mohamed, 2022; UN, 2022).

Por lo anterior, es importante que todas las personas de la sociedad: consumidores, academia, ciencia, industrias, ciudadanía, gobiernos, etc., tengan un contexto de la problemática que implica la disponibilidad del agua y actúen para prevenir en el futuro cercano crisis relacionadas con el agua, pues sin agua simplemente no hay vida y su mal uso genera alteración de diversos factores, como el calentamiento global, alteración del ciclo del agua, pérdida de biodiversidad, sequías, alteración de la agricultura, cambio climático, fenómenos meteorológicos extremos, etc., los cuales se proveen cada vez más críticos, relacionándose estos riesgos con el *ODS13* “Acción por el clima” el cual busca adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos; así como con el *ODS 14* “Vida submarina” cuyo fin es conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos (ONU, 2015). Es necesaria una colaboración y trabajo conjuntos para mejorar la gestión del agua, a través de la adopción de mejores prácticas y la re-adopción de prácticas ancestrales, sostenibles en su uso (Ching-Chi, 2023; Gashure & Wana 2023; Koseoglu-Imer et al., 2023; Zeballos-Velarde, Butron-Revilla & Manchego-Huaquipaco, 2023).

Se está en un punto de inflexión, donde es imprescindible visualizar el valor real del agua bien sea como portador, como fuente de energía o como proveedora de servicios, antes de tomar cualquier decisión, pero ante todo comprender como el agua es esencial y beneficia la vida de todo ser. Su disponibilidad es limitada y multifactorial, hoy día el crecimiento poblacional, el desarrollo industrial, el cambio climático, su costo, su uso desmesurado y la falta de conciencia en su manejo, son algunos de los factores que repercuten en dicha

disponibilidad y que han incrementado su contaminación y por ende el estrés hídrico. El establecimiento de barreras podrían llevar a cabo la transición de la economía lineal a la *EC* del agua, que deben ser visualizadas y abordadas para superarlas y lograr una gestión sostenible y efectiva del agua (Munaro & Tavares, 2023; Marjamaa & Mäkelä, 2022; Neves & Marques, 2022; Morris et al., 2021). Cabe mencionar que el abordaje de la problemática, se encuentra en la operación de la *EC* a nivel micro, está enfocada a productos, procesos, materiales, empaque, modelos de negocio, compañía o cadena de suministro, mientras que el nivel meso a la operación de la *EC* en simbiosis de parques, redes y núcleos industriales y el macro a ciudades, regiones o países (Chrispim et al., 2023).

Barreras actuales para llevar a cabo la economía circular del agua

Innumerables acuerdos y tratados se han llevado a cabo a nivel internacional para establecer estrategias y compromisos entre los países participantes con el afán de tomar acciones para corregir o subsanar en cierta medida la afectación que se ha ocasionado al planeta y sus diversos ecosistemas, al no saber convivir y respetar al resto de los habitantes de la Tierra. Y aun cuando la contribución no ha sido la misma de los países desarrollados, subdesarrollados y no desarrollados, las consecuencias las pagarán todos, sin importar clase social, raza, género, etc. Sin embargo, dichos tratados parecen involucrar solo a algunas élites, como los son gobiernos y científicos de organizaciones de renombre mundial, que son quienes proponen las acciones que llevará a cabo una nación y las metas que ésta debe alcanzar. No obstante, la mayoría de la población hoy día desconoce muchos de los tratados, conceptos involucrados y metas a alcanzar, así como la problemática, sus causas y las consecuencias de continuar con las mismas prácticas y tendencias (Marjamaa & Mäkelä, 2022); además de no ser parte de la solución al no ser partícipes y desconocer la problemática. Incluso se puede afirmar que la mayoría de los estudiantes universitarios de programas no relacionados con la economía desconocen el modelo económico alterno

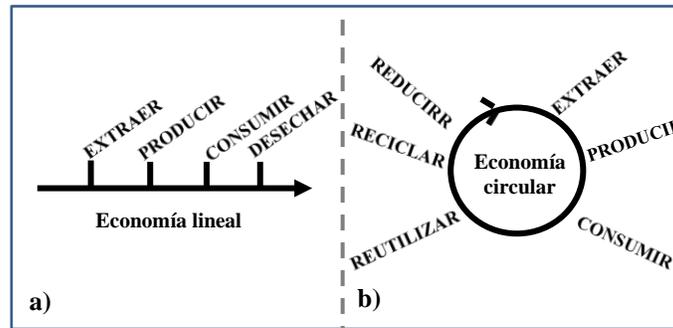


Figura 3. Modelos económicos: a) Lineal y b) circular. Fuente: Elaboración propia.

(economía circular) a la economía usada en la actualidad por el bloque capitalista (economía lineal) (Figura 3).

A pesar de sus múltiples beneficios, existen diversas barreras para llevar a cabo la transición hacia una *EC* del agua (políticas, económicas, sociales, tecnológicas, ambientales, culturales y legales) (Marjamaa & Mäkelä, 2022; Morris et al., 2021; Sharma et al., 2021). Estas son por mencionar: el egoísmo del ser humano, el desconocimiento y falta de participación, la falta de inversión en infraestructura, la falta de incentivos para el cuidado del agua, la falta de colaboración entre sectores, regiones y entre países, pero sobre todo la falta de conciencia e información sobre el cuidado del medio ambiente por parte de la ciudadanía (Munaro & Tavares, 2023; Neves & Marques, 2022; Tan, Tan, & Ramakrishna, 2022; Morris et al., 2021).

El egoísmo del ser humano es lo que ha llevado a estar en este punto de riesgo de la existencia del planeta y de innumerables especies tanto animales como vegetales, así como de diversos ecosistemas (biodiversidad), los cuales disminuyen cada año a mayor velocidad, como consecuencia de la superioridad, comodidad y teóricamente mejor calidad de vida de la raza humana, que en realidad se traduce en invasión de ecosistemas y por tanto eliminación de hábitats de otras especies y degradación de los recursos naturales como son suelo, agua y aire (Pierrat et al., 2023; Marjamaa & Mäkelä, 2022; Deepa et al., 2021), al pensar que el

dinero lo soluciona todo y que el planeta le pertenece al hombre, cuando en realidad, solo es parte de él y lo peor es que se continua con la inercia de no hacer nada, al pensar que lo que un individuo haga no repercute de forma significativa. Así mismo, el desconocimiento de cualquier tema, provoca la omisión de la acción y en este tema no es la excepción, no obstante, es necesario que las generaciones en las que recaerá la acción para la solución de las problemáticas actuales se involucren. Esta posición del ser humano impacta al *ODS 17* “Alianzas para lograr los objetivos” (revitalizar la alianza mundial para el desarrollo sostenible (ONU, 2015).

El desarrollo social y económico ha llevado a la generación de nuevos productos y sustancias químicas que han ocasionado mayor contaminación y generación de residuos a veces peligrosos. Como consecuencias del desarrollo de nuevos productos los cuales en su planificación no contemplaban un diseño ecológico y una evaluación del impacto ambiental que pueden generar durante su ciclo de vida. En investigaciones recientes a este estudio, se le conoce como análisis del ciclo de vida (*ACV*) que permite entre otras cosas medir la circularidad de los materiales y su impacto al ambiente (Pierrat et al., 2023; Brändström & Saidani, 2022; Sharma et al., 2021; Corominas et al., 2020; Hoekstra, 2016), el cual debiera llevarse a cabo al diseñar cualquier producto, servicio o proceso. Y aun cuando se han tenido beneficios como lo es por citar, avances médicos a través de la nanotecnología, valdría la pena colocar en una balanza ambos,

beneficios y perjuicios de ésta; pues si es más que claro que si no se ha podido solucionar la gestión de residuos a nivel macroscópico, mucho menos podrá hacerse a nivel microscópico, esto es, dimensiones que no se pueden ver a simple vista. Hoy día la perspectiva para superar esta barrera es optar por productos más naturales, esto es menos procesados (Pierrat et al., 2023; Marjamaa & Mäkelä, 2022). Se ha comprobado en diversos estudios, que la HH de productos naturales, es mucho menor comparada con aquellos procesados, así como por la adopción hacia un modo de alimentación más saludable, es decir, con mayor consumo de vegetales y sobre todo el consumo de productos de la región; y esto no solo aplica a alimentos, sino también al consumo local de cualquier tipo de producto o el reciclado residuos, disminuye con ello la HH del producto pues se ahorra el agua involucrada en el funcionamiento de la cadena de suministro o distribución (Brändström & Saidani, 2022; Jamwal, Agrawal, & Sharma., 2022; Joséphine, Andrée-Anne, & Samir., 2022). Lo anterior impacta directamente al ODS II “ciudades y comunidades sostenibles” (lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles), pero se encuentra relacionado íntimamente con el ODS 16 “paz, justicia e instituciones sólidas” (Promover sociedades justas, pacíficas e inclusivas), ocasiona que las comunidades en general sean más adaptables a prácticas que reduzcan los residuos, la contaminación, el uso de recursos naturales, en consecuencia disminuye los riesgos a desastres (ONU, 2015).

La falta de inversión en infraestructura es una de las barreras más importantes. Para cerrar el ciclo de vida del agua, se requiere una gran cantidad de infraestructura, como lo son plantas de tratamiento, redes de distribución eficientes, sistemas de recolección de agua de lluvia y aguas grises, así como sistemas de recuperación de agua modernos y que consideren soluciones basadas en la naturaleza (SBN) (Koop et al., 2022; Corominas et al., 2020). El ODS 9 “Industrias, innovación e infraestructura”, precisamente pretende satisfacer lo anterior, mediante la construcción de

infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación (ONU, 2015). La construcción de infraestructura requiere una alta inversión, una visión a largo plazo, además de un análisis ecológico, y muchas veces los gobiernos, empresas y organizaciones no están dispuestos a realizar esta inversión debido a la afectación de intereses económicos y los recursos destinados para ello. Sin embargo, de no realizar esta inversión las consecuencias serán una catástrofe para la disponibilidad del agua apta para consumo humano y para el planeta al no haber disponibilidad de ésta y aumentar la temperatura promedio por el aumento de los gases de efecto invernadero (GEI) (Hassan et al., 2022; Hoekstra, 2016) y con ello la modificación de las condiciones del ciclo de lluvia genera desastres naturales por el aumento de la cantidad de precipitación y a la vez el aumento de sequías, con ello provocaría una crisis alimentaria (Pierrat et al., 2023; Jerome et al., 2022; Bishop, Styles & Lens, 2021) que impacta en su interrelación con los ODS 2 “hambre cero” (poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y una mejor nutrición, así como promover la agricultura sostenible), ODS 9 “industria, innovación e infraestructura” (industria, innovación e infraestructura), ODS 11 “Ciudades y comunidades sostenibles” y 17 “Alianzas para lograr los objetivos” (ONU, 2015). La forma general de involucrarse como ciudadanos es proponer y establecer reglas que garanticen la sostenibilidad de proyectos en todos los ámbitos.

La falta de incentivos para la conservación y cuidado del agua es otra barrera importante (Tan et al., 2022). Muchos países como México, no poseen políticas de precios o tarifas de agua que reflejen el valor real del agua y promuevan como consecuencia su cuidado, tampoco posee cuotas para la descarga de aguas residuales en función del grado de contaminación que contengan, aunado a que la normatividad posee mucha holgura, por lo que hace falta trabajar en ello. Muchas veces el agua se utiliza de manera gratuita o con un precio muy bajo, lo que genera en los usuarios una falsa idea de la verdadera disponibilidad del agua, lo que incita a veces a

apropiarse de cuerpos de agua y ocasionan su desperdicio; además de los ecocidios de las fuentes de agua como los son los diversos ríos que ahora fungen como drenajes, muchos de ellos en canales cerrados lo que repercute directamente en el *ODS* 14 “Vida submarina” (conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos). Lo anterior agrava aún más los problemas de la contaminación y de salud pública al desbordarse estos en épocas de lluvias esto incide en el *ODS* 3 “Salud y bienestar” (garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades) y 15 “Vida de ecosistemas terrestres” (gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación terrestre y detener la pérdida de la biodiversidad) (ONU, 2015). Muchos de los países desarrollados que han logrado una gestión hídrica eficiente, han adoptado las *SBN* y empezado a desentubar sus ríos, tal es el caso de Japón, donde varios de sus ríos han sido transformados a canales abiertos nuevamente, beneficia a la naturaleza en el proceso de auto limpieza del agua (recorrido, oxigenación y descontaminación por energía solar) (Koseoglu-Imer et al., 2023; Deepa et al., 2021), de esta manera se convive de forma respetuosa con el ambiente, pues cabe recordar que en el pasado los ríos y mares fueron primordiales para el desarrollo comercial, pero además el agua era deidad o elemento pilar de vida, esto es, tenía una valoración suprema.

La falta de colaboración entre sociedad civil, sectores y entre países también es gran un desafío. La economía circular del agua requiere la cooperación y colaboración de los diferentes entes de la población, como la academia, la investigación, la sociedad, la agricultura, la industria, el suministro de agua y el gobierno, para llevar a cabo una gestión adecuada del agua como un trabajo y vigilancia interdisciplinar. E incluso requiere la colaboración entre países, como los que comparten los recursos hídricos de una cuenca y en muchos otros aspectos, como son replicar estrategias que han sido satisfactorias para un determinado país (Ching-Chi,

2023; Neves & Marques, 2022; Morris et al., 2021).

Sin embargo, el egoísmo humano y las formas típicas de trabajo, así como los intereses económicos y personales entorpecen esta colaboración incluso desde instituciones u organizaciones pequeñas. Impacta directamente en el *ODS* 17. En el caso de México, mediante los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) y los Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia (PRONAI) a través del (CONAHCyT) Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, así como mediante instituciones de educación pública, busca la colaboración multidisciplinar para alcanzar los *ODS* de la agenda 2030, sin embargo, la costumbre, la egolatría y el proteccionismo de los intereses personales dificultan dicha colaboración aunque es una oportunidad para que la sociedad exprese las necesidades, oportunidades y problemáticas que pueden abordarse de forma conjunta por parte de todos los actores (CONAHCyT, 2023). Así mismo, ha llegado el momento de pensar en proyectos que ofrezcan soluciones a las problemáticas básicas como lo es el cuidado del medio ambiente y realizar proyectos con enfoque del *ACV* y de la *EC* de productos o procesos, pues este ofrece la oportunidad de utilizar materiales de residuo del mismo proceso o de otros cercanos, así reduce la contaminación y sobreexplotación de recursos vírgenes (Aarikka-Stenroos, Kokko, & Pohls, 2023; Baldassarre et al., 2022; Neves & Marques, 2022; Tan et al., 2022; Morris et al., 2021).

Finalmente, la falta de conciencia sobre la importancia y valor del agua es el obstáculo más importante. Muchas personas y empresas no toman la importancia adecuada del agua, la necesidad de su conservación y uso eficiente. Lo anterior aunado al desconocimiento del contexto regional, nacional y mundial hace más grande la barrera. Se requiere de una mayor información y conciencia pública para impulsar la economía circular del agua y no hay mejor forma que propiciar la participación de la sociedad para crear un sentido de pertenencia

(Sharma et al., 2021). Así como modificar los programas de estudio de las instituciones de educación superior para además de formar profesionistas con un enfoque de cuidado ambiental también para resolver las problemáticas objeto de estudio del presente trabajo (Ching-Chi, 2023; Neves & Marques, 2022). Y en este punto, precisamente se fundamentó la encuesta realizada a estudiantes de nivel superior.

Por otro lado, la huella hídrica es un indicador potencial en el cuidado del agua, hace su consumo más tangible volumétricamente y como consecuencia relevante y de interés para la comprensión de la importancia del cuidado del agua. Las universidades y demás centros de educación tienen un papel clave en la adopción de prácticas sostenibles para la reducción del impacto ambiental a causa de las actividades cotidianas, además incorporar su impacto en el uso del agua. Por lo que el rol de los profesores es clave para lograr los *ODS* al bajar la información y sembrar la semilla de la transformación hacia la EC y el cuidado del medio ambiente pero también al formar recursos humanos expertos en estas metodologías (Chrispim et al., 2023).

Si bien las soluciones técnicas pueden estar disponibles para proporcionar los tipos de filtración, tratamiento y conectividad para el uso de aguas residuales, pueden surgir barreras en términos de costo, voluntad política, de aceptación social, daño ambiental (por ejemplo, si el proceso de tratamiento requiere el uso de productos químicos nocivos) y la falta de un marco legal.

Por lo tanto, proponer el uso circular del agua requiere un marco que vaya más allá de la dependencia de soluciones tecnológicas y, en cambio, considere una perspectiva holística que abarque la política y los factores socio ambientales que son críticos para la implementación y el despliegue exitosos de tales tecnologías y abordar la viabilidad económica de tales intervenciones (Morris et al., 2021).

Perspectivas para llevar a cabo la economía circular del agua

Algunas estrategias implementadas por diferentes países, especialmente los más desarrollados y que son susceptibles de imitar son:

Homogenización de un indicador del uso de agua y determinación de éste en el nivel micro, como pueden ser *HH* o *HA* (servicios, procesos, organizaciones y productos), para identificar las áreas críticas en las que se puede hacer una diferencia y establecer metas claras para reducirla tanto de forma personal como a nivel organización (Brändström & Saidani, 2022). Sería una buena estrategia si se implementara una ley para que todos los productos tuviesen en su empaque una etiqueta que contenga dicho indicador, similar al etiquetado de calorías en los alimentos procesados. De esta manera los consumidores tendrían un punto de referencia para su decisión de compra.

Implementación de tecnologías sostenibles: Las tecnologías sostenibles, como el tratamiento, la reutilización y la recolección de agua de lluvia; además de generación de energía verde, están ejecutándose cada vez más, pero hace falta mayor difusión e incentivos gubernamentales para acelerar el cambio (Dan et al., 2022; Mohamed, 2022).

La reutilización de aguas residuales tratadas es una buena práctica que contribuye a la circularidad del agua y puede ahorrar recursos hídricos valiosos. Sin embargo, el cambio de paradigma es inaceptable para la mayor parte de la ciudadanía, debido al desconocimiento de que es posible hacerlo sin correr riesgo de salud, obviamente con las consideraciones pertinentes (Koseoglu-Imer et al., 2023; Yang et al., 2023; Tan et al., 2022; Morris et al., 2021; ONU, 2015). La reutilización de las aguas residuales implica el uso de agua previamente utilizada en procesos industriales y de servicios urbanos, y que ha sido sometida a un tratamiento adecuado para su uso en el mismo fin. Mientras que el reciclaje es el uso para fines diferentes del procedente del agua tratada. Contribuye a la reducción de la demanda de agua potable, disminuir

la huella hídrica y limitar la contaminación de los recursos hídricos (Yang et al., 2023; Morris et al., 2021; Smol et al., 2020).

Campañas de concientización a todos los niveles de educación, en especial énfasis en la educación superior, así como la actualización y capacitación de los docentes de todas las áreas de enseñanza. Las instituciones de educación deben integrar a sus programas educativos campañas de concientización dirigidas a los estudiantes, el personal y la comunidad para fomentar prácticas de uso eficiente del agua, así como proyectos que permitan mostrar de forma tangible la minimización de la contaminación y maximización del recurso (Aarikka-Stenroos et al., 2023; Munaro & Tavares, 2023). De igual manera diseñar programas de enseñanza que permitan la integración de la sociedad.

La reforestación y el uso de plantas nativas y hortalizas, reduce la necesidad de riego y si este se hace en los horarios en los cuales se tiene la temperatura ambiental más baja, reduce la evaporación; por lo tanto, ayuda a reducir la cantidad de agua (Foraste, 2023). Además los árboles son reguladores naturales de la temperatura, conservan la humedad del suelo y son casa de diversas especies, también disminuyen la emisión de gases de efecto invernadero (*GEI*), evitan la erosión del suelo y por tanto la contaminación del agua (Yang et al., 2023; Ruiz-Pérez et al., 2022; Deepa et al., 2021).

La reducción del desperdicio de agua es uno de los puntos iniciales para minimizar el consumo del recurso hídrico, esto es, la detección y reparación de fugas y la implementación de inodoros y lavabos de bajo flujo (Aarikka-Stenroos et al., 2023; Munaro & Tavares, 2023; Baldassarre et al., 2022; Neves & Marques, 2022). Si el cambio de infraestructura no es posible, es hora de ser creativos para poder hacerlo.

Adaptación de las políticas de los tres órdenes de gobierno para fortalecer el abastecimiento del agua para todas las personas, pero sin afectar los

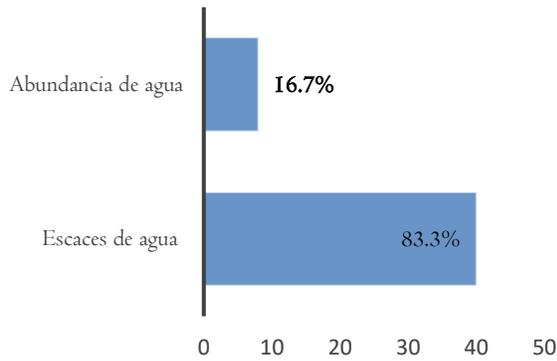
ecosistemas de las fuentes y sin sobre explotar estas, mediante estrategias de tratamiento de aguas residuales (ya que existen muchas plantas municipales sin funcionar y obsoletas) y recarga de acuíferos (con estudios adecuados para evitar riesgos), así como políticas públicas de salud, educación, participación del sector privado e ingresos que contribuyan al desarrollo sostenible y a garantizar la gobernanza del agua (Aarikka-Stenroos et al., 2023; Munaro & Tavares, 2023; Sanusi et al., 2023; Yang et al., 2023; Baldassarre et al., 2022; Neves & Marques, 2022; Tan et al., 2022).

Resultados de la encuesta

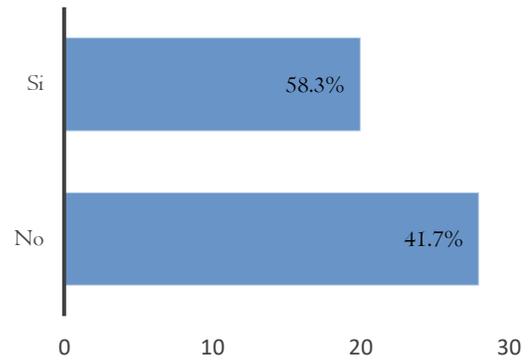
Se encontró en base a los resultados mostrados en los diferentes incisos de la Figura 4, que el desconocimiento sobre el contexto del agua y la economía circular en estudiantes de nivel superior es alto. Un 16.7 % considera que el agua se encuentra en abundancia, mientras que más de la mitad (58.3 %), no sabe de que trata la agenda 2030 de la ONU, y por supuesto desconoce sus pilares y los objetivos de desarrollo sostenible. En referencia específicamente del agua, el 60.4 % desconoce el *ODS* que le compete al agua y saneamiento, aun cuando son necesidades básicas del ser humano. Por otro lado, el 33.3% dice no contribuir al logro de los *ODS*. De aquella población que considera existen problemáticas con el agua, el mayor porcentaje corresponde a la escasez y al desperdicio (20.5 %), seguido de la contaminación (18.9 %), encontrándose después las fugas debidas a infraestructura (17.2 %), y posteriormente la sobreexplotación. Los porcentajes más bajos 5.7 % y 4.1 % corresponden a las sequías y el cambio climático respectivamente, como últimas problemáticas percibidas por los jóvenes, aun cuando son las consecuencias de todo lo anterior y cada vez más críticas. Sin embargo, al preguntar si realizan buenas prácticas de cuidado del agua, la mayoría confirma que toma duchas cortas (29.2 %) y que reutiliza dicha agua para el inodoro (28.1 %), así como el agua de la lavadora (22.5 %). Cabe destacar, que de acuerdo con el porcentaje 14.6 % y 11.2 % de los estudiantes

respectivamente minimiza el uso de los productos químicos en la cocina y el uso de productos personales. El 72.9 % y 81.3 % respectivamente no sabe donde reportar fugas y no hace uso de ecotecnologías. Así mismo el 60.4 % no se involucra en decisiones de la comunidad respecto al cuidado del agua, pero al 62.5 % les gustaría hacerlo. La Figura 4k, refleja que de los usos destinados al agua potable los mayores porcentajes

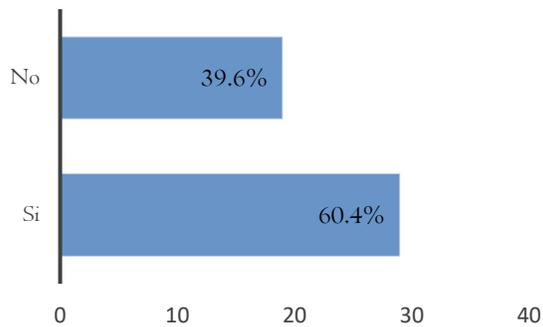
se destinan a la limpieza personal, lavado de trastes, uso en inodoro y lavado de alimentos 18.9, 13.8, 13 y 11 %, respectivamente; mientras que solo el 7.5 % la utiliza para beber, casi a la par del uso para limpieza del hogar y sitios de trabajo (7.9 %), al igual que para el lavado de autos (7.1 %). Y finalmente el 89.6 % de los estudiantes de nivel superior, desconoce de que habla la EC.



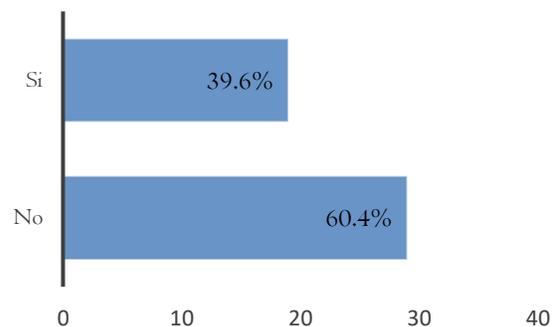
a) Elija el contexto nacional respecto al agua.



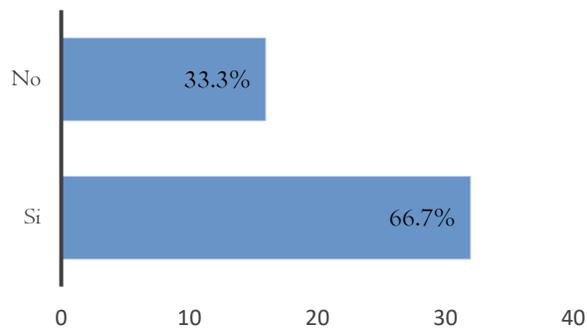
b) ¿Sabe de qué trata la agenda 2030 de la ONU?



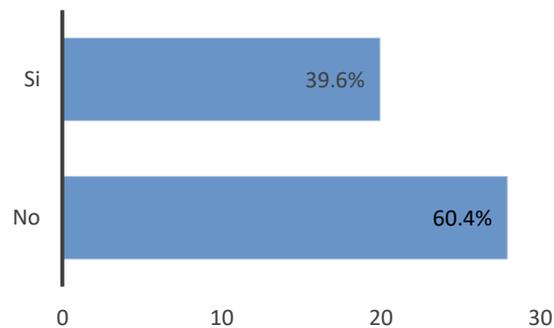
c) ¿Conoce cuál es el Objetivo de Desarrollo Sostenible que habla del agua?



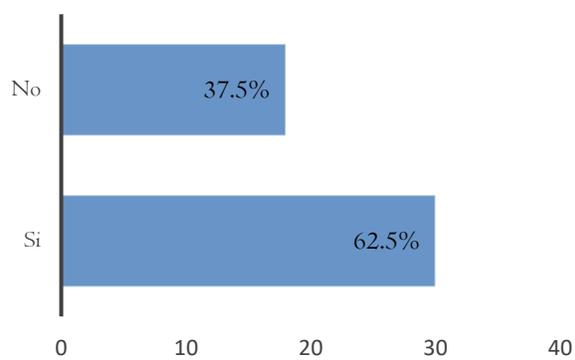
d) ¿Conoce los pilares en los que se fundamenta la agenda 2030 de la ONU?



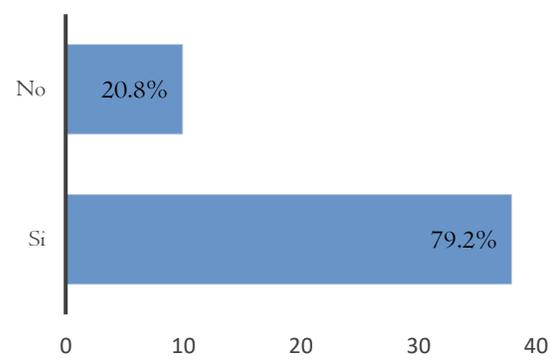
e) ¿Contribuye al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible?



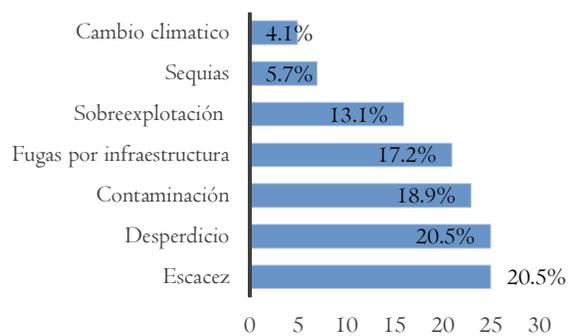
f) ¿Se involucra en la toma de decisiones de su comunidad?



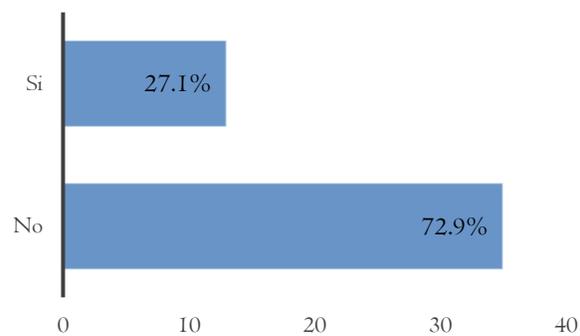
g) ¿Le gustaría formar parte de las decisiones de la ciudadanía de forma local y nacional?



h) ¿Considera que existen problemáticas respecto al agua, en su comunidad?



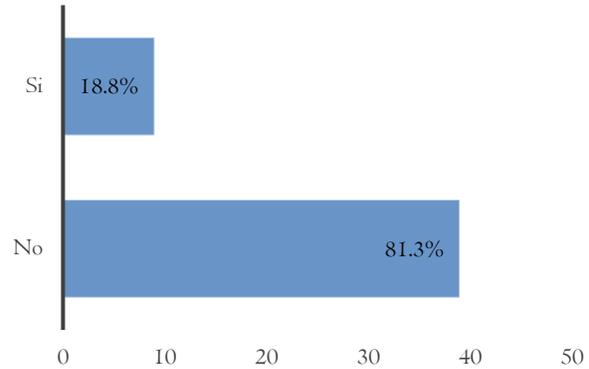
i) Seleccione las problemáticas recurrentes en su comunidad.



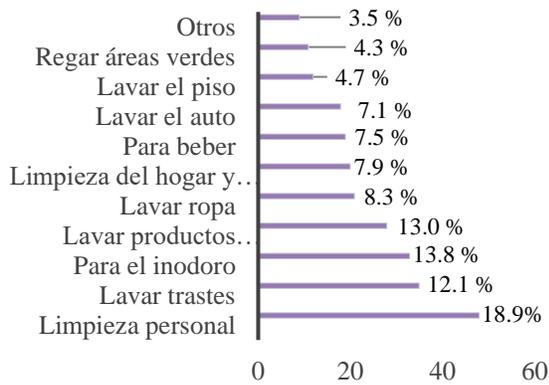
j) ¿Conoce la vía para reportar una fuga o avería de agua?



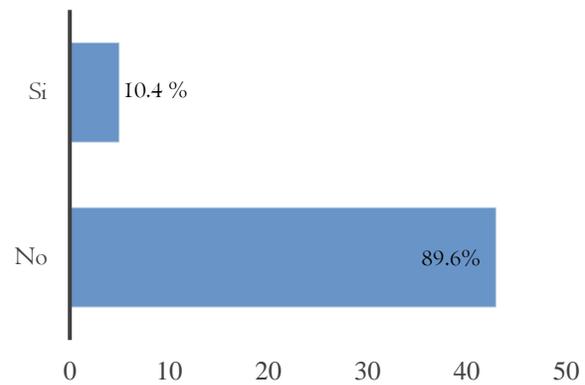
k) ¿Qué prácticas de consumo del agua lleva a cabo?



l) ¿Hace uso de ecotecnologías en su hogar?



m) ¿Qué usos le da al agua potable?



n) ¿Sabe de qué habla la economía circular?

Figura 4. Resultados de la encuesta sobre conocimientos de los *ODS*, economía circular y la gestión del agua, aplicada a estudiantes del Instituto Tecnológico de Zitácuaro.

COMENTARIOS FINALES

El concepto de *EC* es relativamente nuevo y se encuentra en constante investigación y en vías de desarrollo, fundamenta las primeras bases empíricas para su implementación, aún existen innumerables barreras para su completa adopción, por lo que se deben registrar en trabajos de investigación los conceptos relacionados con la *EC* del agua, desarrollo sostenible y agenda 2030, así como las perspectivas que se tienen en base a otros trabajos de investigación permitirá acrecentar el conocimiento del área y avanzar en su desarrollo, así como permitir reflexionar e incursionar en las problemáticas actuales.

En la actualidad la *EC* es crucial, para la eficiente gestión de los recursos de todo tipo y esto aplica por supuesto a la gestión del agua, pretende maximizar la eficiencia en el uso de este recurso vital. La adopción de prácticas de *EC* (3r's), como la reutilización y reciclaje del recurso hídrico, reduce la generación de aguas residuales y la contaminación de cuerpos de agua por la descarga de éstas, lo que contribuye a la preservación de ecosistemas acuáticos y está íntimamente relacionado con el *ODS* 14 "vida submarina". Además, la *EC* del agua, puede reducir los costos de su tratamiento y suministro, mejorar la resiliencia y aumentar la adaptación al cambio

climático a través de la reutilización o reciclaje de las aguas residuales con tratamiento previo, y así estar en congruencia con los ODS 9 “Industrias, innovación e infraestructura”, 12 “Producción y consumo responsable” y 13 “Acción por el clima”. Así pues, la EC del agua se encuentra intrínsecamente ligada al ODS 6 “agua limpia y saneamiento”, ya que busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua, y el saneamiento para todos; pero, además está relacionada con el resto de los ODS de forma directa e indirecta.

Indicadores como la HH y la HA, cuantifican la afectación al medio ambiente y son herramientas valiosas para el cuidado del agua, pues hacen tangible la cantidad de agua de forma cuantitativa o cualitativa, respaldan la toma de conciencia, la planeación de estrategias y toma de acciones de manera comunitaria para maximizar el recurso agua. El uso del ACV en el diseño o rediseño de cualquier proceso, producto o servicio, ayuda a minimizar el impacto negativo en el medio ambiente, incluida el agua como producto o servicio. Estas herramientas permiten establecer lazos de confianza entre las empresas productoras y los consumidores, así como con las partes interesadas de cualquier organización. Así mismo, permiten a las organizaciones ser un referente para la adecuada gestión del recurso hídrico, de responsabilidad social y del compromiso con el medioambiente.

En este momento se está en un punto crucial, donde la participación ciudadana es vital. Los consumidores, tienen el poder de minimizar la contaminación y establecer las reglas para un desarrollo sostenible. La colaboración entre gobiernos, empresas y comunidades es crucial. La falta de conciencia sobre los beneficios y principios de la economía circular del agua son un obstáculo. Por lo que la educación y la sensibilización son clave para involucrar a la sociedad con prácticas más sostenibles. Los resultados de la encuesta realizada en el ITZ, muestran que existe desconocimiento, falta de participación y falta de acción en prácticas de EC del agua en estudiantes de nivel superior. No obstante, es una oportunidad de desarrollo

profesional, al incorporarse en los programas de estudio estas problemáticas y temas actuales, que permitan a los profesionistas ofrecer soluciones y así generar los empleos del futuro. La EC del agua no solo es una solución ambiental, sino también económica y social, por lo que se requiere un cambio de mentalidad y acción para lograr un desarrollo sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento otorgado para la realización del proyecto “Estrategias para el desarrollo sostenible del Instituto Tecnológico de Zitácuaro mediante la transición hacia una economía circular del agua”, en la convocatoria 2023: Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación. Al Instituto Tecnológico de Zitácuaro por la oportunidad de realización de estancias posdoctorales y al CONAHCyT por la beca otorgada para tal propósito.

REFERENCIAS

- Aarikka-Stenroos, L., Kokko, M. & Pohls, E.L. (2023). Catalyzing the circular economy of critical resources in a national system: Case study on drivers, barriers, and actors in nutrient recycling. *Journal of Cleaner Production*, 397, 136380. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136380>
- Ajayi, T.O. (2023). Biomimicry: the nexus for achieving sustainability in the people-process-planet relationship. *Helicon*, 9(5), e16180. <https://doi.org/10.1016/j.helicon.2023.e16180>
- Akter, M.M.K., Haq, U.N., Islam, M.M., & Uddin, M.A. (2022). Textile-apparel manufacturing and material waste management in the circular economy: A conceptual model to achieve sustainable development goal (SDG) 12 for Bangladesh. *Cleaner Environmental Systems*, 4, 100070. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2022.100070>

- Baldassarre, B., Maury T., Mathieux, F., Garbarino, E., Antonopoulos, I. & Sala, S. (2022). Drivers and Barriers to the Circular Economy Transition: The Case of Recycled Plastics in the Automotive Sector in the European Union. *Procedia CIRP*, 105, 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.007>
- Bishop, G., Styles, D., & Lens, P.N. L. (2021). Resources, Conservation & Recycling Environmental performance comparison of bioplastics and petrochemical plastics: A review of life cycle assessment (LCA) methodological decisions. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105451. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105451>
- Brändström, J. & Saidani, M. (2022). Comparison between circularity metrics and LCA: A case study on circular economy strategies. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133537. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133537>
- Brears, R.C. (2020). *Austin Water Developing the Circular Water Economy*. In: Developing the Circular Water Economy. Palgrave Studies in Climate Resilient Societies. Palgrave Pivot, Cham. pp. 121–134. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32575-6_9
- Chen, Y., Lin, M. & Zhuang, D. (2022). Wastewater treatment and emerging contaminants: Bibliometric analysis. *Chemosphere*, 297, 133932. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133932>
- Ching-Chi, H. (2023). The role of the core competence and core resource features of a sharing economy on the achievement of SDGs 2030. *Journal of Innovation & Knowledge*, 8(1), 100283. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2022.100283>
- Chrispim, M.C., Mattsson, M. & Ulvenblad, P. (2023). The underrepresented key elements of Circular Economy: A critical review of assessment tools and a guide for action. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 539–558. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.11.019>
- CONAHCyT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología). (2023). *Programas Nacionales Estratégicos*. Cd. De México, México. <https://conacyt.mx/pronaces/>
- Corominas, L., Byrne, D.M., Guest, J.S., Hospido, A., Roux, P., Shaw, A., & Short, M.D. (2020). The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review. *Water Research*, 184, 116058. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116058>
- Dan, Z., Kehong, W., Guanxiong, Z., Shuangshuang, L., Fang, W., Yuanzhen, P., & Xingzhong, Y. (2022). Ecological engineering practice of cascade-pond system: water purification and biodiversity conservation. *Ecological Engineering*, 179, 106632. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106632>
- Deepa, R., Anandhi, A. & Alhashim, R. (2021). Volumetric and Impact-Oriented Water Footprint of Agricultural Crops: A Review. *Ecological Indicators*, 130, 108093. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108093>
- Feng, B., Zhuo, L., Xie, D., Mao, Y., Gao, J., Xie, P., & Wu, P. (2021). A quantitative review of water footprint accounting and simulation for crop production based on publications during 2002–2018. *Ecological Indicators*, 120, 106962. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106962>
- Fernández, T., & Tamaro, E. 2004. William Thomson [Lord Kelvin]. *En Biografías y Vidas en línea*. Barcelona, España. <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/k/kelvin.htm>
- Foraste, Á.G. (2023). Resources, Conservation & Recycling Advances Circular economy in Andalusia: a Review of Public and Non-Governmental Initiatives. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 17,

200133.
<https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200133>
- Gashure, S. & Wana, D. (2023). Sustainability of the long-term indigenous soil and water conservation practices in the UNESCO designated cultural landscapes of Konso, Ethiopia. *Current Research in Environmental Sustainability*, 5, 100221. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2023.100221>
- Germann, V., Borgwardt, F., Fischer, J., Fuchs-Hanusch, D., Regelsberger, M., Schubert, Uhmann A., Langergraber G. (2023). Development and Evaluation of Options for Action to Progress on the SDG 6 Targets in Austria. *Journal of Environmental Management*, 325, 116487. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116487>
- Hassan, Y., Shankar, V., Usman, S., & Alhassan, A. (2022). Carbon footprint management: A review of construction industry. *Cleaner Engineering and Technology*, 9, 100531. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100531>
- Ho, O.T.K., Gajanayake, A. & Usha, I.R. (2023). Transitioning to a state-wide circular economy: Major stakeholder interviews. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 19, 200163. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200163>
- Hoekstra, A.Y. (2016). A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. *Ecological Indicators*, 66, 564–573. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.026>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2023). *Cd. de México*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/salade_prensa/aproposito/2023/EAP_DMPO23.pdf
- Jamwal, A., Agrawal, R., & Sharma, M. 2022. Deep learning for manufacturing sustainability: Models, applications in Industry 4.0 and implications. *International Journal of Information Management Data Insights*, 2(2), 100107. <https://doi.org/10.1016/j.jjime.2022.100107>
- Jerome, A., Helander, H., Ljunggren, M., & Janssen, M. (2022). Mapping and testing circular economy product-level indicators: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106080. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106080>
- Joséphine, R., Andrée-Anne, L., & Samir, L. (2022). Lifecycle traceability towards sustainable and circular value chains: analysis framework and state of the art in the fashion industry. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 1705–1710. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.643>
- Khajuria A., Atienza V.A., Chavanich S., Henning W., Islam I., Kral U., Liu M., Liu X., Murthy I.K., Timothy O.T.D., Verma P., Xu G., Zeng X., Li J. (2022). Accelerating circular economy solutions to achieve the 2030 agenda for sustainable development goals. *Circular Economy*, 1(1), 100001. <https://doi.org/10.1016/j.ccc.2022.100001>
- Koop, S.H.A., Grison, C., Eisenreich, S.J., Hofman, J., & van Leeuwen, K.J. (2022). Integrated water resources management in cities in the world: Global solutions. *Sustainable Cities and Society*, 86, 104137. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104137>
- Koseoglu-Imer, D.Y., Oral, H.V., Calheiros, C.S.C., Krzeminski, P., Güçlü, S., Pereira, S.A., Surmacz-Górska, J., Plaza, E., Samaras, P., Binder, P.M., van Hullebusch, E.D. & Devolli, A. (2023). Current challenges and future perspectives for the full circular economy of water in European countries. *Journal of Environmental Management*, 345, 118627. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118627>
- Li X., Zhu L., Dong Y., Chen B., Li Q., Wang X., Zhang Y., Wang L. (2022). Water footprint assessment of wool products with a low-water footprint baseline. *Sustainable Production and*

- Consumption*, 34, 310-317.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.09.023>
- Mannina, G., Gulhan, H. & Bing-Jie, N. (2022). Water reuse from wastewater treatment: The transition towards circular economy in the water sector. *Bioresource Technology*, 363, 127951.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127951>
- Marjamaa, M., & Mäkelä, M. (2022). Images of the future for a circular economy: The case of Finland. *Futures*, 141, 102985.
<https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.102985>
- Meiryani, Shi-Ming H., Soepriyanto, G., Audrelia, J., Fahlevi, M., Aljuaid, M., & Grabowska, S. (2022). An exploration of circular water management accountability: A case from Indonesia. *Heliyon*, 8(9), e10556.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10556>
- Mohamed, H.H. (2022). Green processes and sustainable materials for renewable energy production via water splitting. In, *Sustainable Materials and Green Processing for Energy Conversion*. Ed. Elsevier. pp. 169-212.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822838-8.00007-7>
- Morris, J.C., Georgiou, I., Guenther, E., & Caucci, S. (2021). Barriers in Implementation of Wastewater Reuse: Identifying the Way Forward in Closing the Loop. *Circular Economy and Sustainability*, 1(1), 413–433.
<https://doi.org/10.1007/s43615-021-00018-z>
- Morseletto, P. (2023). Sometimes linear, sometimes circular: States of the economy and transitions to the future. *Journal of Cleaner Production*, 390, 136138.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136138>
- Munaro, M. R., & Tavares, S. F. (2023). A review on barriers, drivers, and stakeholders towards the circular economy: The construction sector perspective. *Cleaner and Responsible Consumption*, 8, 100107.
<https://doi.org/10.1016/j.clrc.2023.100107>
- Neves, S.A., & Marques, A.C. (2022). Drivers and barriers in the transition from a linear economy to a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 341, 130865.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130865>
- Nika, C.E., Vasilaki, V., Renfrew, D., Danishvar, M., Echchelh, A., & Katsou, E. (2022). Assessing circularity of multi-sectoral systems under the Water-Energy-Food-Ecosystems (WEFE) nexus. *Water Research*, 221, 118842.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118842>
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible. s.c.* <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Papadaki, C. (2021). Sustainable use of mountain water resources. In *Environmental Water Requirements in Mountainous Areas*. Ed. Elsevier. pp. 281-292.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819342-6.00005-1>
- Pierrat, É., Laurent, A., Dorber, M., Rygaard, M., Verones, F., & Hauschild, M. (2023). Advancing water footprint assessments: Combining the impacts of water pollution and scarcity. *Science of the Total Environment*, 870, 161910.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161910>
- Pietrzak, D., Jarosław K., Ewa K., Grzegorz M. & Katarzyna W. (2020). Fate of selected neonicotinoid insecticides in soil–water systems: Current state of the art and knowledge gaps. *Chemosphere*, 255, 126981.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126981>
- Ruiz-Pérez, M.R., Alba-Rodríguez, M.D., & Marrero, M. (2022). Evaluation of water footprint of urban renewal projects. Case study in Seville, Andalusia. *Water Research*, 221, 118715.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118715>
- Sanusi, O.L., Oke, M.O., & Bello, M.A. (2023). Water entrepreneurship and financialization:

- Complexities for the attainment of SDG in sub-Saharan Africa. *Heliyon*, 9(11): e20859. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20859>
- Sharma, B.H., Vanapalli, K.R., Samal, B., Sankar, V.R., Cheela, Dubey, B.K. & Bhattacharya, J. (2021). Circular economy approach in solid waste management system to achieve UN-SDGs: Solutions for post-COVID recovery. *Science of The Total Environment*, 800, 149605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149605>
- Smol, M., Adam, C., & Preisner, M. (2020). Circular economy model framework in the European water and wastewater sector. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(3), 682–697. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00960-z>
- Tan, J., Tan, F.J., & Ramakrishna, S. (2022). Transitioning to a Circular Economy: A Systematic Review of Its Drivers and Barriers. *Sustainability*, 14(3), 1–13. <https://doi.org/10.3390/su14031757>
- UN (Naciones Unidas). (2022). *La población mundial llega a los 8000 millones de habitantes*. <https://www.un.org/es/desa/la-poblaci%C3%B3n-mundial-llega-los-8000-millones-de-habitantes>
- Yang, Y., Wang, H., Li, Y., Zhang, L., & Zhao, Y. (2023). New green development indicator of water resources system based on an improved water resources ecological footprint and its application. *Ecological Indicators*, 148, 110115. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110115>
- Zeballos-Velarde, C., Butron-Revilla, C. & Manchego-Huaquipaco, Y.C. (2023). The role of ancestral practices as social capital to enhance community disaster resilience. The case of the Colca Valley, Peru. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 92, 103737. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103737>
- Zhang, Y., Zhang, X. & Wang, Z. 2023. Recent advances in the removal of emerging contaminants from water by novel molecularly imprinted materials in advanced oxidation processes—A review. *Science of The Total Environment*, 883, 163702. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163702>

ENTRE PLUMAS: MUJERES RURALES EN EL MUNDO DE LA AVICULTURA

BETWEEN FEATHERS: RURAL WOMEN IN THE WORLD OF POULTRY FARMING

¹Duilio García-Martínez , ²Martha P. Jerez-Salas , ³Marco A. Camacho-Escobar , ²José C. Carrillo-Rodríguez , ²Marco A. Vásquez-Dávila 

^{1,2} Estudiante, investigador, Tecnológico Nacional de México, Campus Valle de Oaxaca (ITVO). Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México. C.P. 71233. ³ Universidad del Mar-Campus Puerto Escondido, Oaxaca. Constitución, Universidad, 71980 Puerto Escondido, Oaxaca. [§]Autor de correspondencia: (ixoye_1198@hotmail.com).

Oaxaca, un corazón lleno de cultura, alegría y folklore, donde la mujer es el principal artífice de la existencia. Hablar de mujeres implica una proporción mayoritaria del país, la cual se ha multiplicado considerablemente en el sector agrícola y refleja una parte de la población económica. El crecimiento de la contribución del género femenino en los asuntos públicos, comercial, política y cultural de México ha acompañado una importante mejora en los indicadores demográficos, especialmente en las zonas urbanas.

La avicultura es una labor representativa de las zonas marginadas de Oaxaca, la cual constituye un importante sustento económico y alimentario para las familias que se dedican a ella para la elaboración de productos seguros y de calidad. La mujer es un factor clave en el apoyo a este emprendimiento ganadero, ella está involucrada en la avicultura en los huertos familiares, no solo desde el lado productivo, sino también desde el económico y social, y tiene pleno control sobre el manejo del rebaño. La importancia económica, cultural y social detrás de la participación de la mujer es su uso generalizado en la cocina mexicana, rituales ancestrales, celebraciones sociales y religiosas.

Los productos obtenidos de la avicultura se comercializan en el mercado local, lo que permite generar ingresos. En la región de los Valles Centrales de Oaxaca estos mercados o plazas se realizan en las cabeceras distritales una vez a la semana y existe un importante

movimiento económico en los productos avícolas que determina diferentes precios que afectan a otras regiones del estado de Oaxaca.

Las mujeres se destacan como productoras de estos alimentos, ellas son las encargadas y responsables de la conservación y manipulación de las especies. Los deberes importantes de las mujeres en la agricultura de traspatio están relacionados con la alimentación del rebaño, el cuidado de las aves enfermas o durante la temporada de reproducción, la obtención de nuevas parvadas, la promoción de los productos originados, por ejemplo, huevos y aves vivas; e intercambiar estas especies con parientes y vecinos de la misma colectividad. Las mujeres no solo son productoras, también ejercen el rol de amas de casa y realizan las tareas asociadas a esta profesión, como limpiar el hogar, cocinar para la familia y cuidar a los niños.

La crianza de pollos es un modo de escape de la realidad que las mujeres enfrentan, muchas veces en situaciones de violencia, abuso y trato desigual en sus hogares, sitios de trabajo y sociedad, simplemente porque son mujeres. Al negarles las oportunidades de aprender, servir, votar y liderar, encuentran en esta actividad un espacio de amor y sanación, un lugar que los sostiene, donde su energía se vuelve más visible, donde crea fuerza.

Pero este enfoque excede la realidad, la mujer es un perfeccionamiento para el alma, ella

cuida como un pájaro cuida a sus polluelos, como dice Dios en Oseas II:3-4 (Biblia Reyna Valera). “A Efraín le enseñé a caminar; sostuve su mano. Pero él no quería admitir que yo lo curé. Lo atraje con los lazos de la ternura, lo atraje con los lazos del amor. Tomé el yugo de su cuello y me acerqué a él suavemente para darle de comer”.

Dios reflexiona aquí sobre cómo crio a Israel, como lo hace una madre con un hijo, y cómo el hijo dio por sentadas todas estas cosas. Tal es la naturaleza de la relación, que cuando se es niño se atrae con estas bondades, se incrementa la fe y podemos agradecer.

Y aquí es donde aterriza el enfoque del libro, *El guajolote nativo de México: estudios recientes y perspectivas* (Perezgrovas-Garza, Camacho y Juárez, 2020); las mujeres son la clave principal del cuidado, del amor en la tierra viva, sin temor a equivocarse, este mundo se detendría sin la presencia de la mujer. Cuando hablamos de mujeres los invito a referirse al amor, las heroínas escondidas que son, esos hogares donde una mujer sostiene, mi madre dice que encuentra paz en sus plantas, mi abuela encuentra paz en sus animales, cada ave representa para ella una parte de su ser.

REFERENCIAS

- Perezgrovas-Garza, R., Camacho, E. M.A.& Juárez, C.A. (2020). *El guajolote nativo: estudios recientes y perspectivas*. BUAP, Red Conbiand México.