



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y POSGRADO
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE**

**REHABILITACIÓN ECOLÓGICA EN SAN
DIEGO METEPEC, TLAXCALA**

**ELIZABETH GARCÍA GALLEGOS
OSCAR GUMERSINDO VÁZQUEZ CUECUECHA
GEMA L. GALINDO FLORES**

(COMPILADORES)

REHABILITACIÓN ECOLÓGICA EN SAN DIEGO METEPEC, TLAXCALA

**Elizabeth García Gallegos
Oscar Gumersindo Vázquez Cuecuecha
Gema L. Galindo Flores
(Compiladores)**

**Universidad Autónoma de Tlaxcala
Tlaxcala, 2024**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA



DIRECTORIO INSTITUCIONAL

Dr. Serafín Ortiz Ortiz
Rector

Dra. Margarita Martínez Gómez
Secretaria Académica

Lic. Elvia Hernández Escalona
Secretaria Administrativa

Dr. Alfredo Adán Pimentel
Secretario de Investigación Científica y Posgrado

M.C. Roberto Carlos Cruz Becerril
Secretario Técnico

Mtra. Diana Selene Avila Casco
Secretaria de Extensión Universitaria y Difusión Cultural

Dr. Juan George Zecua
Secretario de Autorrealización

Mtro. José Reyes Luna Ruíz
Coordinador de la División de Ciencias Biológicas

Dr. Héctor Santos Luna Zendejas
Coordinador General del CIGyA y Posgrado
Centro de Investigación en Genética y Ambiente

Dra. Alba Mónica Montiel González
Coordinadora del CICB
Centro de Investigación en Ciencias Biológicas

Dr. Hipólito Muñoz Nava
Director de la Facultad de Agrobiología

© Universidad Autónoma de Tlaxcala
Av. Universidad No. 1
Calle del Bosque Col. Centro Tlaxcala, Tlax., C.P. 90000
Tel/Fax 01 (248) 48 155 00

Primera edición: 8 de Marzo de 2024
ISBN: 978-607-545-104-6

Prohibida la reproducción total o parcial sin permiso de la institución.
Derechos reservados conforme a la ley.
La información publicada en los capítulos de este libro es responsabilidad del autor (es), por lo que el contenido de los mismos no refleja necesariamente el punto de vista de la Institución.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Tlaxcala, a la Asociación Civil Tlalli Atoktli A. C. y a la presidencia de comunidad de San Diego, Metepec, Tlaxcala por la iniciativa y apoyo para llevar a cabo la “Rehabilitación ecológica del predio de San Gregorio, Metepec, Tlaxcala”.

A los estudiantes de la Licenciatura en Biología de la Facultad de Agrobiología, Licenciatura en Química Clínica de la Facultad de Ciencias de la Salud, de la Maestría en Ciencias en Sistemas del Ambiente del Centro de Investigación en Genética y Ambiente, todos de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, así como al público en general por el apoyo y seguimiento a las acciones de rehabilitación.

Y al Departamento Editorial de la Secretaría de Extensión Universitaria y Difusión Cultural de la Universidad Autónoma de Tlaxcala por sus sugerencias y observaciones que permitieron eliminar errores y omisiones para una mejor presentación de este libro.

Cuidado de la edición: Elizabeth García y Oscar Gumersindo Vázquez

Diseño editorial: Centro de Investigación en Genética y Ambiente

Diseño de portada: Elizabeth García

Esta publicación está disponible en formato electrónico (PDF) en el sitio web institucional en <https://cigya.uatx.mx>

CONTENIDO

I. PRESENTACIÓN	i
II. INTRODUCCIÓN	ii
Capítulo 1. Diversidad vegetal en el cerro de San Gregorio, San Diego Metepec, Tlaxcala. <i>José Luis Martínez y Pérez, Balbina Rodríguez Rodríguez</i>	1
Capítulo 2. La importancia del frío para la producción de frutales caducifolios. Caso San Diego Metepec, Tlaxcala. <i>Maricela Hernández Vázquez, Silvia Herrera Cortés, Minerva Flores Morales, Hermila Orozco Bolaños, José Jiménez López†</i>	7
Capítulo 3. Métodos de estimación de horas frío. Caso de estudio San Diego Metepec, Tlaxcala. <i>Silvia Herrera Cortés, Maricela Hernández Vázquez, Minerva Flores Morales, Hermila Orozco Bolaños, José Jiménez López†</i>	16
Capítulo 4. Conservación de suelo. Construcción de zanjas bordo. <i>Elizabeth García Gallegos</i>	24
Capítulo 5. Establecimiento de islas de vegetación. <i>Eunise Marina Zamora Campos</i>	30
Capítulo 6. Producción de plántula de interés forestal en el cerro de San Gregorio, Metepec, Tlaxcala. <i>Oscar Gumersindo Vázquez Cuecuecha</i>	36
Capítulo 7. Inoculación de planta con hongos ectomicorrizógenos. <i>Gema L. Galindo Flores</i>	43
Capítulo 8. Reforestación: trasplante de las plántulas al cerro de San Gregorio. <i>Oscar Gumersindo Vázquez Cuecuecha, Gema L. Galindo Flores, Elizabeth García Gallegos, Eunise Marina Zamora Campos</i>	53

I. PRESENTACIÓN

El presente libro tiene como finalidad dar a conocer los resultados de una fase de diagnóstico y rehabilitación que involucran a una rehabilitación ecológica y que en donde el hecho de establecer un vínculo entre los generadores de conocimiento y el sector social conduce a un mismo fin con éxito. La rehabilitación ecológica se llevó a cabo en el cerro de San Gregorio dentro de la comunidad de San Diego Metepec, municipio de Tlaxcala, localizada a 2 292 msnm y a 5.1 km de la capital del estado de Tlaxcala. En este lugar se observó una importante degradación del ecosistema, debido principalmente a la pérdida de la vegetación nativa, la apertura de zonas de cultivo y el establecimiento de carreteras resultando en una severa erosión del suelo, situación que llevó a buscar alternativas que reestablezcan la biodiversidad originaria y servicios ambientales, tales como, la estabilización del suelo, la retención de humedad y la recuperación de la flora y la fauna.

La Universidad Autónoma de Tlaxcala es una institución pública cuya labor a través de los Centros de Investigación en Genética y Ambiente (CIGyA), Ciencias Biológicas (CICB) y la Facultad de Agrobiología instauraron diferentes metodologías de investigación conjuntas para realizar la rehabilitación ecológica de manera particular en el cerro de San Gregorio, San Diego Metepec, se contemplaron estudios de diversidad vegetal; análisis climático; conservación de suelos; manejo y producción de germoplasma forestal; establecimiento de islas de vegetación, así como la elaboración y manejo de biofertilizantes a partir de hongos ectomicorrizógenos. Acciones con las que se buscó reestablecer el ecosistema para el beneficio de las futuras generaciones. Es importante mencionar que no existe un procedimiento único para rehabilitar sitios ecológicamente deteriorados, sin embargo, el diagnóstico es fundamental y debe ser específico, ya que a partir de las condiciones de partida se establecen las estrategias que integrarán las fases de rehabilitación, teniendo en mente que el éxito de todo trabajo de este tipo también dependerá de las fuentes de financiamiento, de la voluntad política de las instituciones, pero sobre todo de la participación constante de los grupos sociales.

Los compiladores

II. INTRODUCCIÓN

En el estado de Tlaxcala se reconoce que el 93.7% de su superficie está erosionada en diferente grado, siendo una de las principales causas el crecimiento no planificado de los asentamientos humanos y una mala política de uso y aprovechamiento del recurso suelo (Alvarado *et al.*, 2007)¹. Debido a lo anterior en el territorio se ha generado la aparición de sustratos endurecidos denominados “tepetates”. Gama *et al.* (2007)² lo definen como un horizonte endurecido, ya sea compactado o cementado, subyaciendo a suelos o bien aflorando en superficie, los cuales presentan pobre fertilidad, debido a estas condiciones es urgente realizar proyectos de rehabilitación para mejorar sus características físicas, químicas y biológicas, lo que permitirá un incremento de la biodiversidad, esencial para la función del ecosistema para que pueda brindar sus servicios. En México la rehabilitación es una disciplina emergente, la cual, a pesar de las complicaciones políticas, económicas y sociales del país, ha recibido cada vez mayor atención por diferentes grupos de trabajo multidisciplinarios que conjuntan la teoría y la práctica para un mismo fin.

En este sentido, se planteó dentro de la fase de diagnóstico un recorrido de campo en el cerro de San Gregorio para evaluar la condición de degradación, lo que llevó a establecer las siguientes metodologías: a) evaluación de la diversidad vegetal y b) análisis climático, y en la fase de rehabilitación: c) construcción de obras de conservación, denominadas zanjas bordo, d) establecimiento de islas de vegetación con o sin transposición de suelos, para asistir al proceso sucesional y e) producción de especies nativas de árboles, inoculadas con hongos ectomicorrizógenos para la reforestación. Con estas acciones se buscó que ciertas áreas dentro del cerro de San Gregorio recuperen su estructura y funciones para la producción de servicios ecosistémicos en beneficio de plantas, animales y el ser humano. Para cumplir con lo anterior es indispensable la participación de los actores sociales, que en conjunto con los generadores de conocimiento establezcan y realicen las actividades a desarrollar, se lograron importantes resultados, lo cual no podría lograrse sin la participación de todos los involucrados.

San Diego Metepec es una comunidad que pertenece al municipio del estado de Tlaxcala, muy cercana a la capital del estado. El significado histórico de la comunidad es importante, debido a que en la época virreinal se construyó una iglesia que resguarda un retablo dorado del barroco estípite, el cual expresa en sus pinturas el tema religioso, el arte y la historia de la región, sin duda un significativo monumento que en conjunto con la Capilla de San Gregorio, localizada en el cerro

¹Alvarado, C. M., Colmenero, R. J. A., & Valderrábano, A. Ma. L. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental en el estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum* 14 (3), 317-326.

²Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Báez, H., & Díaz-Ortega, J. (2007). Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIX, 1, 133-145.

del mismo nombre, son templos sobresalientes para los pobladores de esta comunidad y el estado de Tlaxcala (Vargas *et al.*, 2004)³.

Metepec proviene de las palabras en náhuatl, *metl*=maguey; *tépetl*=cerro y *c*=final del lugar, de tal modo que quiere decir “cerro de los magueyes”. Es una localidad localizada al suroeste del municipio de Tlaxcala de Xicohtécatl en el estado de Tlaxcala, colinda con las comunidades de San Lucas Cuauhtelulpan, La Trinidad Tepehitec, Santa María Acuitlapilco y el municipio de Tetlatlahuca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009)⁴. En cuanto a la demografía y de acuerdo con el censo de población y vivienda de 2020⁵ realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, San Diego Metepec tiene una población de 3, 593 personas, de las cuales el 21.35% proviene fuera del estado, el 11.58% de hombres tiene un grado de escolaridad y en mujeres del 12.11%, la población indígena en esta comunidad es del 1.75% y se tiene un 1.09% que habla una lengua indígena.

Dentro de sus características ambientales, San Diego Metepec cuenta con un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media, el relieve lo conforman lomeríos de tobas, el suelo dominante es del orden Cambisol, suelos jóvenes y poco desarrollados. Su geología es de roca ígnea extrusiva del periodo geológico Neógeno (2.3 a 2.5 millones de años). El uso del suelo y vegetación es tipificado principalmente como zona urbana, con áreas importantes en donde se encuentran especies vegetales propias del clima templado, ubicadas en su mayoría en el cerro de San Gregorio (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009)⁴, el cual presenta un alto grado de destrucción de los suelos, generado principalmente por la erosión de las laderas del cerro, así como por actividades antrópicas, lo que ha ocasionado la pérdida de este recurso y la exposición de tepetates (García Zepeda & López Corral, 2012)⁶, lo que se observa en diversos sitios dentro del cerro. Por lo que es de suma importancia buscar la rehabilitación de estos sitios con problemas de degradación, ya que el propósito es conservar los recursos naturales para las futuras generaciones.

³ Vargas, L. E., Gutiérrez, A. C., & Ángeles, P. (2004). La iglesia de San Diego de Alcalá en Metepec, Tlaxcala. Revista electrónica Imágenes del Instituto de Investigaciones Estéticas. https://www.esteticas.unam.mx/revista_imagenes/dearchivos/dearch_vargasetal01.

⁴ Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Censo de población y vivienda 2020. <https://inegi.org.mx>

⁵ Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Censo de población y vivienda 2020. <https://inegi.org.mx>

⁶ García Zepeda, O., & López Corral, A. (2012). Un reservorio de agua del posclásico en el cerro San Gregorio, Tlaxcala. En: Sánchez Mastranzo, N. A., & Mendoza Santos, R. J. (Coord.). Memorias de las Jornadas de Antropología e Historia 2012. Centro INAH Tlaxcala, edición en CD-ROM, Tlaxcala, México. pp. 1-7. https://www.academia.edu/9996167/Un_reservorio_de_agua_del_poscl%C3%A1sico_en_el_cerro_San_Gregorio_Tlaxcala

Capítulo 1. Diversidad vegetal en el cerro de San Gregorio, San Diego Metepec, Tlaxcala

José Luis Martínez y Pérez¹
Balbina Rodríguez Rodríguez²

Introducción

Las plantas conforman la cubierta vegetal que protege al suelo de los procesos erosivos, regula el clima local y proporciona varios servicios ecosistémicos (Jiménez-López *et al.*, 2013). El conocimiento de la diversidad de plantas de cualquier lugar proporciona las herramientas básicas para definir la dirección que debe darse a la propuesta que se tenga sobre los espacios seleccionados, sobre todo lo que concierne al cuidado de dicho entorno. Muchas tomas de decisiones inadecuadas han llevado a la pérdida de esta diversidad disminuyendo la cubierta vegetal de grandes extensiones del estado de Tlaxcala, dando como resultado que, en la actualidad, se presente casi el 50% de su territorio con suelo erosionado (Martínez y Pérez *et al.*, 2011), dejando expuesto el basamento geológico infértil que se conoce como tepetate (Gama-Castro *et al.*, 2007).

El cerro de San Gregorio Metepec presenta este tipo de situación en la mayor parte de su extensión, por lo que, integrantes de la Asociación Civil de San Diego Metepec están interesados en rehabilitar dicha zona. Por ello, se considera como actividad preponderante el conocimiento de todas las especies vegetales que aquí se desarrollan y que puedan tener diversos usos, entre ellos, como potenciales para restaurar áreas erosionadas que ayuden a promover una mejora ambiental de este sitio. Por tal motivo, se ha propuesto realizar un inventario del recurso vegetal, lo que permitirá generar información importante que pueda ser utilizada en varios aspectos por los habitantes de dicha comunidad.

Desarrollo

Con base en las actividades propuestas para la realización del inventario de la diversidad de plantas, los recorridos por el cerro de San Gregorio se efectuaron acompañados con integrantes de la Asociación Civil Tlalli Atoktli A.C. en el año 2022 y 2023, esto para conocer los límites de la zona comunal y los ambientes que allí se presentan. La oportunidad de ser acompañados por personas del lugar proporciona una mejor percepción sobre el conocimiento local del uso de las plantas desde el punto de vista etnobotánico.

Para la recolección de las muestras botánicas se realizaron dos recorridos (periodo de seca y lluvia) en la parte comunal considerando los diferentes ambientes presentes en la zona. El material vegetal fue recolectado considerando las técnicas propuestas por Lot & Chiang (1986), principalmente aquellas que presenten estructuras reproductivas (flor y/o frutos), debido a que esto es un dato importante para realizar la identificación taxonómica de manera adecuada, se utilizaron

¹Centro de Investigación en Genética y Ambiente (CIGyA-UATx), jlmarpe@hotmail.com

²Fundación UAT, A.C., bal_mi_0329@hotmail.com

claves de los diferentes grupos de plantas (Rzedowski *et al.*, 2005) y los ejemplares se incorporaron a la colección científica del Herbario Universitario TLXM (Thiers, 2023) como respaldo del presente trabajo.

Al momento se presentan los primeros resultados en la zona de interés. La información de las muestras botánicas y el material fotográfico de algunas especies se enlista en el Cuadro 1 y se muestran sus imágenes. Cabe hacer mención que la familia Asteraceae se considera como la más diversa a nivel mundial, ya que presenta casi 20 000 especies de amplia distribución (Rzedowski *et al.*, 2005) y muchas de ellas se desarrollan en ambientes perturbados favorecidos por la disminución de la cubierta vegetal arbórea, algunas de ellas sobreviven en condiciones extremas como son los tepetates y aportan materia orgánica a dichos sustratos.

Cuadro 1. Lista de las familias, géneros y especies encontrados en el cerro de San Gregorio.

Familia	Nombre científico	Nombre común
Anacardiaceae	<i>Rhus standleyi</i> Barkley	Sumaco
Apocynaceae	<i>Asclepias linaria</i> Cav.	Algodoncillo
Apocynaceae	<i>Asclepias glauscencens</i> Kunth	--
Apocynaceae	<i>Asclepias rezdowski</i> W.D. Stevens	--
Asteraceae	<i>Aster moranensis</i> Kunth	Flor de María
Asteraceae	<i>Gnaphalium liebmannii</i> Sch. Bip. ex Klatt	Gordolobo
Asteraceae	<i>Pinaropappus roseus</i> (Less.) Less.	Chincuale
Asteraceae	<i>Senecio salignus</i> DC.	Jarilla
Bromeliaceae	<i>Tillandsia recurvata</i> (L.) L.	Magueyitos
Bromeliaceae	<i>Tillandsia usneoides</i> (L.) L.	Heno
Brassicaceae	<i>Lepidium virginicum</i> L.	Lentejilla
Cactaceae	<i>Opuntia tomentosa</i> Salm-Dyck.	Chamacuero
Cupressaceae	<i>Cupressus benthamii</i> Endl.	Cedro blanco



Rhus standleyi



Asclepias linaria



Asclepias glaucescens



Asclepias rezdowski



Aster moranensis



Gnaphalium liebmannii



Pinaropappus roseus



Senecio salignus



Senecio salignus



Tillandsia recurvata



Tillandsia usneoides



Lepidium virginicum



Opuntia tomentosa



Cupressus benthamii

Conclusiones

Hasta al momento y con base a las pláticas con habitantes de la comunidad, se menciona que no existe persona alguna que haga uso de las plantas locales, lo que no permite hacer rescate de este tipo de conocimiento tradicional a través de entrevistas. Sin embargo, por el conocimiento que se tiene de estas especies en otros lugares, se puede contar con este tipo de información y procurar que la comunidad retome alguno de estos usos ya probados, situación que podrá ser atendida a través de la realización a futuro, de talleres sobre conocimiento de las plantas.

Cabe resaltar que las especies de plantas que aquí se mencionan fueron recolectadas solo en la época seca y muchas de ellas se presentan en esta temporada y no todo el año o en la época de lluvia, dado que son de ciclos de vida muy cortos y, además, ya se encuentran adaptadas a ambientes secos, con mucha insolación y con poca humedad, lo que las hace aún más importante para ser utilizadas en programas de restauración ecológica.

Así por ejemplo, las especies agrupadas en la familia Bromeliaceae, generalmente llamadas heno o magueyitos son consideradas como parásitas de otras plantas y que causan daño a éstas, sin embargo, el hecho de que se desarrollen en otras plantas no necesariamente viven a expensas de los nutrimentos, sino que solo las utilizan como soporte (Rzedowski *et al.*, 2005) y han desarrollado estrategias alternativas para obtener el agua que necesitan no por las raíces como comúnmente la obtiene este grupo de organismos, sino por escamas especiales que le ayudan a absorberla del ambiente, por ello pueden ser muy útiles para utilizarse como bioindicadores. Pero el uso más generalizado es el ornamental, ya que en los mercados locales pueden adquirirse durante la época navideña y dicho uso se encuentra regulado por las dependencias federales.

En el caso de *Asclepias linaria* o comúnmente llamada algodoncillo se ha encontrado mencionado que puede ser utilizada en el control de la diabetes (Martínez y Pérez *et al.*, 2011) y *Asclepias rzedowski* se reporta solo para los alrededores de la Ciudad de México (Rzedowski *et al.*, 2005), por lo que su presencia en el estado puede considerarse como un nuevo registro. En el caso de las medicinales, destacan el chipule utilizado para el dolor de muela y cura granos y heridas, el gordolobo de las cuales varias especies son utilizados para controlar la tos, la jarilla para curar la fiebre, el reumatismo, la bilis, además como insecticida y ornamental. En el caso de *Opuntia tomentosa* se utiliza como alimento, tanto sus estructuras vegetativas como sus frutos que son muy dulces y que algunas veces con ellos preparan bebidas refrescantes y vinos dulces (Martínez y Pérez *et al.*, 2011).

Como puede observarse, existe una riqueza natural interesante en estos sitios considerados como inhóspitos y esto es una prueba de ello, estamos conscientes que habrá más información que se podrá compartir con el desarrollo posterior de éste y otros trabajos en esta comunidad.

Referencias

- Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Baéz, H., & Díaz-Ortega, J. (2007). Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: El caso del Glacis de Buenavista, Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Tomo LXI (1), 133-145. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94320861011>
- Jiménez-López, J., Hernández-Vázquez, M., Tlilayatzí-Cocoletzi J., Nieto Pérez, M. L. B., Orozco-Bolaños, H., García-Juárez, G., & Martínez y Pérez, J. L. (2013). *Manejo del recurso Forestal*. En: J. Suárez-Sánchez, H. Muñoz-Nava, J. Jiménez-López, S. Orozco-Flores (Coord.) Manejo de Recursos Naturales. (pp. 43-80). Universidad Autónoma de Tlaxcala. Tlaxcala.
- Lot, A., & Chiang, F. (1986). *Manual de herbario: administración y manejo de colecciones, técnicas de recolección y preparación de ejemplares botánicos*. Consejo Nacional de la Flora de México. México
- Martínez y Pérez, J. L., Santiago-Martínez, M. G., García-Sastré, M., Nava-Gutiérrez, Y., Águila-Flores, V., Galindo-Flores, G. L., Hernández-Cuevas, L. V., & Guerra De La Cruz V. (2011). *Catálogo botánico ilustrado de tepetates en Tlaxcala*. Universidad Autónoma de Tlaxcala. México.
- Rzedowski, G. C. de, J. Rzedowski, & colaboradores. (2005). *Flora Fanerogámica del Valle de México*. Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Thiers, B. (2023). *Index Herbariorum*. The New York Botanical Garden. <https://sweetgum.nybg.org/science/ih/herbarium-details/?irn=126242>.

Capítulo 2. La importancia del frío para la producción de frutales caducifolios. Caso San Diego Metepec, Tlaxcala

Maricela Hernández Vázquez¹
Silvia Herrera Cortes¹
Minerva Flores Morales¹
Hermila Orozco Bolaños²
José Jiménez López^{1†}

Introducción

El patrón de los cultivos en México ha evolucionado, actualmente los productores agrícolas se han adaptado a las condiciones económicas, sociales y tecnológicas actuales, conduciéndolos a modificar sus procesos tradicionales y expandiendo su producción a cultivos competitivos; como es el caso de los espacios frutícolas (Cruz *et al.*, 2012; Aragón, 2013). Sin embargo, las fluctuaciones en la producción de frutales están fuertemente influenciadas por las variaciones climáticas, situación que puede limitar su producción y calidad, y es que los eventos climáticos extremos provocan anomalías en la acumulación de horas frío, la presencia de heladas y lluvias atípicas durante el período invernal provoca bajos rendimientos (González, 2004).

Desde la década de los noventa del siglo pasado es perceptible el aumento de la temperatura en las áreas agrícolas de México (Ruiz *et al.*, 2010; Zarazúa *et al.*, 2011), este incremento de la temperatura afecta directamente la climatología relacionada con las actividades agrícolas, como puede ser la acumulación de frío en el periodo invernal (Medina-García *et al.*, 2011; Santillán-Espinoza *et al.*, 2011). Se está reduciendo el frío disponible en el invierno afectando el desarrollo de árboles frutales de hoja caduca, por lo tanto, el pronóstico de la reducción de horas frío es inminente en varias regiones (Grageda *et al.*, 2016; Chaar & Astorga, 2012; Medina-García *et al.*, 2019). Por ejemplo, en la región manzanera del estado de Chihuahua, la más importante de México, y en la cual se cultivan las variedades Golden Delicious y Red Delicious, en un análisis de cinco escenarios futuros mostró una tendencia significativa de la disminución de las unidades frío en el periodo invernal (Medina-García *et al.*, 2011).

Zacatecas sobresale por la producción de durazno criollo bajo condiciones de temporal, de igual forma en una investigación en el que usaron cinco escenarios futuros muestran una tendencia en el incremento de la temperatura máxima y mínima, lo que trae como consecuencia la disminución de frío invernal (Medina-García *et al.*, 2014). Otro caso es en la región Nogalera de Hermosillo Sonora

¹Licenciatura en Ciencias Ambientales, Facultad de Agrobiología-UATx, [mhernandezv, silvia.herrera, minerva.flores.m, jjimenezl†]@uatx.mx

²Licenciatura en Biología, Facultad de Agrobiología-UATx, horozco@uatx.mx

se está incrementando la temperatura de diciembre y enero afectando al nogal pecanero (*Carya illinoensis* K. Koch), según el escenario 2030 el incremento de la temperatura será de +2°C y un decremento de las horas frío acumuladas de 100HF (Grageda *et al.*, 2016).

En el estado de Tlaxcala se cosechan 1 631 ha destinadas a la producción de durazno, manzana y pera, de estos sobresale la producción de durazno de la variedad “Oro de Tlaxcala” y “Escarcha” con una cosecha de 1 612 ha; sin embargo, no se han hecho investigaciones sobre los requerimientos de frío para estos, y mucho menos para otros frutales caducifolios del estado (SIAP, 2021). Aquí la importancia de determinar los requerimientos de frío para San Diego Metepec, Tlaxcala, esto permitirá proponer frutales viables para la región, o bien, para diseñar estrategias y seleccionar aquellas variedades adaptadas y adaptables a unas condiciones ambientales marcadas en los próximos años por un incremento de las temperaturas como consecuencia del cambio climático.

Desarrollo

Frutales caducifolios

Los frutales de hoja caduca tienen su centro de origen en el sur de China y en Asia Menor y en la actualidad su cultivo se extiende a nivel mundial en gran parte de las zonas templadas, comprendidas entre los 30 y 50 grados de latitud, razón por la cual tienen facilidad de adaptación. Aunque, el manzano (*Malus domestica*) proviene del Cáucaso, el duraznero (*Prunus persica*) y el ciruelo (*Prunus salicina*) son originarios de China, se han encontrado bien adaptadas en latitudes bajas (Fischer, 1994; citado en Cárdenas & Fischer, 2013).

Entre los caducifolios se distinguen los frutales de pepita (pomáceas) y los frutales de hueso (drupáceas). Las pomáceas cultivadas más importantes son el manzano (*Malus domestica* Borkh.), el peral (*Pyrus communis* L.) y el membrillero (*Cydonia oblonga* Mill.). De las drupáceas se destacan los durazneros (*Prunus persica* [L.] Batsch.) y los ciruelos (japonés: *Prunus salicina* Lindl y europeo: *Prunus domestica* L.) (Cárdenas & Fischer, 2013).

Actualmente este tipo de frutales son propios de regiones frías y templadas, se caracterizan por tener un período de dormancia que inicia al final del otoño y durante el invierno en el cual pierden completamente su follaje (Cárdenas & Fischer, 2013; Medina-García *et al.*, 2019). En este momento las yemas entran en un profundo estado de dormancia o reposo del que no salen hasta que experimenten suficiente cantidad de frío invernal.

La salida del estado de dormancia se produce después de haber superado un cierto tiempo de exposición al frío y tengan una adecuada floración, foliación y fructificación, para esto, se determina que 7°C es la temperatura límite superior con acción favorable de enfriamiento, designándose como horas frío (Ortiz, 1987). Entonces, las horas frío se definen como el número de horas que pasa la planta, durante el periodo de reposo invernal, a temperaturas iguales o inferiores a 7°C (Reyna, 1981; Calderón, 1993; Melgarejo, 2000; Urbano, 2003).



<https://storage.googleapis.com/portalfru 1>

En el cuadro 1 se aprecian las necesidades de frío que requieren diferentes especies de árboles frutales y el rango que hay entre sus variedades (Dirección General de Desarrollo Rural, 2010).

Cuadro 1. Requerimientos de frío (HF) en diferentes especies frutales de hoja caduca.

Especie	Mínimo	Máximo
Almendro	100	500
Arándano	700	1200
Avellano	800	1600
Ciruelo europeo	700	1600
Ciruelo japonés	100-600	1000
Albaricoque	200-500	900
Cerezo	500-800	1500
Duraznero*	100-400	1100
Manzano	200-800	1700
Membrillo	100	500
Nogal**	400	1500
Peral	500	1500
Vid	100-500	1400
Higo	100	
Olivo	100	250

*Las variedades californianas tienen requerimientos de 300 HF

**Las más difundidas entre 600-800 HF

Fuente: Dirección General de Desarrollo Rural (2010).

Los síntomas por la falta de frío se observan en la brotación de los órganos vegetativos y en la floración, esta última se retrasa y se prolonga en el tiempo más de lo habitual, siendo menor el número de yemas de flor y apareciendo incluso flores deformadas. Hay una floración escasa, apreciable a simple vista. Si a pesar de lo anterior hay frutos, su calidad se verá afectada, con un menor tamaño, formas poco uniformes, aspecto débil, aumenta la caída de frutos al no disponer de nutrientes y se reduce el rendimiento (AGRICULTURERS, 2018).

Horas frío y la producción de pera en San Diego Metepec

San Diego Metepec, Tlaxcala se localiza a 2 300 msnm, su clima es templado subhúmedo con una precipitación promedio anual de 850 mm. Las temperaturas máximas ocurren en marzo, abril y mayo en un rango de 26-27 °C, y las mínimas en diciembre, enero y febrero en un rango de 3.5-4.5 °C. Las heladas se presentan en noviembre, diciembre, enero y febrero, generalmente no existen granizadas o se presentan esporádicamente en junio y julio (Figura 1).

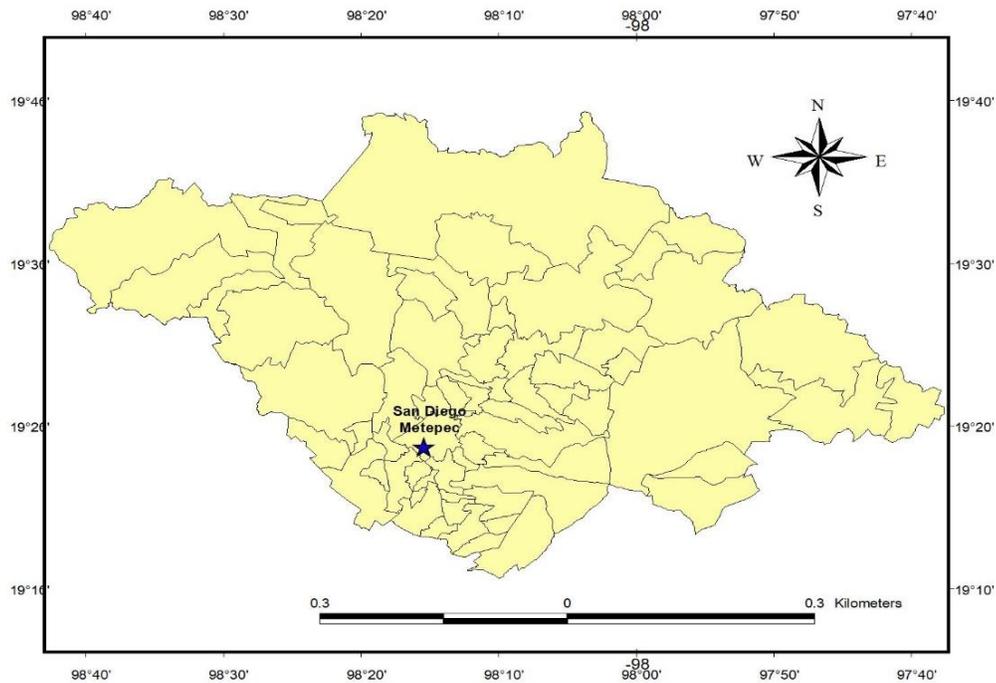


Figura 1. Ubicación geográfica de San Diego Metepec, Tlaxcala.

La producción de pera en México se da a través de una fruticultura llamada de “traspatio o lindero”. Los perales son árboles, de la familia rosáceas y existen más de 30 variedades de pera, entre las principales variedades comerciales podemos mencionar: Anjou, Bartlett, Bosc, Seckel y Kieffer (SADER, 2023). No hay bases de datos históricos de la producción de pera en San Diego Metepec, sin embargo, los pobladores de este lugar mencionan que años atrás este municipio se caracterizaba por una producción importante de ciertas variedades de pera, y de la cual obtenían beneficios económicos, actualmente cosechar pera ya no es relevante en el lugar.

Conociendo esta información se deduce que la causante de la casi desaparición de la producción de pera es el cambio del clima, razón por la cual, se lleva a cabo una descripción de las condiciones climáticas de Metepec mediante el análisis histórico de las variables climáticas temperatura máxima y temperatura mínima que son las que inciden en los requerimientos de horas frío necesarias durante el periodo de reposo de los frutales caducifolios.

En la figura 2 y 3 se representa el comportamiento de la temperatura mínima y máxima de los meses más fríos (noviembre, diciembre, enero y febrero). Se observa un aumento de la temperatura en los últimos 18 años para la mínima y 25 años para la máxima. Este aumento será

desfavorable no solo para la producción de pera, sino también para otros frutales que se pueden cosechar en clima templado.

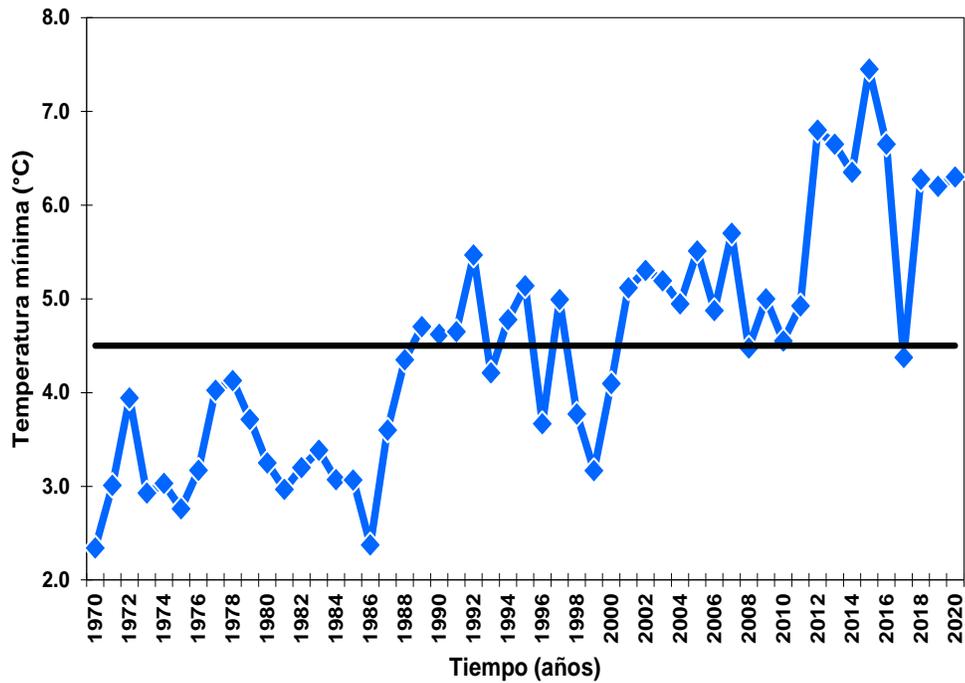


Figura 2. Comportamiento de la temperatura mínima de los meses con más frío en San Diego Metepec, Tlaxcala.

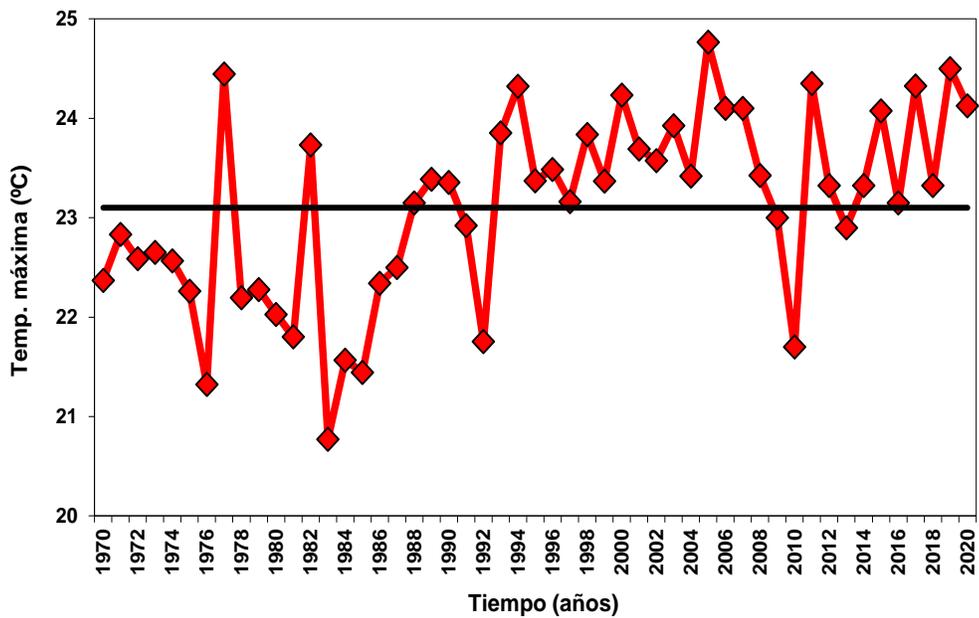


Figura 3. Comportamiento de la temperatura máxima de los meses con más frío en San Diego Metepec, Tlaxcala.

El cálculo de las horas frío ha sido un proceso complicado debido a que para ello se requieren temperaturas horarias, datos a los que difícilmente se puede acceder debido a que la mayoría de las estaciones meteorológicas registran únicamente datos cada 24 h. Para este estudio se utilizó la metodología de Parton y Logan (1981), el cual estima temperaturas horarias y calcula la acumulación de horas frío.

La figura 4 muestra el comportamiento de la acumulación de horas frío. La cantidad está descendiendo a partir del año 2000, y aunque repunta en 2019 y en 2011, en 2012 se reducen de una manera importante, en el 2020 apenas y hubo 99 horas frío, si se retoma la información del cuadro 1, únicamente se podrá cultivar higo, vid y olivo, estos dos últimos no se cultivan en el estado. Sin duda el cambio climático está incidiendo en la variabilidad de las temperaturas, siendo uno de los problemas ambientales más preocupantes de hoy en día, de acuerdo con Fischer *et al.* (2022).

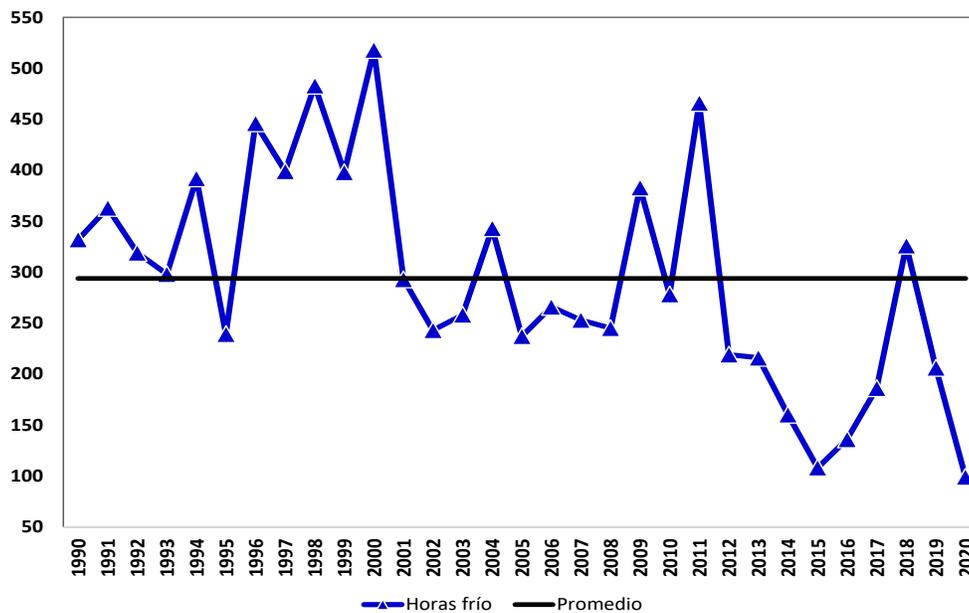


Figura 4. Horas frío en San Diego Metepec, Tlaxcala.

Importancia de la producción de árboles frutales

Los árboles frutales brindan servicios ecosistémicos como agua, aire, belleza de paisaje, no importa si son forestales o frutales, ambos capturan carbono, ayudan a mantener los mantos acuíferos, retienen suelo, la fruticultura bien manejada son fuente de biodiversidad y contribuyen a la mitigación del cambio climático (Comisión Nacional Forestal, 2019). Los frutales caducifolios reducen la evapotranspiración y se crean microclimas bajo las copas que favorecen el desarrollo de una biota que a su vez aumenta el contenido de materia orgánica, coadyuvando así a la recuperación y mejora del suelo.

Los huertos frutales son importantes sistemas de producción sostenible que minimizan las emisiones y secuestran CO₂ de la atmósfera. El CO₂ elevado (e-CO₂) genera efectos positivos sobre los frutales aumentando la fotosíntesis, el uso eficiente de agua, el crecimiento y la biomasa, razón por la cual, es posible el aumento de la calidad y rendimiento de los frutos (Fischer *et al.*, 2022).



<https://http2.mlstatic.com/arboles-fruta 1>

La producción de frutas contribuye a la seguridad alimentaria, la reducción de la pobreza rural, ya que pueden combatir la malnutrición y ser fuente de ingresos de muchas familias que se pueden vincular a los mercados de exportación intrarregionales e internacionales. Una huerta de frutales puede resultar más rentable y redituable que incluso la producción de un cultivo tradicional. Finalmente, en materia de nutrición, el consumo de frutas tiene múltiples beneficios para la salud pues brindan muchos nutrientes como vitaminas, minerales, antioxidantes, agua y fibra. También facilitan la digestión, cuidan la piel, fortalecen el sistema inmunológico, previenen enfermedades, ayudan a mantener un peso saludable y protegen contra el desarrollo de enfermedades crónicas no transmisibles como las enfermedades del corazón, cáncer, hipertensión y diabetes (Llauger, 2016).

Conclusiones

Los efectos del cambio climático se están manifestando, sobre todo en la variabilidad del clima la cual está impactando en la producción de alimentos, incluidos los de origen frutícola. El clima de las estaciones del año ha cambiado, los inviernos, son menos fríos afectando a los frutales, San Diego Metepéc está presentando un aumento en la temperatura de los meses con más frío (noviembre, diciembre, enero y febrero).

Es de gran importancia generar estudios de escenarios futuros a nivel local, de esta forma será posible optar por medidas de adaptación, es decir, cultivar variedades de frutales que requieran menos frío, o bien, cultivarlos en las zonas más frías de la región. Hay diversos compensadores de frío, pero la mayoría suelen tratarse de agroquímicos y tener un impacto negativo al ambiente, lo ideal es la implementación de prácticas sustentables. El uso tradicional de injertos en estos cultivos permitiría contar con una herramienta adicional para mejorar la adaptación y la productividad. La producción de frutales trae beneficios económicos, sociales y ambientales.

Referencias

- AGRICULTURERS. (2018, 19 de marzo). ¿Qué son las horas frío en frutales? Red de especialistas en agricultura. <https://agriculturers.com/que-son-las-horas-frio-en-frutales/>
- Aragón, L. J. G. B. (2013). *Transformaciones socioambientales de una reconversión agrícola; la producción de durazno en el municipio de Alzayanca, Tlaxcala*. [Tesis de doctorado, no publicada]. Colegio de Tlaxcala A. C.
- Calderón, E. (1993). *Fruticultura general. El esfuerzo del hombre*. Editorial Limusa, México.
- Cárdenas, H. J., & Fischer, G. (2013). *Clasificación botánica y morfología de manzano, peral, duraznero y ciruelo*. <https://www.researchgate.net/publication/256495323>
- Chaar, J., & Astorga, D. (2012). Determinación del requerimiento de frío y de calor en durazno [*Prunus pérsica* (L.) Batsch.] mediante un modelo de correlación. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 38 (3), 289-298. <https://www.redalyc.org/pdf/864/86425838002.pdf>
- Comisión Nacional Forestal. (2019, 23 de agosto). Árboles frutales vs forestales. <https://www.gob.mx/conafor/es/articulos/arboles-frutales-vs-forestales?idiom=es>
- Cruz, D. D., Leos, R. J. A., & Altamirano, C. J. R. (2012). La evolución del patrón de cultivos de México en el marco de la integración económica, 1980 a 2009. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(5), 893-906. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000500005&lng=es&tlng=es
- Dirección General de Desarrollo Rural. (2010). *Necesidades de frío invernal de los frutales caducifolios. Unión Europea, Gobierno de Aragon*, Núm. 224. https://bibliotecavirtual.aragon.es/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=3705385
- Fischer, G., Melgarejo, L. M., & Balaguera-López, H. E. (2022). Revisión del impacto de concentraciones elevadas de CO₂ sobre frutales en la era del Cambio Climático. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num2_art:2475
- González, C. P. (2004). *Comportamiento de las horas-frío, grados-día, heladas y precipitaciones en los ecosistemas de la Región del Maule durante los eventos El Niño 1997 y La Niña 1998-1999*. En: S. Avaria, J. Carrasco, J. Rutllant y E. Yáñez. (eds.). *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos en Chile*. CONA, Chile, Valparaíso. pp. 231-252. http://www.cona.cl/pub/libro_elnino/13gonzalez.pdf
- Grageda, G. J., Ruiz, C. J. A., García, R. G. E., Núñez, M. J. H., Valenzuela, L. J., Ruiz, A. O., & Jiménez, L. A. (2016). Efecto del cambio climático en la acumulación de horas frío en la región nogalera de Hermosillo, Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7 (spe13), 2487-2495. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000902487&lng=pt&tlng=es
- Llauger, R. E. (2016). La fruticultura y el desarrollo sostenible. LaRepública.net. [https://www.larepublica.net/noticia/ la_fruticultura_y_el_desarrollo_sostenible](https://www.larepublica.net/noticia/la_fruticultura_y_el_desarrollo_sostenible)
- Medina-García, G., Grageda-Grageda, J., Ruiz-Corral, J. A., Casas-Flores, J. I., Rodríguez-Moreno, V. M., & Mora-Orozco, C. (2019). Disminución de las horas frío como efecto del cambio climático en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(6), 1325-1337. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1688>
- Medina-García, G., Ruiz-Corral, J. A., Zegbe, J. A., Soria, R. J., Rodríguez, M. V., & Díaz, P. G. (2014). Impacto potencial del cambio climático en la región productora de durazno en Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5 (spe10), 1939-1950. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014001401939&lng=es&tlng=es
- Medina-García, G., Ruiz-Corral, J. A., Ramírez-Legarreta, M. R., & Díaz, P. G. (2011). Efecto del cambio climático en la acumulación de frío en la región manzanera de Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (2), 251-263.
- Melgarejo, P. (2000). *Tratado de fruticultura para zonas áridas y semiáridas Vol. 1. El medio ecológico, la higuera, el alcaparro y el nopal*. Mundi-Prensa Libros, Madrid, España.
- Ortiz, S. C. A. (1987). *Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana*. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo (UACH). México.
- Parton, W. J., & Logan, J. A. (1981). A model for diurnal variation in soil and air temperature. *Agricultural Meteorology*, 23, 205-216.
- Reyna, T. T. (1981). Cuantificación de las horas-frío y su importancia en la planeación de cultivos de caducifolios en México. *Memorias del IX Congreso Nacional de Geografía*, tomo I, Toluca, México, pp. 193-203.
- Ruiz, C. J. A., Medina, G. G., Manríquez, O. J. D., & Ramírez, D. J. L. (2010). Evaluación de la vulnerabilidad y propuestas de medidas de adaptación a nivel regional de algunos cultivos básicos y frutales ante escenarios de cambio climático. Informe Final de Proyecto INIFAP-INE. Guadalajara, Jal. 108 p.

- Santillán, E. L. E., Blanco, M. F., Magallanes, Q. R., García, H. J. L., Cerano, P. J., Delgadillo, R. O., & Valdez, C. R. D. (2011). Tendencias de temperaturas extremas en Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(2), 207-219.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2023). La pera te espera. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/la-pera-que-te-espera?idiom=es>
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2021). Producción agrícola. <https://www.gob.mx/siap>
- Urbano, T. P. (2003). *Tratado de Fitotecnia general*. 2a ed., Mundi-Prensa Libros, Madrid, España.
- Zarazúa, V. P., Ruiz, C. J. A., González, E. D. R., Flores, L. E. H., & Ron, P. J. (2011). Cambio climático y agroclimático para el ciclo otoño-invierno en la región Ciénega de Chapala. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2 (Pub. Esp.), 295-308.

Capítulo 3. Métodos de estimación de horas frío. Caso de estudio San Diego Metepec, Tlaxcala

Silvia Herrera Cortés¹
Maricela Hernández Vázquez¹
Minerva Flores Morales¹
Hermila Orozco Bolaños²
José Jiménez López^{1†}

Introducción

En los meses más fríos del año, finales de otoño hasta principios de primavera, los árboles frutales atraviesan por un periodo de reposo conocido como dormancia o latencia que se caracteriza por la suspensión de crecimiento visible en su tejido vegetal marcando el fin de un ciclo vegetativo y el inicio de otro (Beauvieux *et al.*, 2018; Severino *et al.*, 2011). Durante esta fase, se acumulan temperaturas frías hasta satisfacer sus necesidades de enfriamiento, para después almacenar calor y desencadenar adecuadamente sus estadios fenológicos en primavera (Fadón *et al.*, 2020), es decir, para salir del reposo invernal, los árboles caducifolios primero acumulan frío y después calor (Rodríguez & Muñoz, 2022).

La cantidad de frío que un frutal debe acumular depende de la especie y variedad (Rodríguez *et al.*, 2019) y se mide en horas frío (HF). Las HF se definen como las unidades de tiempo en que el árbol se somete a temperaturas menores a 7 °C y superiores a 3 °C (Mendoza, 2020), aunque se ha demostrado que las HF pueden estar en el rango de 0 °C a 7 °C (Pérez *et al.*, 2008; Severino *et al.*, 2011). La acumulación insuficiente de frío en este periodo de letargo tiene como consecuencia el retraso en la brotación de yemas, un desarrollo foliar de brotes defectuosos o deficientes, así como floración no homogénea (Ramírez *et al.*, 2011).

Para los productores frutícolas es importante conocer la cantidad de frío invernal que se espera en los sitios de producción, información de la que depende la selección de los cultivares de árboles, además, ante la evidencia de una disminución de HF como resultado de inviernos más cálidos por efecto del calentamiento global, que afecta directamente la producción frutal principalmente de zonas templadas, y a medida que se acelere el cambio climático, será necesario contar con datos precisos de HF con la finalidad de que los fruticultores hagan coincidir los cultivares con el clima (Luedeling & Brown, 2011; Media-García *et al.*, 2019; Fraga & Santos, 2021).

Lo anterior hace evidente la importancia de contar con información confiable sobre la cantidad de frío acumulado en varias regiones (Thagara *et al.*, 2021); por lo que, realizar estudios

¹Licenciatura en Ciencias Ambientales, Facultad de Agrobiología-UATx, [silvia.herrera, mhernandezv, minerva.flores.m, jjimenezl]@uatx.mx

²Licenciatura en Biología, Facultad de Agrobiología-UATx, horozco@uatx.mx

sobre HF acumuladas es un comienzo para estudiar los impactos que tendrá el cambio climático en la producción frutal en un futuro cercano (Thagara, 2016). Para ello, existen modelos matemáticos que estiman las HF acumuladas, los más conocidos son los modelos lineales de Weinberger, Da Mota, Crossa Raynaud y los no lineales como el modelo proporcionado por Parton y Logan. En este capítulo se presentan los modelos antes citados y se aplican a registros meteorológicos de una estación climatológica a cargo de CONAGUA, para un estudio de la comunidad de San Diego Metepec, Tlaxcala.

Desarrollo

a) Métodos de estimación de horas frío

Para determinar los requerimientos de HF requerido por árboles caducifolios, Weinberger en 1950 se basó en la premisa de que las yemas del frutal deben permanecer cierto número de horas en el rango de temperaturas de 0°C a los 7.2°C durante el otoño y el invierno, momento en el que se presenta el proceso de dormancia (Pérez *et al.*, 2008). De aquí que, convencionalmente, se ha definido las HF como el número de horas en que la planta se somete a temperaturas en el rango de los 0°C a los 7°C (Agusti, 2010 citado en Mendoza, 2020).

Matemáticamente, el cálculo de HF se expresa como:

$$HF_t = \sum_{j=1}^t T \dots (1)$$

con $T = \begin{cases} 1, \text{ si } 0^\circ C \leq T \leq 7^\circ C; \\ 0, \text{ en otro caso.} \end{cases}$ y HF_t representa al número de horas frío al tiempo t .

Ante la incapacidad de algunas estaciones meteorológicas de registrar temperaturas horarias y con la finalidad de estimar las horas frío acumuladas por un frutal, se han desarrollado modelos matemáticos, que utilizan registros de las temperaturas máxima y mínima diarias o la temperatura promedio mensual para los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero. Los modelos más conocidos son los modelos lineales de Da Mota, Weinberger y Crossa-Raynoud. Dentro de los modelos no lineales, para el cálculo de horas frío más conocidos es el modelo seno-exponencial de Parton y Logan.

1. Modelo Da Mota

El modelo desarrollado por Da Mota (Díaz, 1987 citado en Grageda *et al.*, 2016) determina el número de horas frío con la temperatura promedio de los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero mediante el modelo (2).

$$HF_i = 485.1 - 28.52\bar{T}_i, \quad i = 11, 12, 1, 2 \dots (2)$$

Donde HF_i es el número de HF estimadas para el mes i ($i = 11$, representa el mes de noviembre, $i = 12$, representa el mes de diciembre, $i = 1$, representa el mes de enero e $i = 2$, representa el mes de febrero), \bar{T}_i es la temperatura promedio del mes i . Así, las horas frío totales acumuladas (HF_{tot}), se pueden determinar con el modelo 3.

$$HF_{tot} = \sum HF_i, i = 1,2,11,12 \dots (3)$$

2. Modelo Weinberger

Este modelo presentado en Grageda *et al.* (2016) relaciona el número de horas frío con la temperatura promedio de los meses de diciembre y enero, mediante el modelo (4).

$$HF_i = 2124.85 - 125.23\bar{T}_i, i = 12,1 \dots (4)$$

Donde HF_i es el número de HF estimadas para el mes i ($i = 12$, representa el mes de diciembre, $i = 1$, representa el mes de enero), \bar{T}_i es la temperatura promedio del mes i . Por lo que, las horas frío totales acumuladas (HF_{tot}), se pueden determinar como:

$$HF_{tot} = \sum HF_i, i = 1,2,11,12 \dots (5)$$

3. Modelo Crossa Raynaud

Este modelo estima las horas frío para un día, utilizando la temperatura máxima y mínima. El modelo trabaja bajo el supuesto de un incremento constante de la temperatura, desde que ocurre la temperatura mínima de un día hasta que se presenta la temperatura máxima y un decremento constante de la temperatura, desde que ocurre la temperatura máxima hasta que se presenta la temperatura mínima del siguiente día, lo que queda representado con el modelo (6).

$$HF_i = 24 \left(\frac{7 - T_{min_i}}{T_{max_i} - T_{min_i}} \right) \dots (6)$$

Donde HF_i es el número de horas-frío acumuladas para un día i , T_{min_i} y T_{max_i} denotan la temperatura mínima y máxima del día i . Finalmente, para la estimación de HF acumuladas por el periodo de estudio resulta de la sumatoria de las horas frío diarias estimadas con el modelo 6.

4. Modelo Utah

Este método, presenta una función ponderada que asigna diferentes eficiencias de enfriamiento a diferentes rangos de temperatura, para ello, Richardson *et al.* (1974), proponen el término de unidades frío (UF), consideradas como las horas-frío efectivas que la planta acumula de acuerdo con la escala que se presenta en el cuadro 1.

Cuadro 1. Contribución de unidades frío, de acuerdo con la temperatura. Cuadro extraído y modificado de Richardson *et al.* (1974).

Temperatura °C	Unidades frío UF	Temperatura °C	Unidades frío UF
< 1.4	0	12.5-15.9	0
1.5-2.4	0.5	16-18	-0.5
2.5-9.1	1	> 18	-1
9.2-12.4	0.5	-	-

Así, el total de unidades frío que acumula un frutal durante el periodo de estimación estipulado se puede determinar como:

$$UF_{tot} = \sum T_{UF} \dots (7)$$

Donde UF_{tot} son las unidades frío totales acumuladas y T_{UF} es como en el cuadro 1.

5. Modelo Parton y Logan

El modelo seno-exponencial propuesto por Parton y Logan (1981), tiene como objetivo estimar las variaciones de la temperatura durante el día y la noche por medio de un modelo senoidal para estimar las temperaturas horarias durante el día (desde que sale el sol hasta que se oculta) y otro exponencial para la estimación de temperaturas horarias para la noche (desde el ocaso hasta que sale el sol). Asume que la temperatura mínima ocurre dentro de unas pocas horas antes o después del amanecer y la temperatura máxima ocurrirá en algún momento durante las horas diurnas, además, tiene como base la temperatura mínima, máxima, el día juliano y la latitud de la región.

Las expresiones matemáticas para estimar las variaciones de la temperatura durante el día y la noche están expresadas en las ecuaciones (8) y (9) respectivamente.

$$T_i = (T_{max} - T_{min}) \text{sen} \left(\frac{\pi m}{Y+2a} \right) + T_{min}, \dots (8)$$

$$T_i = T_{min} + (T_{oc} - T_{min}) \exp \left(-\frac{bn}{Z} \right), \dots (9)$$

Donde T_{min} , T_{max} y T_{oc} , representan la temperatura mínima, máxima y del ocaso respectivamente. Y es la longitud del día en horas, Z longitud de la noche en horas, m el número de horas desde la temperatura mínima hasta que se oculta el sol, n las horas transcurridas desde

que el sol se oculta hasta que se presenta la temperatura mínima, a y b son coeficientes de corrección para la temperatura máxima y la temperatura nocturna respectivamente.

b) Estimación de horas frío en San Diego Metepec, Tlaxcala

Debido a que en la comunidad de San Diego Metepec no se cuenta con estación meteorológica propia, se trabajó con datos de Tlaxcala capital, bioclimáticamente similar a la comunidad y cuya estación climatológica a cargo de CONAGUA, es la más cercana al sitio de estudio.

Los registros proporcionados, comprenden el periodo de 1 de enero de 1989 a 28 de febrero de 2020. Para los meses más fríos, los registros presentaron 23 datos faltantes para la temperatura mínima (0.62 %) y 25 para la temperatura máxima (0.67 %), mismos que se estimaron mediante regresión lineal con los años de mayor correlación. El análisis descriptivo de la información mediante diagramas de caja, evidencian un incremento en la temperatura mínima, indicativo de inviernos más cálidos (Figura 1). En relación con la temperatura máxima, su comportamiento aun es estacionario, es decir, media y varianzas constantes (Figura 2).

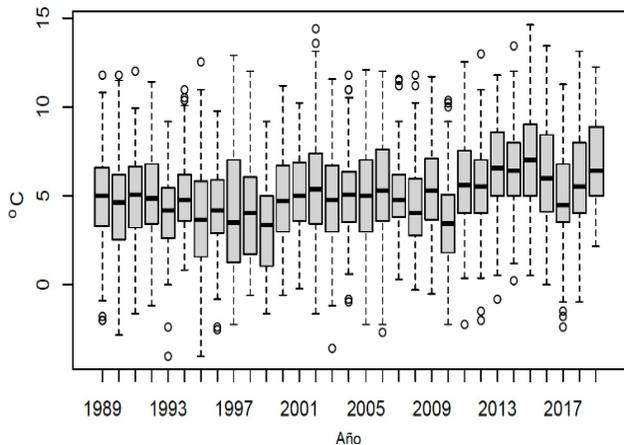


Figura 1. Diagrama de caja para la temperatura mínima.

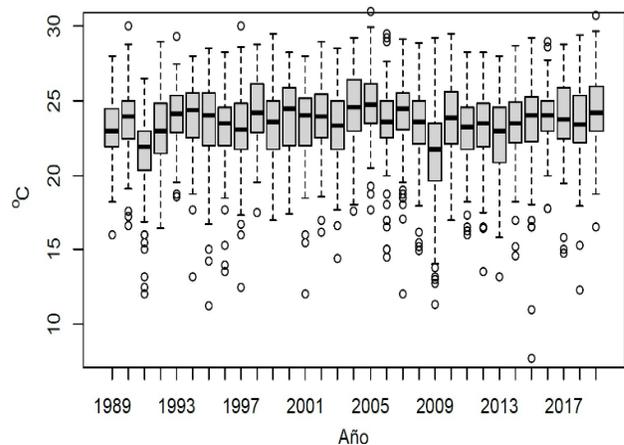


Figura 2. Diagrama de caja para la temperatura máxima.

Después del análisis descriptivo, se calculó la temperatura media para los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero de cada año y se realizaron los cálculos establecidos en las ecuaciones (2) a (6). La aplicación de las ecuaciones (7) y (8), requirió de ser programada en RStudio, versión 2022.02.3+492. Debido a que los datos proporcionados por CONAGUA fueron registros diarios, no fue posible aplicar el modelo de Richardson et al. (1974), mejor conocido como el modelo Utah.

Con fines de ilustración, el Cuadro 2, presenta las estimaciones de horas frío para los años 2010 a 2019. En la Figura 3, se presenta el gráfico de horas frío estimadas para el periodo comprendido de 1989 a 2019.

Cuadro 2. Estimaciones de horas frío por diferentes métodos.

Año	Modelo Da Mota	Modelo Weinberger	Modelo Crossa Raynaud	Modelo Parton y Logan
2010	363.2	1079.8	295.5	467
2011	290	810.6	293.7	219
2012	295.5	780.7	299.7	216
2013	269.7	845.5	299.8	160
2014	225.01	670.6	302.5	108
2015	199.95	660.8	302.1	156
2016	217	604.2	295	186
2017	283.3	926.6	285.9	326
2018	242.9	780.5	279	212
2019	167.6	644.44	283.3	99

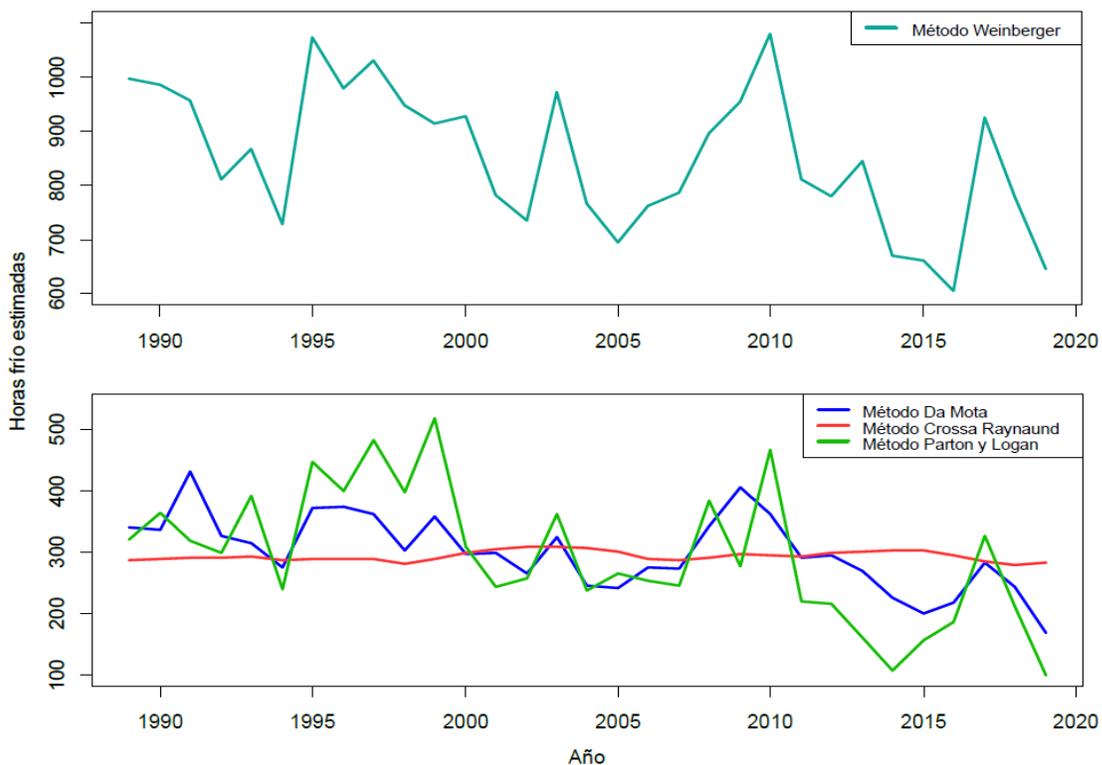


Figura 3. Tendencias de las estimaciones de horas frío para el periodo 1989-2019.

De las estimaciones calculadas, el modelo Weinberger estima horas frío en un rango de valores 600 a 1000 h, el modelo de Crossa Raynaud estima horas frío casi constantes para todos los años analizados. Los modelos de Da Mota y Parton y Logan, estiman horas frío en los rangos de 100 a 550 horas frío, con tendencia a una disminución de acumulación de horas frío a partir del 2010.

Conclusiones

Los análisis realizados presentan evidencia de inviernos más cálidos en la zona de estudio, es decir, un incremento en la temperatura mínima, dando como resultado una disminución en la acumulación natural de horas frío para árboles caducifolios.

Con los resultados encontrados, el paso a seguir es revisar los requerimientos requeridos por los frutales para recomendar cultivar en San Diego Metepec, el tipo de frutal que puede desarrollarse, lo que puede ser un área de oportunidad para la generación de ingresos económicos en el área de estudio. Ante el incremento de la temperatura, es importante realizar estudios que consideren escenarios de cambio climático y acumulación de horas frío no solo para la comunidad, si no, para todo el estado.

Referencias

- Agusti, M. (2010). Fruticultura. *Mundi-Prensa*, 2a ed. 507.
- Beauvieux, R., Wenden, B., & Dirlewanger, E. (2018). Bud Dormancy in Perennial Fruit Tree Species: A Pivotal Role for Oxidative Cues. *Front. Plant Sci.* 9:657, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00657>.
- Díaz, M. D. H. (1987). Requerimiento de frío en frutales caducifolios. *SARH-INIFAP*. México, D. F., Tema didáctico, 2, 21.
- Fadón, E., Herrera, S., Guerrero, I. B., Guerra, M. E., & Rodrigo, J. (2020). Chilling and Heat Requirements of Temperate Stone Fruit Trees (*Prunus* sp.). *Agronomy*, 10 (3), 409, <https://doi.org/10.3390/agronomy10030409>.
- Fraga, H., & Santos, A. J. (2021). Assessment of climate change impacts on chilling and forcing for the main fresh fruit regions in Portugal. *Front. Plant Sci.*, 12, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.689121>.
- Grageda, G. J., Corral, Ruiz, C. J. A. García R., G. E., Núñez M. J.H., Valenzuela L., J., Ruiz A., O., & Jiménez L. A. (2016). Efecto del cambio climático en la acumulación de horas frío en la región Nogalera de Hermosillo Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13, 2487-2495.
- Luedeling, E., & Brown, H. P. (2011). A global analysis of the comparability of winter chill models for fruit and nut trees. *Int. J. Biometeorol.*, 55, 411-421. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0352-y>.
- Medina-García, G., Grageda-Grageda, J., Ruiz-Corral, J. A., Casa-Flores, J. I., Rodríguez-Moreno, V. M., & Mora-Orozco, C. (2019). Cold hours decrease as a result of climate change in Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10 (6), 1325-1337.
- Mendoza, G. E. (2020). Cuantificación y acumulación de horas-frío y días-grado en el Valle alto de Cochabamba. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 7(2), 144-150.
- Parton, W. J., & Logan, J. A. (1981). A model for diurnal variation in soil and air temperature. *Agricultural Meteorology*, 23, 205-216.
- Pérez, J. F., Ormeño, N. J., Reynaert, B., & Rubio, S. (2008). Use of the dynamic model for the assessment of winter chilling in a temperate and subtropical climatic zone of Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 68, 198-206.
- Ramírez, L., R. M., Ruiz, C. J. A., Medina, G. G., Jacobo, C. J. L., Parra, Q. R. A., Ávila M. M. R., & Amado, A. J. P. (2011). Perspectivas del sistema de producción de manzano en Chihuahua, ante el cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 265-279.
- Richardson, A. E., Seeley, D. S., & Walker, R. D. (1974). A model for estimating the completion of rest for "Redhaven" and "Alberta" peach trees. *Hortscience*, 9(4), 331-332.
- Rodríguez, A., & Muñoz, A. (2022). *Requerimiento de frío invernal*. En: Variabilidad agroclimática en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén. Análisis de los últimos 50 años. (pp. 23). INTA. https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_analisisclimatico_vallemedio_riocolorado.pdf.
- Rodríguez, A., Pérez-López, D., Sánchez, E., Centeno, A., Gómara, I., Dosio, A., & Ruíz-Ramos, M. (2019). Chilling accumulation in fruit trees in Spain under climate change. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 1087–1103. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1087-2019>.
- Severino, V., Arbiza, H., Arias, M., Manzi, M., & Gravina, A. (2011). Modelos de cuantificación de frío efectivo invernal adaptados a la producción de manzana en Uruguay. *Agrociencia*, 15(2), 19-28.
- Tharaga, P. C., Steyn, A. S., & Coetzer, G. M. (2016) Impacts on accumulated chill units at selected fruit production sites in South Africa. *Acta Hort.*, 1130, 63-70. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1130.9>.
- Tharaga, P. C., Steyn, A. S., & Coetzer, G. M. (2021) Climate change impacts on temperature and chill unit trends for apple (*Malus domestica*) Production in Ceres, South Africa. *Atmosphere*, 12(6), 740. <https://doi.org/10.3390/atmos12060740>.

Introducción

El suelo tiene un papel fundamental en todos los procesos ecosistémicos, pero su pérdida tiene serias consecuencias en las funciones del mismo, ya que se remueven nutrientes y materia orgánica, se incrementa la densidad aparente y por consecuencia se reduce el espacio poroso, lo que impide a las raíces de las plantas el poder desarrollarse, además se disminuye la tasa de infiltración y capacidad de retención de agua, lo que ocasiona la pérdida de suelo y el afloramiento del sustrato denominado “tepetate”, el cual es considerado una capa de tobas, flujos piroclásticos o antiguas cenizas volcánicas endurecidas dentro del perfil o en la superficie (Etchevers *et al.*, 2006). Gama-Castro *et al.* (2007) lo refieren como un horizonte endurecido, compactado o cementado, que por sus características físicas, mecánicas y químicas; tal como, alta densidad, bajas conductividad hidráulica y retención de humedad son restrictivas para el desarrollo de la vegetación. Su presencia, en consecuencia, representa un problema social y económico, ya que por su baja fertilidad limita el establecimiento de plantas.

Werner estimó en el año 1992 que en el estado de Tlaxcala se exhibía el 54% de estas capas endurecidas. Bolaños González *et al.* (2016) reportaron que el 92.99% de la superficie del estado mostró problemas de erosión hídrica, lo que constituye un grave problema para el establecimiento de especies vegetales, presentándose zonas con erosión extrema en el corredor Hueyotlipan-San Simeón-Apizaco, así como en el suroeste, de Nanacamilpa a Villa Mariano y en el noroeste, desde Tlaxco hasta el límite con Hidalgo (próximo a Apan). También existen zonas importantes con erosión fuerte, principalmente en la zona de La Malinche y en el corredor central del estado, desde el norte de Apizaco hasta el sur de Tlaxcala y Santa Ana Chiautempan. Para recuperar la funcionalidad de los tepetates se han implementado diferentes estrategias, entre las cuales se encuentra el establecimiento de obras de conservación de suelo como parte de las prácticas de rehabilitación, estructuras que se construyen con el propósito de disminuir la erosión laminar, aumentar la infiltración y con ello ser habilitados para la producción forestal, pecuaria o agrícola (Locatelli *et al.*, 2020).

Existe una diversidad de obras de conservación, tales como las terrazas individuales, bordos en curva a nivel, barreras de piedra acomodada en curvas a nivel, prácticas vegetativas, barreras vivas, terrazas de muro vivo, de formación sucesiva, zanja trinchera y zanja bordo, esta última considerada una obra para el control de la erosión laminar, ya que retiene suelo y sedimentos, a su vez capta agua de lluvia, se incrementa la humedad en el suelo, lo que favorece el establecimiento

¹Centro de investigación en Genética y Ambiente (CIGyA-UATx), egarciag@uatx.mx

de especies herbáceas y arbóreas. Este tipo de obra es un conjunto de zanjas y bordos continuos que se construyen en curvas a nivel y se coloca el producto de la excavación aguas debajo de la zanja para formar el bordo, al mismo tiempo se construyen diques divisores para seccionar el almacén de agua (Gerencia de Restauración Forestal, 2018). Estas obras son particularmente notables en Tlaxcala, García Gallegos *et al.* (2023) analizaron sitios con zanja bordo y zanja trinchera en las localidades de Gustavo Díaz Ordaz, municipio de Emiliano Zapata, en Zacapexco, comunidad de San Pedro Ecatepec, Atlangatepec y San Bartolomé Matlalohcan de Tetla de La Solidaridad a través de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, encontrando que, en Gustavo Díaz Ordaz, los valores de las propiedades del suelo no fueron significativamente diferentes respecto al testigo a ocho años de establecer las obras de conservación. En Zacapexco, a cinco años de la construcción de las zanjas bordo, se tuvo un impacto positivo en varias propiedades químicas y biológicas del suelo. Finalmente, en San Bartolomé Matlalohcan, después de más de 40 años de la realización de las zanjas bordo, no se observaron cambios significativos en las propiedades biológicas del suelo, siendo el tipo de vegetación establecida un factor determinante.

Particularmente en el cerro de San Gregorio, ubicado en la comunidad de San Diego Metepec, municipio de Tlaxcala se presentan áreas desprovistas de vegetación, lo que ha ocasionado al paso de los años el afloramiento de capas endurecidas, siendo un problema ambiental a nivel local, que se refleja a nivel municipal y estatal, ya que el cerro provee diversos servicios ecosistémicos a la fauna, flora y el ser humano, por lo que la rehabilitación de este recurso edáfico a través de la construcción de obras de conservación (zanjas bordo) es una alternativa que permitirá la mejora de las condiciones del sustrato.

Desarrollo

a) Identificación de sitios para establecer las obras de conservación

Para el establecimiento de las obras de conservación se realizó una visita al cerro de San Gregorio en el mes de octubre del año 2021, en el recorrido se observaron diferentes áreas con afloramiento de tepetate, ausencia de vegetación, presencia de pedregosidad y una pendiente menor al 20%. Se identificaron cinco áreas con mayor degradación dentro de la sección comunal del cerro de San Gregorio, áreas que en conjunto abarcan una superficie de 6 817.93 m² (Cuadro 1).

Cuadro 1. Localización, superficie y número de zanjas bordo en los diferentes sitios.

Sitio	Coordenadas geográficas	Altura msnm	Superficie (m ²)	No. zanjas bordo
1	19°16'21" N 98°15'31" W	2 353	84.73	10
2	19°16'21" N 98°15'30" W	2 355	183.25	15
3	19°16'22" N 98°15'28" W	2 355	1 098.99	8
4	19°16'25" N 98°15'28" W	2 349	1 300.48	28
5	19°16'16" N 98°15'22" W	2 351	4 150.48	147

b) Construcción de las obras de conservación

En cada una de las áreas seleccionadas se trazaron las obras bajo curvas a nivel (Figura 1), para la excavación de la zanja se utilizó una retroexcavadora Caterpillar® (Figura 2) por lo compactado del sustrato. En total se construyeron 207 zanjas bordo, con medidas en promedio de 2.64 m de largo, 0.68 m de ancho y 0.32 m de profundidad, lo que da un volumen de captación de agua de lluvia de 0.58 m³, que equivale a 570 L por temporada. El sustrato que se extrajo con la maquinaria se depositó con base a la pendiente y después fue separado de la zanja de 20-30 cm con la ayuda de una pala y pico, el bordo se acomodó lo mejor posible y se inició la limpieza de las zanjas con el apoyo de una pala, esta actividad se debe realizar por lo menos cada dos años para evitar que se acumulen los sedimentos en el interior de la zanja e impidan se disminuya el volumen de agua a almacenar.

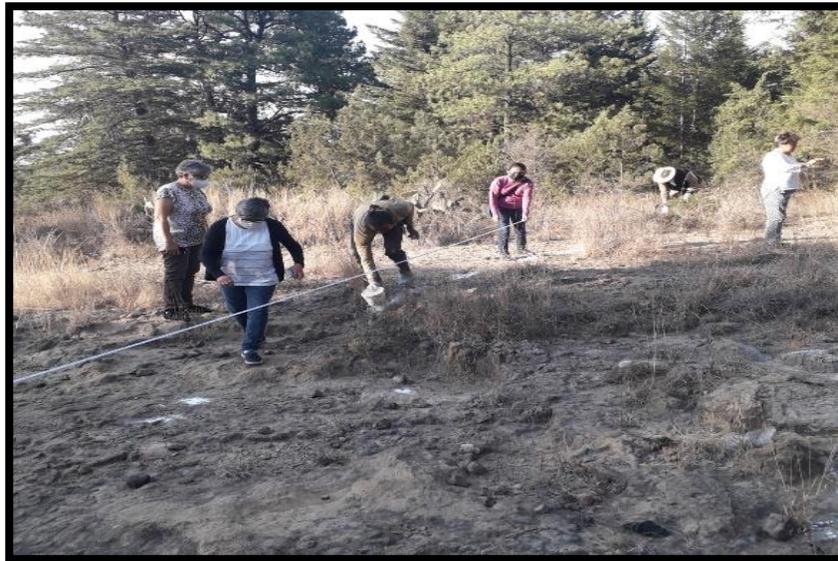


Figura 1. Delimitación de las zanjas bordo en los diferentes sitios.



Figura 2. Construcción de la obra de conservación zanja bordo.

c) Análisis del sustrato

Se analizó física, química y biológicamente el sustrato al término de la excavación, acomodo y limpieza de la zanja bordo, la muestra fue recolectada del material extraído, propiamente del bordo. En cada sitio se recolectaron tres muestras simples a una profundidad de 0-20 cm, las cuales fueron colocadas en bolsas de plástico y se trasladaron al Laboratorio de Recursos Naturales del CIGyA para secar a temperatura ambiente y a la sombra sobre papel Kraft, posteriormente se tamizaron con malla 2 mm de diámetro y se le determinó a cada muestra: textura, por el método del hidrómetro de Bouyoucos; pH en una relación suelo:agua (1:5 p/v); materia orgánica, por el método de Walkley y Black; fósforo disponible por Bray y Kurtz 1 modificado (NOM-021-SEMARNAT-2000) (Semarnat, 2002); densidad aparente por el método de la probeta indicado en la NMX-FF-109-SCFI-2007 (Secretaría de economía, 2008) y respiración microbiana a través de la cuantificación de CO₂ (Zagal *et al.*, 2002). Los datos se analizaron a través de un análisis de varianza y una prueba de comparación de media Tukey ($p < 0.05$).

El resultado del análisis de las diferentes muestras indica que no existe una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre sitios con obra de conservación. El tepetate presentó una mayor proporción de la partícula arena en un 82.4%, un 12.81% de limo y de arcilla 4.70%, lo que da una clase textural areno francosa. Respecto a la densidad aparente la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002) señala que los suelos de origen volcánico deben presentar una densidad aparente menor a 1 g/cm³, las muestras de tepetate del bordo tuvieron un valor de 1.09 g/cm³, valor que se puede deber a la remoción del sustrato, ya que en tepetate Gama-Castro *et al.* (2007) la densidad aparente es generalmente alta de 1.96 a 1.70 g/cm³. En lo que refiere a las propiedades químicas, el pH fue neutro en todas las muestras de los diferentes sitios (6.95), un 0.78% de materia orgánica, valor clasificado por la NOM-021 como muy bajo (<4.0%), por la misma norma mexicana el contenido de fósforo fue bajo (<15 mg/kg), las muestras de tepetate tuvieron en promedio 0.65 mg de fósforo/kg. Al respecto, Munive-Martínez *et al.* (2018) reportaron que, en tepetate sin roturar, el pH fue de 6.94, el contenido de materia orgánica de 0.30% y un contenido de fósforo de 2.93 mg/kg, valor superior al encontrado en el tepetate bajo análisis.

Al determinar la actividad microbiana del sustrato como propiedad biológica se tuvo que el tepetate de los bordos presentó un valor de 307.7 mg C-CO₂/kg suelo/día, que al comparar con la actividad microbiana de suelos de bosque (5 109 mg C-CO₂/kg suelo/día) que reportan Cruz-Ruiz *et al.* (2012) el resultado es muy inferior, lo que se asocia al bajo contenido de materia orgánica presente. En zanjas bordo establecidas para la rehabilitación de tepetates a 5 años se tuvo un valor de 23.77 mg C-CO₂/kg suelo/día, a 8 años de 23.35 mg C-CO₂/kg suelo/día y a 40 años de 17.66 mg C-CO₂/kg suelo/día, siendo un factor importante para el incremento de la actividad microbiana el tipo de vegetación utilizada (García Gallegos *et al.*, 2023). Beltrán López *et al.* (2018) señalan que el establecer especies vegetales favorece una mayor diversidad de microorganismos y actividad microbiana, de tal manera, que se generan relaciones tróficas que contribuyen a la mejora de la calidad del suelo. Dentro de las propiedades biológicas, la actividad microbiana se considera el componente del suelo más complejo, dinámico y activo, el establecimiento de especies vegetales y el incremento de humedad por la construcción de las zanjas bordo (Figura 3) contribuirá a mejorar las propiedades edáficas del sustrato.



Figura 3. Captación del agua de lluvia en las obras de conservación.

Conclusiones

El establecimiento de las obras de conservación en San Gregorio va a contribuir a restablecer el funcionamiento ecosistémico del lugar. Se construyeron un número importante de zanjas bordo, las cuales cumplirán la función de captar el agua de lluvia y con ello incrementar la humedad para que se favorezca el establecimiento de especies herbáceas y arbóreas, lo que va a permitir una mayor infiltración y, por lo tanto, un incremento de la materia orgánica y de la actividad biológica.

Al mismo tiempo, se busca con este tipo de obra disminuir el avance de la degradación del lugar, debido a la captación de materiales transportados. Por lo que, se recomienda realizar mantenimiento regular a las zanjas para que funcionen de manera permanente y se evite su colmatación, ya que a medida que en las zanjas se acumule sedimento, sus efectos positivos tenderán a disminuir.

Referencias

- Beltrán López, S., García Díaz, C. A., Loredó Osti, C., Urrutia Morales, J., Hernández Alatorre, J. A., & Gámez Vázquez, H. G. (2018). "Llorón Imperial", *Eragrostis curvula* (Schrad) Nees, variedad de pasto para zonas áridas y semiáridas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 9(2), 400-407. <http://dx.doi.org/10.22319/rmcp.v9i2.4532>
- Bolaños González, M. A., Paz Pellat, F., Cruz Gaistardo, C. O., Argumedo Espinoza, J. A., Romero Benítez, V. M., & de la Cruz Cabrera, J. C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271-288. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00271.pdf>
- Cruz-Ruiz, E., Cruz-Ruiz, A., Aguilera-Gómez, L. I., Norman-Mondragón, H. T., Velázquez, R. A., Nava-Bernal, G., Dendooven, L., & Reyes-Reyes, B. G. (2012). Efecto en las características edáficas de un bosque templado por el cambio de uso de suelo. *Terra Latinoamericana*, 30 (2), 189-197. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018757792012000200189&lng=es&tlng=es.
- Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Baéz, H., & Díaz-Ortega J. (2007). Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: El caso del Glacis de Buenavista, Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Tomo LXI (1), 133-145. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94320861011>
- Etchevers, J. D., Hidalgo, C., Pratt, C., & Quantin, P. (2006). *Tepetates of Mexico*. En: Encyclopedia of Soil Science. Marcel Dekker, New York. pp. 1745-1748.
- García Gallegos, E., Vázquez Cuecuecha, O. G., Guerra-De la Cruz, V., & Cocoltzi Pérez, F. J. (2023). Evaluación del efecto de obras de conservación en suelos forestales de Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 14(78), 34-57. <http://dx.doi.org/10.29298.rmcf.v14i78.1385>
- Gerencia de Restauración Forestal. (2018). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas*. 5ª. Edición. Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco, México. 298 p.
- Locatelli, B., Homberger, J. M., Ochoa-Tocachi, B. F., Bonnesoeur, V., Román, F., Drenkhan, F., & Buytaert, W. (2020). *Impactos de las zanjas de infiltración en el agua y los suelos de los Andes: ¿Qué sabemos? Resumen de políticas, Proyecto "Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica"*. Forest Trends, Lima, Perú. 16 p. <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2020/05/Impactos-de-las-zanjas-de-infiltraci%C3%B3n-en-el-agua-y-los-suelos.pdf>
- Martínez, C. M., Cuecuecha, O. V., Campos, E. Z., López, A. L., Rivera, C. I. C., & Gallegos, E. G. (2018). La importancia de rehabilitar tepetate con *Lupinus campestris* Cham. & Schltdl. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 6(2. Especial), 49-55. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v6i2.Especial.256>
- Secretaría de Economía. (2008). *Norma oficial mexicana NMX-FF-109-SCFI-2007. Humus de lombriz (lombricomposta)-especificaciones y métodos de prueba*. <https://bit.ly/2Ba4BbB>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2002). *Norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- Werner, G. (1992). Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el estado de Tlaxcala: Distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *Terra*, 10 (Número especial), 318-331.
- Zagal, E., Rodríguez, N., Vidal, I., & Quezada, L. (2002). Actividad microbiana en un suelo de origen volcánico bajo distinto manejo agronómico. *Agricultura Técnica*, 62 (2), 297-309. <http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072002000200012>

Introducción

Las islas de vegetación son parte de las estrategias de nucleación en la restauración ecológica; éstas ocupan espacios yermos, frenan la erosión, incorporan materia orgánica al suelo o sustrato, constituyen fuentes de propágulos y se conforman como fuentes de alimento y microhábitats para la fauna nativa. Tienen como modelo las denominadas “islas de fertilidad o de recursos” de los ecosistemas áridos y semiáridos, las cuales mantienen una alta diversidad y abundancia vegetal, cuya dinámica favorece la acumulación de nutrientes, los procesos hidrológicos y modifican el microambiente (Moncayo-Riascos & Galvéz-Cerón, 2018). Gran parte de la cubierta edáfica en el cerro de San Gregorio de la comunidad de San Diego Metepec, en el municipio de Tlaxcala; se ha degradado completamente, dejando solo afloramientos tepetatosos tras su erosión en aproximadamente 6 817.93 m². El tepetate cementa la superficie provocando el escurrimiento de las precipitaciones, así como cambios microclimáticos en el entorno, entre otros efectos, por lo que constituye un factor limitante para el restablecimiento de la vegetación en el sitio, no obstante, algunas plantas nativas son capaces de desarrollarse sobre él (Martínez y Pérez *et al.*, 2011) y transformar sus propiedades físicas y químicas a corto y mediano plazo (Munive-Martínez *et al.*, 2018), así como su estructura. Por tanto, es necesario aprovechar la diversidad vegetal local para el establecimiento de islas de vegetación que colonicen el tepetate y reactiven la dinámica sucesional en este lugar.

Los cambios que experimenta el ecosistema histórico a raíz del impacto ejercido por distintas perturbaciones (deforestación, erosión, cambio de uso de suelo, inundación, etc.), inician la sucesión secundaria. Este tipo de sucesión es un proceso en el que se establecen especies y poblaciones de acuerdo con las condiciones del entorno, las cuales lo transforman para lograr, a través del tiempo, un ensamblaje muy semejante al ecosistema inicial (Rodríguez León & Roa-Fuentes, 2022). En ocasiones, la sucesión se encuentra detenida en sitios cuyo contexto presenta mínimo potencial para la regeneración, es decir, la resistencia (capacidad de un sistema para mantener su estructura y funcionamiento durante una perturbación), y resiliencia (magnitud de cambio o disturbio que puede experimentar un sistema sin cambiar a un estado alternativo diferente en estructura, función y propiedades, así como en los servicios que proporciona) del ecosistema se ven sobrepasadas (Navarro-Cano *et al.*, 2017), es entonces necesario intervenirlos para reactivar los procesos de sucesión. Un proceso de restauración ecológica asistido real requiere de un diseño, así como de actividades acorde a las necesidades del sitio que deben ser monitoreadas con el fin de verificar su eficacia para mantenerlas y/o sugerir modificaciones pertinentes al proyecto lo antes posible, de

¹Centro de Investigación en Genética y Ambiente (CIGyA-UATx), eunicemarina@yahoo.es

acuerdo con el ecosistema que desea promoverse (Aguilera-Gravito & Ramírez, 2015). Bajo esta perspectiva es que se incorporan las islas de vegetación al tepetate en los sitios del cerro de San Gregorio en Metepec, como una estrategia de bajo costo y accesible puesto que los tepetates se encuentran aledaños a espacios que mantienen vegetación autóctona, de la cual se espera que algunas especies puedan colonizar el tepetate roturado y de esta manera se reanude la sucesión ecológica.

Desarrollo

En el mes de noviembre de 2021 se realizó la recolección de semillas de herbáceas y arbustos de la vegetación local con germoplasma sexual maduro en ese momento (Figura 1). La semilla recolectada se almacenó en bolsas de papel Kraft para favorecer la deshidratación en muestras con alta humedad, tras lo cual se procedió a retirar el tamo o basurillas. No se realizó la separación por especies ya que el objetivo fue conformar una mezcla homogénea de semillas. La mezcla se almacenó en bolsas plásticas a temperatura ambiente y a la sombra.

Al establecerse la temporada de lluvias en el año 2022, y contando ya con sustrato removido gracias a la apertura de las zanjas bordo se procedió a distribuir las semillas lo más uniforme posible sobre los bordos (Figura 2).



Figura 1. Recolecta de semilla local.



Figura 2. Siembra de islas de vegetación.

Después de 30 días se apreció el crecimiento de algunas plántulas, especialmente del género *Salvia*, lo cual indica que la vegetación local es capaz de establecerse en el tepetate roturado (Figura 3), para iniciar el cambio de las propiedades químicas y biológicas del mismo, condición que se contrastará en un periodo posterior (2024), así mismo, durante el año 2023 se verificó el reclutamiento de nuevos géneros y/o especies en las islas a partir de esta primera intervención (Figura 4), para decidir si es necesario realizar un enriquecimiento de especies asistido o si el proceso natural es suficiente. También se evidenció la presencia o visita de fauna a estas islas.



Figura 3. Desarrollo de plántulas en las islas de vegetación durante el 2022.



Figura 4. Plantas herbáceas establecidas en los bordos durante el 2023.

La incorporación de nuevos individuos a las islas de vegetación durante el año 2023 fue importante, pues, aunque los riegos se realizaron solo al pie de los árboles plantados durante la época seca y la temporada de lluvias estuvo retrasada haciendo que las precipitaciones fueran escasas; los géneros/especies vegetales que pudieron emerger y completar su desarrollo en ellas dan muestra de la capacidad de la vegetación local para recolonizar el sustrato una vez roturado sin

mayor intervención humana. Aparte de los árboles de la reforestación, se pudieron registrar 10 géneros vegetales diferentes establecidos en distintas islas, con diferencias en el número de individuos, aunque la especie más abundante fue *Cosmos bipinnatus* seguida de varios pastos.

La mayor parte de los animales observados visitando las flores de las plantas desarrolladas en las islas fueron los insectos (escarabajos, mariposas, mantis, insectos hoja y chapulines). Los arácnidos se establecieron como residentes entre los fragmentos de tepetate, tal como se puede apreciar en la figura 5 y 6. Estas observaciones y registros se realizaron durante el día, no obstante, sería igualmente necesario realizar el monitoreo de la actividad animal durante la noche, así como en el amanecer o atardecer para tener una mayor apreciación de la dinámica en las islas de vegetación, pues se tiene conocimiento de la presencia de algunos reptiles en el sitio (observación personal durante la apertura de zanjas).

Hasta el momento se reconoce la vegetación y la fauna asociada a las islas, pero también es necesario documentar las interacciones que se desencadenen en ellas que seguramente darán más luz al proceso de sucesión en este predio.



Figura 5. Verificación de presencia de fauna en las islas de vegetación.



Figura 6. Fauna visitante de y establecida en las islas.

Conclusiones

El trabajo que se ha realizado hasta el momento permite vislumbrar la posibilidad de continuar de manera exitosa con las islas de vegetación para la reactivación de la sucesión en los sitios. La evidencia de que una parte de la flora local tiene la capacidad de colonizar el tepetate bajo el esquema aquí descrito, aporta información práctica para proyectos similares que deseen emplear esta misma técnica, pues las raíces plantas actúan como agentes de unión temporal de los fragmentos de tepetate con partículas primarias y al mismo tiempo liberan compuestos orgánicos coloidales que actúan en el mismo sentido, ambos aspectos aportan estabilidad al sustrato ante procesos hidrometeorológicos (Velázquez-Rodríguez *et al.* 2022).

Aunque, los resultados al momento de esta evaluación se aprecien como una pequeña contribución, es innegable que se enriquecerá a medida que el proyecto avance pues la aplicación de los fundamentos de la ciencia ecológica es la guía para la rehabilitación de espacios naturales totalmente deteriorados y como en este caso con tepetates aflorados, pero será necesario ensayar y comprender el comportamiento y la plasticidad de las diferentes especies vegetales locales nativas en estudios especializados, así como muchas otras variables entre las que interesan especialmente las interacciones entre especies. El mantenimiento de las islas a través del tiempo es crucial pues permitirá documentar el recambio y enriquecimiento de biodiversidad, así como monitorear los cambios en las propiedades del sustrato para retroalimentar las decisiones alrededor de la recuperación del sitio.

Referencias

- Aguilar-Gravito, M., & Ramírez, W. (2015). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D.C. http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/9281/monitoreo_restauracion_baja_1.pdf?sequence=1
- Navarro Cano, J. A., Goberna Estellés, M., González Barberá, G., Castillo Sánchez, V. M. & Verdú del Campo, M. (2017). *Restauración ecológica en ambientes semiáridos. Recuperar las interacciones biológicas y las funciones ecosistémicas*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España. 162 p. https://www.uv.es/cide/Documentos/RESTAURACION_ECOLOGICA.%20Libro.pdf
- Martínez y Pérez, J. L., Santiago-Martínez, Ma. G., García Sastré, M., Nava Gutiérrez, Y., Águila-Flores, V., Galindo-Flores, G. L., Hernández Cuevas, L. V., & Guerra de la Cruz, V. (2011) *Catálogo botánico ilustrado de tepetates en Tlaxcala*. Universidad Autónoma de Tlaxcala-FOMIX-INIFAP-Maestría en Ciencias Biológicas. México.
- Moncayo-Riascos, M. C., & Gálvez-Cerón, A. (2018). Islas de fertilidad: una revisión sistemática de su estructura y operación. *Idesia (Arica)*, 36(1), 115-122. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018000100115>
- Munive Martínez, C., Vázquez Cuecuecha, O., Zamora Campos, E., López López, A., Calvario Rivera, C. I., & García Gallegos, E. (2018). La importancia de rehabilitar tepetate con *Lupinus campestris* Cham. & Schltdl. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 6 (2 Especial), 49–55. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v6i2.Especial.256>
- Rodríguez León, C. H., & Roa-Fuentes, L. L. (2020). *Introducción a la sucesión ecológica y la restauración del bosque húmedo tropical en Caquetá: proyección para el desarrollo regional*. En: Rodríguez, C. H., & Sterling C. A. (Ed.). *Sucesión ecológica y restauración en paisajes fragmentados de la amazonia colombiana*. Tomo 1: Composición, estructura y función en la sucesión secundaria. Instituto de Investigaciones Científicas SINCHI. Bogotá, Colombia. 19-36 pp. <https://sinchi.org.co/files/publicaciones/novedades%20editoriales/pdf/sucesion%20ecologica%20tomo%201.pdf>
- Velázquez-Rodríguez A.S., Báez Pérez-Pérez A., Hidalgo- Moreno C., Parsa-Retana M., Etchevers-Barra J., & Paz-Pellat F. (2022). Formación de suelos a partir de tepetates: unidades estructurales, carbono orgánico y estabilidad estructural. *Terra Latinoamericana* 40, 1-19. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1447>

Capítulo 6. Producción de plántula de interés forestal en el cerro de San Gregorio, Metepec, Tlaxcala

Oscar Gumersindo Vázquez Cuecuecha¹

Introducción

México desde hace tiempo presenta problemas de deforestación, Rosete-Vergés *et al.* (2014) mencionan que el periodo de 1993 y 2007, en promedio se deforestó 500 000 ha año⁻¹ y en año 2010 la Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO] (2015) reportó 440 600 ha, mientras se reforestaban 137 601 ha en el 2016 (Inegi, 2020), un dato bajo en comparación con lo perdido, trabajos impulsados por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) a través de un programa denominado PRONAFOR (Programa nacional forestal) (Vicente-Arbona *et al.*, 2019). Si bien, la reforestación es baja, es importante garantizar la supervivencia, para ello es necesario emplear germoplasma y planta de calidad, con especies nativas. Para la producción de planta un factor importante es el sustrato, en los años 90 se intensificó el uso de materiales que impactaban al ambiente, lo que disminuyó el uso de recursos alternativos que no causaban daño, tal es el caso del musgo, pero tiene un costo elevado. Por lo tanto, se ha optado por el empleo de materiales más económicos como la corteza, aserrín de pino, la fibra de coco, bagazo de agave, composta de café, entre otros (Aguilera *et al.*, 2015).

En Tlaxcala, uno de los principales problemas de erosión es de forma hídrica, lo que representa el 78% (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, 2002), quedando expuesto el tepetate. En el cerro de San Gregorio Metepec, Tlaxcala, en una superficie aproximada de 5 ha, la condición es de tal forma, que requiere de estrategias de rehabilitación que permitan a futuro un proceso de sucesión integral, considerando a las especies nativas. El pino que se propagó fue *Pinus leiophylla* Schltld. et Cham, árbol con distribución en cuatro de las cinco zonas montañosas del país (Sánchez, 2008), por lo tanto, el objetivo fue producir planta de calidad que garantice un porcentaje de supervivencia, a través del empleo de germoplasma nativo y con una mezcla de sustratos inertes.

Desarrollo

a) Selección y recolecta de germoplasma

Debido a que en el cerro de San Gregorio los árboles no contaban con semillas disponible, la recolecta de estróbilos femeninos se realizó en el Parque Nacional La Malinche (Figura 1), en la comunidad de

¹Centro de investigación en Genética y Ambiente (CIGyA-UATx), oscar.vazquez@docente.uatx.mx

San Pedro Tlalcuapan, municipio de Santa Ana Chiautempan, Tlaxcala, a una altitud de 2 600 msnm en las coordenadas 19°16'05.7"N, 98°07'36.7"O.

En el rodal se seleccionaron 10 árboles dominantes libres de plagas y enfermedades. Además, para evitar el posible parentesco, los árboles elegidos estuvieron localizados a una distancia mínima de 50 m (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021). Entre otras características que se consideraron en la recolecta fueron las siguientes: que los rodales fueran coetáneos, el diámetro normal superior al rodal, copa de diámetro pequeño, ramas cortas y de diámetro pequeño, con un ángulo aproximado de 90 grados con respecto al fuste y árboles bajo competencia, es decir, esta parte última no deben estar aislados.

Otro de los aspectos en la selección de los árboles, es el estado de madurez de la semilla. De forma inicial, el cono con un color marrón como indicio de madurez (Figura 1), gametofito y embrión desarrollado. La morfología de la semilla totalmente desarrollada es importante en el crecimiento inicial de la planta (INATEC, 2016).

Los aspectos antes mencionados, son importantes en la planeación de la recolecta, a través de recorridos en los rodales, datos que se registran para futuros muestreos, con el propósito de determinar ciclos productivos de cada especie (Arguello, 2019). En el caso específico de este trabajo la recolecta se llevó a cabo en los meses de enero y febrero.



Figura 1. Recolecta de estróbilos femeninos en el rodal de San Pedro Tlalcuapan, Tlaxcala.

b) Beneficio del germoplasma

Los conos se trasladaron al Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigación en Genética y Ambiente para ser secados por un tiempo de 8 días a la sombra y otros 8 días fueron expuestos al sol por una semana (Figura 2).

El beneficio o limpieza del germoplasma es un proceso importante en la calidad del germoplasma; una vez abiertos los conos, la eliminación de impurezas garantiza la calidad del material recolectado, ya que contiene semillas vanas, dañadas, óvulos abortados de primer y

segundo año (Figura 3). La separación de las semillas llenas por flotación en alcohol al 5% garantizó la presencia de plántula en el tubete. Además de que las sobrantes fueron almacenadas en un refrigerador Tor Rey® a 4 °C.

Como parte de la información obtenida por la recolecta de conos y semillas, se realizó un estudio de la variación morfológicas y parámetros reproductivos. De tal forma nos ayudó a diagnosticar la variabilidad de las poblaciones naturales como fuente productora de semilla (Bramlett *et al.*, 1977; Moseeler, 200); lo que permitió tener la certeza de la calidad de la semilla, lo que coadyuva a producir planta de calidad.



Figura 2. Clasificación de semilla de *Pinus leiophylla* en el CIGyA-UATx.



Semillas extraídas



Semillas dañadas



Semillas llenas



Óvulos abortados

Figura 3. Separación de las semillas de *Pinus leiophylla*.

c) Propagación del germoplasma

Las semillas llenas, una vez que se verificaron a través de una solución de alcohol por 10 min, con hipoclorito de sodio (5%) se desinfectaron, seguido de un lavado abundante con agua destilada. Una vez realizado lo anterior, la semilla se dejó en imbibición por 24 horas previo a la siembra (Capilla-Dinorin, 2018).

Para la germinación se empleó un sustrato a base de aserrín (50%), perlita (30%), vemiculita (10%) y peat moss (10%) (Figura 4). La mezcla se pasteurizó a una temperatura de 100 °C por 20 min. Una vez fría la mezcla se adicionaron 8.0 g L⁻¹ Osmocote[®], fertilizante de liberación lenta recomendado para la producción de planta en vivero en zonas templadas (Hernández-Zarate *et al.*, 2014; Aguilera-Rodríguez *et al.*, 2021), además 100 g/m³ de *Trichoderma harzianum* Biokrone[®] (Hernández-Zarate *et al.*, 2014).

La mezcla empleada para la propagación de la *P. leiophylla*, es similar a la empleada para *P. greggii* Engelm. Ex Parl. (Vicente-Arbona *et al.*, 2019), donde las características de densidad aparente, porosidad de retención de agua, porosidad de aireación y porosidad total son importantes en el crecimiento de la planta. Estas partes físicas del sustrato brindan características que permiten un mejor desarrollo radicular. La porosidad aumenta conforme incrementa el tamaño de la partícula del material (Landis, 1990). El empleo de aserrín como parte de los sustratos han presentado excelentes resultados, como en especies de *P. pseudostrobus* Lindl y *P. montezumae* Lamb. (Aguilera-Rodríguez *et al.*, 2015; Aguilera-Rodríguez, 2016).

En la densidad aparente, así como en la porosidad si bien depende de tamaño de las partículas, otro elemento es el tamaño del tubete (Vicente-Arbona *et al.*, 2019), que para este caso se utilizó con un volumen de 230 mL.



Figura 4. Preparación de sustrato para la producción de planta de *Pinus leiophylla*.

El sustrato se colocó en tubetes de polipropileno color negro con 230 mL de capacidad. Posteriormente, en la siembra de la semilla se aplicó un fungicida al 0.02% (Captan[®]), cada tercer día por un periodo de quince días (Figura 5).



Figura 5. Llenado de contenedores con el sustrato y siembra de semillas por los miembros de la Asociación Civil.

La semilla germinó en un promedio de 25 días y se continuó con riego y fertilizante soluble, tres veces por semana en tres etapas: 80 ppm de iniciador (9-45-15), a partir del 15 de marzo de 2022: del 15 de abril al 15 de junio se continuó con crecimiento (20-10-20) 120; y finalizador (4-25-35) 75 ppm, del 18 de junio al 15 de agosto (Figura 6).

En la tercera semana de agosto, la planta con una altura promedio de 25 cm se llevó a campo para la reforestación.



Figura 6. Planta de *Pinus leiophylla* en desarrollo y en condición para la reforestación en los sitios seleccionados dentro del cerro de San Gregorio en San Diego Metepec, Tlaxcala.

Conclusiones

El éxito de la reforestación (supervivencia) depende de los siguientes factores: a) de la selección de la población como fuente productora de germoplasma, en la que se debe garantizar la calidad de los progenitores, b) la producción de planta en vivero, por lo que es necesario estimar la calidad de la planta a través de índices (esbeltes y de Dickson), y c) de la técnica de plantación en campo (tamaño de cepa 40 x 40 cm, humedad del sustrato, y la aplicación de hidrogel para disminuir el estrés hídrico en la parte inicial de crecimiento de la planta).

Por otra parte, la condición del sitio tiene una característica (tepetate), que es necesario establecer riegos de auxilio para aumentar el porcentaje de supervivencia en campo. Además de continuar con el monitoreo de la fenología de las especies arbóreas con el propósito de utilizar el germoplasma local.

Referencias

- Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete A., Vargas-Hernández J.J., López-Upton J., López-López M.A., & Ordaz-Chaparro V.A. (2021). Morfología y crecimiento potencial de raíz de *Pinus patula* producido en charolas con poda radical. *Agrociencia*, 55, 81-97.
- Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A., Martínez-Trinidad, T., & Ordaz-Chaparro, V. M. (2016). Producción de *Pinus montezumae* Lamb. con diferentes sustratos y fertilizantes de liberación controlada. *Agrociencia*, 50(1), 107–118.
- Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A., Martínez Trinidad, T., y Ordaz Chaparro V. M. (2015). Producción de *Pinus pseudostrabus* Lindl. Con sustrato de aserrín y fertilizante de liberación controlada. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7 (34), 7-19.
- Arguello-Hernández, M. (2019). Potencial y eficiencia de producción de semillas de *Pinus patula* en cuatro rodales naturales del centro de México. Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico superior de Perote, Veracruz, México. 63 p.
- Bramlett, D. L., Belcher, G. E. W., DeBarr, L., Hertel, G. D., Karrfalt, R. P., Lantz, C. W., & Yates, H. O. (1977). Cone analysis of southern pines: A Guidebook. General Technical Report SE-13. Southeastern Forest Experiment Station, United States Department of Agriculture. Asheville, North Carolina and Southeastern Area, State and Private Forest, Atlanta, Georgia, USA. 28 p.
- Capilla-Dinorin, E. (2018). Variación en Indicadores reproductivos, germinación y crecimiento inicial de plántulas de poblaciones de *Pinus chiapensis*. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México. 74 p.
- Capilla-Dinorin, E., López-Upton J., Jiménez-Casas M., & Rebolledo Camacho V. (2021). Características reproductivas y calidad de Semillas en poblaciones fragmentadas de *Pinus Chiapensis* (Martínez) Andresen. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44 (2), 211-219.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO] (2015). Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2015. Compendio de datos. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Hernández-Zarate, L., Aldrete A., Ordaz-Chaparro V.M., López-Upton J., & López-López M.A. (2014). Crecimiento de *Pinus montezumae* Lamb. en vivero influenciado por diferentes mezclas de sustratos. *Agrociencia* 48, 627-637.
- INATEC, 2016. Viveros y semillas. Manual del protagonista. Instituto Tecnológico Nacional. 84 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2020). *Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa*. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197513.pdf
- Landis, T. D. (1990). Growing media. En T. D. Landis, R. W. Tinus, S. E. McDonald, & J. P. Barnett (eds.), *The container tree nursery manual* (Vol. 2). Agriculture Handbook 674 (pp. 41– 85). EUA: USDA Forest Service.
- Mosseler, A., Major, J. E., Simpson, J. D., Daigle, B., Lange, K., Park, Y. S., ... & Rajora, O. P. (2000). Indicators of populations viability in red spruce, *Picea rubens*. I. Reproductive traits and fecundity. *Canadian Journal of Botany* 78,928-940. <https://doi.org/10.1139/b00-065>
- Rosete-Vergés, F. A., Pérez-Damián, J. L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E. N., Salinas-Chávez, E., & Remond-Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques*, 20(1), 21–35. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.20117>
- Sánchez, G., A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques* 14(1), 107-120. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v1n2/v1n2a3.pdf>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. (2002). *Memoria Nacional 2001-2002. Evaluación de la degradación de los suelos causada por el hombre en la República Mexicana*, escala 1:250,000. SEMARNAT-CP. México. 77 p. <https://www.researchgate.net/publication/307967321>
- Vicente-Arbona, J. C., Carrasco-Hernández V., Rodríguez-Trejo D. A., & Villanueva Morales A. (2019). Calidad de planta de *Pinus greggii* producida en sustrato a base de aserrín. *Madera y Bosques*, 25(2), 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.20192521784>

Capítulo 7. Inoculación de planta con hongos ectomicorrizógenos

Gema L. Galindo Flores¹

Introducción

Los bosques templados de México son altamente valorados debido a su diversidad biológica, extensión territorial, endemismos y potencial económico, ambiental y social. Estudios han demostrado que estos bosques desempeñan un papel crucial en la captura de carbono, el mantenimiento de las reservas hídricas, la conservación de la calidad del suelo y la prevención de la erosión, destacando su importancia en la sostenibilidad ambiental y económica del país (Challenger, 2003; Vogt, 1991; Ordoñez & Maser, 2001; Pregitzer & Euskirchen, 2004; Dixon *et al.*, 1994; Almeida-Leñero *et al.*, 2007; Návar-Cháidez & González-Elizondo, 2009).

Desafortunadamente, los bosques templados de México no están a salvo del deterioro ambiental, especialmente debido a la rápida disminución de su cobertura vegetal. Se estima que la tasa anual de deforestación en el país alcanza un 1.1%, equivalente a 319 000 ha por año, lo que sitúa a México entre los diez países con mayores índices de pérdida de bosques (Velázquez *et al.* 2002).

El deterioro de los bosques templados conlleva una serie de consecuencias significativas, como alteraciones en el clima, la disminución en la recarga de acuíferos, erosión del suelo, así como la pérdida de biodiversidad, entre otros problemas. Ante este panorama, se hace evidente la urgencia de emprender esquemas de rehabilitación de estos ecosistemas implementando programas de reforestación con plantas nativas y el uso de los microorganismos mutualistas que se encuentran en la rizósfera y que realizan una gran diversidad de funciones indispensables para el establecimiento y crecimiento de las plantas y, por lo tanto, en el desarrollo de los ecosistemas forestales (Quoreshi, 2008).

En la rizósfera, se encuentra una diversa comunidad de microorganismos, como algas, bacterias y hongos y otros componentes de la biota edáfica como la microfauna, mesofauna y macrofauna. Estos microorganismos desempeñan un papel crucial en la fertilidad y estabilidad del suelo, así como en el funcionamiento de los ecosistemas forestales. Uno de los grupos destacados son los hongos micorrizógenos, que establecen una relación mutualista con las raíces de muchas plantas conocida como micorriza, mejorando su nutrición, lo que se refleja en un incremento de la biomasa y en la supervivencia (Fisher & Jayachandran, 2002). A cambio, el hongo obtiene de la planta compuestos carbonatados, resultado de la fotosíntesis (Harley & Smith, 1984). Otra ventaja que recibe la planta de la asociación con los hongos micorrizógenos es la protección contra patógenos

¹Centro de investigación en Ciencias Biológicas (CICB-UATx), gemalilia.galindo.f@utax.mx

(Linderman, 2000) y la capacidad para enfrentar el estrés ambiental en comparación con las plantas que no tienen esta interacción (Eisenhaver *et al.*, 2010).

La asociación micorrízica se presenta prácticamente en todos los ambientes terrestres y acuáticos, ya que cerca del 95% de las plantas establecen este tipo de interacción. Los hongos ectomicorrizógenos (HEM) de los Phyla Ascomycota y Basidiomycota son componentes importantes en los bosques templados, donde establecen interacciones mutualistas con árboles de relevancia forestal (angiospermas y gimnospermas). En México, la mayoría de los HEM conocidos provienen de bosques templados, según lo indican estudios previos (Smith & Read, 2008; Martínez-Ramos, 2008; Garza *et al.*, 2002; Valdés *et al.*, 2009).

En este sentido algunas especies de HECM han sido utilizadas en prácticas de restauración de ecosistemas forestales y proporcionan evidencias importantes acerca de cómo y por qué se deberían usar estos hongos para ello. En la década de los 70s y 80s se realizaron los primeros estudios de inoculación de plantas de interés forestal con HECM en su mayoría utilizando especies de HECM extranjeras (Cuevas-Rangel, 1979; Valdés & Grada-Yautenzi, 1980; Valdés *et al.*, 1983; Estrada-Torres & Valdés, 1986; Valdés, 1986; Quintos & Valdés, 1987). Posteriormente, en algunos trabajos se consideraron a HECM nativos en estudios de inoculación tales como *Laccaria laccata*, *Lactarius crysorrheus* y *Cenococcum geophilum* (Gutiérrez-Guzmán *et al.*, 2005; Valdés *et al.*, 2009). Los resultados obtenidos mostraron mayor crecimiento de las plantas inoculadas con respecto a las no inoculadas y señalan que la inoculación con hongos nativos es más exitosa debido a que los hongos nativos están mejor adaptados a las condiciones del sitio, lo que los hace tener mayor potencial para asegurar el éxito en el sitio a recuperar.

Recientemente numerosas investigaciones se han dirigido al conocimiento y la evaluación de diferentes especies de HECM nativos para corroborar su uso como inoculantes efectivos en la sobrevivencia y el crecimiento de diversas especies de coníferas con fines de restauración contemplando diferentes especies de hongos como *Scleroderma texense*, *Hebeloma mesophaeum*, *Pisolithus tinctorius*, *Rhizophagus intraradices*, *Laccaria laccata*, *L. bicolor*, *L. trichodermophora*, *Hebeloma leucosarx*, *Inocybe splendens* y *Suillus brevipes* y hospederos como *Pinus devoniana*, *P. pseudostrobus*, *P. gregii*, *P. hartwegii*, *Abies religiosa* y *Fraxinus uhdei* (Valdés *et al.*, 2010; Martínez-Reyes *et al.*, 2012; Báez Pérez *et al.*, 2015; Galindo Flores *et al.*, 2015; Rentería-Chávez *et al.*, 2017; Flores-Rentería *et al.*, 2017).

Los ejemplos anteriores demuestran que el uso de HM mejoraría la supervivencia de las plantas en campo, que es uno de los grandes obstáculos que han enfrentado, y continúan enfrentando los programas de reforestación.

Tipos de inóculos ectomicorrízicos

La interacción con HECM es esencial para la mayoría de comunidades forestales, por lo que requiere promover la producción de plántulas en invernaderos como prácticas forestales que aumenten la calidad de las plantas y garanticen su sobrevivencia, crecimiento y desarrollo en el momento de trasplantarlas al campo (Werner, 1992).

Por lo que es importante que en los programas de reforestación se considere a la inoculación con HECM para la producción de plantas de interés forestal, como una de las prácticas fundamentales, teniendo en cuenta la selección adecuada entre micobiontes y fitobiontes, ya que

esto representa un factor indispensable en la inoculación para proporcionar una mayor colonización ectomicorrízica en la planta hospedera (Rentería-Chávez *et al.*, 2017).

Para ello se han desarrollado tres tipos de inóculo ectomicorrízico, no obstante, es importante considerar diferentes criterios para su selección teniendo en cuenta las diferentes condiciones ambientales, del suelo, así como características propias de los HECM y del hospedero.

El **inóculo bruto o forestal** que consiste en los propágulos existentes en el suelo (micelio, rizomorfos, esporas, esclerocios, raíces micorizadas, etc). Este método tiene la desventaja de alterar el equilibrio del bosque, debido a las grandes cantidades de extracción del suelo provocando su erosión y degradación, además, no se conocen las especies de HECM involucradas y sus abundancias y no se puede controlar la presencia de patógenos potenciales (Carrasco Hernández *et al.*, 2018).

Inóculo micelial

Se produce en el laboratorio y consiste en micelio aislado y cultivado en medios nutritivos artificiales (González Gallegos *et al.*, 2019). Este inóculo micelial se considera el más eficaz, selectivo y seguro para obtener plántulas, alcanzando un porcentaje mayor de micorrización en un menor tiempo, además, esta técnica evita el riesgo de introducir organismos no deseados. Sin embargo, su manipulación tiende a ser sofisticada y costosa al requerir de instalaciones adecuadas para su proceso (Arana-Gabriel *et al.*, 2019).

Inóculo esporal

Constituido por esporas maduras obtenidas de los esporomas y aplicadas en solución directamente a las plántulas o mezclándolas con el suelo antes de la plantación. Este tipo de inóculo es ampliamente usado debido a su bajo costo, ya que no requiere tecnologías sofisticadas y por la facilidad en su aplicación en vivero. Aunado a lo anterior, este tipo de inóculo se puede mantener en refrigeración a 4°C por periodos cortos de tiempo o congelar, lo que facilita su aplicación (Honrubia *et al.*, 1992; Grove & Malajczuk, 1994; Carrasco-Hernández *et al.*, 2018). La desventaja es que solo esta disponibles en época de lluvias, cuando se producen los esporomas de los HECM.

Por lo anterior, este trabajo contempla la producción de plántulas de *Pinus leiophylla* inoculadas con esporas de *Suillus brevipes* y analiza el efecto de la inoculación sobre el crecimiento y la supervivencia al ser trasplantadas a campo durante el proceso de rehabilitación del cerro de San Gregorio en San Diego Metepec, Tlaxcala.

Desarrollo

a) Recolección de esporomas de hongos ectomicorrizógenos y preparación del inóculo esporal

Los hongos utilizados para la obtención del inóculo esporal fueron recolectados en la época de lluvia (agosto-septiembre del 2022) en bosques de pino-encino aledaños al predio de San Gregorio en la comunidad en San Diego Metepec, éstos correspondieron a *Suillus brevipes*. Para tener una mayor cantidad de inóculo, también se recolectaron esporomas en una plantación de *Pinus* ubicada en las faldas de La Malinche dentro del municipio de San Luis Teolocholco (Figura 1).



Figura 1. Recolecta de esporomas para la obtención de inóculo esporal.

Se seleccionaron los hongos en estado inmaduro de acuerdo con su apariencia física externa (sin magulladuras, sin evidencia de micofagia, ni en descomposición o con parásitos), se envolvieron en papel encerado y se colocaron en una canasta para el traslado al Laboratorio de Interacciones Bióticas del Centro de Investigación en Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Tlaxcala (UATx) para su procesamiento y descripción macroscópica, considerando elementos de importancia taxonómica (Delgado *et al.*, 2005) (Figura 2).



Figura 2. Esporomas de *Suillus* spp y recolecta.

b) Preparación del inóculo esporal

Los esporomas se limpiaron cuidadosamente eliminando restos de suelo y de hojarasca. Posteriormente se separaron los himenios, es decir la estructura en donde se encuentran las esporas, del resto del esporoma (Figura 3).



Figura 3. Preparación de inóculo esporal e inoculación, esporomas de *Suillus* spp.

Los himenios se cortaron en trozos pequeños a los cuales se les añadió agua destilada estéril, aproximadamente cuatro veces su volumen y se licuaron para obtener una mezcla homogénea. La suspensión obtenida se pasó por un tamiz para eliminar los fragmentos del tejido de los esporomas (Figura 4). Para conocer la concentración aproximada de esporas por mL se realizó la cuantificación de éstas mediante la cámara de Neubauer.



Figura 4. Preparación del inóculo esporal.

c) Inoculación esporal de las plántulas de *Pinus leiophylla*

Durante el tiempo de crecimiento las plántulas de pinos y sabinos en el invernadero fueron inoculadas con una solución de esporas contemplando una cantidad de 10^6 esporas por plántula. La suspensión de esporas se incorporó directamente contemplando 20 mL por cada plántula (Figura 5).



Figura 5. Inoculación de plántulas de *P. leiophylla* en condiciones de invernadero.

El riego de las plántulas se realizó cada dos días, con una humedad del 50% en el sustrato. Cuando las plántulas fueron trasplantadas a campo se realizó una segunda inoculación para asegurar la colonización de las raíces por el micelio de los hongos (Figura 6).



Figura 6. Inoculación de plántulas de *P. leiophylla* en condiciones de campo y siembra de plántulas en el cerro de San Gregorio, San Diego Metepec, Tlaxcala.

d) Evaluación del efecto de la inoculación en condiciones de campo

Las plántulas de *P. leiophylla* fueron trasplantadas a campo, se sembraron de acuerdo con el diseño de reforestación indicado en el capítulo 8 y se evaluó la sobrevivencia de la planta, la cual fue superior al 80%.

Conclusiones

En México hay muy pocos estudios sobre el papel de los HECM en restauración; sin embargo, constituyen la evidencia del efecto positivo que tienen en la regeneración y funcionamiento de los bosques templados.

Las condiciones ambientales en los bosques naturales o áreas erosionadas son cambiantes en lo que respecta a las condiciones del suelo tales como el pH, el estrés hídrico, disponibilidad de nutrientes, la salinidad, entre otros. El uso de inóculos micorrízicos representa una alternativa que favorece el establecimiento del arbolado ante condiciones adversas. Las raíces de coníferas inoculadas con micorrizas representan una estrategia para optimizar el establecimiento de las especies arbóreas en condiciones de invernadero y para mitigar el impacto del trasplante a campo, asegurando su sobrevivencia.

Con el presente trabajo se ha evidenciado el efecto positivo de la inoculación esporal de plántulas de *P. leiophylla* con *S. brevipes*. Los resultados obtenidos conjuntamente con las obras de conservación para la rehabilitación del suelo, la producción de planta de calidad y el establecimiento de la comunidad vegetal en el cerro de San Gregorio constituyen un gran ejemplo de que si se plantean estrategias integrales a largo plazo se pueden llegar a recuperar los bosques del estado de Tlaxcala.

Referencias

- Almeida-Leñero, L. Nava M., Ramos, A., Espinosa, M., Ordóñez, Ma. J., & Jujnovsky, J. (2007). Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. *Gaceta Ecológica*, 84-85, 53-64. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53908506.pdf>
- Álvarez-Sánchez, F.J., Peña-Becerril, J. C., Flores-Rentería, D. Y., Olivera-Morales, D., Sandoval-González, I., Galindo-Flores, G., & Santiago-Martínez, M. G. (2018). *Análisis del efecto de los hongos micorrizógenos en el crecimiento y supervivencia de plántulas de árboles en la cuenca del río Magdalena, Ciudad de México*. En: Almeida Leñero, L., Carmona Jiménez, J., Cantoral Uriza, E.A. (Coordinadores). Historia Natural y Cultural de la Cuenca del río Magdalena, Ciudad de México, México. Facultad de Ciencias, UNAM. Ciudad de México. Pp 297-315.
- Báez-Pérez, A. L., Gómez-Romero, M., Villegas, J., De la Barrera, E., Carreto Montoya, L., & Lindig-Cisneros, R. (2015). Inoculación con hongos micorrízicos y fertilización con urea de plantas de *Fraxinus uhdei* en acrisoles provenientes de sitios degradados. *Botanical Sciences* 93, 501-508. <https://doi.org/10.17129/botsci.207>
- Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T., & Malajczuk, N. (1996). *Working with mycorrhizas in forestry and agriculture*. Canberra. ACIAR Monograph.
- Cuevas-Rangel, R. A. (1979). Pruebas de inoculación con el hongo micorrízico *Pisolithus tinctorius* (Pers.) Coker and Couch, en plántulas de *Pinus montezumae* Lamb. en suelos de vivero. *Ciencia Forestal* 4 (19), 46- 62.
- Challenger, A. (2003). *Conceptos generales acerca de los ecosistemas templados de montaña de México y su estado de conservación*. En: Sánchez, O., et al., (eds). Conservación de ecosistemas templados de montaña en México. México. INE. pp. 17-44.
- Delgado, F.A., Villegas, R.M. y Cifuentes, B.J. (2005). Glosario ilustrado de los caracteres macroscópicos en Basidiomycetes con himenio Laminar. Las prensas de Ciencias. UNAM, México, D. F.
- Dixon, R. K., Brown, S., Houghton, R. A., Solomon, A. M., Trexler, M. C., & Wisniewski J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185-190.
- Estrada-Torres, A., & Valdés, M. (1986). El crecimiento y la micorrización de plántulas de pino inoculadas con *Pisolithus tinctorius* en el semillero o en el envase de trasplante. *Biótica* 11, 137-142.
- Estrada-Torres, A., & Santiago-Martínez, Ma. G., (2003). *Avances en el estudio de la ectomicorriza en el estado de Tlaxcala, México*. Tlaxcala: Universidad Autónoma de Tlaxcala. Centro de Investigación en Ciencias Biológicas.
- Fisher, J. B., & Jayachandran, K. (2002). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance seedling growth in two endangered plant species from South Florida. *International Journal of Plant Sciences*, 163 (4), 559-566.
- Flores-Rentería, D., Barradas, V. L., & Álvarez-Sánchez, J. (2017). Ectomicorrizal pre-inoculation of *Pinus hartwegii* and *Abies religiosa* is replaced by native fungi in a temperate forest of central Mexico. *Symbiosis*, 1-14.
- Galindo-Flores, G., Castillo-Guevara, C., Campos-López, A., & Lara, C. (2015). Characterization of ectomycorrhizae formed by *Laccaria trichodermophora* and *Suillus tomentosus* in *Pinus montezumae*. *Botanical Science* 93 (4), 855-863.
- Garay-Serrano, E., Bandala, V. M., & Montoya-Bello, L. (2012). Morphological and molecular identification of the ectomycorrhizal association of *Lactarius fumosibrunneus* and *Fagus grandifolia* var. mexicana trees in Eastern Mexico. *Mycorrhiza*, 22, 583-588.
- Garza, O. F., García Jiménez, J., Estrada Castillón, E., & Villalón Mendoza, H. (2002). *Macromicetos, ectomicorrizas y cultivos de Pinus culminicola* en Nuevo León. *Ciencia UANL* 5 (2), pp. 204-210.
- Gutiérrez-Guzmán, B., Echevers-Barra, J. D., Velázquez-Martínez, A., & Almaraz-Suárez, J. (2005). Influencia del aile (*Alnus firmifolia*) en el crecimiento de plantas de *Pinus patula*. *Terra Latinoamericana*, 23, 89-96.
- Harley, J. L., & Smith, S. E. (1984). *Mycorrhizal symbiosis*. Londres: Academic Press.
- Linderman, R. G. (2000). *Effects of mycorrhizas on plant tolerance to diseases*. En: Kapulnik, Y., Douds, D. D. Jr., (eds.). Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function. Dordrecht, Países Bajos: Kluwer Academic Publishers. pp. 345-365.
- Martínez-Ramos, M. (2008). *Grupos funcionales*. En: Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. México: CONABIO. pp. 365-412.
- Martínez-Reyes, M., Pérez-Moreno, J., Villarreal-Ruiz, L., Ferrera-Cerrato, R., Xoconostle-Cázares, B., Vargas-Hernández, J., & Honrubia-García, M. (2012). Crecimiento y contenido nutrimental de *Pinus greggii* Engelm. inoculado con el hongo comestible ectomicorrízico *Hebeloma mesophaeum* (Pers.) Quél. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18 (2), 183-192.
- Pérez-Moreno, J. (2008). *Ecofisiología y biotecnología de la ectomicorriza*. En: Álvarez-Sánchez, J., Monroy, A. (4ª edición). Técnicas de estudio de las asociaciones micorrízicas y sus aplicaciones en la restauración. México: Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 161-186.

- Pérez-Moreno, J., & Read, D. (2004). Los hongos ectomicorrízicos, lazos vivientes que conectan y nutren a los árboles en la naturaleza. *Interciencia*, 19 (5), 239-247.
- Quintos, M., & Valdés, M. (1987). El desarrollo de micorriza y el crecimiento de plántulas de pino real (*Pinus engelmannii*) al inocularse con *Pisolithus tinctorius*. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 29, 189-192.
- Quoreshi, A. M. (2008). Chapter 13. The use of mycorrhizal biotechnology in restoration of disturbed ecosystem. En: Z.A. Siddiqui, Akhtar, M.S. y Futai, K. eds. *Mycorrhizae: Sustainable Agriculture and Forestry*. Países Bajos: Springer. pp. 303-320.
- Rentería-Chávez, M. C., Pérez-Moreno, J., Cetina-Alcalá, V. M., Ferrera-Cerrato, R., & Xoconostle-Cázares, B. (2017). Transferencia de nutrientes y crecimiento de *Pinus greggii* Engelm. inoculado con hongos comestibles ectomicorrízicos en dos sustratos. *Rev Argent Microbiol.*, 49 (1), 93-104.
- Santiago-Martínez, G. (2008). Los hongos ectomicorrizógenos en las prácticas de restauración. En: J. Álvarez-Sánchez, y Monroy-Ata, A. (eds). *Técnicas de estudio de las asociaciones micorrízicas y sus implicaciones en la restauración*. México: Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 213-232.
- Santiago Martínez, G., Hernández Cuevas, L., Nava Gutiérrez, Y., Galindo Flores, G., Castillo Guevara, C. & Monroy-Ata A. (2019). *Hongos micorrizógenos y ecología de la restauración en México*. En: Álvarez Sánchez, J., Rodríguez Guzmán, P., Alarcón, A. (eds.). *Biodiversidad de Microorganismos de México. Importancia, Aplicación y conservación*. UNAM. Cd de México.
- Santiago Martínez, M. G., Nava Gutiérrez, Y., & Galindo Flores, G. L. (2020). *Métodos de estudio de hongos ectomicorrizógenos*. En: Delgadillo-Martínez, J., Ferrera-Cerrato, R., Alvarado-López, J., Alarcón, A., Pérez-Moreno, J., Almaraz-Suárez, J. J (eds.). *Microbiología Aplicada a la Agricultura y Agroecosistemas: Principios y técnicas para su investigación*. Biblioteca Básica de Agricultura. Editorial del Colegio de Postgraduados, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Universidad Autónoma Chapingo, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Texcoco, Estado de México, México.
- Smith, S.E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis*. 3ª edición. London: Academic Press. pp. 787.
- Valdés, M. (1986). Survival and growth of pines with specific ectomycorrhizae after three years on a highly eroded site. *Canadian Journal of Botany* 64, 885-888.
- Valdés, M., Grada-Yautentzi, R. (1980). *Mycorrhizal inoculation and the afforestation of the Valley of México City*. En: P. Mikola ed. *Tropical mycorrhizae research*. Oxford: Clarendon Press. pp. 93-95.
- Valdés, M., Piña F. y Grada-Yautentzi R 1983. Inoculación micorrízica y crecimiento de plántulas de pino en suelo erosionado. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Micología*, 18, 65-70.
- Valdés, M., Pereda, V., Ramírez, P., Valenzuela, R., & Pineda, R. M. (2009). The ectomycorrhizal community in a *Pinus oaxacana* forest under different silvicultural treatments. *Journal of Tropical Forest Science* 21 (2), 88-97.
- Valdés, M., Ambriz Parra, E., Camacho Vera, A., & Fierros González, A. (2010). Inoculación de plántulas de pinos con diferentes hongos e identificación visual de la ectomicorriza. *Revista Mexicana Ciencias Forestales*, 1 (2), 53-64.
- Velázquez, A., Mas, J. F., Díaz Gallegos, J. R., Mayorga Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., & Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio del uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica* 62, 21-37.
- Werner, D. (1992). *Symbiosis of plants and Microbes* Chapman y Hall, London. 333-380

Capítulo 8. Reforestación: trasplante de las plántulas al cerro de San Gregorio

Oscar Gumersindo Vázquez Cuecuecha¹

Gema L. Galindo Flores²

Elizabeth García Gallegos¹

Eunice Marina Zamora Campos¹

Introducción

Los recursos forestales brindan servicios ecosistémicos en beneficio de la humanidad, entre los que destacan: recarga de mantos freáticos, la producción de madera, alimento, combustibles, entre otros (Flores *et al.*, 2021), lamentablemente estos servicios se han visto afectados a nivel global por factores como el cambio de uso de suelo, de la vegetación y por el incremento de los gases de efecto invernadero (Xiao *et al.*, 2006; Campos *et al.*, 2004). En México la deforestación representa un gran problema ambiental, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) reporta una superficie afectada en el periodo del 2011-2015 de 251 202.38 ha/año (CONAFOR, 2020).

En México, el cambio de uso de suelo es la principal causa de la pérdida de biodiversidad. El bosque templado mexicano representa uno de los ecosistemas con gran diversidad de especies y es un componente fundamental para la regulación del clima global y la infiltración del agua pluvial. No obstante, se ha perdido el 50% de su extensión, debido a la sobreexplotación de los recursos forestales (Allen *et al.*, 2010; del-Val & Sáenz-Romero 2017; Méndez-Encina *et al.*, 2021).

En particular, el estado de Tlaxcala el deterioro ambiental es un problema que ocupa el primer lugar (Espejel *et al.*, 2004), y entre los factores que han impactado al territorio se encuentran la deforestación y la erosión del suelo, como resultado de los cambios en los patrones culturales y socioeconómicos, crecimiento demográfico, la industrialización, así como la falta de acciones en la protección del ambiente (Espejel & Carrasco 1999; Espejel *et al.*, 2004). Si bien en la actualidad se han implementado estrategias de divulgación de la ciencia para el fomento del cuidado de los recursos naturales, hace falta una conciencia o compromiso para la conservación y/o manejo para lograr un desarrollo sustentable.

Una de las especies arbóreas representativas de los bosques templados de Tlaxcala como el Parque Nacional La Malinche y del cerro de San Gregorio es *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. Esta conífera se distribuye a lo largo del país, entre los 1 500 hasta los 3 000 metros sobre el nivel del mar. No obstante, en el estado de Tlaxcala su distribución se ha reducido drásticamente

¹Centro de investigación en Genética y Ambiente (CIGyA-UATx), oscar.vazquez@docente.uatx.mx, eunicemarina@yahoo.es, egarciag@uatx.mx

²Centro de investigación en Ciencias Biológicas (CICB-UATx), gemalilia.galindo.f@utax.mx

manteniéndose algunas poblaciones pequeñas inmersas en zonas de cultivos y asentamientos (Sáenz-Romero *et al.*, 2015; Rodríguez-Trejo 2021).

Actualmente, otro de los factores que ha contribuido a la disminución de la cobertura arbórea es la presencia de plagas y enfermedades. Dentro de las Unidades de Manejo Forestal en el estado de Tlaxcala, el Parque Nacional “La Malinche” se ha visto gravemente afectado por el ataque del descortezador (*Dendroctonus sp.*) (López, 2023), no obstante, esta plaga también ha ocasionado la disminución de la masa forestal en pequeñas comunidades forestales del centro del estado, calculando una pérdida de 645 hectáreas de bosque templado en Tlaxcala, en especial poblaciones enteras de *P. leiophylla* (SENASICA, 2021).

Debido a lo anterior, el gobierno, la sociedad civil y la comunidad universitaria de la UATx implementan alternativas para evitar la pérdida del arbolado, tal como lo ilustra el caso del cerro de San Gregorio en la comunidad de San Diego Metepec perteneciente al municipio de Tlaxcala, dónde, aunado a la pérdida de vegetación se observan problemas de degradación de suelo, por lo que resulta importante realizar acciones de rehabilitación y reforestación con especies nativas aptas para el sitio, esta estrategia es una forma de recuperar estructura, al igual que funciones ecológicas del paisaje.

En el caso del cerro San Gregorio, existen especies nativas como exóticas, estas últimas, son invasoras que, si bien han evitado la erosión en algunas áreas, evitan el crecimiento poblacional de las nativas las cuales tiene funciones importantes dentro de la comunidad, como parte de las cadenas tróficas y hábitat de especies de insectos. Por su parte, las especies nativas están adaptadas a las condiciones del lugar, por lo que tienen mayor probabilidad de sobrevivir y establecerse.

Desarrollo

Las acciones de reforestación se realizaron bajo los siguientes criterios, que a continuación se describen (CONAFOR, 2010):

a) Planeación

Se hizo un recorrido de la zona a reforestar para elegir las especies adecuadas, de acuerdo con los objetivos sociales y condiciones ecológicas. De los taxas presentes, se eligieron las especies arbóreas como *Pinus leiophylla* Schltdl. et Cham y *Cupressus lusitanica* Mill., se recolectaron conos maduros en rodales cercanos, debido a que no había germoplasma disponible en el predio (Figura 1).

La semilla fue de la mejor calidad posible, a través de la selección de árboles fenotípicamente deseables, para garantizar la calidad de las plántulas, aunado a esto, se analizó la viabilidad de los embriones a través de la prueba de tetrazolio, observando el grado de daño en el embrión y/o latencia de este. Para determinar la cantidad de semilla requerida, la calidad se evaluó por medio de la germinación, empleando cuatro repeticiones por lote recolectado, en el Laboratorio de Recursos Naturales del CIGyA-UATx.



Figura 1. Recorrido en el cerro de San Gregorio para la recolecta de germoplasma.

b) Sitios a reforestar

La reforestación se realizó en los sitios donde se establecieron las obras de conservación, las plántulas propiamente se plantaron en los extremos del bordo de la zanja (Figura 2), esto para mantener a la plántula con humedad, la cual proviene de la infiltración que se tiene en la época de lluvia. Además, fueron seleccionados otros sitios dentro del cerro de San Gregorio donde se realizaron terrazas individuales para plantar cada plántula a una distancia de 3 m entre ellas.



Figura 2. Plantación de las plántulas sobre el bordo de la zanja.

c) Reforestación

El transporte de la planta a los diferentes sitios a reforestar se realizó cuidando que no se dañara el ápice principal y ramas. La plantación se llevó a cabo con planta que cumplía con estándares de calidad para garantizar un alto porcentaje de supervivencia, una vez establecido el periodo de lluvias en el sitio. La técnica de plantación en los bordos de las zanjas fue a través de la excavación de una cepa común de 50 x 50 cm, estableciendo una terraza individual, con la cual se busca capturar la mayor humedad para el desarrollo de las especies forestales establecidas (CONAFOR, 2007). A cada

una de las cepas se les agregaron 500 mL de hidrogel hidratado y 1 L de estiércol estabilizado (Figura 3), lo que garantiza humedad en época de seca y favorece la disponibilidad de nutrimentos.



Figura 3. Cepa común con hidrogel y estiércol estabilizado en la reforestación.

d) Mantenimiento

Durante la temporada de estiaje se realizó la limpieza de la cepa y se llevaron a cabo riegos de auxilio, actividades realizadas por los integrantes de la Asociación Civil Tlalli Atoktli A. C. El grupo asesor de la UATx, ejecutó revisiones periódicas posterior al trasplante, esto para verificar supervivencia y la necesidad de reposición de planta. El establecimiento de especies nativas en el bordo de las zanjas fue de suma importancia, pues el objetivo es también rehabilitar los tepetates, los cuales tienen poca materia orgánica, por lo que la disponibilidad de nitrógeno y fósforo es muy baja, al igual que la infiltración de agua y la capacidad de retención de humedad. El establecimiento de especies vegetales, hidrogel y abono orgánico en conjunto van a mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del tepetate. García Gallegos *et al.* (2023) reportan que la zanja bordo es una obra de conservación que en conjunto con la vegetación nativa produce una mejoría en la calidad del suelo, pero en sitios donde se establecieron especies exóticas a 40 años se presentó un impacto positivo solo en la calidad biológica del suelo.

Conclusiones

El éxito de un trabajo de reforestación y/o rehabilitación en una zona gravemente afectada, en la cual el tepetate se encuentra aflorado, requiere de acciones que desencadenen en un proceso biológicamente activo en un tiempo relativamente corto. Para lo anterior, se establecieron obras de conservación, se realizó la propagación de germoplasma de especies propias de la zona (nativas), y de fenotipos con características deseables, además, del cuidado en la producción de planta en la forma correcta para llevar a cabo la reforestación, así como el cuidado posterior a su establecimiento. Siguiendo estas premisas se obtuvo un porcentaje superior al 80% de supervivencia después del año. La mayoría de las pérdidas se atribuyen a la técnica de plantación y a la infiltración del agua, esto último a que en unos sitios no se hizo una roturación del tepetate.

El desempeño de las plántulas en un sitio agotado e impenetrable por la vegetación como lo eran los tepetates en San Gregorio, Metepec; desarrollándose bajo condiciones meteorológicas de

lluvia escasa o sequía ha sido más que satisfactorio, debido a que se han logrado incrementos considerables, tanto en diámetro como en altura, evidenciando fehacientemente su adaptación al sitio. Pero el éxito de la reforestación se relacionó estrechamente con el impulso y compromiso de los actores sociales para cuidar y dar mantenimiento a la reforestación.

La perspectiva tras estos resultados es que cualquier sitio con presencia de suelos degradados dentro de la entidad puede recuperarse con un éxito similar, siempre y cuando el gobierno local, sociedad civil, así como los grupos académicos puedan interactuar eficiente y respetuosamente entre sí, para el logro del noble propósito de recuperar el patrimonio natural de las generaciones venideras.

Referencias

- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H., González, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J. H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660-684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Campos, C. P., Muylaert, M. S., & Pinguelli, L. (2004). Historical CO₂ emission and concentrations due to land use change of croplands and pastures by country. *Science of the Total Environment*, 346, 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.12.053>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2007). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales, manual de prácticas*. Quinta edición, Zapopan, Jalisco, México. 298 p. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/20/1310Manual%20de%20Conservacion%20de%20Suelos%20.pdf>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2010). *Prácticas de reforestación, manual básico*. 1ª. edición, Zapopan, Jalisco, México. 66 p. https://www.conafor.gob.mx/BIBLIOTECA/MANUAL_PRACTICAS_DE_REFORESTACION.PDF
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2020). *Estimación de la tasa de deforestación en México para el periodo 2001-2018 mediante el método de muestreo*. Documento Técnico. Jalisco, México. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/7768Documento%20tecnico%202020%20Deforestacion%20Bruta%20Final.pdf>
- del-Val, E., & Sáenz-Romero, C. (2017). Insectos descortezadores (Coleoptera: Curculionidae) y cambio climático: problemática actual y perspectivas en los bosques templados. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 20(2), 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2017.04.006>
- Espejel, R. A., & Carrasco, R. G. (1999). *El deterioro ambiental en Tlaxcala y las políticas de desarrollo estatal 1988-1999*. *Gaceta Ecológica*, 52, 21-52. <https://es.scribd.com/doc/63748935/El-deterioro-ambiental-en-Tlaxcala-y-las-politicas-de-desarrollo-estatal-1988>
- Espejel, R. A., González Torres, I.M., & Perón Delgado, E. (2004). *El índice de deterioro ambiental en los municipios de Tlaxcala: una propuesta metodológica*. *Gaceta Ecológica* 70: 19-20. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53907002.pdf>
- Flores, A., Romero-Sánchez, M. E., Pérez-Miranda, R., Pineda-Ojeda, T., & Moreno-Sánchez, F. (2021). Potencial de restauración de bosques de coníferas en zonas de movimiento de germoplasma en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(63), 4-27. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i63.813>
- García Gallegos, E., Vázquez Cuecuecha, O. G., Guerra-De la Cruz, V., & Cicoletzi Pérez, F. J. (2023). Evaluación del efecto de obras de conservación en suelos forestales de Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 14(78), 34-57. <http://dx.doi.org/10.29298.rmcf.v14i78.1385>
- López, V. J. M. (2023). Marea roja en la Malinche: el ataque del descortezador. *Revista Digital Universitaria* 24(2). <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2023.24.2.19>
- Méndez-Encina, F. M., Méndez-González, J., Mendieta-Oviedo, R., López-Díaz, J. Ó. M., & Nájera-Luna, J. A. (2021). Ecological niches and suitability areas of three host pine species of bark beetle *Dendroctonus mexicanus* Hopkins. *Forests*, 12(4), 385. <https://doi.org/10.3390/f12040385>
- Rodríguez-Trejo, D. A. (Coord.). 2021. Semillas de Especies Forestales. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Ortega-Rodríguez, J. M., Marín-Togo, M. C., & Madrigal-Sánchez, X. (2015). *Pinus leiophylla* suitable habitat for 1961-1990 and future climate. *Botanical Sciences*, 93(4), 709-718. <https://doi.org/10.17129/botsci.86>
- Servicio Nacional, Inocuidad y Calidad Alimentaria (SENASICA). 2021. Colabora Agricultura en el rescate del Parque Nacional La Malinche. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/>
- Xiao, J., Shen Y., Ge J., Tateishi R., Tang C., Liang Y., & Huang, Z. (2006). Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing. *Landscape and Urban Planning*, 75, 69-80. <http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.12.005>

Rehabilitación ecológica en San Diego Metepec, Tlaxcala

Se concluyó el 8 de Marzo de 2024 en el Centro de Investigación en Genética y Ambiente de la Universidad Autónoma de Tlaxcala.

Km 10.5 Autopista San Martín/Tlaxcala, Ixtacuixtla, Tlaxcala.
CP. 90120. Tel. 248 1 55 00.

El presente libro reporta las estrategias que se implementaron dentro de las fases de diagnóstico y rehabilitación en el cerro de San Gregorio, ubicado en la comunidad de San Diego Metepec, Tlaxcala. En la fase de diagnóstico se llevó a cabo el análisis de la diversidad vegetal, así mismo de cambio climático, en donde se estimaron las horas frío para la producción de frutales caducifolios a través del empleo de varios métodos. En la fase de implementación de estrategias de rehabilitación se construyeron obras de conservación de suelo, con el objetivo de retener partículas y humedad, se establecieron islas de vegetación herbácea con semillas propias del sitio, por otro lado, se llevó a cabo la recolecta de germoplasma de *Pinus leiophylla*, *Cupressus lusitanica* y se elaboró un biofertilizante a base de hongos ectomicorrizógenos para inocular las plántulas forestales al momento del trasplante. Es importante señalar que en este tipo de proyectos la participación de los grupos sociales y autoridades es importante para que se alcance el éxito, así como la voluntad política de las instituciones educativas.

