



Revista Mexicana de Agroecosistemas

Oaxaca, Volumen XIII, Número 1, 2026

Vol. 13 Núm. 1. Enero – Abril, 2026 ISSN: 2007-9559

Fotografía: bosque templado



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca





REVISTA MEXICANA DE AGROECOSISTEMAS, Vol. 13(1), 2026 es un órgano de difusión científica que se publica semestralmente desde 2014 y a partir de 2025 de manera cuatrimestral por el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca; publica resultados de investigaciones científicas originales e inéditas, con enfoque hacia la productividad agrícola, pecuaria, forestal, servicios ecosistémicos y de aprovechamiento y conservación de recursos naturales; también del área social ligada a ese enfoque. La revista está incluida en el listado del *Open Journal System (OJS)*, que incluye *DOI* por artículo (Cross Ref) y en el Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (*latindex*).

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2023-041117195200-102 e ISSN 2007-9559, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor y vigentes al 2026.

Responsable de la última actualización de este número en la División de Estudios de Posgrado e Investigación: Dr. Gerardo Rodríguez-Ortiz, Dr. Marcos Emilio Rodríguez-Vásquez, MC. Arely Concepción Ramírez Aragón. Domicilio conocido, Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México, C.P. 71233, Tel y Fax. 01 (951) 5170788, <https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/index>, rmae@voaxaca.tecnm.mx, rmae.itvo@gmail.com. Fecha de última modificación, 30 de abril de 2026.

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

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

Este número presenta como “**artículo científico**” un estudio sobre el efecto de la incorporación de residuos de cosecha del cultivo de maíz en los indicadores de humedad del suelo; “**nota técnica**” temas acerca del aprovechamiento de los residuos del nopal mediante compostaje. El “**artículo de revisión (review)**” presenta una investigación detallada sobre el uso de la técnica del cultivo de tejidos aplicada a la propagación de crisantemos, específicamente para la obtención de planta madre de calidad sanitaria y fisiológica. Como “**artículo de difusión**”, se aborda el contraste de las ventajas y desventajas que se presentan desde el registro, la ejecución y el desarrollo de los proyectos de secuestro de carbono bajo las metodologías de los estándares CAR y MDL en México.



Comité Editorial (DEPI-ITVO)

Dr. Aarón Martínez Gutiérrez

Dr. Ernesto Castañeda Hidalgo

Dr. Gerardo Rodríguez-Ortiz

Dra. Gisela Margarita Santiago Martínez

Dra. Gisela Virginia Campos Angeles

Dr. Gustavo Omar Díaz Zorrilla

Dr. José Cruz Carrillo Rodríguez

Dr. José Raymundo Enríquez del Valle

M.C. Judith Ruiz Luna

Dr. Marcos Emilio Rodríguez Vásquez

Dra. María Isabel Pérez León

Dra. Martha Patricia Jerez Salas

Dr. Salvador Lozano Trejo

Dr. Vicente Arturo Velasco Velasco

Dr. Yuri Villegas Aparicio

Coordinación editorial

Dr. Gerardo Rodríguez Ortiz

Diseño de portada y administración de página Web

Dr. Marcos Emilio Rodríguez Vásquez

MC. Arely Concepción Ramírez Aragón



Árbitros de este número

Dr. Hector Silos Espino (Instituto Tecnológico de Aguascalientes).

Dr. Angel Rosario Ceballos Chavez (Universidad Tecnológica de la Tarahumara, Chihuahua).

MC. Araceli Ruiz Fierro (Junta Local de Sanidad Vegetal del Valle del Fuerte, Sinaloa).

MC. Gloria Paulina Pérez Felix (CIIDIR Unidad Oaxaca).

Dr. Rufino Sandoval García (Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca).

Dr. Pablo Espinoza Zúñiga (Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, campus Ixcatlán).

MC. Alexandra Sánchez Velásquez (Universidad del Mar, Campus Puerto Ángel).

Dr. Gregorio Hernández Salinas (Instituto Tecnológico Superior de Zongolica, Veracruz).



Política de revisión de manuscritos

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

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

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

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

ATENTAMENTE

Comité editorial



	Contenido	Pág.
	Artículo científico	
I	Evaluación de la humedad y carbono edáfico en dos sistemas agrícolas / Soil moisture and carbon assessment in two agricultural systems	
	¹ §César Antonio Casasola-Elizondo  , ² David Cristóbal-Acevedo 	I - 9
	Nota técnica	
2	Residuos de <i>Opuntia ficus-indica</i> y estiércol de caballo como insumos de compostaje / <i>Opuntia ficus-indica</i> residues and horse manure as composting inputs	
	¹ Alan Jesús Torres-Sandoval  , ² §María Elena Tavera-Cortés  , ¹ Yolanda Donají Ortiz-Hernández 	10 - 16
	Artículo de revisión	
3	Cultivo de tejidos vegetales aplicado a la producción de plantas de crisantemo libres de patógenos / Plant tissue culture applied to the production of pathogen-free chrysanthemum plants	
	¹ Fátima Manuel-Zárate  , ² §José Raymundo Enríquez-del Valle  , ³ Alfonso Vásquez-López  , ² Gerardo Rodríguez-Ortiz  , ³ Isidro Morales-García  , ² Yuri Villegas-Aparicio 	17 - 32
	Artículo de difusión	
4	Proyectos de secuestro de carbono bajo metodologías CAR y MDL en México / Carbon sequestration projects under CAR and CDM methodologies in Mexico	
	¹ §Guadalupe Soledad Costumbre-Alonso  , ² Gerardo Rodríguez-Ortiz  , ² José Raymundo Enríquez-del Valle  , ¹ Ashmir Ambrosio-Lazo  , ² Aaron Martínez-Gutiérrez 	33 - 40



DIRECTORIO

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

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

Dra. Marisa Guadalupe Flores Aguilar- Directora (ITVO)

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

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

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

Dr. Marcos Emilio Rodríguez Vásquez (marcos.rv@voaxaca.tecnm.mx), MC. Arelly Concepción Ramírez
Aragón (arely.ra@voaxaca.tecnm.mx) - Coordinación de soporte Revista Institucional DEPI-ITVO

Mayores informes:

Revista Mexicana de Agroecosistemas

Domicilio conocido

Ex-hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México

C. P. 71233

Tel. y Fax: 01(951) 5170788

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

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



Evaluación de la humedad y carbono edáfico en dos sistemas agrícolas

Soil moisture and carbon assessment in two agricultural systems

¹César Antonio Casasola-Elizondo , ²David Cristóbal-Acevedo 

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Chetumal. Quintana Roo. ²Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Departamento de Suelos. Texcoco, Estado de México. ³Autor de correspondencia: (casasola.cesar@inifap.gob.mx).

Resumen

Estudiar el efecto de la materia orgánica en los indicadores de humedad del suelo proporciona información sobre el impacto de las prácticas agrícolas en el ecosistema edáfico. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la incorporación de residuos de cosecha del cultivo de maíz sobre la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, la humedad aprovechable, la conductividad hidráulica saturada y el contenido de materia orgánica en el suelo de dos parcelas con distinto manejo agronómico: un sistema orgánico y un sistema convencional. La incorporación de residuos de cosecha en la parcela con manejo orgánico incrementó de manera significativa ($p < 0.05$) la capacidad de campo, humedad aprovechable, punto de marchitez permanente, la materia orgánica, y mostró un potencial de captura de carbono 36 % mayor en comparación con el sistema convencional.

Palabras clave: capacidad de campo, conductividad hidráulica, humedad aprovechable, punto de marchitez.

Abstract

Studying the effect of organic matter on soil moisture parameters provides information on the impact of agricultural practices on soil ecosystem. The objective of this research was to evaluate the effect of incorporating maize crop residues on field capacity, permanent wilting point, plant available water, saturated hydraulic conductivity, and organic matter content in the soil of two plots under different agricultural management systems:

an organic and a conventional system. The results indicate that the incorporation of crop residues in the organically managed plot significantly increased ($p < 0.05$) field capacity, plant available water, permanent wilting point, organic matter, and exhibited a 36 % higher carbon sequestration potential compared to the conventional system.

Index words: field capacity, hydraulic conductivity, plant available water, wilting point.

Introducción

El suelo es un sistema vivo, heterogéneo y dinámico debido a la interacción de sus componentes físicos, químicos y biológicos (Van, 2017). El agua y el suelo constituyen recursos naturales fundamentales para el crecimiento y rendimiento de los cultivos agrícolas, debido a que intervienen en procesos de disponibilidad y transporte de nutrientes esenciales (Taiz et al., 2015). El estudio de las propiedades físicas del suelo en relación con el aprovechamiento del agua aporta información valiosa sobre el impacto de las prácticas agrícolas, pecuarias y forestales en su funcionamiento (Estrada-Herrera et al., 2017).

Algunos indicadores importantes para evaluar el contenido de agua en los suelos son la capacidad de campo (CC), que corresponde a la cantidad de agua retenida a ~ -33 kPa; el punto de marchitez permanente (PMP), asociado al contenido de agua a ~ -1500 kPa (Inforsato & de Jong van Lier, 2021; Myeni et al., 2021); la humedad aprovechable (HA), definida como el agua disponible para los cultivos (Ladányi et al., 2021); y la conductividad hidráulica saturada (K_s), que

representa la capacidad del suelo para transmitir agua a través de los poros.

De acuerdo con datos de la Organización de las Naciones Unidas, para el año 2030 el sector agrícola deberá satisfacer la demanda alimentaria de una población proyectada en 500 millones de habitantes adicionales (FAOSTAT, 2025), al tiempo que prioriza técnicas orientadas a la recuperación de la fertilidad del recurso suelo, deteriorado tras décadas de agricultura intensiva.

Para revertir dicho deterioro y restaurar la fertilidad del suelo, se han implementado estrategias como el uso de cultivos de cobertura (Matos-Pech et al., 2022; Salcedo-Mayta et al., 2022), la labranza cero (Martínez et al., 2019), la rotación de cultivos (Weisberger et al., 2019) y la incorporación de materia orgánica con el fin de incrementar el contenido de carbono orgánico (Cooper et al., 2020). No obstante, el efecto positivo de estas prácticas es difícil de detectar antes de cinco años (Sequeira y Alley, 2011) debido a que se requiere entre 20 a 60 años para que el carbono orgánico se estabilice (West y Post, 2002). Por lo tanto, resulta pertinente complementar la comprensión sobre la interacción entre la incorporación de los residuos de cosecha, los indicadores de humedad del suelo y el contenido de carbono en sistemas agrícolas con distinto manejo. El objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto de la incorporación de residuos de cosecha del cultivo de maíz en diversos indicadores de humedad del suelo, al comparar un sistema con manejo orgánico frente a uno con manejo convencional. Se planteó la hipótesis de que el tratamiento con el manejo orgánico retendrá mayor humedad en la capa agrícola (0 - 0.3 m), como resultado del incremento de la materia orgánica aportada por la adición de residuos de cosecha de ciclos anteriores.

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo sobre un suelo clasificado como Inceptisols (Soil Survey Staff, 2014), con textura franco arenosa (62.04 % arena, 20.72 % de limo y 17.24 % de arcilla), una

densidad aparente de 1.4 g cm^{-3} , una profundidad de 1.2 m, pH 6.6, conductividad eléctrica (C.E.) $215 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Semarnat, 2002), pendiente de 2 %, a una altitud de 2250 m. El sitio reporta una precipitación media anual de 645 mm, una temperatura media anual de $15 \text{ }^\circ\text{C}$, presencia de heladas tempranas a fines de septiembre y tardías en abril (García, 2004).

Las muestras de suelo se recolectaron en unidades experimentales establecidas hace más de 10 años. La parcela con manejo orgánico, tiene un área de 3150 m^2 , se incorporó en promedio $8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de residuos de cosecha (hoja y tallos de maíz), sin aplicación de fertilizantes minerales. En contraste, la parcela con manejo convencional, posee un área de 1375 m^2 , utilizó un sistema de labranza tradicional (barbecho, rastra, surcado y siembra) y se cultivó durante 10 ciclos con monocultivo de maíz. Se aplicó fertilización mineral a una dosis de $200\text{-}100\text{-}60 \text{ (kg ha}^{-1} \text{ de N - P}_2\text{O}_5 \text{ - K}_2\text{O)}$. El 50 % del requerimiento de nitrógeno y el 100 % del fósforo y potasio se adicionó al momento de la siembra; el 50 % restante de nitrógeno se incorporó al final del desarrollo vegetativo (75 días después de la siembra). Como fuente mineral se utilizó sulfato de amonio (21 % N), superfosfato simple (18 % P_2O_5) y sulfato de potasio (50 % K_2O).

Muestreo y análisis de suelos

Se empleó un muestreo sistemático en cuadrícula con una separación equidistante de 5 m entre puntos de muestreo a una profundidad de 0 - 0.3 m, se obtuvieron un total de 214 muestras de suelos (152 del sistema orgánico y 62 del sistema convencional). Las muestras se secaron a temperatura ambiente, sobre papel periódico con volteos constantes y sin exposición directa al sol. Con un mazo de madera se redujo el tamaño de los agregados y se tamizó por una malla número 10 (2 mm por pulgada lineal) como lo indica el método AS-01 de la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002).

Se realizó el registro de indicadores de humedad de suelo a distintos potenciales hídricos, capacidad de campo (CC; agua retenida a -33 kPa) con la olla de presión, y el punto de marchitez

permanente (*PMP*; agua retenida a – 1500 kPa) con la membrana de presión (Richards, 1956) y la humedad aprovechable (*HA*; calculada como la diferencia entre *CC* y *PMP*) a través del método AS-06 (Semarnat, 2002). La conductividad hidráulica saturada (K_s ; cm h^{-1}) se realizó con el permeámetro de carga constante en muestras saturadas (Elrick y Reynolds, 1992).

El contenido de materia orgánica (*MO*; %) del suelo se determinó por el método AS-07 (Semarnat, 2002), y el carbono orgánico total (*CO*; %) se calculó al dividir el valor de *MO* entre el factor de Van Benmelen (1.724) (Ecuación 1), que resulta de la suposición de que la materia orgánica del suelo contiene un 58 % de carbono ($1/0.58 = 1.724$), (*Ibid.*).

$$CO(\%) = \frac{MO(\%)}{1.724} \quad \text{Ecuación 1}$$

El carbono orgánico del suelo (*COS*; Mg ha^{-1}) se estimó con base en el *CO*, la densidad aparente del suelo (P_s ; Mg m^{-3}) y la profundidad de muestreo (P_s ; m) (Ecuación 2), mediante la metodología de Batjes (1996):

$$COS = CO \times P_a \times P_s \quad \text{Ecuación 2}$$

Diseño experimental y análisis estadístico

Se realizó un diseño experimental completamente al azar (DCA). Las variables seleccionadas se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) bajo un modelo lineal generalizado univariado, donde los resultados con $p < 0.05$ se consideran significativos. Este procedimiento se ejecutó con el software SAS OnDemand for

Academics (SAS Institute Inc., 2024). Asimismo, el análisis de componentes principales (*PCA*) se realizó a partir de la matriz de correlación de Pearson de las variables estandarizadas con la librería FactoMineR del software Rstudio v.I.2.I335 (RStudio Team, 2020). La contribución relativa de cada variable se determinó con base en los eigenvalores. Por último, la representación cartográfica del área de estudio se elaboró con el software GS+ (Robertson, 2008).

Resultados y discusión

Después de 10 años de incorporación continua de residuos de cosecha, el sistema agrícola orgánico presentó un mayor contenido de agua del suelo en comparación con el sistema convencional. A una profundidad de 0.30 m, la capacidad de campo alcanzó ($0.217 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), valor superior al registrado en el sistema convencional ($0.189 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). De manera similar, el punto de marchitez permanente fue mayor en el sistema orgánico ($0.094 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) en comparación al sistema convencional ($0.082 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Ambas variables presentaron diferencias significativas ($p < 0.0001$), resultados que coinciden con los registrados por Lal (2020), quien señala que restaurar el contenido de materia orgánica de suelos degradados incrementa en mayor medida la retención de agua a capacidad de campo que el aumento en el punto de marchitez permanente (**Tabla I**).

Tabla I. Indicadores de humedad y contenido de materia orgánica del suelo.

Sistema agrícola	<i>CC</i> ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	<i>PMP</i> ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	<i>HA</i> ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	K_s (cm h^{-1})	<i>MO</i> (%)
Sistema orgánico	0.217 ± 0.012^a	0.094 ± 0.004^a	0.124 ± 0.012^a	2.9 ± 1.1^a	1.6 ± 0.8^a
Sistema convencional	0.189 ± 0.010^b	0.082 ± 0.004^b	0.107 ± 0.008^b	2.8 ± 0.8^a	1.3 ± 0.4^b
Valor F modelo	33.08	50.85	13.13	0.09	5.98
Pr > F modelo	<0.0001	<0.0001	0.0005	0.7708	0.0167
DMS	0.97	0.33	0.89	0.82	0.29

CC = capacidad de campo, *PMP* = punto de marchitez permanente, *HA* = humedad aprovechable, K_s = conductividad hidráulica saturada, *MO* = materia orgánica, DMS = diferencia mínima significativa. Medias con letras distintas en hileras presentan diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$). $n = 40$. Media \pm desviación estándar.

La humedad aprovechable fue mayor en el sistema orgánico ($0.124 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) respecto al sistema convencional ($0.107 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) ($p \leq 0.0005$). Este resultado sugiere una mayor capacidad del suelo para almacenar y suministrar agua a los cultivos bajo prácticas de manejo que incorporan de manera continua de residuos orgánicos de cultivos. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Salcedo-Pérez et al. (2007), quienes señalaron que la humedad aprovechable depende del tipo de suelo y puede modificarse mediante las prácticas agrícolas que influyen en sus propiedades físicas. Asimismo, Sarker et al. (2022) reportaron que la incorporación de residuos de cosecha aumenta el contenido de humedad del suelo en distintas profundidades en comparación con parcelas sin residuos, debido a que estos modifican el balance de energía del suelo, reducen la evaporación y contribuyen a mantener condiciones más favorables de temperatura y disponibilidad hídrica (Tabla I).

La conductividad hidráulica saturada no mostró diferencias entre tratamientos ($p > 0.05$), lo que indica que los cambios atribuibles al manejo agrícola no afectaron las propiedades relacionadas con la transmisión de agua en condiciones de saturación (Tabla I). Este resultado contrasta con lo reportado por Lugo et al. (2022) quienes señalaron que la incorporación de mejoradores orgánicos promovió modificaciones de 7 % en la porosidad del suelo y de 5 % en la conductividad hidráulica respecto al tratamiento testigo.

Asimismo, el contenido de materia orgánica fue significativa en el sistema orgánico 1.6 % respecto al sistema convencional 1.3 % ($p < 0.05$). De acuerdo con los criterios establecidos por Semarnat (2002), el sistema orgánico se clasifica con un contenido medio (1.6 – 3.5 % de MO), mientras que el sistema convencional se ubica en la categoría de contenido bajo (0.6 – 1.5% de MO) (Tabla I).

En este sentido, Flores-López et al. (2014) documentaron que la incorporación de residuos de cosecha en el sistema de producción de maíz contribuye a mantener o incrementar los niveles de materia orgánica del suelo hasta 4.6 % con dos pasos de rastra, en contraste con prácticas donde el rastrojo se retira o quema.

La Figura I muestra un agrupamiento consistente de las observaciones hacia el sistema agrícola orgánico, el cual se asocia a niveles más elevados de capacidad de campo, humedad aprovechable y punto de marchitez permanente. Este patrón indica que la incorporación de residuos de cosecha de cultivo de ciclos anteriores promueve una mayor retención de agua en el suelo, en comparación con el sistema convencional donde las observaciones se concentran en una región del plano asociada a menores valores de los indicadores de humedad lo que sugiere una menor capacidad del suelo para almacenar agua aprovechable por los cultivos.

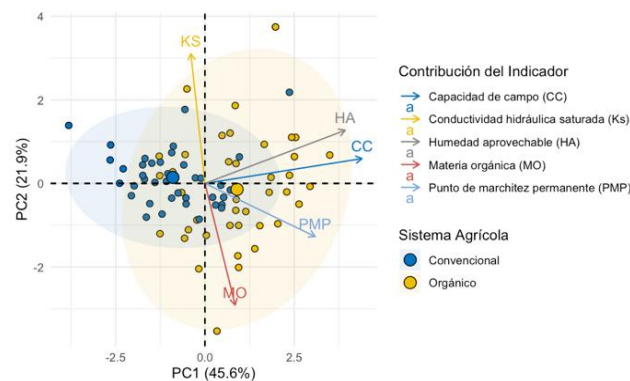


Figura I. Análisis de coeficientes de correlación de Pearson entre indicadores de humedad y contenido de materia orgánica del suelo. CC = capacidad de campo, PMP = punto de marchitez permanente, HA = humedad aprovechable, Ks = conductividad hidráulica saturada, MO = materia orgánica.

Tabla 2. Contribución de la varianza total en indicadores de humedad y contenido de materia orgánica del suelo.

Componente	Eigenvalor	Varianza (%)	Varianza acumulada (%)
PCI CC	2.27	0.46	0.46
PC2 HA	1.09	0.22	0.68
PC3 PMP	0.94 ⁻¹	0.19	0.87
PC4 K _s	0.68 ⁻¹	0.12	0.99
PC5 MO	0.01 ⁻¹	0.01	1.00

CC = capacidad de campo, PMP = punto de marchitez permanente, HA = humedad aprovechable, K_s = conductividad hidráulica saturada, MO = materia orgánica.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Ramírez et al. (2023), quienes demostraron que el incremento del carbono orgánico del suelo mejora de manera significativa la retención de agua disponible, de manera particular en el rango comprendido entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, debido a cambios en la distribución y conectividad de poros. De manera similar, otros trabajos señalan que sistemas con mayor incorporación de materia orgánica presentan mejor retención de nutrientes, estabilidad de agregados, mayor porosidad estructural y, en consecuencia, mayor almacenamiento hídrico en el perfil del suelo (de Alencar et al., 2024; Abdallah et al., 2021; Lal, 2014).

Bautista-Cruz et al. (2004) consideran a la materia orgánica, la conductividad hidráulica saturada y la capacidad de almacenamiento del agua como indicadores químicos y físicos de la calidad de un suelo, debido a que influyen en la manera en que el recurso acepta, retiene y transmite agua con nutrimentos a las plantas y microorganismos información que coincide con la reportada en el presente trabajo (Tabla 2).

En la Figura 2 se observa una correlación positiva y significativa de manera estadística entre la capacidad de campo con la humedad aprovechable y el punto de marchitez permanente, lo que indica que los incrementos en la retención de agua del suelo ocurren de manera proporcional entre las variables estudiadas. Este comportamiento sugiere que la dinámica hídrica del suelo está influida por modificaciones

estructurales asociados al contenido de materia orgánica, de manera particular en la distribución y estabilidad del sistema poroso.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Abdallah et al. (2021) quienes encontraron relaciones positivas entre el incremento de materia orgánica y la mejora simultánea de la capacidad de campo y del agua disponible, efecto atribuido a una mayor estabilidad de agregados y a modificaciones en la distribución y continuidad de macroporos y mesoporos. Por otro lado, Lal (2020) menciona que, aunque las propiedades físicas, químicas y biológicas pueden emplearse como indicadores de calidad de suelo, su interpretación debe realizarse considerando el contexto edafoclimático, el uso de suelo, ya que no todos los atributos responden de igual modo ante distintas prácticas de manejo.

En la Figura 3 se observa que el potencial de captura de los suelos agrícolas está asociado con mejores prácticas de manejo. La incorporación de residuos de cosecha durante 10 años en el sistema orgánico Figura (3A) logró almacenar 4'578 MgC ha⁻¹ en los primeros 0.3 m de profundidad, lo que representa un incremento de 30 % más carbono respecto al sistema convencional Figura (3B), información que coincide con la reportada por Sánchez-Hernández et al. (2011) quienes mencionan que el aporte de residuos orgánicos característicos del sistema de uso agrícola y el tipo de suelo regulan la acumulación de carbono en el suelo. Este comportamiento también coincide con lo descrito por Lal (2018), quien señala que la incorporación continua de residuos de cosecha

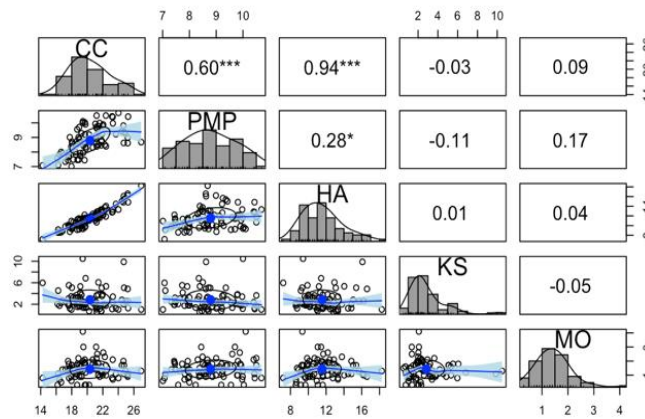


Figura 2. Análisis de coeficientes de correlación de Pearson entre indicadores de humedad y contenido de materia orgánica del suelo. *CC* = capacidad de campo, *PMP* = punto de marchitez permanente, *HA* = humedad aprovechable, *K_s* = conductividad hidráulica saturada, *MO* = materia orgánica. ***, **, * significativo (0.001, 0.01 y 0.05).

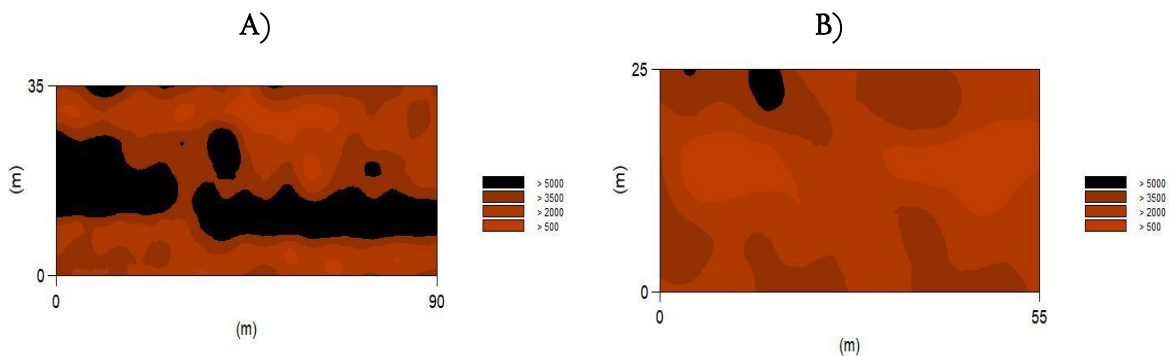


Figura 3. Distribución del carbono orgánico del suelo (MgC ha^{-1}) en dos sistemas de producción agrícola. A = sistema orgánico, B = sistema convencional. Rango de 500 a 1999 MgC ha^{-1} , 2000 a 3499 MgC ha^{-1} , 3500 a 4999 MgC ha^{-1} , $>5000 \text{ MgC ha}^{-1}$.

constituye una de las prácticas más efectivas para incrementar el secuestro de carbono en horizontes superficiales del suelo. Asimismo, la acumulación observada puede explicarse por mecanismos de estabilización física del carbono dentro de agregados, tal como lo documentaron Six et al. (2004), quienes demostraron que la formación y estabilización de macro y microagregados favorecen la protección del carbono orgánico frente a la mineralización rápida, favoreciendo su permanencia en el suelo sin impedir la dinámica de

la fracción lábil necesaria para los procesos biogeoquímicos y la nutrición de los cultivos.

Además del incremento en el almacenamiento de carbono, la incorporación de residuos de cosecha de ciclos anteriores contribuye a mejorar la calidad del suelo y sus propiedades físicas y químicas (Smreczak y Ukalska-Jaruga, 2021). De manera similar, Tang et al. (2024) encontraron que incorporar residuos de maíz durante cinco años incrementó la concentración de carbono orgánico del suelo y el almacenamiento de nitrógeno total en la capa superior del suelo,

asociado con mejoras en la estructura y estabilidad de agregación.

Conclusiones

Después de 10 años de incorporación continua de residuos de cosecha, el sistema agrícola orgánico presentó mayor almacenamiento de carbono en los primeros 0.30 m del suelo y mejor capacidad de retención de agua, evidenciada por mayores valores de capacidad de campo, punto de marchitez permanente, humedad aprovechable y contenido de materia orgánica respecto al manejo convencional, sin afectar la conductividad hidráulica saturada. Estos resultados demuestran que la incorporación de residuos constituye una práctica efectiva para incrementar la calidad hídrica del suelo y contribuir a la sostenibilidad del sistema agrícola.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Regional Sureste del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas Forestales y Pecuarias, así como a la Universidad Autónoma Chapingo por la colaboración y el apoyo en la documentación de la presente investigación.

Referencias

- Abdallah, A. M., Jat, H. S., Choudhary, M., Abdelaty, E. F., Sharma, P. C. & Jat, M. L. (2021). Conservation agriculture effects on soil water holding capacity and water-saving varied with management practices and agroecological conditions: A review. *Agronomy*, 11(9), 1681. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091681>
- Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in soils of the world. *European journal of soil science*, 47(2), 151-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>
- Bautista-Cruz, A., Etchevers-Barra, J., del Castillo, R. F. & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2), 90-97.
- Cooper, J., Greenberg, I., Ludwig, B., Hippich, L., Fischer, D., Glaser, B. & Kaiser, M. (2020). Effect of biochar and compost on soil properties and organic matter in aggregate size fractions under field conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295, 106882. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106882>
- de Alencar, G. V., Gomes, L. C., Barros, V. M. D. S., Ortiz Escobar, M. E., de Oliveira, T. S. & Mendonca, E. D. S. (2024). Organic farming improves soil carbon pools and aggregation of sandy soils in the Brazilian semi-arid region. *Soil Use and Management*, 40(3), e13097. <https://doi.org/10.1111/sum.13097>
- Elrick, D. E. & Reynolds, W. D. (1992). *Infiltration from Constant-Head Well Permeameters and Infiltrimeters. In: Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice.* (G. C. Madison Topp, W. D. Reynolds, & R. E. Green, Eds.). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspepub30.c1>
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H. & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813-831. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=SI405-31952017000800813&lng=es&nrm=iso&tln_g=es
- FAOSTAT. (2025). *Food and Agriculture Organization of the United Nations.* FAOSTAT Database. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Flores-López, H. E., Ruíz Corral, J. A., Mora Orozco, C. D. L., Zarazúa-Villaseñor, P., Chávez Durán, Á. A., Ramírez Vega, H. & Velásquez Valle, M. A. (2014). Aplicación del modelo EPIC para evaluar el efecto del cambio climático y prácticas de manejo sobre el rendimiento de grano en maíz de

- temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(SPE10), 2007-2020.
- García, E. (2002). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Inforsato, L. & de Jong van Lier, Q. (2021). Polynomial functions to predict flux-based field capacity from soil hydraulic parameters. *Geoderma*, 404. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115308>
- Ladányi, Z., Barta, K., Blanka, V. & Pálffy, B. (2021). Assessing Available Water Content of Sandy Soils to Support Drought Monitoring and Agricultural Water Management. *Water Resources Management*, 35(3), 869-880. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02747-6>
- Lal, R. (2014). Soil conservation and ecosystem services. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(3), 36-47. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30021-6](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30021-6)
- Lal, R. (2018). Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global change biology*, 24(8), 3285-3301. <https://doi.org/10.1111/gcb.14054>
- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265-3277. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>
- Lugo Valenzuela, H., Prado Hernandez, J. V., Vazquez Peña, M. A., Pineda Pineda, J. & Velazquez Lopez, N. (2022). Caracterización hidrodinámica del modelo de Green y Ampt en un suelo con mejoradores orgánicos. *Biotecnia*, 24(3), 15-21. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i3.1627>
- Martínez Gamiño, M. Á., Osuna Ceja, E. S. & Espinosa Ramírez, M. (2019). Impacto acumulado de la agricultura de conservación en propiedades del suelo y rendimiento de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(4), 765-778. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1640>
- Matos-Pech, G., Arcocha-Gómez, E., López-Hernández, M. B., Garma-Quen, P., González-Valdivia, N. A. & Echavarría-Góngora, E. de J. (2022). Efecto de abonos verdes inoculados en las propiedades químicas de un luvisol férrico de Campeche, México. *Revista Terra Latinoamericana*, 40, 1-9. e933. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.933>
- Miyeni, L., Mdlambuzi, T., Paterson, D. G., Nysschen, G. De. & Moeletsi, M. E. (2021). Development and evaluation of pedotransfer functions to estimate soil moisture content at field capacity and permanent wilting point for South African soils. *Water (Switzerland)*, 13(19), 2639. <https://doi.org/10.3390/w13192639>
- Ramírez, P. B., Machado, S., Singh, S., Plunkett, R. & Calderón, F. J. (2023). Addressing the effects of soil organic carbon on water retention in US Pacific Northwest wheat-soil systems. *Frontiers in Soil Science*, 3, 1233886. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1233886>
- Richards, L. A. (1956). Sample Retainers for Measuring Water Retention by Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 20(3), 301-303. <https://doi.org/10.2136/sssaj1956.03615995002000030001x>
- Robertson, G. P. (2008). *GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences*. GammaDesign Software.
- RStudio Team. (2020). *RStudio: Integrated Development for R*. <http://www.rstudio.com/>
- Sarker, M.R., Galdos, M.V., Challinor, A.J., Huda, M.S., Chaki, A.K. and Hossain, A. (2022). Conservation tillage and residue management improve soil health and crop productivity—Evidence from a rice-maize cropping system in Bangladesh. *Front. Environ. Sci.* 10:969819. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.969819>
- Salcedo-Mayta, S., Canihua-Rojas, J., Samaniego-Vivanco, T., Cruz-Luis, J., Pérez-Porras, W. & Cosme De La Cruz, R. C. (2022). Cover crops

- associated with quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) in the Peruvian Altiplano: Erosion reduction, improved soil health and agricultural yield. *Scientia Agropecuaria*, 13(3), 265–274. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.024>
- Salcedo-Pérez, E., Galvis-Spinola, A., Hernández-Mendoza, T. M., Rodríguez-Macias, R., Zamora-Natera, F., Bugarin-Montoya, R. & Carrillo-González, R. (2007). La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo. *Terra Latinoamericana*, 25(4), 419–425. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57315558010.pdf>
- Sánchez-Hernández, R., Ramos-Reyes, R., Geissen, V., Mendoza-Palacios, J., Cruz-Lázaro, E., Salcedo-Pérez, E. & Palma-López, D. J. (2011). Contenido de carbono en suelos con diferentes usos agropecuarios en el trópico mexicano. *Terra Latinoamericana*, 29, 211–219.
- SAS Institute Inc. (2024). *SAS OnDemand para académicos*. https://www.sas.com/en_us/software/on-demand-for-academics.html
- Semarnat. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 antes NOM-021-RECNAT-2000. *Diario Oficial de La Federación*, 1–73. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Sequeira, C. H., & Alley, M. M. (2011). Soil Organic Matter Fractions as Indices of Soil Quality Changes. *Soil Science Society of America Journal*, 75(5), 1766–1773. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0067>
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and tillage research*, 79(1), 7–31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- Smreczak, B., & Ukalska-Jaruga, A. (2021). Dissolved organic matter in agricultural soils. *Soil Science Annual*. <https://doi.org/10.37501/soilsa/132234>
- Soil Survey Staff. (2014). *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys* (12th ed.). Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436.
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M. & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (L. Taiz, E. Zeiger, I. M. Moller, & A. Murphy, Eds.; 6a ed.). Sinauer Associates Incorporated.
- Tang, Y., Cui, X., Xu, H., Peng, D., & Liang, B. (2024). Managing Residue Return Increases Soil Organic Carbon, Total Nitrogen in the Soil Aggregate, and the Grain Yield of Winter Wheat. *Agronomy*, 14(7), 1584. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071584>
- van Es, H. (2017). A New Definition of Soil. *CSA News*, 62(10), 20–21. <https://doi.org/10.2134/csa2017.62.1016>
- Weisberger, D., Nichols, V., & Liebman, M. (2019). Does diversifying crop rotations suppress weeds? A meta-analysis. *PLOS ONE*, 14(7), e0219847. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219847>
- West, T. O., & Post, W. M. (2002). Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1930–1946. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1930>

Residuos de *Opuntia ficus-indica* y estiércol de caballo como insumos de compostaje

Opuntia ficus-indica residues and horse manure as composting inputs

¹Alan Jesús Torres-Sandoval^{ORCID}, ²María Elena Tavera-Cortés^{ORCID}, ¹Yolanda Donají Ortiz-Hernández^{ORCID}

¹Instituto Politécnico Nacional (IPN). Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Oaxaca. Santa Cruz Xoxocotlán-Oaxaca. México. ²IPN. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas. Iztacalco-Ciudad de México. México. [§]Autor de correspondencia: (mtavera@ipn.mx).

Resumen

La producción de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) en Milpa Alta, Ciudad de México, superó las 250 000 t durante 2024, de las cuales se ha reportado que más del 60 % del producto no llega al consumidor final, generando grandes volúmenes de residuos vegetales; adicionalmente, esta producción depende del uso intensivo de estiércol de caballo como fertilizante, lo que plantea retos ambientales y productivos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el aprovechamiento de los residuos de nopal mediante compostaje. Se recolectaron muestras representativas de ambos materiales y se determinó su contenido de humedad y cenizas mediante secado controlado y calcinación. Los residuos de nopal presentaron alta humedad (89.88 ± 3.63 %) y mayor contenido mineral (10.38 ± 3.65 %), mientras que el estiércol mostró menor humedad (60.2 ± 4.72 %) y bajo contenido de cenizas (2.3 ± 0.4 %). Estas observaciones señalan que la interacción de ambos componentes puede favorecer el equilibrio de humedad y porosidad, contribuyendo a la obtención de compost de calidad.

Palabras clave: fertilización orgánica, nopal verdura, sostenibilidad agrícola, sustrato, valorización.

Abstract

The production of edible nopal (*Opuntia ficus-indica*) in Milpa Alta, Mexico City, exceeded 250 000 t in 2024, reports indicate that more than 60 % of this output does not reach the final

consumer, resulting in the generation of large volumes of plant residues; additionally, this production relies on the intensive use of horse manure as fertilizer, which poses both environmental and productivity challenges. The objective of this study was to evaluate the utilization of nopal residues through composting. Representative samples of both materials were collected, and moisture and ash content were determined through controlled drying and calcination. Nopal residues showed high moisture content (89.88 ± 3.63 %) and higher mineral content (10.38 ± 3.65 %), whereas horse manure exhibited lower moisture (60.2 ± 4.72 %) and low ash content (2.3 ± 0.4 %). These observations indicate that the interaction of both components can enhance the balance of moisture and porosity, thereby contributing to the production of high-quality compost.

Index words: organic fertilization, edible nopal, agricultural sustainability, substrate, valorization.

Introducción

La producción de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) constituye una actividad agrícola de gran importancia en Milpa Alta, Ciudad de México, representa una de las principales fuentes de ingreso para las familias de la región. Históricamente, Milpa Alta lideró la producción nacional; sin embargo, a mediados de la década de 2000 fue superada por el estado de Morelos debido a diversas ineficiencias productivas (Salinas, 2011; SIAP, 2025). A pesar de ello, datos recientes de la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo

Rural (CORENADR, 2024) reportan que la producción anual promedio de nopal verdura en Milpa Alta supera las 204 000 t, lo que equivale a aproximadamente el 22 % de la producción nacional. A nivel nacional, Morelos concentra la mayor producción con 409 208 t, seguido por el Estado de México con 85 478 t (SIAP, 2025). De manera destacada, en 2024 la producción en la Ciudad de México alcanzó 250 000 t (Secretaría de Cultura de la Ciudad de México, 2024), superando el promedio histórico y fortaleciendo la economía de cerca de 7000 familias, además de contribuir de manera significativa a la seguridad alimentaria. A pesar de su importancia, la cadena productiva del nopal enfrenta serios desafíos en materia de sostenibilidad. Uno de los principales es el elevado índice de desperdicio, según estimaciones de la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol, 2018) más del 60 % del producto no llega al consumidor final, debido a factores como pérdida postcosecha, problemas de comercialización y descarte por criterios de calidad, problema documentado también en sistemas agrícolas similares (Escamilla-García et al., 2025). Esta situación no solo implica la pérdida considerable de recursos naturales, sino que también impacta negativamente los ingresos de los productores. Adicionalmente, dentro de los retos asociados al sistema productivo, el uso generalizado de estiércol de caballo, a pesar de ser un fertilizante natural, también conlleva riesgos ambientales, como la emisión de gases de efecto invernadero, la posible contaminación por lixiviación y la dependencia de insumos externos (Pinos-Rodríguez et al., 2012; Aguirre-Villegas y Larson, 2017; Umar et al., 2025). Estos factores evidencian la necesidad de replantear las estrategias de manejo de fertilidad del suelo en busca de alternativas más sostenibles.

Frente a este escenario, la valorización de residuos surge como alternativa sostenible. Diversos estudios muestran que los residuos vegetales mejoran la calidad del suelo cuando se incorporan mediante compostaje, al favorecer propiedades como la estabilidad de agregados, la retención de humedad y la disponibilidad de

nutrimentos (Abiven et al., 2009; Kelley et al., 2020). En particular, los residuos de *Opuntia* han demostrado estabilizarse adecuadamente durante el proceso, favoreciendo la actividad microbiana y la obtención de compostar con características adecuadas para uso agrícola, como una mayor estabilidad del material y aporte mineral (Rodas-Gaitán et al., 2019) lo que permite generar compostas adecuadas para uso agrícola (Torres-Sandoval et al., 2025). Su uso conjunto con estiércoles puede aumentar la disponibilidad nutrimental y mejorar la respuesta de los cultivos (Alvarado-Raya et al., 2016; González-Torres et al., 2024).

Estos hallazgos respaldan la viabilidad del uso de residuos vegetales, como el nopal, en prácticas de compostaje. En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el aprovechamiento de los residuos de nopal mediante compostaje.

Materiales y métodos

Obtención y caracterización de muestras

La recolección de muestras se llevó a cabo en junio de 2024 en una parcela productiva de nopal ubicada en Milpa Alta, Ciudad de México (19°13'46.3" N, 99°02'14.1" W). Este sitio se caracteriza por una producción intensiva de nopal y la generación de una cantidad considerable de residuos vegetales después de la cosecha (**Figura I**). Se recolectaron cinco pencas de nopal descartadas durante la cosecha, seleccionadas mediante un muestreo no probabilístico por selección dirigida, al considerarse representativas de los residuos agrícolas generados. Asimismo, se obtuvo una muestra de estiércol de caballo en la misma parcela productiva de nopal, considerada como material de referencia debido a su uso generalizado en las prácticas de fertilización de los sistemas productivos de nopal en Milpa Alta. Posteriormente, las muestras fueron trasladadas al laboratorio de la UAM Iztapalapa en recipientes limpios y cerrados, a temperatura ambiente y el mismo día de su recolección, donde se determinó su contenido de humedad y de cenizas para su caracterización.

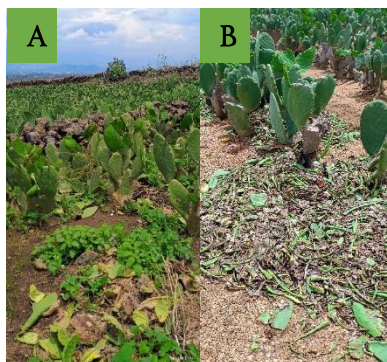


Figura 1. A) Parcela de producción de nopal en Milpa Alta. B) Residuos de pencas de nopal descartadas.

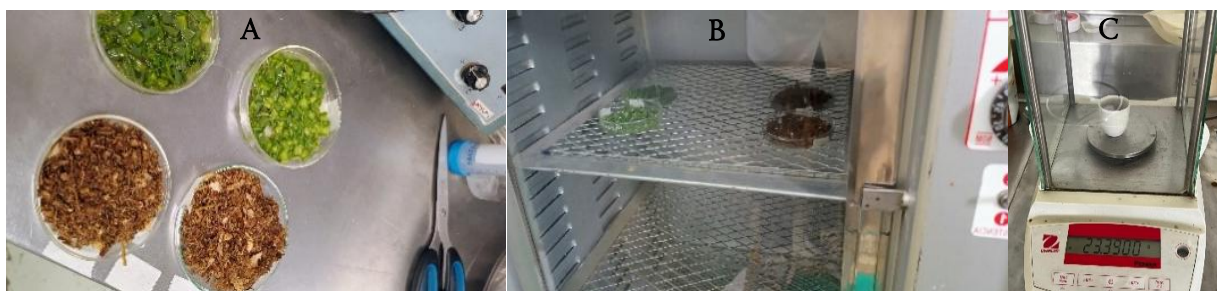


Figura 2. Determinación de humedad. A) preparación de muestras, B) secado y C) pesaje.

Determinación del contenido de humedad

Previamente, las muestras de residuos de nopal y estiércol de caballo fueron acondicionadas para su análisis; en el caso del nopal, se trocó en porciones pequeñas y homogéneas, mientras que el estiércol se homogeneizó manualmente para reducir la variabilidad del material.

Posteriormente, las muestras fueron pesadas para registrar el peso fresco y posteriormente se secaron en una estufa a 50 °C durante 96 h continuas, hasta alcanzar peso constante (Figura 2). La diferencia entre el peso fresco y peso seco permitió calcular el porcentaje de humedad (Ecuación 1).

$$H(\%) = \left(\frac{PF-PS}{PF} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: H = humedad en base húmeda, PF = peso fresco de la muestra (g), PS = peso seco (g).

Determinación del contenido de cenizas

Las muestras secas obtenidas después de la determinación de humedad fueron sometidas a un proceso de calcinación, utilizando la totalidad del

material remanente de cada muestra. En primer lugar, se aplicó un pretratamiento con llama directa para eliminar restos de materia orgánica superficial. Posteriormente, las muestras fueron introducidas en un horno de mufla a 600 °C durante 4 h, hasta lograr combustión completa (Figura 3). El contenido de cenizas se determinó a partir de la diferencia entre el peso seco inicial y el peso final de cenizas (Ecuación 2).

$$\text{Cenizas (\%)} = \left(\frac{PS-PC}{PS} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: PS = peso seco inicial de la muestra (g), PC = peso final de cenizas obtenido después de la calcinación (g).

Resultados y discusión

Los análisis de humedad y cenizas obtenidos en este estudio constituyen un primer paso para evaluar la viabilidad de los residuos de *Opuntia ficus-indica* y el estiércol de caballo como insumos en procesos de compostaje. Estos parámetros se

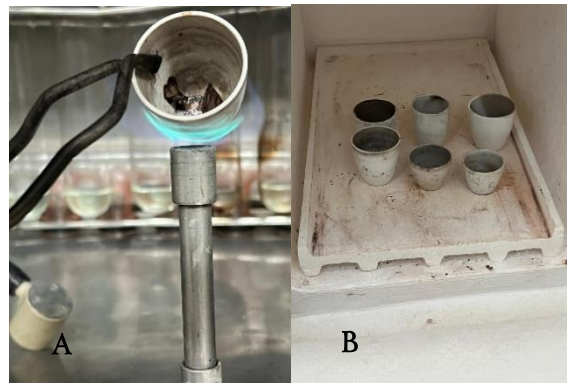


Figura 3. A) Calcinación con llama directa, B) combustión en mufla.

analizaron porque son indicadores clave de la descomposición y de la calidad potencial del compost, ya que influyen en la actividad microbiana, la estabilidad del material y el aporte de nutrientes. El promedio de humedad en la totalidad de muestras fue de 89.88 ± 3.63 %, valor similar a lo reportado por Betancourt-Domínguez et al. (2006) con 91.5 %; Rodríguez-Félix y Cantwell (1988) con 92.0 % en estudios realizados con *Opuntia ficus-indica* y menor a lo señalado por Machado-Velasco y Vélez-Ruiz (2008) 97.79 % de humedad, mientras que Maki-Díaz et al. (2015) registraron valores para consumo nacional (94.56 %) y de exportación (94.84 %).

El elevado contenido de humedad del nopal, aunque representa un desafío técnico, también ofrece una buena oportunidad. Por un lado, una humedad excesiva, si no se maneja adecuadamente puede favorecer condiciones anaeróbicas, lo que puede reducir la actividad microbiana, ralentizar la descomposición y afectar la calidad final del compost. Sin embargo, este mismo factor puede acelerar la descomposición inicial y estimular la actividad microbiana, elementos importantes para una biodegradación eficiente (Kim et al., 2016). En este sentido, Aguilar-Paredes et al. (2023) resaltan la humedad como uno de los factores más influyentes en la sucesión microbiana durante el compostaje, impactando directamente la estabilidad y calidad del producto final. Asimismo, Kim et al. (2016) observaron que mantener niveles de humedad cercanos a la capacidad de retención de agua de los materiales optimiza el consumo de oxígeno y mejora la actividad microbiana aeróbica.

Por su parte, Makan et al. (2013) mencionan que niveles de humedad iniciales alrededor del 75 % pueden ser adecuados para alcanzar temperaturas elevadas y tasas eficaces de descomposición en sistemas con control de aireación, como los biorreactores.

Considerando estos antecedentes, los residuos de nopal exhiben una viabilidad significativa como componente en mezclas para compostaje, especialmente al combinarse con materiales más secos. Su alto contenido de humedad puede aprovecharse estratégicamente para impulsar procesos de compostaje eficientes y sostenibles.

Considerando estos antecedentes, los residuos de nopal exhiben una viabilidad significativa como componente en mezclas para compostaje, especialmente al combinarse con materiales más secos. Su alto contenido de humedad puede aprovecharse estratégicamente para impulsar procesos de compostaje eficientes y sostenibles.

Los residuos de nopal presentaron un contenido de cenizas de 10.38 ± 3.65 %. Estos valores son cercanos a lo reportado por Sepúlveda et al. (2007), quienes encontraron rangos del 10 % al 15 %. Este aporte mineral es relevante, ya que, según Hassan et al. (2024), un compost con contenido significativo de cenizas puede incrementar la fertilidad del suelo, mejorar su capacidad de retención de nutrientes y favorecer la actividad microbiana.

En contraste, el estiércol de caballo utilizado en este estudio presentó un valor promedio de cenizas de 2.3 ± 0.4 %. Este resultado es menor a los encontrados por Lundgren y Pettersson (2009) (5-7 %) y Chong et al. (2019) (10 %). Esta

diferencia probablemente se debe a la alta presencia de aserrín contenido en el estiércol usado en la región. Si bien este tipo de material seco es útil para regular la humedad y aportar estructura al compost, su contenido mineral relativamente bajo podría reducir la riqueza nutricional del producto final.

En este sentido, estudios como el de Dědina et al. (2024) muestran que la adición de cenizas vegetales o minerales durante el compostaje puede modificar significativamente propiedades del compost, como el pH, la densidad aparente y la disponibilidad de nutrientes. En particular, se observó que una mayor fracción de cenizas está asociada con un contenido más alto de minerales, aunque su disponibilidad puede depender de la forma química presente y del pH del medio. Por tanto, el contenido de cenizas no solo actúa como indicador de la fracción inorgánica, sino también como potencial modificador de la calidad final del compost, especialmente en lo que respecta a su valor como fertilizante orgánico.

Conclusiones

Los residuos de *Opuntia ficus-indica* presentan un alto contenido de humedad y niveles de cenizas que favorecen la descomposición y aportan minerales, por lo que constituyen un insumo potencial para la elaboración de compost. Asimismo, el contraste entre la elevada humedad del nopal y la menor humedad del estiércol de caballo sugiere que ambos materiales podrían complementarse para equilibrar la mezcla y mejorar su manejo durante el proceso.

Referencias

- Abiven, S., Menasseri, S. & Chenu, C. (2009). The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>
- Aguilar-Paredes, A., Valdés, G., Aráneda, N., Valdebenito, E., Hansen, F. & Nuti, M. (2023). Microbial community in the composting process and its positive impact on the soil biota in sustainable agriculture. *Agronomy*, 13(2), 542. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020542>
- Aguirre-Villegas, H. A. & Larson, R. A. (2017). Evaluating greenhouse gas emissions from dairy manure management practices using survey data and lifecycle tools. *Journal of Cleaner Production*, 143, 169-179. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.133>
- Alvarado-Raya, H. E., Salinas-Callejas, E. & Ortiz-Huerta, G. (2016). Peso fresco y calidad de nopalito (*Opuntia ficus-indica* L.) fertilizado con composta de estiércol de vaca. *Tecnociencia Chihuahua*, 10(1), 58-71. <https://doi.org/10.54167/tch.v10i1.581>
- Betancourt-Domínguez, M. A., Hernández-Pérez, T., García-Saucedo, P., Cruz-Hernández, A. & Paredes-López, O. (2006). Physico-chemical changes in cladodes (nopalitos) from cultivated and wild cacti (*Opuntia* spp.). *Plant Foods for Human Nutrition*, 61(3), 115-119. <https://doi.org/10.1007/s11130-006-0008-6>
- Chong, C., Mong, G., Han, J., Fong, W., Ani, F., Lam, S. & Ong, H. (2019). Pyrolysis characteristics and kinetic studies of horse manure using thermogravimetric analysis. *Energy Conversion and Management*, 180, 1260-1267. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.071>
- Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural (CORENADR). (30 de octubre de 2025). *Nopales de Milpa Alta, corazón agroecológico de la CDMX*. Gobierno de la Ciudad de México. <https://altepdl.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/nopales-de-milpa-alta-corazon-agroecologico>
- Dědina, M., Petru, V., Čermák, P., Moudrý, J., Mukosha, C. E., Lošák, T., Hrušovský, T. & Watzlová, E. (2024). Environmental life cycle assessment of silage maize in relation to

- regenerative agriculture. *Sustainability*, 16(2), 481. <https://doi.org/10.3390/su16020481>
- Escamilla-García, P. E., Alvarado-Raya, H. E., Caire Alfaro, C., Dorantes Hernández, P. I. & Ángeles Tovar, L. C. (2025). Standardization process for the production of nopal-based (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) compost: A technical and economic analysis. *Compost Science & Utilization*, 32(4), 104-119. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2025.2498334>
- González-Torres, G. Y., Bernardino-Nicanor, Á., Fernández-Ávalos, S., Acosta-García, G., Juárez-Goiz, J. M. S. & González-Cruz, L. (2024). Effects of nopal and goat manure on soil fertility and the growth, yield and physical characteristics of tomato and carrot plants. *Agronomy*, 14(6), 1221. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061221>
- Hassan, M. U., Huang, G., Munir, R., Khan, T. A. & Noor, M. A. (2024). Biochar co-compost: A promising soil amendment to restrain greenhouse gases and improve rice productivity and soil fertility. *Agronomy*, 14(7), 1583. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071583>
- Kelley, A., Wilkie, A. C. & Maltais-Landry, G. (2020). Food-based composts provide more soil fertility benefits than cow manure-based composts in sandy soils. *Agriculture*, 10(3), 69. <https://doi.org/10.3390/agriculture10030069>
- Kim, E., Lee, D.-H., Won, S. & Ahn, H. (2016). Evaluation of optimum moisture content for composting of beef manure and bedding material mixtures using oxygen uptake measurement. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 29(5), 753–758. <https://doi.org/10.5713/ajas.15.0875>
- Lundgren, J. & Pettersson, E. (2009). Combustion of horse manure for heat production. *Bioresource Technology*, 100(12), 3121–3126. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.050>
- Machado-Velasco, K. & Vélez-Ruiz, J. (2008). Estudio de propiedades físicas de alimentos mexicanos durante la congelación y el almacenamiento congelado. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 7(1), 41–54. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=SI665-27382008000100006&lng=es&tlng=es
- Makan, A., Assobhei, O. & Mountadar, M. (2013). Effect of initial moisture content on the in-vessel composting under air pressure of organic fraction of municipal solid waste in Morocco. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 10(1), 3. <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-3>
- Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M. L., Calderón-Zavala, G. & Anaya-Rosales, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*, 49(1), 31–51. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=SI405-31952015000100003&lng=es&tlng=es
- Maltais-Landry, G., Bertoni, N., Valley, W., Grant, N., Nestic, Z. & Smukler, S. (2018). Greater impacts of incubation temperature and moisture on carbon and nitrogen cycling in poultry relative to horse manure-based soil amendments. *Journal of Environmental Quality*, 47(4), 919–921. <https://doi.org/10.2134/jeq2017.11.0420>
- Pinos-Rodríguez, J. M., García-López, J. C., Peña-Avelino, L. Y., Rendón-Huerta, J. A., González-González, C. & Tristán-Patiño, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*, 46(4), 381–392. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=SI405-31952012000400004&lng=es&tlng=e
- Rodas-Gaitán, H., Palma-García, J., Olivares-Sáenz, E., Gutiérrez-Castorena, E. & Vázquez-Alvarado, R. (2019). Biodynamic preparations on static pile composting from prickly pear cactus and moringa crop wastes. *Open*

- Agriculture*, 4(1), 247–257.
<https://doi.org/10.1515/opag-2019-0023>
- Rodríguez-Félix, A. & Cantwell, M. (1988). Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (nopalitos). *Plant Foods for Human Nutrition*, 38, 83–93.
<https://doi.org/10.1007/BF01092314>
- Salinas, E. (2011). Sistema y métodos de compostaje: El caso de una planta de compostaje. En M. Tavera & H. Alvarado (Eds.), *La factibilidad tecnológica para la producción de composta en el DF* (pp. 99–123). Instituto Politécnico Nacional
- Secretaría de Cultura de la Ciudad de México. (7 de junio de 2025). *Inaugura Clara Brugada la Feria del Nopal en el Monumento a la Revolución y declara las terrazas agrícolas patrimonio de la ciudad*. Gobierno de la Ciudad de México.
<https://cultura.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/248-25>
- Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol). (2018). *Desperdicio de alimentos en México*.
http://www.sedesol.gob.mx/boletinesSinHambre/Informativo_02/infografia.html
- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E., & Aceituno, C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments*, 68(4), 534–545.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.08.001>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2025). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Gobierno de México.
https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola
- Torres-Sandoval, A. J., Ortiz-Hernández, Y. D., Tavera-Cortés, M. E., Acevedo-Ortiz, M. A. & Lugo-Espinosa, G. (2025). *Closing the Loop in Opuntia Cultivation: Opportunities and Challenges in Residue Valorization*. *Agronomy*, 15(10), 2311.
<https://doi.org/10.3390/agronomy15102311>
- Umar, M., Akbar, A., Eman, R., Hayat, M. F., Naz, H. & Ashraf, A. (2025). Mitigating nutrient pollution from livestock manure: Strategies for sustainable management. En N. Hussain, C.-Y. Hung, & L. Wang (Eds.), *Agricultural nutrient pollution and climate change: Challenges and opportunities* (pp. 165–187). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-80912-5_6

Cultivo de tejidos vegetales aplicado a la producción de plantas de crisantemo libres de patógenos

Plant tissue culture applied to the production of pathogen-free chrysanthemum plants

¹Fátima Manuel-Zárate , ^{2§}José Raymundo Enríquez-del Valle , ³Alfonso Vásquez-López , ²Gerardo Rodríguez-Ortiz , ³Isidro Morales-García , ²Yuri Villegas-Aparicio 

¹Estudiante. ²Investigador. Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO). Santa Cruz Xoxocotlán-Oaxaca. México. ³Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca. Santa Cruz Xoxocotlán-Oaxaca. México. [§]Autor de correspondencia: (jose.ev@voaxaca.tecnm.mx).

Resumen

El cultivo de crisantemo (*Chrysanthemum × morifolium*) tiene gran importancia económica en México, por su superficie cultivada y volumen de inflorescencias que se comercializan. Las plantas se propagan de forma asexual mediante el enraizado de estacas herbáceas o micropropagación, técnicas que conservan las características genéticas de la planta original seleccionada. Ambos procesos requieren material vegetal inicial de alta calidad fitosanitaria. El esquema de micropropagación para obtener plantas madre (PM) libres de patógenos específicos, combina saneamiento con las etapas de propagación *in vitro*: 1) termoterapia en invernadero; 2) cultivo *in vitro* de ápices meristemáticos; 3) quimioterapia. Actualmente existen numerosos estudios sobre la propagación *in vitro* de crisantemo que combina datos históricos, normativos y científicos publicados entre 1962 y 2023 que abarca los datos más relevantes, como el tipo de explanto vegetal para iniciar el cultivo *in vitro*, condiciones de medio de cultivo (MC) e incubación y la respuesta obtenida, la adaptación en invernadero de plantas micropropagadas y su establecimiento en suelo para cultivarlas como PM. El diagnóstico y certificación de plantas libres de patógenos son cruciales para garantizar la sanidad vegetal, prevenir la diseminación de enfermedades y cumplir con las regulaciones fitosanitarias nacionales e internacionales. La incorporación del CTV en los esquemas productivos representa una alternativa para mantener y aumentar la competitividad de la floricultura mexicana.

Palabras clave: crisantemo, cultivo *in vitro*, esquejes, patógenos, propagación.

Abstract

Chrysanthemum (*Chrysanthemum × morifolium*) cultivation is of great economic importance in Mexico, due to its cultivated area and the volume of inflorescences sold. Plants are propagated asexually through rooting herbaceous cuttings or micropropagation, techniques that preserve the genetic characteristics of the selected original plant. Both processes require initial plant material of high phytosanitary quality. The micropropagation scheme for obtaining stock plants (MPs) free of specific pathogens combines sanitation with the following *in vitro* propagation stages: 1) greenhouse thermotherapy; 2) *in vitro* culture of meristematic apices; and 3) chemotherapy. Currently, numerous studies exist on the *in vitro* propagation of chrysanthemums, combining historical, regulatory, and scientific data published between 1962 and 2023. These studies cover the most relevant information, such as the type of plant explant used to initiate *in vitro* culture, culture medium (CM) and incubation conditions, the resulting response, the greenhouse adaptation of micropropagated plants, and their establishment in soil for cultivation as plant material (PM). The diagnosis and certification of pathogen-free plants are crucial to ensuring plant health, preventing the spread of diseases, and complying with national and international phytosanitary regulations. Incorporating plant culture technology (PCT) into production

systems represents an alternative for maintaining and increasing the competitiveness of Mexican floriculture.

Index words: chrysanthemum, *in vitro* culture, cuttings, pathogens, propagation.

Introducción

Los crisantemos (*Chrysanthemum* spp.) son de origen asiático y a nivel mundial pertenecen a una de las cuatro principales especies ornamentales cultivadas para flor de corte. En China se cultivaban hace más de 2500 años, formando un grupo altamente diversificado y siendo la principal flor exportada durante el 2019, con hasta 1911 millones de plantas (Zhou et al., 2023). Es una especie económicamente notable, cubriendo 8475 ha de producción en el año 2013 (Eisa et al., 2022). En Europa, el cultivo de crisantemo para la producción de flores cortadas es una industria altamente rentable, en Italia se ocupan alrededor de 1200 ha para su cultivo, principalmente en invernaderos de alta tecnología (Castello et al., 2022).

En México se encuentran numerosas variedades con diversidad de colores y formas. Existe una demanda constante de nuevas variedades en la industria hortícola dedicada a flores cortadas (Cruz et al., 2016). Durante el año 2012 se registró un área de producción abierta de 2365 ha (Eisa et al., 2022). En 2023, el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) reportó que los floricultores mexicanos produjeron 1609 millones de flores de crisantemo, representando el 38.5 % del total nacional. Las principales entidades productoras son el Estado de México con el 94.1 %, Puebla con 4.8 %, Morelos con 0.8 % y el resto del país el 0.3 % (SIAP, 2023). La producción de flor bajo invernadero registró un crecimiento promedio de 99.9 % en el periodo de 2004 a 2010 (Valdez-Aguilar et al., 2015).

El crisantemo es una de las principales flores de corte cultivadas en México, valorada por su gran adaptabilidad a diferentes condiciones agroclimáticas, lo que permite su producción

durante todo el año. Para un óptimo desarrollo requiere temperaturas entre 15 y 27 °C, humedad relativa (*HR*) de 60 a 70 %, suelos porosos con alto contenido de materia orgánica, pH entre 5.5 y 6.5, y la conductividad eléctrica no debe superar los 2.5 mS m⁻¹. Sin embargo, cuando la *HR* supera el rango óptimo, se incrementa significativamente el riesgo de diversos problemas fitosanitarios, causadas por hongos, tales como la roya blanca y diversas pudriciones. Por el contrario, niveles bajos provocan alteraciones fisiológicas como acortamiento de tallos, quemaduras foliares y falta de uniformidad en la floración (Linares, 2005).

Los problemas sanitarios ocasionados por diversos agentes fitopatógenos como: hongos, bacterias, virus y viroides, generan síntomas como manchas y defoliación, crecimiento raquítico, disminuyen el valor estético y comercial que afectan la calidad, productividad y valor de las cosechas (García-Velasco et al., 2005). Los crisantemos son altamente susceptibles a contaminantes fúngicos (*Alternaria*, *Fusarium*, roya blanca), bacterianos (*Agrobacterium*, *Pseudomonas*) y virus del tipo *Cucumber mosaic virus* (CMV), *Chrysanthemum virus B* (CVB), *Impatiens necrotic virus* (INSV), *Tomato aspermy virus* (TAV) y el *Tomato spotted wilt virus* (TSWV) (Ram et al., 2009; Kondo et al., 2011).

Uno de los eventos más críticos en la historia de este cultivo en México fue, durante la década de 1990, cuando se presentó la enfermedad de la roya blanca del crisantemo, provocada por *Puccinia horiana* Henn. Esta enfermedad provocó pérdidas económicas a los agricultores, lo que obligó a la implementación de estrictas medidas cuarentenarias y sanitarias en los procedimientos de cultivo (Leyva-Mir et al., 2001). Ante esta situación, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, estableció la campaña de prevención y acción contra la enfermedad, y publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-EM-021-FITO-1994, aplicable en el Estado de México, Morelos y Distrito Federal; así como las medidas preventivas para evitar su diseminación a las zonas productoras de crisantemo libres del patógenos. Actualmente la Norma se canceló, pero el manejo técnico

permanece vigente para asegurar la producción de material vegetal de calidad fitosanitaria y evitar la reintroducción o dispersión del patógeno en las zonas productoras.

A pesar de los avances en el manejo, los problemas fitosanitarios continúan representando una de las principales limitantes para la producción sustentable de crisantemo en México, ya que comprometen la competitividad del sector y generan importantes pérdidas económicas para los productores.

La propagación mediante cultivo de tejidos vegetales (*CTV*) representa una herramienta biotecnológica con importantes ventajas, entre las que destaca la posibilidad de lograr el rejuvenecimiento fisiológico de las plantas, al tiempo que se preservan fielmente las características genéticas de los genotipos seleccionados. Este método minimiza la aparición de mutaciones somáticas y cambios epigenéticos no deseados (González-Rábade et al., 2011).

En diversas especies ornamentales, entre ellas el crisantemo, el *CVT* se ha utilizado ampliamente para renovar y mantener *PM*. Esta técnica ha demostrado ser efectiva para producir material de propagación de alta calidad fitosanitaria y genética (Zalewska et al., 2010; González-Rábade et al., 2011; Azadi et al., 2016; Quiroz et al., 2017; Wang et al., 2020). Desde la década de 1970, las técnicas *CTV* en ocasiones complementadas con otras herramientas biotecnológicas, han encontrado diversas aplicaciones: 1) obtención de organismos genéticamente modificados (*OGM*); mediante la ingeniería genética, con el objetivo de introducir nuevas características de interés (Valle-Sandoval et al., 2008; Delgado-Paredes et al., 2021); 2) cultivo de meristemos, que puede ser complementado con termoterapia y quimioterapia para obtener plantas libres de patógenos específicos. Se han desarrollado protocolos eficientes de regeneración de plantas a través de embriogénesis (Naing et al., 2016) o por organogénesis (Valle-Sandoval et al., 2008; Song et al., 2011; Mehedi et al., 2020; Babiker et al., 2021; Chonwdhury et al., 2021) utilizando diferentes tipos de explante y diversas formulaciones de medios de cultivo (*MC*) que

incluyen combinaciones de reguladores del crecimiento vegetal.

Por lo que el presente trabajo tuvo el objetivo general de revisar el uso de la técnica de cultivo de tejidos aplicada a la propagación de crisantemo, específicamente para la obtención de *PM* de calidad sanitaria y fisiológica. Y como específicos: describir protocolos de micropropagación y revisar el diagnóstico y certificación de plantas libres de patógenos.

Desarrollo

Generalidades del cultivo de tejidos vegetales

El *CTV* permite la manipulación controlada de células, tejidos y órganos de las plantas, técnica que facilita el estudio del comportamiento celular y el análisis detallado de los procesos fisiológicos y genéticos que ocurren en condiciones *in vitro* (González-Rábade et al., 2011). Los avances en biología molecular y celular han impulsado el desarrollo de técnicas de manipulación genética, que profundizan en la comprensión de los mecanismos de crecimiento y desarrollo vegetal en plantas. En las últimas décadas, se han mejorado diversas estrategias con el objetivo de modificar positivamente características morfológicas y fisiológicas como productividad, tolerancia al estrés físico y químico, y resistencia a plagas y enfermedades (Delgado-Paredes et al., 2021).

En las condiciones controladas de cultivo de tejidos, es posible observar con precisión los eventos de división celular y formación de órganos, en respuesta a varios factores tales como composición de *MC*, temperatura, luz y humedad. La regeneración *in vitro* se ha logrado en múltiples variedades utilizando medios basales, diferentes tipos y concentraciones de reguladores de crecimiento (*RC*), aditivos como antioxidantes y otros.

La morfogénesis se desarrolla a partir de una gran variedad de explantes como tallos (nodal e internodal), yemas axilares, hojas, ápices o meristemos apicales, protoplastos, raíces, pedicelos y floretes (Valle-Sandoval et al., 2008). El éxito de este proceso depende en gran medida de la optimización del *MC*, en que se hayan definido la formulación de sales inorgánicas, los componentes

orgánicos como vitaminas, aminoácidos, carbohidratos, los tipos y concentraciones de *RC*, apropiados para cada etapa del esquema de propagación; además de las condiciones de incubación que incluyen los rangos de temperatura, la iluminación en intensidad y fotoperiodo (Eisa et al., 2022).

Características y manejo de la planta madre en la propagación del crisantemo

El *Chrysanthemum* es una planta perenne de la familia Asteraceae que puede alcanzar 1.50 m de altura. Sus hojas son lobuladas o dentadas, con superficie lisa o rugosa y de color verde oscuro o claro (Stace, 1991). Produce inflorescencias en capítulo con una gran diversidad de formas y colores (Vidale, 1983).

La propagación del crisantemo se realiza principalmente mediante esquejes herbáceos obtenidos de las *PM*. Este proceso consta de, 1) la *PM* desarrolla ramas laterales que se cortan como esquejes de consistencia herbácea. homogéneos en tamaño; 2) enraizado de esquejes, se preparan dejando las hojas en la mitad superior del tallo y que se establecen a densidades de 600 a 800 estacas m⁻², en sustratos de densidad baja y alta porosidad; en ambientes de *HR* alta, producido por sistemas de nebulización intermitente en los horarios de mayor temperatura (Enríquez-del Valle et al., 2005). De acuerdo con otros autores esta práctica es elegida por su simplicidad y conservación en la descendencia (Zhang et al., 2013); 3) cultivo para producción de flor. El éxito del proceso depende del abastecimiento continuo de material vegetal inicial de excelente calidad fisiológica y sanitaria (Vences-Contreras et al., 2009).

Gaytan-Acuña et al. (2006) mencionan que los esquejes deben cumplir con estándares de calidad para garantizar un buen desarrollo y producción en invernadero. Durante la propagación, es necesario controlar la presencia de vectores de microorganismos patógenos, ya que los ambientes de enraizamiento favorecen la infección por patógenos de tipo hongos, bacterias y virus. Estas infecciones pueden reducir significativamente los

rendimientos y calidad de las cosechas de las flores (Wise et al., 2020; Eisa et al., 2022).

Una práctica común en el manejo de *PM* es el despunte o eliminación del ápice del tallo (aproximadamente 1 cm del extremo apical) que se realiza entre los 7 y 10 días posteriores al establecimiento en suelo. Esta práctica estimula el desarrollo de brotes a partir de yemas axilares. Una vez que un brote axilar alcanza unos 10 cm de altura, se corta su extremo superior (5-6 cm), el cual se utiliza como esqueje para su enraizamiento (Hartmann y Kester, 1980). Al cortar el esqueje, en la *PM* se procura quede un segmento del tallo con una o dos hojas; ya que en la base del pecíolo de cada hoja se localiza una yema vegetativa que dará origen a un nuevo brote axilar.

La *PM* puede producir entre 14 y 15 esquejes en un período de 10 a 15 semanas. Es fundamental que estos esquejes presenten óptima calidad sanitaria, fisiológica y ausencia de daños físicos. Si las *PM* presentan plagas, enfermedades o deficiencias nutrimentales y estos problemas no se corrigen oportunamente, la calidad de los esquejes se deteriorará progresivamente, afectando los lotes de plantas nuevas y, en consecuencia, una reducción en la calidad y el valor comercial de la cosecha de flores (Enríquez-del Valle et al., 2005; Solano-Báez et al., 2013). Se recomienda renovar la *PM* cada 5 a 6 meses, ya que después de este período la calidad de los esquejes que se obtienen de ésta disminuye notablemente. En México, gran parte del material vegetal para el establecimiento de cultivos agrícolas de crisantemo es importado, lo que incrementa los costos de producción (Olivera et al., 2000).

Metodología del cultivo *in vitro* en crisantemo

La propagación clonal, aplicado a la producción de *PM* de crisantemo, tiene el objetivo de obtener plantas de mayor calidad fitosanitaria (Teixeira et al., 2003). Cuando el objetivo es producir plantas libres de patógenos, es posible iniciar los cultivos *in vitro* mediante el establecimiento de ápices meristemáticos (Mandal et al. 2000; Valle-Sandoval et al. 2008) ya que estos no poseen elementos vasculares desarrollados, dificultando el transporte de partículas virales de los órganos

maduros y enfermos, a los órganos jóvenes en crecimiento activo (Bhojwani y Dantu, 2013).

Para asegurar éxito en obtener plantas libres de patógenos específicos, mediante el uso de *CTV*, es posible aplicar algunos procedimientos complementarios: 1) someter a plantas en invernadero o cámaras de crecimiento a termoterapia, en el rango de 38 a 42 °C, durante periodos de 20-60 días, que ha mostrado ser altamente eficiente en la inactivación de la mayoría de virus de importancia económica (Wang et al., 2018); 2) iniciar los cultivos *in vitro* mediante el establecimiento de ápices meristemáticos, en que se tome en cuenta el tamaño del ápice meristemático lo que se ha demostrado mayor posibilidad de obtener plantas libres de virus específicos (Mori y Hosokawa, 1977; Cha-um et al., 2006); 3) La quimioterapia se basa en el uso de sustancias antivirales como la ribavirina (Virazole®) y el oseltamivir, aplicadas en concentraciones de 10-50 mg L⁻¹, ya sea incorporadas al medio de cultivo (*MC*) o mediante la inmersión de meristemas. La combinación de los procedimientos 1, 2 y 3 es una alternativa eficaz en la erradicación de virus en plátano (*Musa* spp.), papa (*Solanum tuberosum*), vid (*Vitis vinifera*), cítricos y numerosas especies ornamentales (Smith et al., 2017; Wang et al., 2018; Panattoni et al., 2021).

En los sistemas de producción de plantas de crisantemo se ha incluido una etapa de *CTV* para producir *PM* que se obtienen de micropropagación, se transfieren a sustrato e invernadero para su aclimatación, y se tienen varias categorías: 1) bloque básico (primera generación de *PM*, que son plantas micropropagadas a partir de ápices meristemáticos, las que se transfieren de *in vitro* a sustrato para su aclimatación; posteriormente se trasladan a suelo bajo condiciones controladas (generalmente en invernadero protegido) y reciben cuidados rigurosos para garantizar que se mantengan

protegidas de vectores, para mantenerlas en óptimo estado sanitario y fisiológico. 2) Bloque de incremento, segunda generación de *PM*, que se originan del enraizado de esquejes obtenidos de las plantas del bloque básico. La cantidad de plantas de este bloque de incremento es mayor, y se debe cultivar bajo cuidados que conserven su sanidad y calidad fisiológica. También se maneja con controles sanitarios estrictos, así como inspecciones visuales, pruebas de laboratorio, aislamiento; 3) producción final, que a partir del bloque de incremento se obtienen grandes cantidades de esquejes que se enraízan y se entregan a los agricultores como plantas certificadas o de calidad certificada, que se cultivan para producción de flor. Este esquema es el estándar en programas de certificación de material vegetal sano, y permite producir miles de plantas idénticas, libres de virus y de alta calidad (Bello-Bello y Spinoso-Castillo, 2023).

Las técnicas de *CTV* requieren en términos generales se cumplan varios requisitos: 1) condiciones de asepsia; 2) uso de *MC* de composición definida; 3) condiciones físicas de incubación. Los que se describen a continuación.

Condiciones de asepsia. Se describen los métodos de esterilización superficial de explantos (material vegetal con que se inicia el cultivo *in vitro*), materiales de laboratorio, *MC*. El éxito del cultivo *in vitro* de *Chrysanthemum morifolium* depende en gran medida de la esterilización efectiva de explantos y del material de laboratorio.

Como requisito para el establecimiento *in vitro* de crisantemo, se espera excluir patógenos y obtener cultivos asépticos (Tabla 1); por lo anterior, se describen los procedimientos para desinfección superficial de los tejidos y órganos vegetales de crisantemo (Tabla 2) y procedimientos aplicados en tejidos (Tabla 3).

Tabla 1. Tipo de explante del material vegetal y procedimiento de esterilización superficial en preparación a su establecimiento *in vitro* en tejidos- órganos de crisantemo.

Explante	Modificación clave	Tasa de éxito	Referencia
Hojas	Inmersión en NaOCl 1.0 % durante 5 min + 0.1 % HgCl ₂ durante 3 min. Seguido de enjuagues con agua esterilizada.	92 % sin contaminación	Manokari et al. (2023)
Pétalos	Inmersión en NaOCl 1.0 % durante 5–7 min + antioxidante (100 mg L ⁻¹ ácido ascórbico). Seguido de enjuagues con agua esterilizada.	90 % regeneración	Li et al. (2024)
Yemas axilares	Inmersión en NaOCl 2.0 % durante 10 min + etanol al 70 % durante 30 segundos. Seguido de enjuagues con agua esterilizada.	96 % supervivencia	Waseem et al. (2022)
Tallos con callo previo	Inmersión en NaOCl 2.5 % durante 15 min + AgNO ₃ 5 mg L ⁻¹ en medio (post-esterilización). Seguido de enjuagues con agua esterilizada.	< 1 % contaminación	Kim et al. (2023)

Nota: El HgCl₂ (cloruro mercuríco) es altamente efectivo pero tóxico.

Tabla 2. Pasos de un procedimiento para realizar la desinfección superficial del material vegetal de crisantemo

Paso	Procedimiento	Tiempo (min)	Observaciones
1	Selección y prelavado	30–60	Tomar explantes jóvenes (4–6 semanas) de <i>PM</i> sanas. Lavar con agua corriente + 2–3 gotas de detergente líquido (Tween 20 o jabón neutro).
2	Desinfección inicial	1–2	Sumergir en etanol 70 % con agitación suave.
3	Enjuague estéril	3 × 1	Agua destilada estéril.
4	Esterilización principal	8–12	Hipoclorito de sodio (NaOCl) 1.5–2.0 % + 2 gotas Tween 20/100 mL. Agitación constante.
5	Enjuague final	4 × 1	Agua destilada estéril.
6	Secado	1–2	Sobre papel estéril en cabina de flujo laminar.

(Adaptado de Naing et al., 2021; Manokari et al., 2023; Li et al., 2024). *PM* = plantas madre.

Los cultivos de la etapa de establecimiento de cultivos asépticos se colocan en incubación y en el transcurso de hasta seis semanas se eliminan aquellos que se contaminan por hongos o bacterias, y otros cultivos que hayan muerto debido a daños por el procedimiento de desinfección en la etapa de establecimiento de cultivos *in vitro*. Los cultivos que se hayan logrado asépticos y viables, se observan respuestas de división celular y desarrollo de órganos (tallos con

yemas axilares, formación de raíces adventicias). De los órganos que hayan desarrollado, se continúa con inducir su proliferación por lo que el material vegetal se extrae de su cultivo *in vitro* y en condiciones asépticas de la campana de aire filtrado de flujo laminar horizontal, el uso de materiales y herramientas esterilizados, son cortados y transferidos- subcultivados a otros recipientes *in vitro*, en donde continúe la proliferación de propágulos (Tabla 4).

Tabla 3. Tratamientos de desinfección superficial aplicados a tejidos de crisantemos y niveles de éxito obtenidos para lograr cultivos asépticos.

Estrategia	Aplicación	Eficacia	Referencia
Antibióticos en medio	Cefotaxima 200-500 mg L ⁻¹	Reduce 70–90 %	Naing et al. (2021)
Nanopartículas de plata (AgNPs)	4-7.5 mg L ⁻¹ en medio Murashige & Skoog, 1962 (MS)	98 % control, sin fitotoxicidad	Manokari et al. (2023)
Dióxido de cloro	0.01 mg L ⁻¹ ClO ₂	La supervivencia del trasplante alcanzó el 100 %	Tian et al. (2022)
Cultivo en oscuridad inicial	7 días a 25 °C	Reduce estrés oxidativo y contaminación	Li et al. (2024)

Tabla 4. Esterilización de material de laboratorio.

Material	Método de esterilización	Condiciones	Frecuencia
Frascos, tapaderas, tubos	Autoclave	121 °C, 1.05 kg cm ⁻² , 15–20 min	Cada uso
Pinzas, bisturí, tijeras	Autoclave o esterilización en calor seco	121 °C (15 min)	Cada uso
Superficies de trabajo	Lámpara UV + etanol 70 %	UV 30 min + limpieza con etanol	Antes y después
Agua destilada / medios	Autoclave	121 °C, 15 min	Siempre
Pipetas, puntas	Desechables estériles o autoclave en bolsa	121 °C, 1.05 kg cm ⁻² , 15–20 min	Cada lote

Uso de *MC* de composición definida que mediante experimentación al comparar diferentes mezclas se determinó una como la más adecuada para el crecimiento óptimo de células o tejidos en condiciones controladas *in vitro*. Existen numerosas formulaciones de sales inorgánicas para *CTV*, y la formulación de sales inorgánicas *MS* es de las más usadas para numerosas especies vegetales. Las sales minerales se complementan con vitaminas, *RC* vegetal, fuente de carbono (sacarosa). El pH se ajusta entre 5.7 a 5.8 antes de agregar el agente gelificante, que se disuelve y distribuye a los recipientes. Posteriormente se somete a esterilización por autoclave (121 °C, 15-20 min). Las formulaciones varían según el cultivar, el tipo de explante, el tipo de respuesta que se espera, ya sea proliferación de brotes,

organogénesis, o enraizamiento (Rodríguez et al., 2014).

Para la regeneración *in vitro* de once cultivares de crisantemo (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev) a partir de meristemas apicales, éstos se establecieron en *MC* con las sales inorgánicas *MS*, 0.4 mg L⁻¹ de tiamina-HCl, 100 mg L⁻¹ de mio-inositol, 30 g L⁻¹ de sacarosa, en que se usaron combinaciones de ácido naftalenacético (ANA) en cuatro concentraciones (0.01, 0.02, 0.03 y 0.04 mg L⁻¹) y de Kinetina (K) (0.5, 1.0 y 1.5 mg L⁻¹). El pH ajustado a 5.8 antes de agregar 6.5 g L⁻¹ de agar (Vences-Contreras et al., 2009). Mientras que para la regeneración *in vitro* de *D. grandiflora* var. Micromargara, se usó *MC* con las sales minerales *MS* suplementado con 4.4 µM de BAP, 2.2 g L⁻¹ de gelrite, y 0, 15 o 30 g L⁻¹ de sacarosa (Cruz et

al., 2016). También se ha evaluado el desarrollo *in vitro* de propágulos de crisantemo a partir de segmentos de tallo establecidos en *MC* con sales inorgánicas MS, suplementado con ácido α -naftalenacético y bencilaminopurina (0.5 y 1.0 mg L⁻¹), los que conservaron fidelidad clonal tras micropropagación, durante subcultivos repetidos (Jevremovic y Radojevic, 2004). Para obtener la regeneración directa *in vitro* de, *D. × grandiflorum* cv. Kitam, segmentos de tallo se establecieron en *MC* con las sales inorgánicas MS, con 3 % de sacarosa, 2.0 ó 3.0 mg L⁻¹ de BAP, y 0.1 a 1.8 mg L⁻¹ de AIA, y 0.6 % de agar. Posteriormente, para inducir que los brotes formasen raíces adventicias, estos se colocaron en el medio MS basal al 50 % de sus sales, 1.5 % de sacarosa y 0.6 % de agar (Valle-Sandoval et al., 2008). Pant et al. (2015) reportaron un método sencillo y económico para la propagación *in vitro*, masiva de *Chrysanthemum morifolium*, al usar *MC* con sales inorgánicas MS suplementado con una baja concentración de BAP. En el *MC* se usó cáscara de psilio y azúcar comercial como alternativas que sustituyeron al agar y la sacarosa purificada.

Condiciones físicas de incubación. En complemento a la composición del *MC* y para lograr una respuesta determinada, es necesario el control de las condiciones físicas de incubación: rango de temperatura, iluminación (intensidad, fotoperiodo, calidad), gases componentes de la atmosfera *in vitro*.

Etapas de un esquema de propagación *in vitro*

Un esquema de propagación clonal *in vitro* de crisantemo incluye las etapas siguientes:

Etapas 0, de selección de material vegetal y su preparación para el cultivo *in vitro*. Consiste en seleccionar una planta sobresaliente y sana, la que se establece en invernadero o vivero, donde se somete durante varias semanas a condiciones ambientales: iluminación, abastecimiento de agua y nutrimentos en cantidades apropiadas, control de plagas y enfermedades, para mejorar su condición de sanidad y fisiológica, y ya cumplido este requisito, esta planta será el orteto, donadora de los tejidos, órganos, que se usarán en el sistema de propagación (Wang et al., 2020).

Etapas I, de establecimiento de cultivos asépticos. En esta etapa los tejidos vegetales obtenidos de la planta orteto, se someten a desinfección superficial y se establecen *in vitro*. En el caso de crisantemo, variedad 'White Reagan' se usaron tejidos de hoja y segmentos nodales, que su desinfección superficial consistió de la secuencia siguiente: lavado con agua y detergente, seguido de inmersión en etanol al 70 % por 30 segundos y posterior inmersión en hipoclorito de sodio al 1 % durante 10 minutos; enjuagues con agua esterilizada. Los tejidos vegetales se establecieron en *MC* que contenía sales y vitaminas MS, 30 g L⁻¹ de sacarosa, 1 mg L⁻¹ de BAP, 7 g L⁻¹ de agar. Los cultivos *in vitro* se incubaron durante 21 días en condiciones de fotoperiodo de 16 horas luz/ 8 h oscuridad y temperatura de 25 ± 2 °C. En tales condiciones se logró que 85 % de los explantos se lograsen asépticos y en 70 % de éstos ocurrió la formación de callos (González et al., 2020). Además de lograr cultivos asépticos *in vitro*, se espera que en los tejidos vegetales ocurran división celular y formación de órganos (brotes axilares, brotes adventicios, raíces, embriones somáticos).

Etapas II, de proliferación de propágulos. Tiene como objetivo la producción masiva de brotes axilares o adventicios a partir de las células, órganos que se formaron durante la Etapa I. Entonces, en condiciones asépticas los órganos se cortan en segmentos para establecerlos en medio de cultivo para inducir alguna respuesta de morfogénesis, como la activación de meristemas, la organogénesis (Teixeira et al., 2021) que, en el caso de crisantemo, se obtuvieron nuevos brotes a partir de segmentos de tallo con yemas axilares (Yesmin et al., 2014). En esta fase, los explantos que, en la etapa I lograron establecerse asépticamente, se transfirieron a un *MC* para promover la brotación de múltiples yemas axilares, compuesto por sales minerales y vitaminas MS, 30 g L⁻¹ de sacarosa, 7 g L⁻¹ de agar, 1.5 mg L⁻¹ de BAP (bencilaminopurina) y 0.1 mg L⁻¹ de ANA (ácido naftalenoacético) (Lim et al., 2019). En crisantemo cv. Euro, los cultivos se incubaron bajo fotoperiodo de 16 h luz, temperatura de 25 ± 2 °C y humedad relativa del 60–70 % durante cuatro semanas. En estas condiciones, se

observó el desarrollo de 4.2 brotes por explanto (INIFAP, 2023). Vences-Contreras et al. (2009) cultivaron *in vitro* diversas variedades de crisantemo (*D. grandiflora* Tzvelev.) Eleonora amarilla y blanca, Indianápolis blanco, margarita ocre, coral y roja, puma amarillo y blanco, spider blanco y vikingo amarillo, que son las más cultivadas comercialmente en la zona florícola de Villa Guerrero, Estado de México. Para la etapa I se usaron ápices meristemáticos, que se establecieron en MC que contenían las sales inorgánicas de MS, 0,4 mg L⁻¹ de tiamina-HCl, 100 mg L⁻¹ de mio-inositol, 30 g L⁻¹ de sacarosa y diversas combinaciones de BAP y ANA, el pH fue ajustado a 5.7– 5.8 antes de agregar 6.5 g L⁻¹ de agar (Enríquez-del Valle et al., 2005). Los cultivos se incubaron durante 30 días en condiciones de temperatura promedio de 25 ± 2 °C, y fotoperiodo de 16 h luz (lámparas de luz blanca fría fluorescente, con intensidad lumínica de 50 μmol m⁻² s⁻¹) y ocho horas de oscuridad. En el periodo citado se observaron diferencias en el factor de multiplicación desde I:8 hasta I:29, con las variedades más productivas: Puma amarillo y Vikingo amarillo. Diversos estudios han demostrado que no existe una combinación óptima estándar de RC aplicable para todas las variedades, debido a la fuerte influencia del factor genotípico (Teixeira, 2003).

Etapa III, enraizado de brotes y preparación para trasplante a suelo. Los tallos-brotes en cultivo *in vitro*, se establecen en un MC que favorece el desarrollo de raíces adventicias o embriones somáticos para formar plántulas completas, como paso previo a que las plantas se transfieran a macetas con sustrato. Brotes de crisantemo cv. Euro fueron transferidos a un MC compuesto por las sales inorgánicas MS a mitad de concentración, 20 g L⁻¹ de sacarosa, 1 mg L⁻¹ de AIB (ácido indolbutírico) y 7 g L⁻¹ de agar. Los cultivos *in vitro* se incubaron durante 21 días en condiciones similares a las etapas anteriores, y 90 % de los brotes formaron raíces adventicias (INIFAP, 2023).

Etapa IV, de aclimatación de plantas micropropagadas. Grattapaglia y Machado (1998) indican que la aclimatación es importante debido

a que las plantas obtenidas *in vitro* presentan escasa o nula formación de ceras epicuticulares, estomas ineficientes en su apertura y cierre, raíces poco eficientes para absorción de agua, y actividad fotosintética reducida, por lo que son susceptibles a estrés de trasplante y no controlan la pérdida de agua en caso de establecerlas en un ambiente de vivero o campo. Por lo que las vitroplantas deben ser establecidas en un ambiente que permita su adaptación gradual, en que se promuevan cambios morfológicos y fisiológicos hasta que las plantas presenten características apropiadas para su establecimiento en vivero (Ritchie et al., 1991). Enríquez-del Valle et al. (2005) propagaron *in vitro* plantas de *Dendranthema grandiflora* cv. Polaris White, las plántulas se extrajeron del MC, se lavaron cuidadosamente para eliminar residuos de agar y trasplantaron a un sustrato compuesto por 100 % tierra de monte, sin aplicación de fertilizante mineral. Las plantas se mantuvieron en condiciones de radiación solar reducida al 50 %, con alta humedad relativa e iluminación incandescente de 100 W m⁻² por 4 h nocturnas. Durante las cinco semanas siguientes se realizó una reducción gradual de la humedad hasta alcanzar condiciones similares al ambiente *ex vitro*. La tasa de supervivencia durante la aclimatación fue del 95 %.

Durante la adaptación ocurren cambios fisiológicos y morfológicos en las plantas. En condiciones *in vitro* los propágulos vegetales están expuestos a intensidades de iluminación reducidas, 20 a 50 μmol m⁻² s⁻¹, y en estas condiciones desarrollan tallos delgados y de entrenudos largos. Las hojas de las plantas son pequeñas, de poco grosor y tienen mayor concentración de clorofila. A nivel fisiológico, las plantas reducen su punto de compensación de luz para equilibrar la actividad fotosintética reducida (Ferrante y Mariani, 2018). En condiciones de intemperie las plantas estarán expuestas a irradiancias de 1000 a 1500 μmol m⁻² s⁻¹, por lo que al extraerlas del cultivo *in vitro* se les debe exponer gradualmente a irradiancias cada vez mayores.

El CTV se ha aplicado en crisantemo desde hace 40 años, y aun se publican reportes de investigaciones relacionadas con la biología del

desarrollo en esta especie. Plantas de crisantemo var. Zembra que en condiciones de invernadero estuvieron expuestas a intensidades de iluminación de $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, su actividad fotosintética fue de $4.5 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Casierra-Posada et al., 2013). Se evaluó la nutrición de plantas de *Dendranthema grandiflora* obtenidas *in vitro*, que durante su aclimatación en invernadero se irrigaron con diversas diluciones de solución nutritiva. Las plantas mostraron diferencias de crecimiento en relación positiva a la cantidad de nutrimentos que se les suministró en el riego (Enríquez-del Valle et al., 2005).

Diagnóstico y certificación de plantas libres de patógenos

El diagnóstico y la certificación de plantas libres de patógenos son procesos para garantizar la sanidad vegetal, prevenir la diseminación de enfermedades y cumplir con las regulaciones fitosanitarias nacionales e internacionales. Implica implementar procedimientos indicados en Normas, complementado con actividades reguladas por organismos oficiales que incluyen la inspección visual y métodos de laboratorio avanzados.

Los documentos de NOM-EM-021-FITO-1994, Ley Federal de Producción, Certificación y Comercio de Semillas (LFPCCS), Regla para la Calificación de Semilla de Crisantemo y Reglamento de la LFPCCS, forman un marco normativo interconectado en México para garantizar la sanidad vegetal en el cultivo de crisantemos, con énfasis en el diagnóstico (detección y vigilancia de patógenos como hongos, virus y plagas) y la certificación (verificación oficial de ausencia de patógenos para material de propagación). Este enfoque es crítico para la exportación, ya que el crisantemo es una flor de corte de alto valor, vulnerable a enfermedades cuarentenarias (SENASICA, 2023).

La producción de material de propagación de crisantemo en México debe cumplir obligatoriamente con la NOM-EM-021-FITO-1995, que establece el uso de casas-malla antiáfidos y monitoreo semanal (DOF, 25-10-1994). Además, la LFPCCS obliga a que todo

esqueje comercializado o exportado cuente con certificación oficial de categoría “Certificada” (DOF, 15-06-2007; Última Reforma DOF, 11-05-2018). El procedimiento operativo específico para la calificación de lotes se encuentra detallado en la regla para la calificación de semilla de crisantemo (SNICS, 2014), mientras que los requisitos de muestreo y diagnóstico más actualizados están en los lineamientos técnicos vigentes del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA, 2023).

Normas de calidad y certificación fitosanitaria

La certificación es un proceso formal que se basa en los resultados del diagnóstico y el cumplimiento de estándares específicos. Estándares y Normativas: La producción de material vegetal certificado debe cumplir con Normas Oficiales Mexicanas y estándares internacionales, que establecen los requisitos fitosanitarios para la producción, movilización e importación/exportación de plantas.

En México, el SENASICA es el organismo oficial encargado de regular y emitir certificados fitosanitarios. También existen organismos de certificación privados acreditados que realizan auditorías para garantizar la conformidad con las normas. Es de observancia general en toda la República Mexicana. Su aplicación corresponde a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, hoy SADER) a través del Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS). No se registran reformas mayores posteriores a 2011 hasta noviembre de 2025 (DOF, 15-06-2007; Última Reforma DOF, 11-05-2018).

La LFPCCS tiene por objetivo regular la producción de semillas certificadas, su calificación y comercialización, con el fin de fomentar la planeación agrícola, elevar el rendimiento y calidad de las cosechas, y promover el uso de semillas de alta calidad. Se alinea con el artículo 27 constitucional y la Ley de Desarrollo Rural Sustentable. Prioriza el acceso a semillas para pequeños productores, la investigación y la coordinación intersectorial, sujetándose a

Tabla 5. Factores de calidad y niveles mínimos

Factor	Descripción	Niveles mínimos (Básica, Registrada, Certificada)	Habilitada
Genética	Pureza varietal por Guía Técnica UPOV-armonizada; verificación en floración. ^o	Ausencia de off-types (> límites por inspección); identidad al 100 %.	No cumple total, pero inspeccionada.
Física	Longitud esquejes (6-8 cm), raíces (2-5 cm, blancas); vigor visual bueno.	≥ 90 % enraizadas; madurez fisiológica, sin deficiencias.	< 90 % enraizadas, pero viables.
Fisiológica	PM vegetativas (iluminación nocturna); vida útil ≤ 9 meses (máx. 40 esquejes/planta).	Máx. 3 generaciones <i>in vitro</i> (6 meses c/u); sin yemas prematuras ni callo.	Cumple parcial; para incremento propio.
Fitosanitaria	Libre de plagas (insectos, nematodos), enfermedades (roya, botritis), virus y hongos.	Ausencia total de roya/virus; fungicida de amplio espectro aplicado.	Inspeccionada, pero posible presencia mínima.

presupuestos federales (DOF, 15-06-2007; Última Reforma DOF, 11-05-2018). Para efectos de esta Ley, se define como semilla la obtenida del fruto después de la fecundación de la flor, de los frutos o partes de éstos, así como partes de vegetales o vegetales enteros utilizados para la reproducción y propagación de las diferentes especies vegetales.

Regla para la calificación de semilla de crisantemo (*Chrysanthemum × hortorum*) RLFPCCS, emitida por el SNICS, con el objetivo de establecer criterios, procedimientos y especificaciones para calificar semillas y material de propagación (esquejes y plantas) (Tabla 5), asegurando calidad genética, física, fisiológica y fitosanitaria. Facilita la producción, distribución y comercio, con énfasis en propagación vegetativa. (SNICS, 2014).

En el ámbito de aplicación y comercializadores de esquejes, plantas micropropagadas y material para producción comercial, cubre categorías de calificación para variedades registradas en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales. El cual excluye semillas botánicas; enfocado en esquejes (6-8 cm) y cultivo *in vitro* y para importaciones: Requiere etiqueta de certificación del país origen y Certificado Fitosanitario, cumpliendo Normas Oficiales Fitosanitarias Mexicanas (DOF, 02-09-2011)

Comentarios finales

El crisantemo es de las flores de corte más importantes a nivel mundial y nacional, destacando México como uno de los principales productores. Sin embargo, la propagación convencional mediante plantas madre de las que se cortan ramas de consistencia herbácea para su uso como estacas (esquejes) que se induce su enraizado, presenta limitaciones significativas: acumulación progresiva de patógenos (hongos, bacterias y especialmente virus), pérdida de vigor fisiológico, baja *TM* y dependencia estacional, lo que incrementa los costos de producción y reduce la calidad comercial de la flor.

El cultivo de tejidos vegetales, aplicado a la micropropagación clonal de crisantemo, inicia con el cultivo de ápices meristemáticos y el posterior incremento de propágulos a través de brotes axilares y organogénesis, es una solución biotecnológica eficiente para la producción masiva de plantas madre elites libres de patógenos y genéticamente uniformes. Se tienen protocolos de micropropagación de crisantemo en que se describen los tejidos a usar, las condiciones de medio de cultivo e incubación; posteriormente las condiciones para la aclimatación en invernadero de las plantas micropropagadas y el posterior establecimiento de las plantas en suelo e

invernadero para cultivarlas como plantas madre-orteto. La integración de estas técnicas en los programas de producción comercial garantiza la producción de material vegetal sano y fiel al tipo, que además reduciría la dependencia de importaciones, y mejora la competitividad de los floricultores mexicanos, contribuyendo a la sostenibilidad del sector al minimizar el uso de agroquímicos para el control de enfermedades. Futuras investigaciones deberán enfocarse en optimizar protocolos específicos por cultivar, evaluar el comportamiento en campo de las plantas micropropagadas, e incorporar herramientas complementarias como termoterapia y quimioterapia para la eliminación total de viroides y virus de difícil eliminación.

Agradecimientos

El presente trabajo fue posible gracias al apoyo financiero de la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), que otorgó a la primera autora una Beca Nacional para estudios de posgrado en México.

Referencias

Azadi, P., Bagheri, H., Nalouisi, A. M., Nazari, F. & Chandler, S. F. (2016). Current status and biotechnological advances in genetic engineering of ornamental plants. *Biotechnology Advances*, 34(6), 1073-1090. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.06.006>

Babiker, Y. F., Elorky, M. G., Elmokadem, H. E., El-Naggar, H. M. and Meheissen, M. A. M. (2021). Establishment of callus cultures of *chrysanthemum* (*Dendranthema × grandiflorum*) var. 'Zembla yellow'. *Alexandria Journal of Agricultural Sciences*, 66(5), 123-132.

Bello-Bello, J. J. & Spinoso-Castillo, J. L. (2023). Utilización de nanopartículas de plata en la micropropagación de plantas. *Mundo nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 16(30), e00063.

<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69692>

Bhojwani, S. S. & Dantu, P. K. (2013). Production of virus-free plants. Springer. *In Plant tissue culture: An introductory text*. pp. 227-243. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1026-9_16.

Casierra-Posada, F., Peña-Olarte, J. E. & Cardona-Ayala, C. E. (2013). Respuesta fotosintética de plantas de crisantemo (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) cv. Zembla a diferentes intensidades lumínicas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(1), 47-56. <https://doi.org/10.17584/rcch.2013v7i1.1975>

Castello, I., D'Emilio, A., Baglieri, A., Polizzi, G. & Vitale, A. (2022). Management of Verticillium wilt of *chrysanthemum* through VIF soil mulching combined with reduced-dose fumigation. *Agriculture*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/agriculture12020141>

Cha-um, S., Hien, N. T. & Kirdmanee, C. (2006). Disease-free production of sugarcane varieties (*Saccharum officinarum* L.) using *in vitro* meristem culture. *Biotechnology*, 5(4), 443-448.

Chonwdhury, J., Hoque, M. I. y Sarker, R. H. (2021). Development of an efficient *in vitro* regeneration protocol for *Chrysanthemum* (*Chrysanthemum morifolium* Ramat). *Plant Tissue Culture and Biotechnolgy*, 31, 161-171. <https://doi.org/10.3329/ptcb.v31i2.57344>

Cruz, Y. N., Chi-Sánchez, F., Uc-Várguez, A., Ramos-Díaz, A. & Cano-Sosa, J. (2016). Regeneración *in vitro* y transformación genética del crisantemo (*Dendranthema grandiflora* var. micromargara). *Mexican Journal of Biotechnology*, 1(1), 51-59.

Delgado-Paredes, G. E., Vásquez-Díaz, C., Esquerre-Ibañez, B., Bazán-Sernaqué, P. & Rojas-Idrogo, C. (2021). Cultivo de tejidos *in vitro* en propagación de plantas y conservación de germoplasma de especies económicamente importantes en el Perú. *Scientia Agropecuaria*, 12(3), 337-349.

- <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.037>
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (1994, octubre 25). NORMA Oficial Mexicana (con carácter de emergencia) NOM-EM-021-FITO-1994, por la que se establece con carácter obligatorio la campaña de prevención y acción contra la plaga denominada roya blanca del crisantemo. 25-10-1994. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/mex13097.pdf>
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2007, junio 15; Última Reforma, 2018, noviembre 05). Ley Federal de Producción, Certificación y Comercio de Semillas [LFPCCS], 15-06-2007. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFPCCS_110518.pdf
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2011, septiembre 2). Reglamento de la Ley Federal de Producción, Certificación y Comercio de Semillas. Nuevo Reglamento 02-09-2011. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LFPCCS.pdf
- Eisa, E. A., Tilly-Mándy, A., Honfi, P., Shala, A. Y., & Gururani, M. A. (2022). *Chrysanthemum*: A comprehensive review on recent developments in *in vitro* regeneration. *Biology*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/biology11121774>
- Enriquez-del Valle, J. R., Velásquez, B., Vallejo, A. R., & Velasco, V. A. (2005). Nutrición de plantas de *Dendranthema grandiflora* obtenidas *in vitro* durante su aclimatación en invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(4), 337–383.
- Ferrante, A. & Mariani, L. (2018). Agronomic management for enhancing plant tolerance to abiotic stresses: High and low values of temperature, light intensity, and relative humidity. *Horticulturae*, 4(3), 21. <https://doi.org/10.3390/horticulturae403021>
- García-Velasco, R., Zavaleta, E., Rojas, R. I., Leyva, S. G., Simpson, J. K., & Fuentes, D. G. (2005). Antagonismo de *Cladosporium* sp. contra *Puccinia horiana* Henn. causante de la roya blanca del crisantemo (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev). *Revista Mexicana de Fitopatología*, 23, 79–86.
- Gaytan-Acuña, E. A., Ochoa-Martínez, D. L., García-Velasco, R., Zavaleta-Mejía, E. & Mora-Aguilera, G. (2006). Producción y calidad comercial de flor de crisantemo. *Terra Latinoamericana*, 24(4), 541–548.
- González-Rábade, N., Badillo-Corona, J. A., Aranda-Barradas, J. S. & Oliver-Salvador, M. del C. (2011). Production of plant proteases *in vivo* and *in vitro* — A review. *Biotechnology Advances*, 29(6), 983–996. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.08.017>
- González, A., Pérez, M., & Ramírez, L. (2020). Establecimiento *in vitro* de tejidos de crisantemo (*Chrysanthemum morifolium*) para micropropagación. *Revista de Biotecnología Vegetal*, 20(3), 45–52.
- Grattapaglia, D. & Machado, M. A. (1998). Micropropagação. En A. C. Torres, L. S. Caldas, & J. A. Buso (Eds.), *Cultura de tejidos y transformación genética de plantas* (1). 509–564. EMBRAPA.
- Hartmann, H. T. & Kester, D. E. (1980). *Propagación de plantas: Principios y prácticas* (A. M. Ambrosio, Trad.). Continental.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) (2023). Protocolo de micropropagación de crisantemo (*Dendranthema grandiflorum*) cv. Euro' para producción de plantas libres de virus (Protocolos de Biotecnología Vegetal No. 15). *Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural*. https://www.inifap.gob.mx/publicaciones/Documentos/Protocolo_micropropagacion_crisantemo_cv_Euro_2023.pdf
- Jevremovic S. y Radojevic, L.J. (2004). Producción masiva de diferentes cultivares de crisantemo (*Chrysanthemum morifolium*) mediante cultivo *in vitro*. *Journal of Agriculture Sciences Research*, 65, 47–54.
- Kim, H. J., Lee, S. Y., Park, J. W., & Kim, M. S. (2023). Post-sterilization supplementation of AgNO₃ in medium enhances endogenous contamination control in stem explants with

- pre-induced callus for woody plant micropropagation. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 152(1), 89–102. <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02415-8>
- Kondo, T., Yamashita, K., & Sugiyama, S. (2011). First report of Impatiens necrotic spot virus infecting chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium*) in Japan. *Journal of General Plant Pathology*, 77(4), 263–265. <https://doi.org/10.1007/s10327-011-0317-y>
- Leyva-Mir, S. G., Lora-Trejo, I., Cárdenas-Soriano, E. & Valdovinos-Ponce, G. (2001). Patogénesis de la roya blanca *Puccinia horiana* Henn. en una variedad susceptible de crisantemo [*Chrysanthemum morifolium* (Ramat.) Hemsl.]. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 19(2), 191–196.
- Li, J., Wang, Y., Zhang, H. & Chen, X. (2024). Initial dark incubation mitigates oxidative stress and microbial contamination in plant tissue culture: Insights from physiological and molecular analyses. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 158(3), 45. <https://doi.org/10.1007/s11240-024-02678-9>
- Lim, J. H., Kim, Y. J. & Park, Y. G. (2019). Effect of cytokinins and auxins on shoot multiplication of *chrysanthemum* cultivars. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 60(4), 523–531. <https://doi.org/10.1007/s13580-019-00145-7>
- Linares, H. (2005). *El cultivo del crisantemo*. Programa de Jóvenes Emprendedores Rurales.
- Mandal, A. K. A., Chakrabarty, D., & Datta, S. K. (2000). Application of *in vitro* techniques in mutation breeding of *chrysanthemum*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 60(1), 33–38. <https://doi.org/10.1023/A:1006459930178>
- Manokari, M., Cokul Raj, M., Dey, A., Faisal, M., Alatar, A. A., Joshee, N., & Shekhawat, M. S. (2023). Silver nanoparticles improved morphogenesis, biochemical profile and micro-morphology of *Gaillardia pulchella* Foug cv. 'Torch Yellow'. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 154(1), 123–135. <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02502-w>
- Mehedi, M. N.H., Mitu, N., Robbani, M., Sukhi, K. F. N., Rahman, M.H. S. y Noor, M. A. (2020). Impact of different explants and growth regulators on *in vitro* regeneration of *Chrysanthemum*. *Asian Journal of Biochemistry, Genetics and Molecular Biology*, 4(4), 10–8. <https://doi.org/10.9734/ajbgmb/2020/v4i430112>
- Mori, K. & Hosokawa, D. (1977). Localization of viruses in apical meristem and production of virus-free plants by means of meristem and tissue culture. En *Symposium on Tissue Culture for Horticultural Purposes* (pp. 389–396).
- Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
- Naing, A.H., Park, Il. K., Chung, M.Y., Lim, K.B. and Kim, C.K. (2016). Optimización de los factores que afectan la regeneración eficiente de brotes en crisantemo cv. Shinma. *Brazilian Journal of Botany*, 39, 975–984. <https://doi.org/10.1007/s40415-015-0143-0>
- Naing, A. H., Sharmin, U., Soe, M. M. H., Lwin, K. H., & Khan, M. S. H. (2021). Antibiotics and Plant Preservative Mixture (PPM™) in contamination control of plant tissue culture: Efficacy and phytotoxicity. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 145(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11240-021-02045-7>
- Olivera, V. Z., Gutiérrez, M. A., Gutiérrez, J. A., & Andrade, M. (2000). Cultivo *in vitro* de gerbera (*Gerbera jamesonii* H. Bolus) y su aclimatación en invernadero. *Bioagro*, 12(3), 75–80.
- Pant M., Lal, A. & Jain, R. (2015). Un método sencillo y económico para la propagación

- masiva de *Chrysanthemum morifolium* y evaluación de la actividad antibacteriana de plántulas cultivadas *in vitro*. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 5, 103–111. <https://doi.org/10.7324/JAPS.2015.50716>
- Panattoni, A., Ferrada, F., D'Anna, F. & Triolo, E. (2021). Combined thermotherapy and chemotherapy for virus elimination in woody fruit plants: A review. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 146(3), 423–439. <https://doi.org/10.1007/s11240-021-02092-0>
- Quiroz, K. A., Berríos, M., Carrasco, B., Remales, J. B., Caligari, P. D. S. & García-González, R. (2017). Meristem culture and subsequent micropropagation of Chilean strawberry (*Fragaria chiloensis* (L.) Duch.). *Biological Research*, 50. <https://doi.org/10.1186/s40659-017-0130-7>
- Ram, R., Verma, N., Kumar, K., Kulshrestha, S., Raikhy, G., Hallan, V., & Zaidi, A. A. (2009). Molecular studies on *Tomato aspermy* virus isolates infecting chrysanthemums. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 42(2), 99–111. <https://doi.org/10.1080/03235400600951779>
- Ritchie, G., Short, K. C., & Davey, M. R. (1991). *In vitro* acclimatization of *chrysanthemum* and sugar beet plantlets by treatment with paclobutrazol and exposure to reduced humidity. *Journal of Experimental Botany*, 42(245), 1557–1561.
- Rodríguez, M., Chacón, M., & Carrillo, R. (2014). Efecto de la concentración y de los componentes del medio de cultivo MS sobre la germinación *in vitro* de *Ugni molinae*. *Bosque*, 35(1), 119–122. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000100012>
- SENASICA (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria) (2023). (2025, agosto 8). *Normas Oficiales Mexicanas en materia de sanidad vegetal. <https://www.gob.mx/senasica/documentos/normas-oficiales-mexicanas-en-materia-de-sanidad-vegetal>
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2023). (2025, 8 de mayo). *Ornamentos, la belleza también se expresa en datos*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/891793/Brochure_Ornamentos_Feb_2024.pdf
- Smith, I. M., Lozano, I., & Jones, R. A. C. (2017). Thermotherapy and chemotherapy for virus elimination in plants: Principles and applications. En M. A. Mayo & C. A. Ryan (Eds.), *Plant virology protocols* (3rd ed., pp. 215–238). Academic Press. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7315-0_12
- SNICS (Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas). (2014). Regla para la calificación de semilla de crisantemo (*Chrysanthemum spp.*). Dirección General de Sanidad Vegetal. <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/172408/Crisantemo.pdf>
- Solano-Báez, R. G., Barrales-Cureño, H. J., Cortés-Flores, J. I., & Enríquez-del Valle, J. R. (2013). Producción de esquejes en plantas madre de crisantemo (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev) bajo condiciones de invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 19(3), 287–298. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2012.10.047>
- Song, J. Y., Mattson, N.S y Jeong, B. R. (2011). Efficiency of shoot regeneration from leaf, stem, petiole and petal explants of six cultivars of *Chrysanthemum morifolium*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 107(7), 295–304.
- Stace, C. A. (1991). *Plant Taxonomy and Biosystematics* (2ª edición). Cambridge University Press, Cambridge. 279.
- Teixeira da Silva, J. A. (2003). *Chrysanthemum*: advances in tissue culture, cryopreservation, postharvest technology, genetics and transgenic biotechnology. *Biotechnology Advances*, 21(8), 715–766.

- [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(03\)00117-4](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(03)00117-4)
- Teixeira da Silva, J. A., Kher, M. M., Soner, D., & Nataraj, M. (2021). Advances in *chrysanthemum* tissue culture: A review. *Scientia Horticulturae*, 285, Article 110234. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110234>
- Tian, C., Xie, Z., Zhao, Y., Zhang, Z., Xue, T., Sheng, W., Zhao, F. y Duan, Y. (2022). Una concentración de dióxido de cloro de grado microgramo induce la regeneración vegetal en un solo paso en crisantemos. *In Vitro Cell. Dev. Biol.-Plant* 58, 1138–1144. <https://doi.org/10.1007/s11627-022-10295-4>
- Valdez-Aguilar, L. A., Hernández-Pérez, A., Alvarado-Camarillo, D., & Cruz-Altunar, Á. (2015). Diseño de un programa de fertilización para crisantemo en base a extracción de macronutrientes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(12), 2263–2276.
- Valle-Sandoval, M. R., Mascorro-Gallardo, J. O., Gil-Vázquez, I., & Iturriaga-de la Fuente, G. (2008). Regeneración directa *in vitro* del crisantemo, *Dendranthema × grandiflorum* Kitam, a partir de segmentos de tallo. *Universidad y Ciencia*, 24(3), 219–227.
- Vences-Contreras, C., Vázquez-García, L. M. & Hernández-Rodríguez, O. A. (2009). Regeneración *in vitro* de once cultivares de crisantemo (*Dendranthema grandiflora* Tzvelev) a partir de meristemos apicales. *Agronomía Mesoamericana*, 20(2), 409–415.
- Vidale, H. (1983). *Producción de flores y plantas ornamentales*. Mundi-Prensa. 161 p.
- Wang, Q., Cuellar, W. J., Rajamäki, M. L., Hirata, Y. & Valkonen, J. P. T. (2018). Combined thermotherapy and antiviral compounds for elimination of viruses from vegetatively propagated plants. *Plant Disease*, 102(11), 2108–2120. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-18-0489-FE>
- Wang, J., Su, Y., Kong, X., Ding, Z., & Zhang, X. S. (2020). Initiation and maintenance of plant stem cells in root and shoot apical meristems. *aBIOTECH*, 1(3), 194–204. <https://doi.org/10.1007/s42994-020-00020-3>
- Waseem, M., Khan, A. R., Fatima, S., & Ali, H. M. (2022). Efficient surface sterilization protocol for axillary bud explants in rose (*Rosa hybrida* L.) micropropagation: Impact on survival and contamination control. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 150(2), 267–278. <https://doi.org/10.1007/s11240-022-02289-4>
- Wise, K., Gill, H., & Selby-Pham, J. (2020). Willow bark extract and the biostimulant complex Root Nectar® increase propagation efficiency in *chrysanthemum* and lavender cuttings. *Scientia Horticulturae*, 263, 109108. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109108>
- Yesmin, S., Hashem, A., Das, K. C., Hasan, M. M., & Islam, M. (2014). Efficient *in vitro* regeneration of *chrysanthemum* (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) through nodal explant culture. *Nuclear Science and Applications*, 23(1-2), 47–50.
- Zalewska, M., Miler, N., & Wenda-Piesik, A. (2010). Effect of *in vitro* topophysis on the growth, development, and rooting of chrysanthemum explants (*Chrysanthemum grandiflorum* /Ramat./Kitam). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 85(4), 362–366. <https://doi.org/10.1080/14620316.2010.11512681>
- Zhou, J., Jiang, X., Agathokleous, E., Lu, X., Yang, Z., & Li, R. (2023). High temperature inhibits photosynthesis of chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) seedlings more than relative humidity. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1272013. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1272013>

Proyectos de secuestro de carbono bajo metodologías CAR y MDL en México

Carbon sequestration projects under CAR and CDM methodologies in Mexico

¹Guadalupe Soledad Costumbre-Alonso , ²Gerardo Rodríguez-Ortiz , ²José Raymundo Enríquez-del Valle , ¹Ashmir Ambrosio-Lazo , ²Aaron Martínez-Gutiérrez 

¹Estudiante. ²Investigador. Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (Itvo). Santa Cruz Xoxocotlán-Oaxaca. México. México. [§]Autor de correspondencia: (soledadcostumbre@gmail.com).

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo realizar una revisión de información documental sobre los procesos de registro de metodologías implementadas en los proyectos de carbono en México, bajo los estándares internacionales de la Reserva de la Acción Climática (CAR) y Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) para la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI). Se llevó a cabo una recopilación y análisis de artículos científicos y de revisión, así como la consulta en plataformas de organizaciones gubernamentales con datos actualizados relacionados a la implementación de proyectos de carbono en México; como alternativa importante para la reducción de los GEI y fuente de ingreso para las comunidades, es importante conocer su funcionamiento y las complicaciones en su implementación. A pesar de las ventajas que pueden ofrecer los proyectos bajo los estándares CAR y MDL como es la transferencia de tecnologías, conocimiento y proporcionar una fuente de ingresos económicos, también se encuentran puntos negativos, sobre todo en los proyectos de pequeña escala: en ellos, al utilizar metodologías menos complejas en comparación a proyectos de gran escala ponen en juego la credibilidad del monto total de créditos emitidos por cada proyecto.

Palabras clave: estándares, gases de efecto invernadero, organizaciones, procesos.

Abstract

The objective of this study was to analyze the registration processes for methodologies implemented in carbon projects in Mexico, under

the international standards of the Carbon Action Reserve (CAR) and Clean Development Mechanisms (CDM) for the reduction of greenhouse gases (GHG). A review and compilation of scientific literature was carried out, as well as consultation with government organizations' platforms with updated data related to the implementation of carbon projects in Mexico. As an important alternative for reducing GHGs and a source of income for communities, it is important to understand how they work and the complications involved in their implementation. Despite the advantages that projects under the CAR and CDM standards can offer, such as the transfer of technology and knowledge and the provision of a source of income, there are also negative aspects, especially in small-scale projects. In these projects, the use of less complex methodologies compared to large-scale projects calls into question the credibility of the total amount of credits issued for each project.

Index words: standards, greenhouse gases, organizations, processes.

Introducción

En los últimos decenios el calentamiento global se ha convertido en un gran problema que enfrenta la humanidad, poniendo en riesgo los límites de la economía, diferentes amenazas contra los ecosistemas y la subsistencia de la humanidad todo esto generado por la acumulación de los GEI (Meireles et al., 2024). El Protocolo de Kioto (PK) tiene su origen en Kioto en el año 1997 durante la Convención de

las Naciones Unidas sobre el cambio climático por países desarrollados y en desarrollo, comprometiéndose a reducir sus GEI; en dicho protocolo se plantearon mecanismos para su reducción (Estrada, 2022). El PK hace diferenciación entre los países que lo conforman con base al principio básico de “responsabilidades comunes pero diferenciadas”, en el cual se establece que todos los países tienen el compromiso de proteger al medio ambiente, pero en particular delega un mayor compromiso a los países desarrollados, quienes forman parte del Anexo I del PK debido a su antigüedad en la emisión de los GEI (MÉXICO₂, 2023).

México tiene su participación en el mercado de bonos de carbono a partir del año 1998 cuando firma el tratado del protocolo de Kioto y ratificándolo posteriormente en el año 2000, sin embargo fue hasta el año 2008 cuando comenzó a tener mayor relevancia esto debido a la reforma energética, la cual propició la expansión del mercado de carbono mexicano (López-Toache et al., 2016). En México los principales proyectos bajo el MDL que se han implementado están orientados a las energías renovables, dentro de los cuales han participado distintos organismos financieros tales como el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Banco Santander Central Hispanoamericano (BSCH), Cooperación Andina de Fomento (CAF) y Banco Bilbao Vizcaya Argentina (BBVA) quienes han apoyado y participado como intermediadores de los CERs (López-Toache et al., 2016). Es importante resaltar que los proyectos realizados bajo el MDL tienen dos enfoques importantes el de contribuir a la reducción de los GEI y el de realizar aportaciones para el crecimiento del país origen del proyecto (Mercado y Molina, 2021).

En México, además de la implementación de proyectos de carbono al MDL también ha incorporado proyectos en el estándar de la Reserva de la Acción Climática (CAR por sus siglas en inglés), que es un registro confiable en el caso de México; tuvo su implementación en el año 2008 a partir de la firma de un Memorando de Entendimiento (MOU por sus siglas en inglés), con seis estados de la frontera de México

con la finalidad de elaborar protocolos para llevar a cabo la medición y verificación para los proyectos de reducción de GEI en el país. Actualmente el estándar del CAR tiene cinco protocolos enfocados en temas de: eficiencia de calderas, forestales, vertedero, ganado y halocarbonos, todos ellos son aplicables para México. El estándar CAR en el año 2024 ha registrado para México en diferentes áreas créditos emitidos tal como en bosque 10 857 189, en el manejo de residuos y destrucción de metano, relleno sanitario con 279 352 y ganadería con 575 créditos emitidos durante este año (CAR, 2024).

Para la ejecución de dichos proyectos bajo los estándares antes mencionados es de vital importancia disponer de métodos de medición que garanticen cumplir con los requerimientos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) y que sean costo-eficientes para determinar con seguridad el almacenamiento y la captura de C (Casiano-Domínguez et al., 2018). Cabe mencionar que cada estándar tiene etapas definidas que van desde el diagnóstico y la viabilidad, el desarrollo de estudios de diagnóstico, implementación, la evaluación para verificar la ejecución del proyecto, para finalmente llevar a cabo la venta de certificados (Esquivel et al., 2025). Es por ello que en el presente artículo se tuvo como objetivo contrastar las ventajas y desventajas que se presentan desde el registro, la ejecución y el desarrollo de los proyectos de secuestro de carbono bajo las metodologías de los estándares CAR y MDL en México.

Desarrollo

Metodología de la Reserva de Acción Climática (CAR)

Se realizó una recopilación de artículos científicos y de revisión en diferentes medios como repositorios, publicaciones y bases de datos de revistas disponibles y de acceso gratuito: Google académico, Scielo, Redalyc. Para la búsqueda de los artículos se utilizaron palabras clave como “CAR”, “MDL”, “CDM”, “Mercado voluntario

de carbono”; posteriormente se desarrolló un filtro que consistió en la recopilación de artículos científicos y de divulgación que en su contenido abordaran el antecedente sobre los estándares internacionales de “CAR y MDL” implementados al mercado voluntario de carbono y principalmente proyectos implementados en México. Se tomó en cuenta los artículos de investigación de reciente publicación en idioma español e inglés y de información de plataformas gubernamentales con datos actualizados.

A nivel global el estándar CAR reúne el 8.3 % de los proyectos a nivel internacional exclusivamente de los países de México, Estados Unidos y Canadá. Entre los aspectos que se necesitan revisar y mejorar para fortalecer la integridad social y ambiental de los créditos de carbono emitidos por la Reserva se encuentra el rechazo de intermediarios por cuestiones metodológicas en la estimación de los créditos (Semarnat-Inecc-Gggi, 2024).

En México el Protocolo CAR ha llevado a cabo el desarrollo de metodologías adaptadas para México, dirigidas a procesos industriales, manejo forestal, ganadería y gestión de residuos (Reserva de Acción Climática, s.f.). Dichos protocolos son elaborados por la misma Reserva y durante su desarrollo involucra la cooperación de los asesores técnicos, comunidades, compradores y la sociedad civil Semarnat-Inecc-Gggi, 2024). Un antecedente importante de la implementación de este estándar en México, fue el proyecto piloto ejecutado en la comunidad de San Juan Lachao bajo la denominación de “Captura de Carbono en San Juan Lachao”; dicho proyecto fue dirigido por la Integradora de Comunidades Indígenas y Campesinas de Oaxaca (ICICO) A.C. y cuyo inversionista principal fue la empresa de Disney, se desarrollaron actividades de producción sostenible, aprovechamiento sin generar repercusiones mayores al ecosistema, conservación y restauración de áreas deterioradas (Ranero y Covalada, 2018). La comunidad de San Juan Lachao, en trabajo conjunto con la

organización de ICICO consiguieron implementar en el año 2012 un Plan de manejo forestal sustentable (PMFS) aprovechando 5000 ha de bosque dominante de pino-encino para llevar a cabo la certificación y aprovechamiento mediante el manejo sustentable. Cabe destacar que se convirtió en una fuente de empleo temporal o permanente para 150 personas de la comunidad durante las actividades llevadas en el aprovechamiento forestal, y sumando 22 empleos más en las actividades de pagos por servicios ambientales hidrológicos (PSA-H); estas acciones y la asesoría por parte de ICICO llevaron a la comunidad de San Juan Lachao recibir el Premio Nacional de Silvicultura por parte de la Semarnat en el año 2015. Esta comunidad, en el año 2014 bajo la asesoría de ICICO logran llevar a cabo el proyecto piloto para la certificación de créditos de carbono en una extensión de 3200 ha de bosque bajo el estándar CAR; una desventaja de este estándar es que el proceso de gestión del monitoreo, la estimación y la certificación implican un período largo de tiempo, sin embargo su gran ventaja es que estos créditos son beneficiosos al ser comercializados en el mercado internacional a un precio más elevado (Rontard et al., 2020).

De acuerdo con la base de datos de compensaciones del registro voluntario (Goldman School of Public Policy, 2025) se tiene el registro de los principales estándares y el número de proyectos totales de cada uno (**Figura 1**), así como los créditos totales emitidos por alcance de cada estándar (**Figura 2**); los datos que se reportaron son los obtenidos hasta la fecha del 31 de octubre del 2025. En los cuales se puede encontrar que el estándar CAR cuenta con un total de 792 proyectos en total, así también se destaca que el mayor volumen de créditos emitidos se lleva a cabo por actividades de silvicultura y uso del suelo con 926,657,400 créditos totales emitidos.

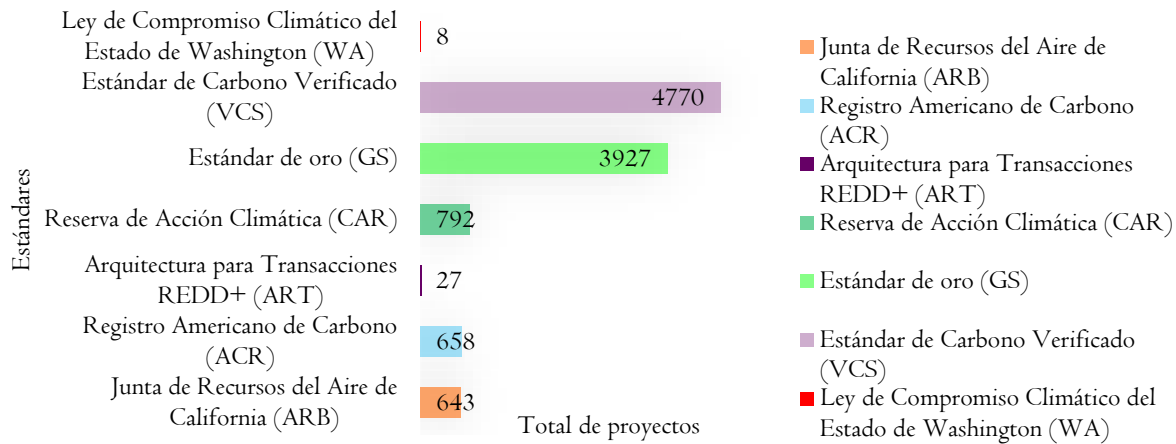


Figura 1. Proyectos de compensación por estándar. Fuente: Elaboración propia con datos de la base de datos de compensaciones del registro voluntario de la escuela Goldman School of Public Policy (GSPP) 2025.

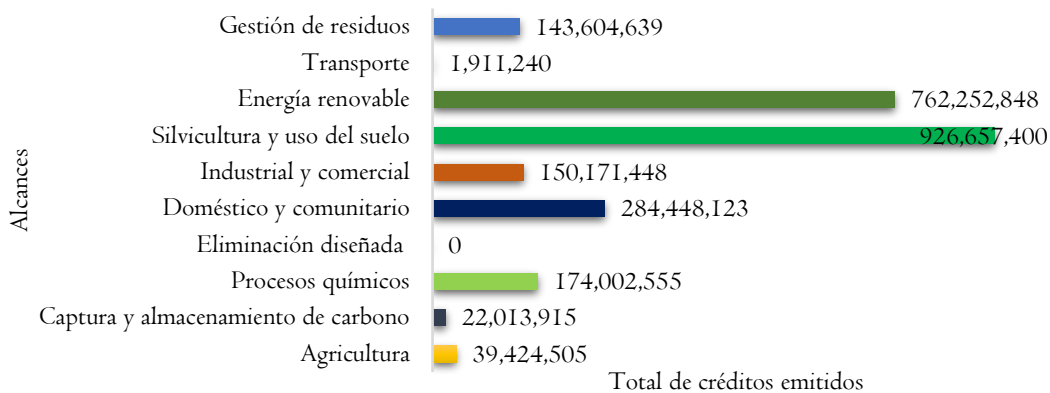


Figura 2. Créditos emitidos por alcance. Fuente: Elaboración propia con datos de la base de datos de compensaciones del registro voluntario de la escuela Goldman School of Public Policy (GSPP) 2025.

Otro dato relevante que se puede destacar es la cantidad total de créditos emitidos por el estándar CAR, el cual se concentra en un total equivalente al 5 % de esas emisiones y destacando la región de América del Norte 565 361 547 con la mayor cantidad de créditos emitidos, en segundo lugar, Asia Meridional con 448 992 097 y tercer lugar América Latina y el Caribe con 440 678 987 créditos emitidos (**Figura 3**).

México hasta el mes de agosto de 2025 contaba con 835 proyectos de carbono en el mercado voluntario de carbono, de los cuales un 50 % pertenecen a proyectos de remoción, dirigidos esencialmente al sector forestal y de uso de la tierra; actualmente, cerca de la totalidad de

estos proyectos tiene su registro en el Estándar de Acción Climática (Nordahl, 2025).

Una desventaja de este estándar se centra en las metodologías disponibles, ya que sólo son aceptadas por los países de México, Guatemala, Panamá, Canadá y Estados Unidos, lo cual implica que sea poco conocida por compradores en otras regiones. Sin embargo, el lado positivo de los protocolos desarrollados por CAR es que son exclusivos para México y están adaptados al contexto legal, social y cultural del país. Entre los proyectos desarrollados para México se encuentran: eficiencia de calderas, manejo forestal, gestión de residuos, ganadería, halocarbono (Semarnat-Inecc-Gggi, 2024).

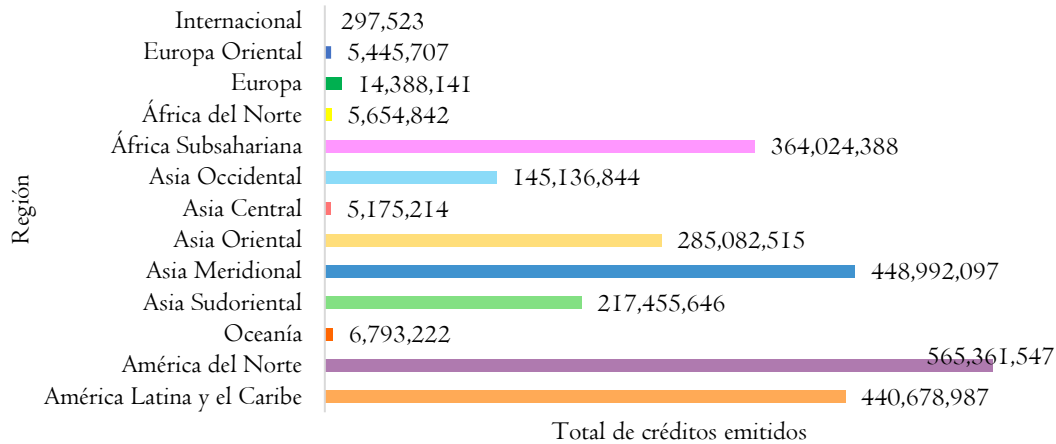


Figura 3. Créditos emitidos por región. Fuente: Elaboración propia con apoyo de la base de datos de compensaciones del registro voluntario de la escuela Goldman School of Public Policy (GSPP) 2025.

Metodologías de Desarrollo Limpio (MDL)

Una de las críticas al MDL se centra en el proceso de registro de los proyectos ya que los participantes necesitan alcanzar el consentimiento de la Autoridad Nacional Designada (AND), dicha autoridad es un organismo gubernamental de alto nivel y es el responsable de asegurar que los proyectos cumplan con las adaptaciones que conllevan los objetivos de desarrollo del país sede del proyecto, además se encargan de elaborar y presentar el documento de diseño del proyecto (DDP) a la junta ejecutiva del MDL de la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) para su aceptación. El DDP debe de contener toda la información necesaria para valorar la ejecución de los requisitos del MDL. Los proyectos aceptados reciben el financiamiento del MDL tiempo después de haber concluido su elaboración, con lo cual la Junta Ejecutiva perteneciente al MDL exige que el DDP contenga las evidencias del uso del incentivo financiero durante el proceso de la elaboración de dichos proyectos que han logrado la certificación del MDL, después de concluir su elaboración y que estos proporcionen dichos datos en lo que se exprese el manejo del incentivo financiero otorgado (Baird & Green, 2020; Schneider, 2007). Cabe destacar que para cualquier proyecto los costos de la ejecución y

operación son un punto crucial (FutureCamp Climate GmbH, 2020) debido a que toma en cuenta los costos diversas actividades como son la obtención de información del inventario forestal (requiere personal de campo, tiempo y transporte), la certificación y la búsqueda de mercado (Esquivel et al., 2025).

De acuerdo con la página oficial del MDL (2025), se establece que las actividades a desarrollar para el registro del proyecto en este estándar deben iniciar con el ciclo de aprobación del proyecto, el cual contempla siete actividades: a) diseño del proyecto en base a la línea base de emisiones aprobada y la metodología de monitoreo, b) aprobación del proyecto por la Autoridad Nacional Designada (AND) mediante una carta de aprobación en la que se incluye la contribución del proyecto al desarrollo sostenible, c) una entidad operativa designada (EOD), valida el documento de diseño del proyecto, d) la secretaría realiza la comprobación y verificación de la integridad del proyecto, e) el responsable del proyecto realiza el monitoreo de las emisiones reales de acuerdo a la metodología aprobada, f) la entidad operativa designada se ocupa de realizar una verificación sobre el logro de la reducción de emisiones contempladas en el plan de seguimiento y g) la entidad operativa designada

emite el informe de verificación con solicitud de emisión a la junta Ejecutiva del MDL.

Posterior al registro, para que se lleve a la venta la reducción certificada de emisiones (RCE) nuevamente se sigue un proceso que contempla como primera acción (Ramos et al., 2012): a) la revisión del proyecto por parte del ADN para su aprobación posteriormente se envía a la EOD para su validación b) se lleva a cabo el registro del proyecto en el MDL, al mismo tiempo con el registro del país en el que se desarrollará el proyecto, c) se lleva a cabo la implementación y verificación por la EOD y finalmente al ser aprobada se inicia con la venta de los RCE.

En los proyectos de MDL contempla cinco depósitos de carbono: biomasa aérea, biomasa subterránea, madera muerta, hojarasca y carbono orgánico del suelo. Para llevar a cabo la estimación de los depósitos de carbono se deben aplicar los métodos antes previstos en las normas metodológicas aprobadas por el MDL; en ellas se emplean tres enfoques para la estimación de las reservas de carbono y los cambios en la reserva que puedan darse: estimación por factores determinados, estimación por modelado y estimación por medición (United Nations Framework Convention on Climate Change (Unfccc, 2015).

La Comisión Nacional Forestal (Conafor, 2024) ha identificado desafíos en el funcionamiento del Mercado Voluntario de Carbono en México (MVC) bajo los estándares internacionales para los proyectos de carbono, como es el desconocimiento del mercado por parte de los actores principales de los proyectos, el poco conocimiento sobre otros proyectos relacionados al carbono, el abuso por parte de los intermediarios e inversionistas quienes se quedan con la mayor ganancia, afectando a las comunidades; además, los precios son menores que los costos en la inversión del proyecto, faltan metodologías para proporcionar el monto confiable en la contabilidad de las reducciones de emisiones de carbono de los proyectos. La ausencia de una metodología autorizada para la actividad específica de mitigación disminuye su

posibilidad de que el proyecto sea aprobado, en el MDL están disponibles cuatro metodologías específicas aplicables para cada actividad de mitigación específica, en ellas se encuentran: para actividades de proyectos a gran escala de proyectos de pequeña escala, para la forestación y gran escala así como actividades de reforestación (A/R), las dirigidas a proyectos A/R de pequeña escala y para la captura y almacenamiento de carbono (CCS). Un aspecto importante a recalcar es la adaptación de ciertas metodologías que realizan tanto el MDL, estándares voluntarios y otros programas GEI tomando en cuenta las carencias locales y a su vez propiciando una alternativa positiva de adopción de estos proyectos y sobre todo favorecer su desarrollo (FutureCamp Climate GmbH, 2020). Otra crítica severa sobre la comercialización de estos créditos certificados por los estándares es sobre su venta, ya que con esto permite que los principales actores que contaminan transfieran su responsabilidad a un tercero, haciendo que no permita la modificación a sus acciones de afectación hacia el ecosistema (Montoya, 2023).

Prospectiva

Los estándares bajo las metodologías CAR y MDL han sido de gran ventaja para la implementación de proyectos de carbono para México no obstante presentan diferencias en la inclusión de depósitos de carbono, en el caso del MDL contempla e incluye cinco depósitos de carbono: biomasa aérea, biomasa subterránea, madera muerta, hojarasca y carbono orgánico del suelo mientras que la CAR excluye los depósitos de carbono en madera muerta derribada, mantillo y hojarasca, a pesar de esta disimilitud su relevancia e importancia se atribuye a la flexibilidad para realizar modificaciones en los protocolos destinados en cada actividad generadora de GEI incluida en cada estándar; estos cambios en los protocolos se pueden adaptar al contexto social, político y cultura del país. Sin embargo, aún existen fallas en sus metodologías, las cuales se necesitan fortalecer para la ejecución de futuros proyectos para que

puedan garantizar la autenticidad en los volúmenes de créditos generados. Este problema se genera principalmente en aquellos proyectos de pequeña escala dentro del MDL, debido a la aplicación de metodologías menos complejas a comparación de aquellos de gran escala, derivado, existe cierta desconfianza sobre la veracidad del total de créditos generados de estos proyectos. La falta de conocimiento del mercado por los desarrolladores del proyecto hace que no exista una venta de créditos de carbono bien pagada, ya que en el proceso pueden existir intermediarios que aprovechen la situación, sumado a esto los gastos de operación suelen ser costosos y el proceso de registro del proyecto tardado. Es de gran importancia crear o modificar los instrumentos políticos para aumentar la participación de proyectos en particular aquellos que son de pequeña escala.

Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México, por el apoyo económico mediante proyecto de investigación financiado 2025: “Potencial de secuestro de CO₂ de bosques bajo manejo maderable en Oaxaca”, Clave: 22082.25-P.

Referencias

Baird, I. G. & Green, W. N. (2020). The Clean Development Mechanism and large dam development: Contradictions associated with climate financing in Cambodia. *Climatic Change*, 161(2), 365-383. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02621-4>

Casiano-Domínguez, M., Paz Pellat, F., Rojo Martínez, M., Covaleda Ocon, S. & Aryal, D. R. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: Primera estimación en México. *Madera y Bosques*, 24. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401894>

Climate Action Reserve (CAR) (2024). Annual report 2024. *Climate Action Reserve*. www.climateactionreserve.org

Comisión Nacional Forestal (Conafor) (2024). Estado que guarda el sector forestal en México. México: 2023. 263 p.

Estrada Chavira, M. E. (2022). Evolución y controversias de los bonos de carbono en México. *Semestre Económico*, 11(1), 127-133. <https://doi.org/10.26867/se.2022.v11i1.132>

Esquivel Bazán, E., Trench, T. & Ruiz De Oña Plaza, C. (2025). Justicia climática: El mercado voluntario de carbono forestal en el sureste de México. *Región y Sociedad*, 37, e2008. <https://doi.org/10.22198/rys2025/37/2008>

FutureCamp Climate GmbH. (2020). *Créditos de compensación para el Sistema de Comercio de Emisiones mexicano: Análisis de criterios para la priorización de proyectos*. GIZ. <https://www.bivica.org/file/view/id/5617>

Goldman School of Public Policy (7 de diciembre 2025). *Voluntary Registry Offsets Database* [Archivo excel]. Goldman School of Public Policy <https://gspp.berkeley.edu/berkeley-carbon-trading-project/offsets-database>

López-Toache, V., Romero-Amado, J., Toache-Berttolini, G. & García-Sánchez, S. (2016). Bonos de carbono: Financiarización del medioambiente en México. *Estudios Sociales*, 25(47), 189-214.

Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) (2 de diciembre 2025). *Ciclo del proyecto*. https://cdm.unfccc.int/methodologies/standard_base/index.html

Meireles, M., Cruz Hernández, M., y Moreno Brid, J. C. (2024). El mercado de carbono en México: Trayectoria, diagnóstico y retos. *Panorama Económico*, 32(2), 132-162. <https://doi.org/10.32997/pe-2024-4938>

Mercado García, A. y Molina Rodríguez, C. B. (2021). América Central en el mercado de emisiones: Una evaluación multicriterio de proyectos del Mecanismo de Desarrollo Limpio. *Problemas del Desarrollo*. *Revista Latinoamericana de Economía*, 52(204).

<https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2021.204.69648>

MÉXICO₂ (2023). *Sistemas de Comercio de Emisiones en México*. Nota técnica. MÉXICO₂

<https://www.mexico2.com.mx/uploads/mexico/file/SCEMX2023.pdf>

Montoya Guiral, L. F. (2023). Bonos de Carbono y Competitividad Empresarial: Cómo la Adopción de Prácticas Sostenibles Puede Generar Ventajas Estratégicas. *Observatorio de las Ciencias Sociales en Iberoamérica*, 4(3), 40-48.

<https://doi.org/10.51896/ocsi.v4i3.157>

Nordahl, J. (9 de abril de 2025). Mexico's Carbon Market: Key Trends and Challenges for Project Developers. *AlliedOffsets*. <https://blog.alliedoffsets.com/key-carbon-market-trends-and-challenges-for-project-developers-in-mexico>

Ramos, A. C., Delgado, A. F. y IbarraYúnez, A. (2012). Análisis de la distribución territorial de proyectos del mecanismo para un desarrollo limpio. *Economía Mexicana Nueva Época*, 2(2), 213-250.

Ranero, A., y Covalada, S. (2018). El financiamiento de los proyectos de carbono forestal: Experiencias existentes y oportunidades en México. *Madera y Bosques*, 24(Especial), e2401913. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401913>

Reserva de Acción Climática. (s.f.). Impulsando los créditos de carbono en México. *Climate Action Reserve*. (15 de diciembre de 2025) <https://climateactionreserve.org/es/mexico/>

Rontard, B., Reyes Hernández, H. & Aguilar Robledo, M. (2020). Pagos por captura de carbono en el mercado voluntario en México: Diversidad y complejidad de su aplicación en Chiapas y Oaxaca. *Sociedad y Ambiente*, 22, 212-236.

<https://doi.org/10.31840/sya.vi22.2106>

Schneider, L. (2007). *Is the CDM fulfilling its environmental and sustainable development objectives? An evaluation of the CDM and*

options for improvement. Report prepared for WWF.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (Inecc) Instituto Global para el Crecimiento Verde (Gggi). (2024). Mercado Voluntario de Carbono en México: Caracterización y resultados de su estudio en territorio: 2024. Ciudad de México

United Nations Framework Convention on Climate Change (Unfccc) (2015). Measure for estimation of carbon stocks in afforestation and reforestation project activities under the clean development mechanism.

https://unfccc.int/resource/docs/publications/cdm_afforestation_field-manual_web.pdf