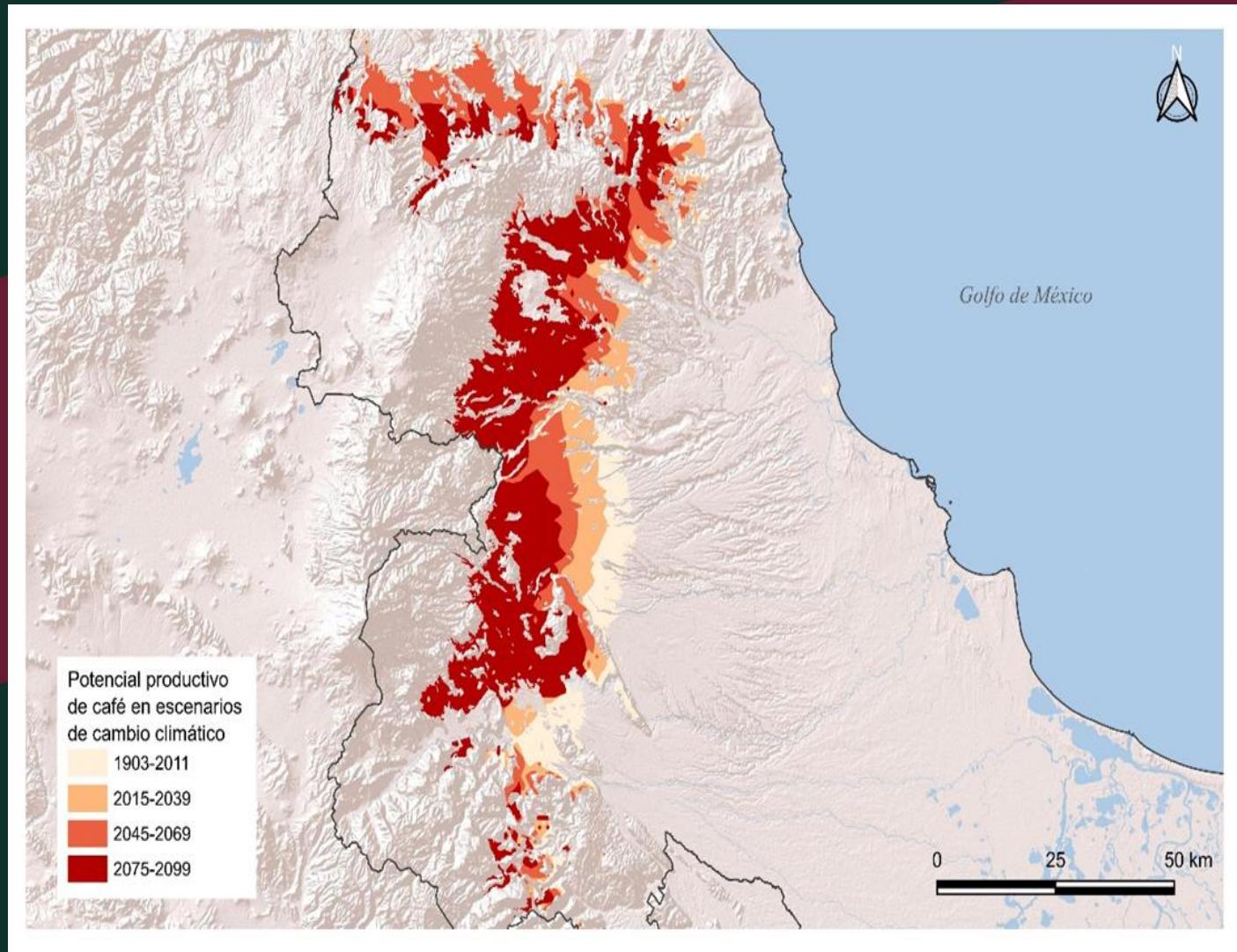


# Temas relevantes de investigación e innovación en la producción agropecuaria y forestal

## Compiladores

Dr. Rubén Santos Echeverría, Dr. Héctor Daniel Inurreta Aguirre  
y MC. Jeremías Nataren Velázquez



**Agricultura**  
Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural

**40 inifap**  
Aniversario  
Bienestar para el campo

**Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias**

Av. Progreso No. 5, Col. Barrio de Santa Catarina, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04010, Ciudad de México

**Centro de Investigación Regional Golfo Centro**

Campo Experimental Cotaxtla  
Medellín, Veracruz, México

Publicación Especial Núm. 14, diciembre 2025

ISBN: 978-607-37-1833-2

## DIRECTORIO INSTITUCIONAL

### SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL

#### **Dr. Julio Antonio Berdegué Sacristán**

Secretario de Agricultura y Desarrollo Rural del Gobierno de México

#### **Lic. Leonel Efraín Cota Montaño**

Subsecretario de Agricultura y Desarrollo Rural

### INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES, FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

#### **Dr. Alejandro Espinosa Calderón**

Director General Interino

#### **Dr. Rafael Ariza Flores**

Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

#### **Dr. Luis Ortega Reyes**

Coordinador de Planeación y Desarrollo

#### **Mtro. Martín Rafael González Hernández**

Coordinador de Administración y Sistemas

#### **Lic. Leonardo Ávila Franco**

Titular de la Unidad Jurídica

### CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL GOLFO CENTRO

#### **Dr. Rubén Santos Echeverría**

Director Regional

#### **Dr. Héctor Daniel Inurreta Aguirre**

Director de Investigación

#### **Lic. Malinatzin García Robles**

Directora de Administración

## **Temas relevantes de investigación e innovación en la producción agropecuaria y forestal**

## **Temas relevantes de investigación e innovación en la producción agropecuaria y forestal**

### **Compiladores**

**Dr. Rubén Santos Echeverría**

Director Regional

Centro de Investigación Regional Golfo Centro

**Dr. Héctor Daniel Inurreta Aguirre**

Director de Investigación

Centro de Investigación Regional Golfo Centro

**M.C. Jeremías Nataren Velázquez**

Jefe de Campo

Campo Experimental Cotaxtla



Instituto Nacional de Investigaciones  
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Instituto Nacional de Investigaciones

Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Centro de Investigación Regional Golfo Centro

Campo Experimental Cotaxtla

Medellín, Veracruz, México

Publicación Especial Núm. 14

Diciembre de 2025

D.R. © Instituto Nacional de Investigaciones  
Forestales, Agrícolas y Pecuarias  
Progreso Núm. 5. Colonia Barrio de Santa Catarina  
Alcaldía Coyoacán, C.P. 04010, Ciudad de México, México.  
Tel. 55 3871 8700

[www.gob.mx/inifap](http://www.gob.mx/inifap)

Publicación Especial Núm. 14

Temas relevantes de investigación e innovación en la producción  
agropecuaria y forestal

ISBN: 978-607-37-1833-2

Primera Edición: 2025

No está permitida la reproducción total o parcial de esta publicación, ni la transmisión  
de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia, por  
registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito a la Institución.

Hecho en México

La cita correcta de esta obra es:

Santos E.R., Inurreta A.H.D. y Nataren V.J. (Colab.). 2025. Temas relevantes de  
investigación e innovación en la producción agropecuaria y forestal. Publicación  
Especial Núm. 14. INIFAP-CIRGOC-Campo Experimental Cotaxtla. Medellín, Veracruz,  
México, p. 96.

## Contenido

<b>PRESENTACIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1. LA VISIÓN E INCURSIÓN DE LOS JÓVENES EN LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFIC.....</b>	<b>2</b>
1.1. Introducción .....	2
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. La relación entre la universidad y sector gubernamental.....	4
1.4. Difusión y promoción de la investigación en Veracruz .....	5
1.5. Principales Programas y Acciones de Fomento a la Investigación en 2025.....	6
1.6. Conclusiones y recomendaciones.....	6
1.7. Referencias bibliográficas.....	7
<b>2. MEJORAMIENTO DE FRIJOL NEGRO OPACO MESOAMERICANO EN EL TRÓPICO DE MÉXICO: AVANCES Y PERSPECTIVAS.....</b>	<b>9</b>
2.1. Introducción.....	9
2.2. Problemática regional y justificación del mejoramiento .....	9
2.3. Evolución histórica y metodológica del mejoramiento genético .....	10
2.4. Estrategia de mejoramiento y limitaciones de adopción.....	16
2.5. Desafíos futuros de mejoramiento para el trópico.....	16
2.6. Referencias bibliográficas .....	18
<b>3. USO DE MICROORGANISMOS PARA EL CONTROL DE PLAGAS .....</b>	<b>20</b>
3.1. Introducción.....	20
3.2. El control biológico y los microorganismos benéficos.....	21
3.3. ¿Qué son los HEP? .....	21
3.4. ¿Cómo actúan los HEP?.....	22
3.5. ¿Por qué usar los HEP? .....	23
3.6. Otras funciones de los HEP .....	24
3.7. Ventajas de HEP .....	24
3.8. Desventajas de los HEP .....	24
3.9. ¿Qué falta? .....	25
3.10. Conclusiones y recomendaciones .....	25
3.11. Referencias bibliográficas.....	26

<b>4. NUEVAS PERSPECTIVAS DE LA INVESTIGACIÓN EN AGROECOSISTEMAS.....</b>	<b>29</b>
4.1. Introducción .....	29
4.2. Seguridad alimentaria.....	29
4.3. El agroecosistema.....	30
4.4. Cambio climático .....	32
4.5. Sistemas y complejidad.....	33
4.6. Nuevas perspectivas de estudio desde la complejidad.....	35
4.7. Nuevas perspectivas de investigación desde enfoques metodológicos .....	36
4.8. Conclusiones y recomendaciones.....	36
4.9. Referencias bibliográficas.....	37
<b>5. PROCESOS PRÁCTICOS CON VALOR AGREGADO DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS.....</b>	<b>39</b>
5.1. Introducción.....	39
5.2. Propuesta para el desarrollo agrícola, pecuario o forestal.....	39
5.3. Conclusiones y recomendaciones.....	40
5.4. Referencias bibliográficas .....	40
<b>6. LA IMPORTANCIA DE LOS SUELOS SALUDABLES EN LA AGRICULTURA DEL FUTURO.....</b>	<b>42</b>
6.1. Introducción.....	42
6.2. Antecedentes .....	42
6.3. Estado del arte.....	43
6.4. Propuesta para el desarrollo agrícola, pecuario y forestal.....	44
6.5. Recomendaciones para lograr la autosuficiencia alimentaria .....	46
6.6. Conclusiones y recomendaciones .....	46
6.7. Referencias bibliográficas .....	47
<b>7. HÚMEDALES ARTIFICIALES EN EL AGRO MEXICANO.....</b>	<b>48</b>
7.1. Introducción.....	48
7.2. Propuesta para el desarrollo agrícola, pecuario o forestal.....	48
7.3. Conclusiones y recomendaciones .....	49
7.4. Referencias bibliográficas .....	49
<b>8. VERACRUZ ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO: ¿HACIA DÓNDE SE DESPLAZARÁ SU POTENCIAL PRODUCTIVO?.....</b>	<b>51</b>
8.1. Introducción .....	51
8.2. Antecedentes.....	51
8.3. Desarrollo del tema .....	52

8.4. Aplicación metodológica: variación temporal de precipitación y temperatura por estrato altitudinal en Veracruz.....	53
8.5. Estado del arte.....	56
8.6 Estrategias de mitigación .....	56
8.7. Propuesta para el desarrollo agrícola, pecuario o forestal .....	57
8.8. Conclusiones y recomendaciones.....	58
8.9. Referencias bibliográficas.....	58
<b>9. INNOVACIÓN EN EL CULTIVO DE TEJIDOS VEGETALES Y SUS APLICACIONES....</b>	<b>61</b>
9.1. Introducción.....	61
9.2. Antecedentes.....	61
9.3. Sanidad vegetal .....	62
9.4. Conservación de germoplasmas.....	63
9.5. Producción de metabolitos.....	64
9.6. Mejoramiento genético.....	64
9.7. Mejoras en la calidad y fisiología de frutos y semillas, optimizando características nutricionales y organolépticas.....	64
9.8. Incremento de la tolerancia a estrés ambiental, como sequías, heladas o exceso de sales.....	65
9.9. Micropagación.....	65
9.10. Propuesta para el desarrollo agrícola y seguridad alimentaria.....	66
9.11. Conclusiones y recomendaciones.....	66
9.12. Referencias bibliográficas.....	66
<b>10. LA INVESTIGACIÓN FORESTAL: RETOS Y OPORTUNIDADES PARA LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA.....</b>	<b>68</b>
10.1. Introducción.....	68
10.2. Región templada .....	69
10.3. Región tropical .....	70
10.4. Región árida.....	70
10.5. Consideraciones para una Estrategia de Desarrollo Tecnológico e Innovación en el sector forestal mexicano .....	71
10.6. Conclusiones y recomendaciones .....	72
10.7. Referencias bibliográficas .....	73
<b>11. SISTEMAS ALTERNATIVOS DE PRODUCCIÓN DE CERDOS: EN CAMA PROFUNDA Y EN PASTOREO.....</b>	<b>75</b>
11.1. Introducción .....	75

11.2. Antecedentes.....	75
11.3. Sistema de cama profunda.....	76
11.4. Sistema en pastoreo .....	76
11.5. Estado del arte .....	77
11.6. Sistema de cama profunda .....	77
11.7. Sistema de cerdos en pastoreo.....	77
11.8. Propuesta para el desarrollo de la porcicultura.....	78
11.9. Infraestructura adaptada al contexto rural .....	78
11.10. Manejo zootécnico eficiente .....	78
11.11. Sanidad y bioseguridad.....	79
11.12. Capacitación y asistencia técnica.....	80
11.13. Evaluación económica .....	80
11.14. Evaluación ambiental.....	80
11.15. Recomendaciones para lograr la autosuficiencia alimentaria .....	81
11.16. Conclusiones y recomendaciones.....	81
11.17. Referencias bibliográficas .....	81
<b>12. SALUD DEL SUELO Y GANADERÍA REGENERATIVA.....</b>	<b>83</b>
12.1. Introducción .....	83
12.2. La ganadería como actividad esencial .....	84
12.3. La ganadería y la degradación de los suelos .....	85
12.4. La ganadería regenerativa como alternativa .....	86
12.5. Beneficios de las prácticas de ganadería regenerativa en el suelo.....	86
12.6. Desafíos de la ganadería regenerativa y el suelo.....	89
12.7. Recomendaciones generales.....	90
12.8. Conclusiones.....	91
12.9. Referencias bibliográficas.....	91

## Figuras

<b>Figura 1.</b> Actores principales en el desarrollo y divulgación de la educación científica.....	5
<b>Figura 2.</b> Esquema ilustrativo de los niveles jerárquicos de análisis de los agroecosistemas. Fuente: Elaboración propia modificada de Holling (1986).....	31
<b>Figura 3.</b> Esquema ilustrativo de la dinámica del ciclo adaptativo. Fuente: Holling (1996).....	34
<b>Figura 4.</b> Proyección de cambios en temperatura y precipitación por estrato altitudinal en el estado de Veracruz bajo escenarios de cambio climático. ....	54
<b>Figura 5.</b> Diferencia de temperatura y precipitación entre escenarios de cambio climático y escenario base.....	55
<b>Figura 6.</b> Movilidad espacial y temporal del potencial productivo del café ante escenarios de cambio climático. ....	55
<b>Figura 7.</b> Aplicaciones del cultivo de tejidos vegetales. ....	62
<b>Figura 8.</b> Degradación de praderas e impactos en el suelo. Modificado de Enríquez-Quiroz et al. 2021. ....	85

## Cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Variedades mejoradas de frijol negro mesoamericano para el trópico mexicano, desarrollo, metodologías y características agronómicas .....	12
<b>Cuadro 2.</b> Algunos ejemplos temáticos de investigaciones que han derivado en aplicaciones tecnológicas o de innovación.....	71
<b>Cuadro 3.</b> Cambios en variables promedio del suelo entre pastoreo continuo y rotacional en Durango.....	87

## PRESENTACIÓN

Esta publicación presenta la aportación de investigadores especializados de distintos sectores de la producción agropecuaria y forestal, participantes en la **XXXVII Reunión Científica-Tecnológica Forestal y Agropecuaria, Veracruz 2025**. En su presentación, que corresponde a cada capítulo de esta publicación, se abordaron los antecedentes, el estado actual o estado del arte del tema, los retos o desafíos y algunas propuestas para el desarrollo agrícola, pecuario o forestal, según el caso. Las aportaciones o aseveraciones son responsabilidad de cada autor, pero el propósito de esta publicación de la serie INIFAP busca documentar las ideas que pudieran servir de base para promover la innovación o las nuevas investigaciones que mejoren la productividad de los subsectores agrícola, pecuario y forestal, bajo criterios sustentabilidad.

Refiérase al índice, pero la temática general de esta publicación especial aborda doce temas relevantes de investigación e innovación en la producción agropecuaria y forestal relacionados con la inclusión de nuevos jóvenes en la ciencia y la tecnología, el mejoramiento genético de frijol, control biológico de plagas, agroecosistemas, valor agregado de productos agropecuarios, la importancia de los suelos saludables, humedales artificiales, el potencial productivo influenciado por el cambio climático, cultivo de tejidos vegetales, producción forestal, producción de cerdos y ganadería regenerativa. En la mayoría de ellos, se proponen alternativas para la agricultura del futuro y vacíos de conocimiento. Por tanto, este documento es valioso para hacer referencia inicial en la formulación de nuevas investigaciones como en implementar acciones de fomento agropecuario y forestal.

**Dr. Rubén Santos Echeverría**

Director del Centro de Investigación Regional Golfo Centro, INIFAP, y  
Presidente del Comité Organizador de la XXXVII Reunión Científica-Tecnológica Forestal y Agropecuaria Veracruz 2025

# 1. LA VISIÓN E INCURSIÓN DE LOS JÓVENES EN LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Ma. Graciela Hernández y Orduña<sup>1</sup>  
Cynthia Wong Arguelles<sup>2</sup>

**Palabras claves:** Vocaciones científicas, Educación STEAM, Política científica, Fuga de cerebros, Divulgación de la ciencia.

## 1.1. Introducción

La participación de los jóvenes en la ciencia y la investigación es fundamental para el progreso de la sociedad, el desarrollo sostenible y la innovación ya que representa la renovación de ideas y la fuerza motriz para enfrentar los desafíos futuros (UNESCO, 2024); esto representan una fuente crítica de nuevas perspectivas, energía y creatividad, elementos indispensables para abordar los desafíos globales, desde el cambio climático hasta las crisis de salud pública (Nieda & Macedo, 1997). Fomentar la participación temprana en la ciencia no es solo una cuestión de vocación individual, sino un imperativo social y gubernamental (Chacón & Peña, 2012). Sin embargo, a pesar del reconocimiento de su potencial, la visión y la trayectoria de los jóvenes en el ámbito científico están plagadas de obstáculos significativos que requieren atención urgente por parte de las instituciones educativas y los responsables de políticas públicas.

La visión de los jóvenes hacia la ciencia es a menudo dual. Por un lado, existe una fascinación innata por el descubrimiento y por el otro el deseo de contribuir al conocimiento humano. Programas que exponen a los estudiantes a la práctica real de la investigación pueden cultivar actitudes positivas hacia la ciencia y mejorar su autoeficacia científica (Chacón & Peña, 2012). El Instituto Internacional para la Educación Superior en América Latina y el Caribe (UNESCO) ha enfatizado repetidamente la importancia de integrar el pensamiento científico en la vida cotidiana de las nuevas generaciones, promoviendo un espíritu crítico y una actitud indagadora desde la educación básica (UNESCO, 2021). No obstante, esta visión optimista choca frecuentemente con la realidad de un sistema que a menudo se percibe como elitista, hermético y falto de recursos.

La problemática que enfrentan los jóvenes investigadores es multifacética. Uno de los obstáculos más prominentes es la falta de financiación adecuada y la escasez de oportunidades laborales estables (OCDE, 2023). La incertidumbre contractual y los bajos salarios en muchos países impulsan la "fuga de cerebros", en el que los talentos

emergentes buscan mejores condiciones en el extranjero (Altbach & de Wit, 2022). A nivel institucional, la rigidez curricular y la falta de programas de mentoría efectivos dificultan la

<sup>1</sup>Directora General del Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico.

<sup>2</sup>Profesora del Tecnológico Nacional de México-Campus Ciudad Valles.

transición de estudiante a profesional de la investigación. Además, barreras psicológicas como el estrés, el aburrimiento o el desinterés, si no se gestionan adecuadamente, pueden socavar la motivación inicial (Nieda & Macedo, 1997). Superar estos desafíos no solo garantizaría una fuerza laboral científica robusta, sino que también aseguraría que la próxima generación de líderes científicos pueda innovar sin limitaciones estructurales.

El objetivo de este capítulo es fomentar y asegurar la participación equitativa e inclusiva de los jóvenes en las áreas de las ciencias y las humanidades, eliminando las barreras que limitan su acceso y desarrollo, y promoviendo la creación de entornos educativos y profesionales que valoren la diversidad de perspectivas e identidades para enriquecer la producción de conocimiento y la innovación social.

## 1.2. Antecedentes

La realidad de la investigación y la producción científica en México se caracteriza por una compleja dualidad: un capital humano de alta calidad y un potencial de innovación considerable coexisten con limitaciones financieras y estructurales significativas (Foro Consultivo Científico y Tecnológico, 2016). Históricamente, el país ha buscado impulsar la ciencia, la tecnología y la innovación (CTI), reconociéndolas como pilares esenciales para el desarrollo nacional. Este esfuerzo se articula a través de diversas instituciones, siendo las universidades y los centros públicos de investigación los actores protagónicos.

Las instituciones de educación superior (IES) fungen como los pilares indiscutibles de la generación de conocimiento y la formación de capital humano (Didou & Gérard, 2010). A pesar de los esfuerzos y el talento inherente de su comunidad científica, el sistema se enfrenta a desafíos estructurales significativos, principalmente en términos de financiamiento y retención de talento.

Las universidades, lideradas por entidades clave como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Politécnico Nacional (IPN), concentran la mayor parte de la infraestructura y el personal dedicado a la investigación en el país. Estas instituciones son cruciales en la formación de científicos y tecnólogos capaces de generar innovación y responder a las necesidades nacionales (Camino Carranza & Acosta González, 2016). A través de programas de pregrado y posgrado, se forma a los científicos, ingenieros y humanistas que el país requiere para ser competitivo en la economía global del conocimiento (Aronson, 2007). La Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) apoya esta formación mediante becas y programas que impulsan a especialistas a nivel superior y posgrado (CONEVAL, 2024).

No obstante, este panorama prometedor se ve opacado por una inversión insuficiente en investigación y desarrollo (I+D). México invierte consistentemente un porcentaje de su Producto Interno Bruto (PIB) muy por debajo del promedio de la OCDE. Datos recientes indican que el gasto en I+D en México se sitúa alrededor del 0.27% del PIB (World Bank, 2023), una cifra que

refleja una brecha considerable en comparación con el promedio global y las economías más desarrolladas. Esta limitación presupuestaria impacta directamente en la disponibilidad de recursos para proyectos de investigación, el equipamiento de laboratorios y la creación de nuevas plazas académicas.

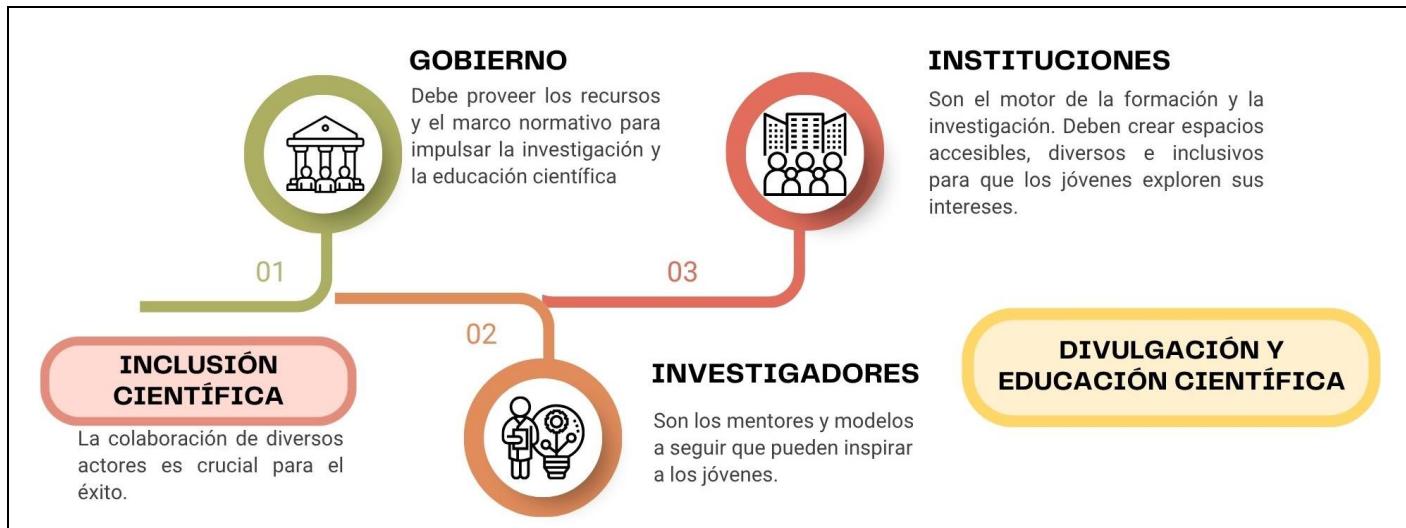
Como consecuencia directa de la falta de condiciones laborales y oportunidades de desarrollo profesional, México enfrenta el persistente fenómeno de la "fuga de cerebros" (Didou, 2013). Muchos profesionales altamente cualificados, a menudo formados con recursos públicos en programas de posgrado nacionales o en el extranjero, optan por buscar estabilidad y mejores salarios fuera del país. Esta migración de talento representa una pérdida neta de la inversión realizada en capital humano y socava la capacidad del país para innovar y competir tecnológicamente a largo plazo (Altbach & de Wit, 2022).

### **1.3. La relación entre la universidad y sector gubernamental**

Si bien las universidades mexicanas son actores fundamentales en la producción científica y la formación de especialistas, la realidad del sector de CTI en México demanda una mayor inversión sostenida y políticas públicas más robustas que permitan capitalizar y retener el talento nacional, transformando el potencial científico en desarrollo tangible para el país. Ciocca y Delgado (2017) ofrecen una visión crítica de los avances y desafíos en la investigación científica, subrayando que, aunque el número de investigadores ha aumentado, las universidades siguen enfrentando barreras estructurales que limitan su capacidad de competir a nivel internacional, como la falta de acceso a equipamiento de calidad y recursos humanos suficientes.

La integración de las universidades con otros actores clave como el sector privado es fundamental para fomentar la innovación y enfatizar la necesidad de políticas que fomenten una colaboración más sólida entre las universidades y los sectores productivos y gubernamentales (Villa-Enciso et al. 2023; Albornoz, 2002). Debe existir una estrecha relación entre los diversos actores involucrados los cuales tienen un objetivo específico para la divulgación y educación científica (Figura 1).

México tiene un sistema educativo donde la educación pública es predominante, con más del 80% de los estudiantes cursando su educación en escuelas públicas. Esta vasta mayoría representa una oportunidad significativa para fortalecer el aprendizaje en Ciencia, Tecnología, Ingeniería, Arte y Matemáticas (STEAM) como palanca de desarrollo nacional. Esta realidad demográfica subraya la necesidad de que las políticas públicas educativas se centren en este sector para lograr un impacto nacional equitativo. El "talento mexicano está listo para brillar", pero requiere las herramientas y el apoyo necesarios para enfrentar los desafíos globales a través de la innovación y el pensamiento crítico (Cámara de Diputados, 2025).



**Figura 1.** Actores principales en el desarrollo y divulgación de la educación científica.

El fomento de la educación STEAM en México se impulsa a través de programas gubernamentales y colaboraciones con la sociedad civil, reconociendo la importancia de estas habilidades para la innovación y el bienestar social. El actual modelo educativo nacional integra el enfoque STEAM como parte de su propuesta pedagógica. Promueve el Aprendizaje Basado en Indagación (STEAM como enfoque) y el Aprendizaje Basado en Proyectos Comunitarios, buscando que los estudiantes propongan soluciones a problemáticas de su contexto real. La Secretaría de Educación Pública (SEP) ha desarrollado modelos específicos para los distintos niveles de educación básica bajo esta iniciativa, con el objetivo de fomentar la igualdad de género en las áreas STEAM desde edades tempranas (Cámara Periodismo Legislativo, 2024). Al implementar la metodología STEAM, se busca que los estudiantes adquieran competencias como la solución de problemas, el estímulo de la creatividad y la capacitación para las exigencias laborales futuras (Azcaray, 2019).

Existen esfuerzos conjuntos entre el gobierno, la sociedad civil organizada y empresas para la toma de decisiones y ha impulsado programas que buscan promover el estudio de estas áreas entre niños y jóvenes, especialmente mujeres.

#### 1.4. Difusión y promoción de la investigación en Veracruz

En Veracruz, el Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico (COVEICYDET) es el organismo público descentralizado del gobierno del estado de Veracruz encargado de fomentar, impulsar, fortalecer y coordinar las actividades de ciencia, tecnología e innovación en la entidad. Creado en 2004, su misión es utilizar la ciencia y la tecnología como pilares para el desarrollo económico y social del Estado, alineándose con el Plan Veracruzano y el Plan Nacional de Desarrollo.

## 1.5. Principales Programas y Acciones de Fomento a la Investigación en 2025

Durante 2025, el COVEICYDET ha lanzado diversas convocatorias y programas, con una inversión inicial que supera los 2 millones de pesos para apoyar a la comunidad científica y estudiantil.

Los principales programas y acciones incluyen:

- **Premio Estatal de Ciencia y Tecnología Veracruz 2025:** Una convocatoria diseñada para reconocer y estimular la labor de los investigadores veracruzanos, promoviendo proyectos de transferencia de conocimientos y tecnologías que generen un impacto social real.
- **Apoyos Complementarios para el Fortalecimiento de Actividades Científicas:** Este programa ofrece estímulos económicos para estudiantes y profesores con el fin de fortalecer sus proyectos de investigación, con el objetivo de ampliar el registro estatal de investigadores.
- **Fomento de Vocaciones Científicas (STEM):** El Consejo organiza diversas actividades dirigidas a niñas, niños y jóvenes para despertar su interés en las áreas de Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (STEM). Un ejemplo de esto es el "Campamento de Empoderamiento Científico 2025", realizado en colaboración con el INAOE en Puebla, enfocado en temas de liderazgo y equidad de género en la ciencia.
- **Proyecto Estratégico de Semiconductores (Futsari):** En colaboración con el estado de Puebla, el COVEICYDET participa en la iniciativa Futsari. Este proyecto busca incorporar el talento veracruzano en el diseño y fabricación de semiconductores, abordando temas de investigación alineados con las prioridades nacionales.
- **Difusión y Divulgación de la Ciencia:** El organismo gestiona y rehabilita espacios como el "Kaná Museo de Ciencia y Tecnología de Veracruz", y utiliza las redes sociales para mostrar el impacto de la ciencia y la innovación en el estado, fomentando el acceso universal al conocimiento. Además, cuenta con un programa permanente denominado "Camino de la Ciencia" Museo Móvil, que tiene por objetivo acercar las temáticas del Museo KANÁ a la población que por diversas razones no puede asistir al mismo.
- **Publicaciones Científicas Veracruzanas:** A través de convocatorias específicas, el COVEICYDET apoya la difusión de resultados de investigación generados en la entidad, contribuyendo a la socialización del conocimiento científico.

Con ello, se busca impulsar la innovación tecnológica y la formación de talento para así facilitar la transferencia de tecnología hacia el sector productivo y aplicar los resultados de la investigación académica en soluciones prácticas para beneficio del desarrollo regional.

## 1.6. Conclusiones y recomendaciones

Es necesario implementar medidas estratégicas que fortalezcan el rol de las universidades, gobierno e instituciones para maximizar su contribución al desarrollo científico y tecnológico en todas las regiones de México, así como reforzar la infraestructura de colaboración.

Hay áreas de oportunidad como lo son el acercamiento de los jóvenes a oportunidades reales, deben tener un acceso a los recursos educativos más equitativo y con la difusión en las plataformas digitales de los programas vigentes un mayor acercamiento en su institución a diversas actividades para fomentar su participación en la investigación.

Es importante mejorar la capacitación de los maestros, la infraestructura en las escuelas, fortalecer la inversión de la investigación y desarrollo en las universidades, fomentar la calidad de las investigaciones y el rol de los investigadores, así como promover la cooperación entre las universidades, gobierno y sociedad en consorcios o redes.

Toda esta integración facilitará el acceso a recursos avanzados y mejorará la capacidad de todos los involucrados para maximizar su contribución al desarrollo científico y tecnológico de nuestro país para así resolver de manera más efectiva los desafíos locales y globales a los que nos enfrentamos.

## 1.7. Referencias bibliográficas

- Albornoz, Orlando (2002). Los vértices de la meritocracia Utopía y Praxis Latinoamericana, vol. 7, núm. 17, pp. 121-124 Universidad del Zulia Maracaibo, Venezuela.
- Altbach, P. G., & de Wit, H. (2022). Responding to the brain drain: Initiatives by European universities. Boston College Center for International Higher Education.
- Aronson, P.P. (2007). El retorno de la teoría del capital humano Fundamentos en Humanidades, vol. VIII, núm. 16, pp. 9-26. Universidad Nacional de San Luis San Luis, Argentina
- Azcaray, J. (2019). Beneficios de la educación STEAM. En Metodología STEAM. Aplicaciones en la educación básica
- Cámara de Diputados. (2025, 13 de marzo). La educación STEAM: la oportunidad de transformar el futuro de los jóvenes. Gaceta Parlamentaria
- Chacón, C. T., & Peña, A. (2012). Actitudes de los estudiantes hacia la ciencia y la tecnología: un análisis de la literatura. Revista de Enseñanza de las Ciencias, 30(1), 17-29.
- Ciocca, D. R., & Delgado, G. (2017). The reality of scientific research in Latin America; an insider's perspective. Cell stress & chaperones, 22(6), 847-852. <https://doi.org/10.1007/s12192-017-0815-8>
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). (2024). Informe de Evaluación de la Política de Desarrollo Social 2024.

Didou, S. (Coord.). (2013). La formación internacional de los científicos en América Latina: debates recientes. ANUIES.

Didou, S., & Gérard, E. (2010). Fuga de cerebros, movilidad académica, redes científicas. UNESCO.

Gamino Carranza, A., & Acosta González, M. G. (2016). Educación, ciencia y tecnología en México: Desafíos para la innovación. En Mexican Higher Education and the Production of Knowledge.

[https://johepal.com/browse.php?a\\_id=106&slc\\_lang=en&sid=1&printcase=1&hbnr=1&hmb=1](https://johepal.com/browse.php?a_id=106&slc_lang=en&sid=1&printcase=1&hbnr=1&hmb=1)

Nieda, J., & Macedo, B. (1997). Un currículo científico para estudiantes de 11 a 14 años. UNESCO.

OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). (2023). Panorama de la educación 2023: Indicadores de la OCDE. Editorial OCDE.

UNESCO IESALC. (2024). Contribución de las universidades a los sistemas nacionales de investigación en América Latina y el Caribe. UNESCO IESALC. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000392046>

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). (2021). Recomendación de la UNESCO sobre la Ciencia y los Investigadores Científicos. UNESCO Publishing.

Villa-Enciso, E., García-Mosquera, J., Valencia-Arias, A., & Medina-Valderrama, C. J. (2023). Exploring the Role of Latin American Universities in the Implementation of Transformative Innovation Policy. Sustainability, 15(17), 12854. <https://doi.org/10.3390/su151712854>

World Bank. (2023). Gasto en investigación y desarrollo (% del PIB) - México. <https://datos.bancomundial.org/indicador/GB.XPD.RSDV.GD.ZS?locations=MX>

## 2. MEJORAMIENTO DE FRIJOL NEGRO OPACO MESOAMERICANO EN EL TRÓPICO DE MÉXICO: AVANCES Y PERSPECTIVAS

Jorge Alberto Acosta Gallegos<sup>3</sup>

José Luis Anaya López<sup>3</sup>

Elizabeth Chiquito Almanza<sup>4</sup>

Yanet Jimenez Hernández<sup>5</sup>

Oscar Hugo Tosquy Valle<sup>6</sup>

**Palabras claves:** *Phaseolus vulgaris*, Mejoramiento genético, Trópico mexicano, Resistencia múltiple, Selección asistida por marcadores moleculares.

### 2.1. Introducción

El frijol representa la principal fuente proteínica para sectores socioeconómicamente vulnerables (41.9% de la población nacional); este aporta el 36% de la ingesta diaria de proteínas (CONEVAL, 2025). Su cultivo constituye una actividad económica importante que involucra a productores familiares, y representa un cultivo básico de seguridad alimentaria en regiones vulnerables como el trópico. El trópico mexicano se localiza principalmente en la región sur-sureste. Está conformado por los estados de Campeche, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz, y Yucatán, aunque hay otros estados que no se consideran del trópico, pero tienen zonas tropicales como Jalisco, Colima, Michoacán, Nayarit, y Sinaloa.

En la región sur-sureste se producen alrededor de 10 variedades y tipos de frijol. El 56% de su producción corresponde a la clasificación “otros frijoles negros”, el 32% a la variedad Jamapa, y el 12% a “otros frijoles de color” (SIAP, 2021). En Chiapas, el principal productor de la región, destaca la producción de “otros frijoles negros” y “otros frijoles de color”; mientras que, en Veracruz, (tercer productor de la región después de Oaxaca), sobresale el cultivo de Jamapa. En Yucatán, se cultivan otras especies como el Ib (*Phaseolus lunatus* L.); en Chiapas, Oaxaca y Guerrero, además de *P. lunatus*, se cultivan *P. dumosus* Macfad. y *P. coccineus* L.

### 2.2. Problemática regional y justificación del mejoramiento

De acuerdo con el análisis realizado por el INIFAP para el desarrollo de un Plan Estratégico para incrementar la productividad y competitividad del frijol en la región sur-sureste, los tres principales problemas en esa región son: 1) la escasez de semilla de alta calidad de variedades mejoradas, 2) el inadecuado aprovechamiento de los materiales nativos, y 3) la sequía terminal.

<sup>3</sup> Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Bajío.

<sup>4</sup> Auxiliar de investigación del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Bajío.

<sup>5</sup> Investigadora del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Bajío.

<sup>6</sup> Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Cotaxtla.

Además, cada subregión tiene problemas específicos. En Yucatán, Campeche, Quintana Roo y Tabasco, destacan los altos costos de producción y la sequía intraestival; en Chiapas y Veracruz el mosaico amarillo dorado producido por el virus del mosaico amarillo dorado del frijol (BGYMV, por sus siglas en inglés), la mancha angular [*Pseudocercospora griseola* (Sacc.) Crous & Braun] y los suelos ácidos (Yoshii-Okuda y col., 1987); mientras que en Guerrero y Oaxaca la sequía intraestival, las plagas, los suelos de baja fertilidad, el mosaico amarillo dorado, y el mosaico común, producido por el virus del mosaico común del frijol (BCMV) y por el virus de la necrosis y el mosaico común del frijol (BCMNV).

En esta región el uso de semilla mejorada es menor en comparación con el promedio nacional. La siembra se hace mayoritariamente con semilla nativa de frijol negro y la producción se dedica en gran medida al autoconsumo o el mercado local (SNICS, 2020); incluso en Veracruz se siembra frijol ‘Negro Michigan’, que se introdujo como grano importado de los EEUU. El poco uso de semilla mejorada en la región sur-sureste puede estar relacionado con los usos y costumbres de cada entidad, la brecha tecnológica que caracteriza en general a la región y con la baja disponibilidad de semilla certificada.

Si bien la mayoría de estos problemas deben abordarse desde una perspectiva multidisciplinaria, el mejoramiento genético constituye un componente estratégico para abordar los desafíos productivos, de nutrición y adaptación climática que enfrenta la región, contribuyendo al desarrollo de variedades con características agronómicas superiores.

### 2.3. Evolución histórica y metodológica del mejoramiento genético

Entre 1951 y 2025 el INIFAP desarrolló 30 de las 31 variedades de frijol negro mesoamericano registradas para el trópico, evidenciando una progresión desde métodos empíricos de selección en variedades nativas hasta la incursión en la selección asistida por marcadores moleculares (Cuadro 1). La evolución se caracteriza por cuatro fases distintivas: fundacional (uso de variedades nativas) (1951-1969), transición hacia métodos de hibridación (1973-1985), consolidación (1992-2014), y la incorporación de herramientas moleculares e inoculación con patógenos (2018-2025).

**Fase fundacional (1951-1969).** La fase fundacional del mejoramiento se caracterizó por el desarrollo de seis variedades pioneras mediante metodologías de selección masal e individual aplicadas a germoplasma nativo local. Las colectas se realizaron estratégicamente en Veracruz y la Huasteca Hidalguense, regiones reconocidas por su diversidad genética y adaptación específica. Los objetivos de mejoramiento priorizaron resistencia a antracnosis (*Colletotrichum lindemuthianum*) y tolerancia a roya (*Uromyces appendiculatus*) y tizones, enfermedades prevalecientes en condiciones tropicales. Este período estableció los fundamentos genéticos del programa, siendo Jamapa (Cárdenas-Ramos y Velo, 1964) la variedad más influyente y emblemática, que continua en uso y ha sido usada como progenitor de distintas variedades en México (Cuadro 1) y otros países.

**Fase de transición a métodos de hibridación (1973-1985).** Esta fase de poco más de una década, marca una transición metodológica caracterizada por la coexistencia entre la selección tradicional de variedades criollas y las primeras hibridaciones dirigidas. Se desarrollaron seis variedades que reflejan esta dualidad técnica: Negro Chiapas (1981), Negro Veracruz (1981) y Negro Frailesca (1982) a través de selección masal tradicional, mientras que Sataya 425 (1973), Negro Nayarit 80 (1981), Negro Huasteco 81 (1982) y Negro Sinaloa (1985) por hibridación y selección sistemática. Esta fase representa el período de experimentación técnica donde los mejoradores evaluaron la eficiencia comparativa entre metodologías tradicionales y enfoques híbridos emergentes, sentando las bases para la adopción masiva de cruzamientos dirigidos en la siguiente fase.

**Fase de consolidación (1992-2014).** La fase de consolidación constituyó el período más productivo y técnicamente sofisticado, con el desarrollo de 11 variedades mediante hibridación y selección dirigida. Este período se vio profundamente influenciado por la colaboración estratégica entre el INIFAP y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), establecida en 1972 y que alcanzó su máxima productividad durante estos años.

La alianza INIFAP-CIAT resultó en el desarrollo de variedades emblemáticas incluyendo Negro Huasteco 81 (primera variedad de la colaboración), Negro Tacaná (1993), Negro Papaloapan (2005), y Negro Comapa (2008) para Veracruz, así como Negro Tropical (2001), Negro Grijalva (2003), y Frailescano (2013) para Chiapas (Villar-Sánchez y col., 2020). Todas las variedades derivadas de esta colaboración incorporaron resistencia a BCMV, y algunas a BGYMV y a mancha angular. A la par con Frailescano, se registró en Chiapas la variedad de grano rojo, Sangre Maya, con resistencia múltiple a enfermedades.

Las variedades de amplia adaptación como Negro Comapa y Negro Papaloapan ejemplifican el éxito de la colaboración mencionada, presentando resistencia integral a patógenos diversos y estabilidad productiva a través de diversos ambientes. La contribución del CIAT incluyó donación de fuentes de resistencia específicas, familias élite con probabilidad de registro comercial, y transferencia de metodologías avanzadas de mejoramiento. La fase culminó con Verdín (2014), variedad que integra metodologías híbridas tradicionales y anticipa la transición hacia herramientas biotecnológicas, siendo de planta erecta, precoz, resistente a mosaico común, y tolerante a estreses biótico y abiótico.

**Fase de incorporación de herramientas moleculares (2018-2025).** Esta fase representa los primeros esfuerzos sistemáticos de incorporación de marcadores moleculares en el Programa de Mejoramiento de Frijol del INIFAP. Se caracteriza por colaboraciones limitadas entre el Campo Experimental Bajío (CEBAJ), donde se realiza la selección asistida por marcadores moleculares (SAMM), y las sedes de mejoramiento del Campo Experimental Cotaxtla, Veracruz y del Campo Experimental Santiago Ixcuintla en Nayarit. El producto de esta colaboración culminó con el desarrollo de cuatro variedades con genes específicos mediante SAMM de tipo SCAR y CAPS, que, si bien son funcionales, requieren modernización hacia plataformas más robustas, precisas y económicamente eficientes. Actualmente existen marcadores moleculares de tipo SNP basados en la tecnología PCR Competitiva Específica de Alelos (KASP, por sus siglas en inglés)

ligados a la resistencia a mancha angular, antracnosis, BCMV, BGYMV, roya, tizón común, y oscurecimiento lento del grano en variedades de semilla clara (<https://excellenceinbreeding.org/module3/kasp>) que requieren estandarización y validación en germoplasma mexicano antes de su implementación rutinaria.

Los genes introgresados mediante SAMM son el gen I de resistencia a BCMV, el gen bc-3 de resistencia a BCMV y BCMNV, y el gen bgm-1 de tolerancia a BGYMV, las variedades desarrolladas son San Blas con los genes I + bc-3 (2018), Rubí con los genes I + bgm-1 (2018), Rincón Grande con los genes I + bgm-1 (2022) y Tijax con el gen I (2025), que les confieren resistencia simple o múltiple a las principales enfermedades virales presentes las regiones productoras objetivo. La precisión en introgresión genética permite piramidar resistencias múltiples sin comprometer características agronómicas deseables, aunque los procesos actuales usados en el CEBAJ requieren optimización técnica.

**Cuadro 1.** Variedades mejoradas de frijol negro mesoamericano para el trópico mexicano, desarrollo, metodologías y características agronómicas.

Variedad	Año de desarrollo/registro/TO <sup>a</sup>	Condición de cultivo <sup>b</sup>	Método de obtención (genealogía)	Atributos <sup>c</sup>	Área de recomendación
Fase de incorporación de herramientas moleculares (2018-2025)					
Tijax <sup>d</sup>	2025/2025/en trámite	T, HR, R.	Selección masal de la variedad Jamapa y selección asistida por marcadores moleculares ligados a resistencia a los virus BCMV (Jamapa-M-M-M-M).	Resistente a mosaico común; amplia adaptación al trópico y subtrópico (gen I).	Trópico seco.
Rincón Grande <sup>e</sup>	2022/2023/3158	T, HR, R.	Hibridación y selección asistida por marcadores moleculares ligados a resistencia a los virus BCMV y BGYMV (Jamapa/XRAV-187-3-1-2).	Alto rendimiento; resistente a roya, antracnosis y mosaico común (gen I), tolerante al mosaico amarillo dorado (gen bgm-1).	Áreas tropicales y subtropicales de Veracruz y Chiapas.
San Blas <sup>d</sup>	2018/2019/2183	T, HR, R.	Hibridación y selección asistida por marcadores moleculares ligados a resistencia a los virus BCMV y BCMNV (Jamapa/XRAV-187-3).	Resistente a mosaico común y raíz negra (genes I + bc-3).	Trópico seco y El Bajío Guanajuatense.
Rubí <sup>e</sup>	2018/2019/-	T, HR, R.	Hibridación y selección asistida por marcadores moleculares ligados a resistencia a los virus BCMV y BGYMV (Jamapa/XRAV-187-3-1-8).	Precoz; resistente a mosaico común (gen I); tolerante a mosaico amarillo dorado (gen bgm-1); amplia adaptación y potencial productivo.	Veracruz y Chiapas.
Fase de consolidación (1990-2014)					

<b>Variedad</b>	<b>Año de desarrollo/registro/TO <sup>a</sup></b>	<b>Condición de cultivo <sup>b</sup></b>	<b>Método de obtención (genealogía)</b>	<b>Atributos <sup>c</sup></b>	<b>Área de recomendación</b>
Verdín <sup>e,*</sup>	2014/2015/-	HR, T.	Hibridación y selección [(SXB 114/DOR 605)//SXB 123]; línea SEN 70.	Precoz; resistente a mosaico común; tolerante a antracnosis, mosaico amarillo dorado y a sequía terminal.	Veracruz y Chiapas.
Frailescano <sup>f,*</sup>	2013/2014/-	T, HR, R.	Hibridación y selección [(NCB 228/RCB 224)F1//SXB 244]; línea SCN 6.	Precoz, resistente a mosaico común; tolerante a mosaico amarillo dorado y a suelos ácidos.	Chiapas.
Coranay <sup>g</sup>	2010/2011/1040	HR.	Selección individual y masal, en colectas de la variedad Jamapa (I-AUTAN-02-427-48-26-6-MU).	Tolerante a roya.	Zona costera de Nayarit.
Costenay <sup>g</sup>	2010/2011/1039	HR.	Selección individual y masal, en colectas de la variedad Jamapa (I-CESIX 02-06-CM (6)-MU).	Tolerante a roya.	Zona costera de Nayarit.
Negro Comapa <sup>e,*</sup>	2008/2010/-	HR, T.	Hibridación y selección [(VAX-4/A-801)//DOR 500].	Tolerancia a mancha angular, roya y mosaico amarillo dorado; alto rendimiento y amplia adaptación.	Áreas tropicales y subtropicales del estado de Veracruz.
Negro Grijalva <sup>f,*</sup>	2003/2008/-	T, HR, R.	Hibridación y selección [(DOR 364/G 18521)//(DOR 365/IN 100)]; línea DOR 445.	Tolerante a mosaico amarillo dorado; precoz, planta erecta, tolera suelos ácidos .	Áreas tropicales de Chiapas y regiones similares.
Negro Papaloapan <sup>e,*</sup>	2005/2007/-	T, HR, R.	Hibridación y selección [(DOR 364/G 18521)//(DOR 365/LM-30630)]; DR14564-9-CM-CM-CM; línea DOR 454.	Tolerancia a roya, mancha angular; antracnosis, mosaico amarillo dorado, adaptación en suelos ácidos.	Áreas tropicales de Veracruz y Chiapas.
Garceño <sup>h</sup>	2004/2006/-	-	-	Adaptación a las condiciones de Chiapas.	Chiapas.
Negro Tropical <sup>e,*</sup>	2001/2007/-	T, HR, R.	Hibridación y selección [DOR 364/G 18521//DOR 365/IN100 DR14564-5-CM(15B)-M-M-M]; línea DOR 500.	Resistente a mosaico común, roya, y mancha angular; tolerante a mosaico dorado, antracnosis, tizón común, tizón de halo y sequía. Tolera suelos ácidos.	Trópico húmedo. Veracruz y costa de Chiapas.
Negro Medellín <sup>e</sup>	2000/2004/-	HR.	Hibridación y selección (D-145/Negro Mochis 84 II-307-CB-5E-OE-M-M-M).	Resistente a roya, mancha angular; tolerante al mosaico dorado y a suelos de baja fertilidad	Trópico húmedo de México.

Variedad	Año de desarrollo/registro/TO <sup>a</sup>	Condición de cultivo <sup>b</sup>	Método de obtención (genealogía)	Atributos <sup>c</sup>	Área de recomendación
				ligeramente ácidos; amplia adaptación.	
Negro Pacífico <sup>i</sup>	1998/2004/-	HR.	Hibridación y selección [Sataya 425/ICA Pijao//Guat. L-81-64/Guat. L-82-43 II284FrMo-CM(3B)-4-M-M-U].	Tolerante a mosaico dorado, mosaico común y roya.	Trópico seco de Sinaloa y Nayarit.
Negro 8025	1994/1997/267	HR, R	Hibridación y selección (Jamapa / Compuesto negro Chimaltenango 2).	Resistente a roya, amplia adaptación	Trópico húmedo, Valles Altos y Bajío
Negro Tacaná <sup>e,*</sup>	1993/2013/-	HR, R.	Hibridación y selección [DOR 364/G 18521//DOR 365/LM30630 DR14564-3-CM(15B)-M-M-M]; línea DOR 390.	Resistente a mosaico común; tolerante a mosaico amarillo dorado.	Trópico húmedo, Veracruz y costa de Chiapas.
Negro Cotaxtla-91 <sup>e</sup>	1992/2004/-	HR.	Hibridación y selección [D-149/1397; 1199CM-7T-CM (2)].	Resistente a roya y antracnosis; tolerante al mosaico dorado y a la mancha angular.	Veracruz y regiones similares. Trópico Húmedo.
Negro INIFAP <sup>e</sup>	1992/2004/266	HR, T.	Hibridación y selección [D-149/1397 II99-CM-7T-CM-(2)].	Tolerante al mosaico dorado; resistente a roya.	Centro de Chiapas y regiones tropicales similares.
Fase de transición hacia métodos de hibridación (1973-1985)					
Negro Sinaloa	1985/-/-	-	Hibridación y selección (Veracruz-101-9-12/Selección en Jamapa 3 II755-F-MEC-F 5-4T-M-2-1-U).	Resistente a roya y antracnosis; tolerante a virosis; planta erecta moderadamente tolerante a tizón común y tizón de halo.	Sinaloa y norte de Nayarit.
Negro Frailesca	1982/-/-	-	Selección en variedad criolla de Veracruz (Medellín-2M-2M-M).	Tolerante a la roya.	Valles Centrales de Chiapas.
Negro Huasteco 81 *	1982/-/-	HR, R.	Hibridación y selección [(ICA-Pijao/Porrillo 70 DR 3757-8g-CM (11)]; línea D-145.	Resistente a mosaico común y roya; tolerante al mosaico dorado y mancha angular.	Trópico húmedo, y riego en el trópico seco y región templada subhúmeda.
Negro Chiapas	1981/-/-	T.	Selección masal en variedad criolla (Tepehua-4M-1M-M).	Resistente a antracnosis; tolerante a roya , tizón común y tizón de halo.	Valles Centrales de Chiapas.
Negro Nayarit 80	1981/-/-	HR.	Hibridación y selección (Jamapa/S-89-N//Jamapa/Canario 101 II-428-M-M).	Planta erecta. Tolerante a antracnosis.	Nayarit.

Variedad	Año de desarrollo/registro/TO <sup>a</sup>	Condición de cultivo <sup>b</sup>	Método de obtención (genealogía)	Atributos <sup>c</sup>	Área de recomendación
Negro Veracruz <sup>e</sup>	1981/-/-	HR, R.	Selección masal en variedad criolla (Colección Cempoala, Ver.-1 M).	Tolerante a roya, antracnosis y mosaico dorado.	Centro de Veracruz y áreas similares.
Sataya 425	1973/-/-	T, R.	Hibridación y selección (Veracruz 1-A-6/Perry Marrow//Jamapa/Canario 101).	Tolerante a antracnosis y roya.	Nayarit, Sinaloa y Jalisco.
Fase fundacional (1951-1969)					
Villa Guerrero	1969/-/-	R, T.	Selección individual en variedad criolla (México-325-1).	Resiste a antracnosis.	Región templada subhúmeda (Morelos y Guerrero).
Actopan	1962/-/-	HR, R.	Compuesto de seis líneas derivadas de variedades criollas colectadas en Paso de Ovejas, El Morro, Tinajas, Rinconada y Zempoala, Veracruz y una línea derivada de variedad criolla de la Huasteca Hidalguense.	Tolerante a antracnosis, roya, tizón común y tizón de halo.	Veracruz; riego en Sinaloa, zonas tropicales y semitropicales.
Antigua	1962/-/-	T.	Introducción y selección individual en variedad criolla de la Huasteca Hidalguense (Hidalgo-1 M).	Resistente a antracnosis; tolerante a la roya, tizón común y tizón de halo.	Chiapas, Veracruz, zonas tropicales y semitropicales.
Veracruz 268	1960/-/-	T, R.	Selección masal en variedad criolla de Acatlán, Ver. (Veracruz 268).	Tolerante a roya, antracnosis, mosaicos, clorosis y pudriciones de la raíz.	Trópico húmedo y partes del trópico seco.
Jamapa	1964/2004/-	HR, T, R.	Selección individual y masal, mezcla de 15 líneas de la colección realizada en Paso de Ovejas, Ver. (Veracruz 87-15).	Tolerante a tizón común, antracnosis, mosaicos, tizón de halo y roya.	Altiplano subhúmedo, trópico seco y trópico húmedo.
Arriaga	1951/-/-	T.	Selección individual y masal de variedad criolla (Arriaga 2-2-1-M).	Resistente a antracnosis; tolerante a la roya, tizón común y tizón de halo.	Veracruz, Chiapas, Campeche y Yucatán.

-: Indica que no se registró la variedad, no se tiene título de obtentor o no se cuenta con información. a: año de desarrollo/año de registro en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales/Título de obtentor (TO), b: Condiciones de cultivo, T = Temporal; R = Riego; HR = humedad residual. c: Se indica el gen de resistencia en las variedades donde se confirmó su presencia por marcadores moleculares. d: Desarrollada en el C. E. Bajío. e: Desarrollada en el C. E. Cotaxtla. f: Desarrollada en el C. E. Centro de Chiapas. g: Desarrollada en el C. E. Santiago Ixcuintla. h: Desarrollada por Agroservicios Pioneros, S. A. de C. V. i: Desarrollada en el C. E. Valle del Fuerte. Elaborado con información del Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS, 2025); Yoshii y Rodríguez, 1982; Rosales-Serna y col., 2004; Cruz-Cruz y col., 2021; Ibarra-Pérez y col., 2022; Tosquy-Valle y col., 2025.

## 2.4. Estrategia de mejoramiento y limitaciones de adopción

Las 31 variedades de frijol negro mesoamericano muestran una orientación estratégica al trópico húmedo y en menor proporción al trópico seco, concentrándose en Chiapas (14 variedades), Veracruz (12) y Nayarit (7). Esta distribución refleja la constante demanda por variedades con más atributos deseables. Variedades como Negro Tropical, Negro Comapa y Negro Papaloapan ejemplifican adaptación amplia, siendo recomendadas para múltiples estados y condiciones agroecológicas.

El análisis de la genealogía de las variedades revela que Jamapa constituye el progenitor más utilizado (29% de las variedades), seguido por las líneas DOR del CIAT que incorporaron resistencia a mosaico amarillo dorado. La evolución muestra una progresión estratégica desde variedades con resistencia simple en la fase fundacional hacia la piramidación de genes múltiples durante la consolidación, culminando con la integración de resistencia viral específica mediante selección asistida por marcadores moleculares en la fase actual.

Pese a los esfuerzos de mejoramiento, el uso de semilla nativa en la región sur-sureste alcanza 73-88% según el ciclo productivo, contrastando con la disponibilidad y el potencial de las variedades mejoradas. Entre los factores que limitan su adopción se incluyen su desconocimiento, la limitada disponibilidad de semilla certificada, sistemas de transferencia tecnológica deficientes e insuficientes, factores socioculturales que favorecen el uso de materiales tradicionales, y limitaciones económicas de los pequeños productores. Además, existe un desajuste entre las necesidades específicas de sistemas productivos de subsistencia que cultivan variedades trepadoras intercaladas con otros cultivos y las características de las variedades arbustivas desarrolladas principalmente para sistemas de monocultivo. El sistema de maíz doblado en madurez fisiológica y siembra de frijol de suelo en agosto en Chiapas permite el uso de variedades mejoradas de hábito de crecimiento arbustivo.

Los 74 años de mejoramiento evidencian un programa técnicamente exitoso que ha logrado diversificar resistencias y adaptaciones regionales. Sin embargo, persiste la brecha entre desarrollo tecnológico y la adopción, combinada con los desafíos emergentes del cambio climático y la finalización de la colaboración CIAT-INIFAP; esto demanda una reorientación estratégica del programa hacia objetivos más amplios, metodologías modernas y sistemas de transferencia más efectivos.

## 2.5. Desafíos futuros de mejoramiento para el trópico

El cambio climático representa el desafío más complejo para el mejoramiento futuro, demandando variedades más resilientes, tolerantes a temperaturas extremas (diurnas  $>35^{\circ}\text{C}$ , nocturnas  $>20^{\circ}\text{C}$ ), sequía prolongada e intermitente, y mayor incidencia de plagas y enfermedades emergentes. La respuesta requiere el aprovechamiento sistemático de la biodiversidad nativa y mejorada, de facilidades e infraestructura para obtener tres generaciones

de selección por año, entre otras. A la par que se inicia el próximo ciclo de mejoramiento, se debe multiplicar la semilla de las variedades de reciente registro para su amplio uso en la producción.

La selección de materiales nativos sobresalientes constituye una prioridad estratégica mediante evaluación en diferentes ambientes para identificar genotipos superiores en rendimiento, resistencia a enfermedades y calidad de grano. En este caso se debe prestar especial atención en la identificación del germoplasma, pues algunos materiales mejorados difundidos con anterioridad son considerados como nativos por los técnicos y productores noveles.

México alberga la mayor diversidad global de *Phaseolus*, recurso subutilizado en programas de mejoramiento. Los estados de Chiapas, Oaxaca y Guerrero poseen biodiversidad excepcional de la forma domesticada de las especies: *P. vulgaris*, *P. coccineus*, *P. dumosus*, *P. lunatus*, y *P. acutifolius*.

El aprovechamiento sistemático de *P. vulgaris* silvestre mediante caracterización fenotípica y desarrollo de poblaciones de introgresión constituye una oportunidad de mediano y largo plazo. Las especies relacionadas como *P. coccineus* y *P. dumosus* representan fuentes potenciales para hibridación interespecífica, aunque con limitaciones técnicas significativas. Las especies *P. lunatus* y *P. acutifolius*, si bien no compatibles reproductivamente, poseen características de adaptación a estreses que pueden informar estrategias de selección en *P. vulgaris* o pueden ser objeto de mejoramiento per se e impulsar su producción y consumo.

El desarrollo de poblaciones diversas mediante cruzamientos dirigidos entre progenitores élite tolerantes a sequía y calor con acervos genéticos contrastantes representa un objetivo fundamental. Las estrategias de escape incluyen identificación y selección de materiales precoces que eviten coincidencia entre períodos de máximo estrés ambiental con etapas críticas de desarrollo. La caracterización de mecanismos fisiológicos de movilización de asimilados bajo estrés constituye línea prioritaria de investigación aplicada.

Los objetivos de mejoramiento deben expandirse hacia tolerancia a pudrición carbonosa del tallo (*Macrophomina phaseolina*) y a los insectos chicharrita (*Empoasca spp.*) y al trío de reciente introducción al país, adaptación a condiciones de baja fertilidad edáfica, suelos ácidos, considerar características culinarias (tiempo de cocción, digestibilidad), y adaptación a diversos sistemas de cultivo incluyendo variedades trepadoras para sistemas de subsistencia.

La modernización del mejoramiento debe enfocarse en la migración hacia marcadores de tipo SNP para características con genes conocidos, mejoramiento de protocolos de inoculación artificial para enfermedades fungosas, caracterización exhaustiva del germoplasma nativo y mejorado mediante métodos fenotípicos, y desarrollo de protocolos de evaluación bajo estreses múltiples. La investigación en marcadores para tolerancia a factores abióticos debe continuar como objetivo a largo plazo sin expectativas de aplicación inmediata.

La reducida colaboración actual entre CIAT e INIFAP e INIFAP y universidades americanas, presenta tanto desafíos como oportunidades para el programa regional. Las necesidades inmediatas incluyen el fortalecimiento de colaboraciones con el CEBAJ para la selección asistida por marcadores moleculares, el establecimiento de sitios de evaluación estratégicos en Nayarit y los campos experimentales en los distintos estados de la región sur-sureste, consideración de diferencias agroclimáticas de zonas altas de Oaxaca y Guerrero, y el desarrollo de capacidades técnicas locales.

Paralelamente, existe potencial para retomar colaboración con centros internacionales, particularmente CIAT, y explorar alianzas con universidades norteamericanas con programas especializados en leguminosas que puedan aportar germoplasma superior, metodologías innovadoras y perspectivas complementarias para enfrentar los desafíos emergentes del mejoramiento. Es necesario explorar la colaboración complementaria con instituciones nacionales que cuenten con posgrado y puedan contribuir en temas de investigación básica, incluyendo cruzas interespecíficas y verificación de transferencia de caracteres útiles. Estas deben desarrollar conocimientos complementarios a los que dominan los investigadores en el INIFAP.

## 2.6. Referencias bibliográficas

- Cárdenas-Ramos, F. y Velo, G. (1964). Jamapa, una variedad mejorada de frijol para el trópico. In: 3<sup>a</sup>. Reunión del Proyecto Cooperativo Centro Americano de Mejoramiento de Frijol. Antigua, Guatemala. 35-38.
- Cruz-Cruz, E., Acosta-Gallegos, J. A., Reyes-Muro, L., y Cueto-Wong, J. (2021). Variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) del INIFAP. Ciudad de México: INIFAP-Oficinas Centrales. Libro Técnico, (2), 98.
- CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social) 2025. Resultados de pobreza en México 2008-2018 a nivel nacional y por entidades federativas. [En línea]. Disponible en: <https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza-2018.aspx>. Consultado: 09 de septiembre de 2025.
- Ibarra-Pérez, F. J., Tosquy-Valle, O. H., Rodríguez-Rodríguez, J. R., Villar-Sánchez, B., López-Salinas, E., y Anaya-López J. L. (2022). Rubí: Nueva Variedad Mejorada De Frijol Negro Para Las áreas Tropicales De Veracruz Y Chiapas. Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas, 13(3), 577-87. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i3.2227>.

Rosales-Serna, R., Acosta-Gallegos, J. A., Muruaga-Martínez, J. S., Hernández-Casillas, J. M., Esquivel-Esquivel, G., y Pérez-Herrera P. (2004). Variedades mejoradas de frijol del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y pecuarias. SAGARPA. INIFAP. CIRCE. Campo Experimental Valle de México. Chapingo, Estado de México, México. Libro Técnico, (6), 148.

SNICS (Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas) 2020. Programa de abasto de semilla de frijol. [En línea]. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/632082/Programas\\_de\\_abasto\\_Frijol.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/632082/Programas_de_abasto_Frijol.pdf). Consultado el 12 de septiembre de 2025.

SNICS (Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas) 2025. Catálogo Nacional de Variedades Vegetales. [En línea]. Disponible en: <https://lookerstudio.google.com/u/0/reporting/5b7206ba-e190-48fe-9696-73523bfccf58/page/itBWB>. Consultado el 01 de septiembre de 2025.

SIAP (Servicio de información agroalimentaria y pesquera) 2021. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. [En línea]. Disponible en: [https://nube.agricultura.gob.mx/cierre\\_agricola/](https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/). Consultado el 05 de septiembre de 2025.

Tosquy-Valle, O.H., Ibarra-Pérez, F. J., Acosta-Gallegos, J. A., Esqueda-Esquivel, V. A., y Anaya-López, J. L. (2025). Rincón Grande: Variedad De Frijol Negro Para Veracruz Y Chiapas. Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas, 16(3), e3646. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i3.3646>.

Villar-Sánchez, B., Tosquy-Valle, O. H., López-Salinas, E., Cruz-Chávez, F. J., Acosta-Gallegos, J. A. (2020). Frailescano: nueva variedad de frijol negro opaco para Chiapas. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 11(8), 1985-1992.

Yoshii, K.; Rodríguez, J. (1982). Negro Huasteco-81. Nueva variedad de frijol para el trópico de México. SARH. Veracruz, México. Folleto Número (1), 10.

Yoshii-Okuda, K., Rodríguez-Rodríguez, J. R., Núñez-González, S., Carrizales-Mejía, N., Ibarra-Pérez, F. J., García-Pérez P. (1987). Rendimiento y adaptación de la línea D-145 tolerante al mosaico dorado del frijol en el sureste de México. Revista Fitotecnia Mexicana, (9), 57–63. <https://doi.org/10.35196/rfm.1987.9.57>.

### 3. USO DE MICROORGANISMOS PARA EL CONTROL DE PLAGAS

Héctor Cabrera Mireles<sup>6</sup>

**Palabras Claves:** Control biológico, Manejo integrado de plagas, Hongos entomopatógenos, *Beauveria bassiana*.

#### 3.1. Introducción

La agricultura moderna enfrenta serios desafíos de sostenibilidad, como el cambio climático, el agotamiento de recursos y la degradación ambiental, que afectan directamente la productividad de los cultivos. Entre los factores más preocupantes se encuentran las plagas y enfermedades, responsables de fuertes pérdidas a nivel mundial, siendo los insectos los que causan alrededor del 10.8% de las pérdidas agrícolas globales (Garai, 2024). Aunque la mayoría de los insectos cumplen funciones beneficiosas, una fracción importante es perjudicial para la producción de alimentos y fibras, así como para la salud y el bienestar humano (Jankielsohn, 2018).

Para contrarrestar estas pérdidas, los agricultores han recurrido al uso intensivo de plaguicidas sintéticos, que en los últimos 30 años prácticamente se han duplicado, alcanzando los 4 millones de toneladas en 2018 (Smagghe *et al.*, 2023). Estos compuestos han sido clave para sostener la productividad, pero también han generado graves consecuencias ambientales y ecológicas: contaminación de suelos y cuerpos de agua, afectación de organismos benéficos, desarrollo de resistencia en plagas, resurgimiento de plagas secundarias y la alteración de los enemigos naturales que regulan los ecosistemas. Esta situación ha impulsado la búsqueda de alternativas más seguras, confiables y sostenibles (Skinner *et al.*, 2014). En este contexto, el Manejo Integrado de Plagas (MIP) se presenta como una estrategia fundamental al combinar métodos químicos y no químicos para minimizar riesgos a la salud y al ambiente (Karlsson *et al.*, 2020).

Dentro del MIP, el control biológico ocupa un lugar central al emplear depredadores, parasitoides y microorganismos entomopatógenos (bacterias, hongos, virus y nematodos) para combatir plagas clave (Angon *et al.*, 2023). Entre ellos, los hongos entomopatógenos (HEP) son especialmente prometedores, ya que además de controlar eficazmente insectos plaga, contribuyen a la salud del suelo al favorecer la diversidad microbiana, mejorar la nutrición vegetal y suprimir patógenos dañinos (Vivekanandhan *et al.*, 2024).

El uso de HEP, por tanto, no solo reduce la dependencia de plaguicidas químicos, sino que también fortalece la resiliencia de los agroecosistemas al aprovechar la llamada “resistencia ambiental”, en la que los entomopatógenos presentes de manera natural ayudan a contener las poblaciones de plagas (Rajula *et al.*, 2020).

<sup>6</sup> Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Cotaxtla.

El objetivo de este capítulo es presentar las generalidades del uso de microrganismos entomopatógenos como agentes de control biológico de plagas agrícola y se particulariza en el uso de hongos entomopatógenos por ser, en la actualidad, el grupo de mayor impacto en beneficio de los agroecosistemas.

### **3.2. El control biológico y los microorganismos benéficos**

El control biológico de plagas busca reducir los daños causados por insectos sin recurrir a la erradicación total, utilizando organismos benéficos como hongos, bacterias, virus y nematodos entomopatógenos. Estos agentes son seguros para el medio ambiente, retrasan la resistencia de las plagas y forman parte fundamental del MIP mediante enfoques como el control clásico, el aumento y la conservación. Su aplicación permite sustituir parcialmente los insecticidas químicos, ofreciendo una alternativa más sostenible y confiable (Garai, 2024; Sharma R. y Sharma P., 2021).

Dentro de estos agentes, los nematodos entomopatógenos (NEP) destacan por su rápida acción contra una amplia variedad de plagas agrícolas, aunque su participación en el mercado aún es reducida (menos del 5%). Los NEP tienen una amplia gama de huéspedes como mosquitos de hongos, trips, gusanos cortadores, gorgojos de la vid, entre otros (Ruiu et al., 2024; Singh et al., 2024). Las bacterias entomopatógenas (BEP) dominan el sector, representando el 66% de los plaguicidas microbianos, pero solo el 1.9% del mercado mundial de plaguicidas, siendo *Bacillus thuringiensis* (Bt) el más utilizado por su eficacia contra lepidópteros, coleópteros, dípteros y otros insectos, aunque con limitaciones por su falta de persistencia en el ambiente (Deka et al., 2021). Los virus entomopatógenos (VEP), en especial los baculovirus, son muy específicos y seguros, aunque con menor participación comercial, se ubican detrás de bacterias y hongos en el mercado de plaguicidas microbianos. Son muy efectivos contra diversas plagas agrícolas como lepidópteros, dípteros, coleópteros y pulgones, incluyendo especies de *Spodoptera*, *Helicoverpa* y *Cydia* (Smagghe et al., 2023).

Los HEP incluyen más de 700 especies patógenas para insectos, aunque solo algunos géneros como *Beauveria*, *Metarhizium*, *Cordyceps* y *Akanthomyces* se usan comercialmente como micoínsecticidas. Estos representan el 19% del mercado mundial de bioplaguicidas, dominado por *Beauveria bassiana* (36%) y *Metarhizium anisopliae* (28%), que son eficaces contra una gran variedad de plagas agrícolas, forestales, domésticas y de invernadero (trips, mosca blanca, pulgones, coleópteros, dípteros, lepidópteros, ácaros, mosquitos, entre otros) (Singh, 2024; Quesada, 2024).

### **3.3. ¿Qué son los HEP?**

Los HEP son especies de microorganismos patógenos para los insectos que desempeñan un papel importante en el control de las poblaciones de insectos, lo que los convierte en uno de los

primeros factores de control de plagas. Los entomopatógenos pueden verse como aquellos microbios que evolucionaron con sus huéspedes desarrollando la capacidad de superar sus barreras inmunológicas, explotándolos con éxito como recursos nutricionales útiles, son parásitos que poseen la capacidad natural de infectar fatalmente a los insectos, sin causar daños al ecosistema (Ruiu, 2024). Los hongos entomopatógenos son de interés en la protección de cultivos como agentes de control biológico directo para plagas de artrópodos debido a su modo de acción tegumentario (Vega et al., 2012). Los insectos de diversos órdenes, como lepidópteros, coleópteros, hemípteros, dípteros, ortópteros e himenópteros, son susceptibles a la infección por HEP (Risbey, 2024).

Más de 750 especies de hongos de alrededor de 90 géneros son patógenos para insectos clasificados en varios filos, a saber: *Chytridiomycota*, *Ascomycota*, *Basidiomycota* y el subfilo *Entomophthoromycotina* (Rajula, 2020). Sin embargo, solo unos pocos aparecen en la gama actual disponible de insecticidas comerciales derivados de HEP, denominados micoinsecticidas. Entre ellos, *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae* e *Isaria fumosoroseus* son los tres principales contribuyentes de HEP debido a su amplia variedad de huéspedes y facilidad de recolección de esporas (Litwin, 2020).

La mayoría de las plagas de insectos económicamente importantes son susceptibles a la infección por entomopatógenos, lo que destaca el poder de los microorganismos patógenos. En la mayoría de los casos, son inofensivos para los insectos benéficos (Skinner, 2014) y tienen bajos niveles de toxicidad para los mamíferos (Rumbos, 2017), lo que los considera una alternativa segura y ecológica a los plaguicidas químicos (Risbey, 2024). Los HEP, como *Beauveria* spp., *Metarhizium* spp. e *Isaria* spp., son componentes importantes y generalizados de los ecosistemas terrestres (Quesada, 2024), mientras que algunos hongos, como los de la familia Hypocreales, exhiben amplios rangos de huéspedes; otros, como Entomophthorales, son más específicos del huésped (Garai, 2024).

### 3.4. ¿Cómo actúan los HEP?

Los HEP actúan parasitando y matando insectos plagas, reduciendo efectivamente sus poblaciones sin la necesidad de productos químicos nocivos plaguicidas (Han, 2022). El proceso inicia cuando las esporas se adhieren a la cutícula del insecto o penetran por aberturas naturales, utilizando presión mecánica y enzimas que degradan la cutícula. Una vez dentro del hemocele, el hongo se desarrolla, obtiene nutrientes y libera toxinas que debilitan la inmunidad del huésped, lo que lleva a una colonización progresiva y finalmente a la muerte del insecto (Moharran, 2021). La infección se ve potenciada por la presencia de estructuras especializadas como los apresorios y por toxinas fúngicas (destruxinas, bavericina, efrapeptinas), además de enzimas líticas que digieren la cutícula. La mortalidad del insecto ocurre por daño mecánico, toxinas, obstrucción de vasos o agotamiento de nutrientes. Tras la muerte, el insecto se momifica y el hongo produce nuevos conidios que se dispersan por agua, viento o a través de otros

insectos, asegurando la continuidad del ciclo y facilitando el control de plagas (Moharran, 2021; Angon, 2023).

La eficacia de los HEP depende de factores ambientales (humedad alta y temperaturas moderadas son ideales) y de la especie fúngica. Estos organismos pueden actuar como patógenos obligados, facultativos, oportunistas o potenciales, dependiendo de su relación con el huésped (Sharma, 2021). Además, especies como *Beauveria bassiana* ejercen control no solo por infección directa, sino también mediante antibiosis, competencia y la inducción de resistencia sistémica en las plantas, lo que amplía su valor como herramienta de MIP (Skinner, 2014).

### 3.5. ¿Por qué usar los HEP?

Los insumos químicos, incluidos los insecticidas, han incrementado la producción agrícola, sin embargo, el impacto negativo de estos insecticidas químicos también ha aumentado. Estos incluyen, entre otros, daños a las tierras de cultivo, los recursos hídricos y la vegetación, y la destrucción involuntaria de insectos que podrían ser beneficiosos para la agricultura. Además, esto puede provocar que algunas plagas agrícolas aumenten su capacidad de dañar cultivos. Se ha reportado un aumento en la mortalidad y la morbilidad derivadas del contacto de los trabajadores con estos productos químicos, especialmente en las economías en desarrollo (Rajula et al., 2020). El uso excesivo y el mal uso de plaguicidas químicos por parte de los actores de la cadena de valor agrícola ha hecho necesario el desarrollo de métodos benignos nuevos y de menor riesgo para controlar las plagas de insectos. Los desafíos que presentan los plaguicidas sintéticos han impulsado la aplicación de enfoques alternativos para reducir los daños causados por las plagas, sorteando las limitaciones asociadas a estos plaguicidas (Rajula et al., 2020).

Un método de menor riesgo para controlar las plagas de insectos que está ganando terreno en términos de utilización es el microbiocontrol (control microbiano), uno de los cuales son los HEP como componente fundamental del MIP (Angon et al., 2023). Los HEP son alternativas a los plaguicidas convencionales en la agricultura orgánica o donde la resistencia a los plaguicidas y las preocupaciones ambientales limitan el uso de plaguicidas sintéticos (Shaurub, 2023). Los HEP favorecen el control de las plagas de insectos en muchas fases de su ciclo de vida con poca o ninguna toxicidad residual y de mamíferos debido al respeto al medio ambiente, la biopersistencia y la ocurrencia natural de HEP, son más baratos a largo plazo, muestran menores efectos residuales y son capaces de superar el problema de la resistencia (Sharma et al., 2023).

Además de su perfil compatible con la agricultura ecológica, los entomopatógenos representan una excelente herramienta para ser utilizada en programas de MIP y con vistas a prevenir la evolución de poblaciones resistentes a los tratamientos mediante un uso racional y diverso de estrategias de control, asegurando la sostenibilidad a largo plazo de las estrategias de control de plagas (Ruiu et al., 2024).

De acuerdo con Cai y Dimopoulos (2025), los beneficios obtenidos con el uso de microorganismos benéficos son: eliminar las plagas de las plantas, aumentar el rendimiento de los cultivos, aumentar la seguridad alimentaria con mayores rendimientos y reducir los riesgos de toxicidad por plaguicidas, prevención de enfermedades transmitidas por vectores en personas y animales, restaurar ecosistemas contaminados, degradar pesticidas y promover la economía circular y reciclar residuos sólidos.

### **3.6. Otras funciones de los HEP**

Los HEP como *Metarhizium* y *Beauveria*, no solo regulan poblaciones de insectos, sino que también establecen relaciones benéficas con las plantas, actuando como endófitos y epífitos en raíces, tallos y hojas (Jaber y Enkerli, 2017). Aportan nitrógeno al parasitar insectos, promueven el crecimiento vegetal y aumentan la resistencia frente a plagas y enfermedades (Ramakuwela y Hatting, 2020). Además, participan en el control biológico de fitopatógenos, ya que producen metabolitos antimicrobianos, antibióticos, enzimas y compuestos volátiles que inhiben el desarrollo de patógenos, mientras emplean mecanismos como competencia, antibiosis, parásitismo e inducción de resistencia sistémica (Garai, 2024). Su potencial va más allá del control de plagas: contribuyen a la agronomía general de las plantas, ayudándolas a enfrentar estreses bióticos y abióticos (sequía, salinidad, temperatura, deficiencia nutricional) y favoreciendo su crecimiento y nutrición, lo que abre nuevas perspectivas para su aplicación en agricultura sostenible (Quesada et al., 2024).

### **3.7. Ventajas de HEP**

Los HEP son eficaces contra una amplia variedad de plagas al penetrar la cutícula de los insectos y pueden actuar en distintas etapas de su ciclo de vida. Estos son seguros para el ambiente y el ser humano, capaces de persistir en el suelo durante años y generar epizootias naturales, lo que los hace valiosos en el manejo integrado de plagas. Además de controlar insectos, los HEP ofrecen beneficios adicionales: inducen resistencia en plantas, mejoran la absorción de nutrientes, favorecen el crecimiento vegetal y ayudan a tolerar estreses como la salinidad, reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos (Sharma et al., 2023; Islam et al., 2021). En comparación con insecticidas sintéticos, los HEP son más sostenibles, con menor riesgo de resistencia en plagas, inocuos para organismos no objetivo y, a largo plazo, más económicos. Incluso pueden combinarse con productos químicos para lograr efectos sinérgicos (Garai, 2024).

### **3.8. Desventajas de los HEP**

Los HEP presentan limitaciones como su acción más lenta que los insecticidas químicos, dependencia de condiciones ambientales óptimas y, en raros casos, efectos sobre organismos

no objetivo, lo que junto a un manejo inadecuado ha generado expectativas insatisfechas entre agricultores (Sharma et al., 2023; Jaber y Ownley 2018).

### **3.9. ¿Qué falta?**

La escasa transferencia tecnológica y el reducido número de productos registrados limitan el aprovechamiento de los HEP, sobre todo en países menos industrializados. Para potenciar su uso se requieren tecnologías que mejoren su producción, eficacia y estabilidad en ambientes adversos, junto con marcos regulatorios que faciliten su registro y aplicación en programas de MIP (Grzywacz et al., 2022). Asimismo, se necesita más investigación sobre los mecanismos biológicos de los HEP, como metabolitos, exudados y compuestos volátiles, que podrían aumentar su eficacia y compatibilidad con la agricultura ecológica. El desarrollo de formulaciones basadas en microorganismos autóctonos permitiría superar problemas de adaptación ambiental y favorecer su comercialización. Aunque los HEP tienen un gran potencial para transformar el control de plagas, la limitada comprensión de sus interacciones con insectos y plantas aún restringe su éxito en la práctica agrícola MIP (Risbey, 2024).

### **3.10. Conclusiones y recomendaciones**

El papel potencial de los hongos entomopatógenos en el control biológico de plagas de cultivos no se ha comprendido ni apreciado plenamente en nuestro país.

Se debe trabajar mucho en el aislamiento e identificación de estos hongos en las diferentes regiones de nuestro país. Es importante destacar que la mayoría de las formulaciones desarrolladas para el biocontrol en casi todo el mundo provienen principalmente de las especies *M. anisopliae* y *B. bassiana*; sin embargo, existen géneros que se pueden utilizar y que han demostrado ser beneficiosos para el biocontrol y fáciles de cultivar.

Existe un círculo vicioso entre el cambio climático y la agricultura, con el calentamiento global que afecta negativamente el rendimiento de los cultivos y la seguridad alimentaria, y las prácticas agrícolas convencionales contribuyen significativamente al calentamiento global. Los agricultores deben adoptar prácticas más sostenibles para que la creciente demanda de alimentos se satisfaga con el menor impacto en el medio ambiente.

El efecto insecticida natural de los HEP, los atributos ecológicamente beneficiosos y los roles recientemente identificados como endófitos los convierten en un componente de control biológico altamente viable de MIP.

Se necesitan investigaciones especializadas para comprender la interacción entre HEP, insectos huéspedes, cultivos y su entorno con el fin de explorar la mejor formulación de micoinsecticidas.

### 3.11. Referencias bibliográficas

- Angon PB, Mondal S, Jahan I, et al. Integrated Pest Management (IPM) in Agriculture and Its Role in Maintaining Ecological Balance and Biodiversity. Xiao X, ed. *Adv Agric.* 2023;2023:1-19. doi:10.1155/2023/5546373
- Angon PB, Mondal S, Jahan I, et al. Integrated Pest Management (IPM) in Agriculture and Its Role in Maintaining Ecological Balance and Biodiversity. *Adv Agric.* 2023;2023(1):5546373. doi:10.1155/2023/5546373
- Cai P, Dimopoulos G. Microbial biopesticides: A one health perspective on benefits and risks. *One Health.* 2025;20:100962. doi:10.1016/j.onehlt.2024.100962
- Deka B, Baruah C, Babu A. Entomopathogenic microorganisms: their role in insect pest management. *Egypt J Biol Pest Control.* 2021;31(1):121. doi:10.1186/s41938-021-00466-7
- Garai K. Biocontrol breakthrough: leveraging entomopathogens for eco-friendly pest management in modern agriculture. *The Planta RBS.* 2024;5(2):1591-1599.
- Grzywacz D, Moore S, Luke B, Subramanian S, Moore D, Rabindra J. Mass production of entomopathogens in less industrialized countries. In: Morales-Ramos JA, Rojas MG, Shapiro-Ilan DI, eds. *Mass Production of Beneficial Organisms.* Elsevier - Academic Press; 2022:431-462. doi:10.1016/B978-0-12-822106-8.00001-4
- Han P, Gong Q, Fan J, Abbas M, Chen D, Zhang J. Destruxin A inhibits scavenger receptor B mediated melanization in *Aphis citricola*. *Pest Manag Sci.* 2022;78(5):1915-1924. doi:10.1002/ps.6809
- Islam W, Adnan M, Shabbir A, et al. Insect-fungal-interactions: A detailed review on entomopathogenic fungi pathogenicity to combat insect pests. *Microb Pathog.* 2021;159:105122. doi:10.1016/j.micpath.2021.105122
- Jaber LR, Enkerli J. Fungal entomopathogens as endophytes: can they promote plant growth? *Biocontrol Sci Technol.* 2017;27(1):28-41. doi:10.1080/09583157.2016.1243227
- Jaber LR, Ownley BH. Can we use entomopathogenic fungi as endophytes for dual biological control of insect pests and plant pathogens? *Biol Control.* 2018;116:36-45. doi:10.1016/j.biocontrol.2017.01.018
- Jankielsohn A. The Importance of Insects in Agricultural Ecosystems. *Adv Entomol.* 2018;6(2):62-73. doi:10.4236/ae.2018.62006

Karlsson K, Stenberg JA, Lankinen Å. Making sense of Integrated Pest Management (IPM) in the light of evolution. *Evol Appl.* 2020;13(8):1791-1805. doi:10.1111/eva.13067

Litwin A, Nowak M, Różalska S. Entomopathogenic fungi: unconventional applications. *Rev Environ Sci Biotechnol.* 2020;19(1):23-42. doi:10.1007/s11157-020-09525-1

Moharram AM, Abdel-Galil FA, Hafez WMM. On the enzymes' actions of entomopathogenic fungi against certain indigenous and invasive insect pests. *Egypt J Biol Pest Control.* 2021;31(1):51. doi:10.1186/s41938-021-00397-3

Quesada-Moraga E, González-Mas N, Yousef-Yousef M, Garrido-Jurado I, Fernández-Bravo M. Key role of environmental competence in successful use of entomopathogenic fungi in microbial pest control. *J Pest Sci.* 2024;97(1):1-15. doi:10.1007/s10340-023-01622-8

Rajula J, Rahman A, Krutmuang P. Entomopathogenic fungi in Southeast Asia and Africa and their possible adoption in biological control. *Biol Control.* 2020;151:104399. doi:10.1016/j.biocontrol.2020.104399

Ramakuwela T, Hatting J, Bock C, et al. Establishment of Beauveria bassiana as a fungal endophyte in pecan (*Carya illinoiensis*) seedlings and its virulence against pecan insect pests. *Biol Control.* 2020;140:104102. doi:10.1016/j.biocontrol.2019.104102

Risbey C. Can entomopathogenic fungi successfully control insect pests? Forster CM, ed. Bristol Inst Learn Teach BILT Stud Res J. 2024;(5):22-31.

Ruiu L, Jehle JA, Quesada Moraga E, Tarasco E, Benelli G. Entomopathogens: Theory and practice. *Crop Prot.* 2024;184:106813. doi:10.1016/j.cropro.2024.106813

Rumbos CI, Athanassiou CG. Use of entomopathogenic fungi for the control of stored-product insects: can fungi protect durable commodities? *J Pest Sci.* 2017;90(3):839-854. doi:10.1007/s10340-017-0849-9

Sharma A, Sharma S, Yadav PK. Entomopathogenic fungi and their relevance in sustainable agriculture: A review. *Cogent Food Agric.* 2023;9(1). doi:10.1080/23311932.2023.2180857

Sharma R, Sharma P. Fungal entomopathogens: a systematic review. *Egypt J Biol Pest Control.* 2021;31(1):57. doi:10.1186/s41938-021-00404-7

Shaurub EH. Review of entomopathogenic fungi and nematodes as biological control agents of tephritid fruit flies: current status and a future vision. *Entomol Exp Appl.* 2023;171(1):17-34. doi:10.1111/eea.13244

Singh KA, Nangkar I, Landge A, Rana M, Srivastava S. Entomopathogens and their role in insect pest management. *J Biol Control.* Published online April 11, 2024:1-17. doi:10.18311/jbc/2024/35752

Skinner M, Parker BL, Kim JS. Role of Entomopathogenic Fungi in Integrated Pest Management. In: *Integrated Pest Management*. Elsevier; 2014:169-191. doi:10.1016/B978-0-12-398529-3.00011-7

Smagghe F, Spooner-Hart R, Chen ZH, Donovan-Mak M. Biological control of arthropod pests in protected cropping by employing entomopathogens: Efficiency, production and safety. *Biol Control.* 2023;186:105337. doi:10.1016/j.biocontrol.2023.105337

Vega FE, Meyling NV, Luangsa-ard JJ, Blackwell M. Fungal Entomopathogens. In: *Insect Pathology*. Elsevier; 2012:171-220. doi:10.1016/B978-0-12-384984-7.00006-3

Vivekanandhan P, Alford L, Krutmuang P. Editorial: Role of entomopathogenic fungi in sustainable agriculture. *Front Microbiol.* 2024;15:1504175. doi:10.3389/fmicb.2024.1504175

## 4. NUEVAS PERSPECTIVAS DE LA INVESTIGACIÓN EN AGROECOSISTEMAS

Arturo Pérez Vázquez<sup>7</sup>

**Palabras clave:** Agricultura, Complejidad, Seguridad alimentaria.

### 4.1. Introducción

La investigación convencional en agricultura se ha dado bajo un enfoque de un sistema estático en contraste a un sistema dinámico cuyo comportamiento o estado temporal evoluciona y cambia constantemente y que puede ser descrito y analizado mediante modelos matemáticos complejos como ecuaciones diferenciales o series de tiempo que permitan predecir el comportamiento de sistemas complejos. Entendiendo como sistema complejo a un conjunto de elementos que están interconectados y que a través de dichas interacciones generan propiedades emergentes y un comportamiento azaroso. Edgar Morin (2004) ha sido uno de los pensadores pioneros en abordar a los sistemas desde la perspectiva de la complejidad con la intención de ofrecer en términos epistemológico un marco general para la compresión de una realidad cambiante, la cual es concebida como un complejo de interacciones que solo se puede abordar desde una visión holística que supere al reduccionismo tradicional positivista (Morin, 2004). Edgar Morin ha sido el mayor representante del planteamiento teórico de la complejidad que se caracteriza por su no linealidad, la auto organización, la adaptación, y que muestra comportamientos impredecibles como el caos. Ejemplos de sistemas complejos incluyen los ecosistemas, y los agroecosistemas y su interacción con el componente social, ambiental, económico y tecnológico.

### 4.2. Seguridad alimentaria

Es indudable que lograr los objetivos del desarrollo sostenible y particularmente la seguridad alimentaria en países en desarrollo es un reto mayúsculo, particularmente en un contexto de cambio climático, pandemias, crecimiento poblacional, pérdida de biodiversidad, erosión, crisis económica, entre otras. En decir, lograr un desarrollo sostenible implica lograr en gran medida los objetivos plasmados en la agenda ODS 2020 de la ONU. La producción de alimentos mundial está estrechamente relacionada con la calidad del suelo, la calidad y suficiencia de agua, el clima, el componente biótico y las innovaciones. Es fundamental resaltar que la seguridad alimentaria tiene una estrecha relación con la agricultura y la producción de alimentos en sus diversas modalidades, desde la agricultura familiar, la agricultura intensiva y la agricultura urbana, entre otros. Además, la agricultura presenta problemas muy ligados a los retos ya mencionados, pero la agricultura es culpable y víctima de efectos directos e indirectos a la calidad del ambiente y de los recursos naturales en general (Pérez-Vázquez y Landeros, 2009). Por ejemplo, la producción

<sup>7</sup> Profesor-Investigador del Colegio de Postgraduados-Campus Veracruz.

agroalimentaria es un factor emisor de gases efecto invernadero (GEI) que contribuyen directa o indirectamente al cambio climático, y es responsable de alrededor del 31% del total mundial de emisiones de GEI (FAO, 2015; IPCC, 2015) y, en México, la agricultura emite el 14% (Ge et al., 2021).

La producción agropecuaria está estrechamente relacionada con el clima, como es la temperatura, precipitación, vientos entre otros en lo que se ha definido como zonas agroecológicas. Pero también se sabe que la producción agropecuaria es sensible y altamente vulnerable al clima, particularmente lo que tiene que ver con el cambio climático (eventos climáticos extremos).

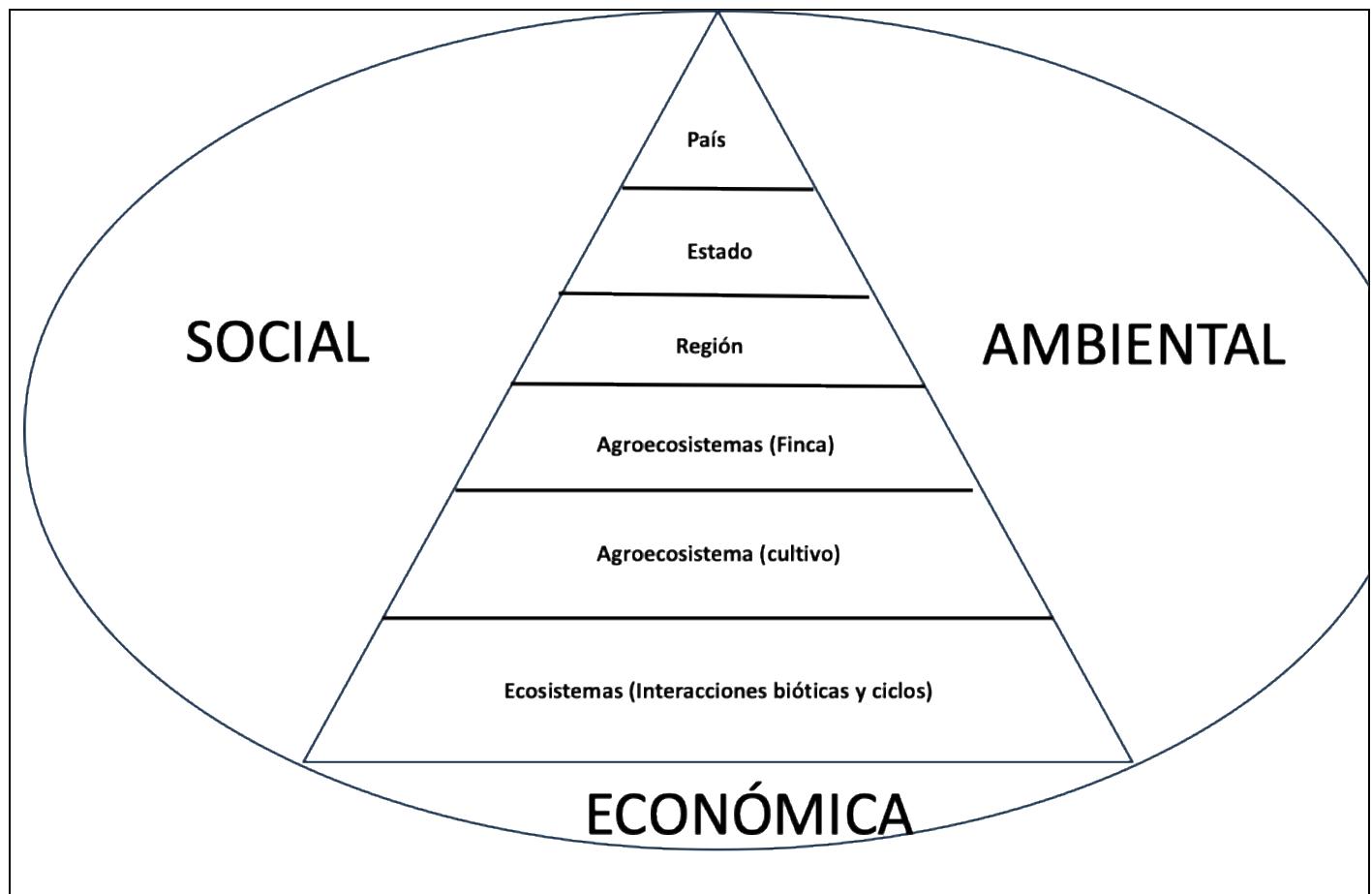
De Schutter (2010) afirma qué para poder alimentar a los casi 10 mil millones de personas a nivel mundial en el año 2050 será necesario implementar innovaciones y prácticas agrícolas económicamente viables, ecológicamente sostenibles, como una forma de impulsar la producción de alimentos y mejorar el bienestar y condiciones de vida, particularmente de la población en condición de pobreza. La FAO remarca que los países en desarrollo tendrán que elevar su producción alimentaria en poco más del 70% para satisfacer las necesidades alimentarias de su población. Pero eso se torna complicado ante el efecto dominó (*perfect storm*) que se espera provoque el cambio climático. Por ejemplo, hoy los nuevos agricultores saben que ya no pueden hacer la agricultura como solían hacerlo sus padres o abuelos y comentan que ya no podemos leer las nubes, ahora llueve menos, los calores son más fuertes, se atrasan las lluvias o son tan pocas que no se dan los cultivos.

### 4.3. El agroecosistema

El agroecosistema como objeto es una mera abstracción de la realidad y una construcción conceptual (Figura 2). Este es un concepto concebido por el ser humano con fines eminentemente de análisis y estudio de la realidad agropecuaria (Pérez-Vázquez, A. 1996); además, este es o trata de ser una síntesis de un sistema que conjuga una serie de componentes acerca de la actividad agrícola y que incluye varios procesos. El agroecosistema fue inicialmente concebido como un ecosistema modificado (Odum, 1969; Hernández X. 1977); es un constructo social y, en la realidad y praxis, es resultado de la intervención humana que le confiere una estructura propia y funcionamiento. De tal manera que, como cualquier sistema, un agroecosistema incluye los siguientes aspectos básicos: límites, componentes, interacciones, finalidad, contexto y salidas.

Entonces, el agroecosistema ha sido concebido como objeto o unidad de estudio. Por tanto, el agroecosistema es un constructor, una abstracción de la realidad, una interpretación que damos de lo real (*la doxa*) que sería en su sentido amplio la agricultura. El agroecosistema no existe en la realidad, como no existe ningún otro sistema, dado que los sistemas son solo una forma de interpretar la realidad. El agroecosistema por ser una construcción mental o modelo conceptual, no lo podemos observar per se y en dado caso, mediríamos sus alcances de forma indirecta mediante su operacionalización. Por tanto, se propone que el término agroecosistema sea

abordado y conceptualizado como un objeto epistémico, el cual es dinámico y cambia con el conocimiento. El concepto de “objeto epistémico” deriva de la historia de la ciencia (Rheinberger 1997; 2006) y se refiere a una “cosa” que los humanos pueden y quieren saber.



**Figura 2.** Esquema ilustrativo de los niveles jerárquicos de análisis de los agroecosistemas. Fuente: Elaboración propia modificada de Holling (1986).

A la fecha existen diversas definiciones de agroecosistema, que van desde definiciones simples (ecosistema modificado) hasta definiciones complejas (sistema complejo adaptativo). Usualmente se concibe al agroecosistema como una unidad de estudio, una abstracción de la realidad, ecosistema modificado, etc. Por tanto, el concepto de agroecosistema depende del tipo de investigación, contexto y de los enfoques de estudio del mismo. El concepto de agroecosistema ha experimentado una evolución y su análisis ha implicado un enfoque sistémico, holístico e interdisciplinario. Desde sus inicios se fundamentó en la Teoría General de Sistemas (Bertalanffy, 1968) y como herramienta metodológica útil para el estudio y síntesis de los agroecosistemas. Este abordaje brinda la posibilidad de incluir elementos y componentes desde un pensamiento integrador y de complejidad.

En la evolución del concepto se puede distinguir la influencia de tres paradigmas dominantes en el desarrollo del concepto agroecosistema y de la propia agroecología como disciplina

científica. La primera definición conceptual es a partir de la ecología, como un ecosistema modificado; posteriormente, a partir de la Teoría General de Sistemas (TGS) entendiéndose su estudio, como un sistema. De esta manera, la teoría de sistemas y su evolución a través de sus generaciones influyen en la concepción del agroecosistema, bajo diferentes elementos de análisis, lo cual no se ha dado de forma sincrónica (Casanova et al. 2016). Y finalmente, las ciencias de la complejidad, en donde se plantea la comprensión del agroecosistema en la producción, consumo y sostenibilidad de los alimentos, lo cual permitirá integrar nuevas tecnologías agrícolas, armonizar y sincronizar las acciones de gestión agrícolas para lograr sinergias, dependiendo del contexto del sistema. Desde la complejidad, el estudio de los agroecosistemas ha implicado su estudio desde la Teoría de Sistemas Complejos Adaptativos (SCA), Teoría de Sistemas Socio-Ecológicos (SSE), Teoría de Sistemas Autopoéticos, Teoría de Redes, Dinámica de sistemas y el modelado basado en agentes, por mencionar algunas, que han logrado integrar los avances en el conocimiento de sistemas complejos para la solución de problemas agrícolas. Se puede definir al agroecosistema como un modelo conceptual para representar la dinámica agrícola en que intervienen diversos factores de las dimensiones ambiental, sociocultural, económica y tecnológica que se interrelacionan en una escala espacio-temporal.

#### 4.4. Cambio climático

El cambio climático (CC) o también conocida como crisis climática se refiere a un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (IPCC, 2014). La causa del cambio climático son las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), que han aumentado a partir del año 1950 como resultado de las actividades humanas entre ellas la deforestación y el incremento en la quema de combustibles fósiles. Como consecuencia de los niveles de concentraciones atmosféricas de gases de larga permanencia en la atmósfera, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), se han incrementado sin precedentes los GEI en los últimos dos siglos. Este cambio climático se ha agravado debido al modelo económico imperante de capitalismo industrial, consumismo, y hábitos alimenticios que son la causa del problema del CC (Riechmann, 2016) y se considera que las medidas para detener los impactos del CC deben ser profundos y radicales en la ética-política y en una cultura de autocontención.

El CC va a afectar negativamente la idoneidad de las áreas agrícolas actuales para la producción de alimentos, socavando la resiliencia de los sistemas agrícolas. Los cambios extremos de temperatura pueden influir directa o indirectamente en la duración de la temporada de crecimiento o expresión de diferentes etapas fenológicas, modificando fuertemente su productividad y la idoneidad de un territorio para ciertos cultivos que son fuente de alimento, ingresos, dinámica económica y hasta cultural. Una reducción de las precipitaciones puede afectar a la disponibilidad hídrica de los cultivos y, por tanto, su rendimiento, sin considerar los posibles riesgos de pérdidas de cosecha por eventos extremos (olas de calor, precipitaciones intensas, etc.).

Sobre la base de estas premisas, los agricultores tendrán que ser capaces de producir alimentos saludables (ODS 2 y 3), proteger la calidad y cantidad del agua (ODS 6), conservar la energía (ODS 7), apoyar la mitigación climática mediante la reducción de emisiones de carbono y de otros GEI (ODS 13), así como proteger la vida en la tierra mediante la conservación del suelo y preservando la biodiversidad (ODS 15) bajo un contexto de cambio climático acelerado. En este contexto la comunidad científica está llamada a apoyar a los agricultores en sus actividades evaluando los efectos del cambio climático, identificando y estudiando sistemáticamente prácticas sostenibles y brindándoles perspectivas claras para un mejor derrotero de la agricultura.

La resiliencia es la capacidad que posee intrínsecamente un sistema para soportar perturbaciones puntuales o recurrentes, manteniendo su estructura y función, y de manera extrínseca es la capacidad que tiene un sistema de absorber impactos o perturbaciones y aún así tener la capacidad de reorganizarse y recuperarse sin cambiar su estructura ni función. Por tanto, fortalecer la resiliencia de los agroecosistemas y de las comunidades rurales asegurará la producción de alimentos en el futuro.

#### 4.5. Sistemas y complejidad

Como se sabe, algunas características de los sistemas complejos son la interconexión e interdependencia entre sus elementos o componentes, donde los elementos están interconectados y cualquier cambio que afecte a un elemento provoca un cambio efecto de "fichas de dominó" afectando al todo. Por tanto, la no linealidad o en otras palabras la relación causa-efecto no son proporcionales y por tanto predecibles con exactitud, donde pequeños cambios (efecto mariposa) pueden tener grandes consecuencias y cambios en el sistema, en donde los ecosistemas y agroecosistemas usualmente tiende a la adaptación y auto organización, y donde los sistemas complejos pueden ajustarse a su entorno y reorganizarse en respuesta a las perturbaciones.

Un sistema complejo adaptativo (SCA) es un conjunto de componentes interdependientes que tienen la capacidad de amoldar sus parámetros y reglas en respuesta a cambios en su entorno o en sus propias interacciones internas, con el fin de mantener homeostasis, lograr una mayor eficiencia o "sobrevivir" en condiciones cambiantes extremas (Figura 3). Esto incluye a organismos biológicos, ecosistemas y agroecosistemas. En este caso los agricultores buscan modificar la estructura, comportamiento o funcionamiento de los agroecosistemas en función de la experiencia y los cambios del ambiente. Estos sistemas utilizan bucles de retroalimentación para monitorear y responder a sus propios estados y a estímulos externos, tienden a auto organizarse de forma autónoma y a desarrollar patrones de comportamiento emergentes sin una dirección centralizada.

En otras palabras, los SCA son sistemas en los que su comportamiento es resultado de interrelaciones no lineales, a diferentes escalas espaciales y temporales (Holland, 2006). Por ejemplo, el enfoque de SCA permite analizar cómo los procesos en niveles más bajos de

organización a nivel de genes producen patrones en niveles más altos de organización como los ecosistemas. La idea de los SCA se formuló originalmente para dar sentido a los fenómenos naturales (Holland, 1992).

Con fines de investigación en agroecosistemas, el concepto de SCA lo definimos como: un sistema dinámico conformado por muchos agentes individuales (de las dimensiones ambiental y/o social) con libertad para actuar de forma diversa y cuyas acciones están interconectadas, lo que ocasiona que las acciones de un agente cambien el contexto para otros agentes, lo que a su vez provoca configuraciones variadas a nivel del sistema e impactos sobre otros sistemas. Aunque los términos de sistemas, complejidad y SCA se usan en muchas ocasiones de manera indistinta, los SCA deben ser considerados como una instancia especial de la complejidad, dado que, a diferencia de la definición tradicional de sistemas, los SCA contienen componentes y capacidades adaptativas (Preiser et al., 2018).



**Figura 3.** Esquema ilustrativo de la dinámica del ciclo adaptativo. Fuente: Holling (1996).

Los componentes adaptativos permiten que los sistemas cambien y evolucionen con el tiempo en respuesta a las retroalimentaciones y cambios en el contexto del sistema, de tal manera que los SCA tienen “memoria” y capacidad de aprender de respuestas y configuraciones anteriores y

esto les confiere influir y dar forma a las trayectorias actuales y futuras del sistema. Por lo tanto, el SCA se caracteriza por enfatizar los efectos causales no lineales entre y dentro de los sistemas, evitar suposiciones a priori sobre variables clave y ver el equilibrio del sistema como múltiple, temporal y en movimiento (Duit y Galaz, 2008).

#### 4.6. Nuevas perspectivas de estudio desde la complejidad

**Sistemas autopoéticos.** Un sistema autopoético está organizado y definido como una unidad, como una red de procesos de producción (transformación y destrucción) de componentes que produce componentes que a través de sus interacciones y transformaciones regenera continuamente y establece la red de procesos (relaciones) que lo produjeron; y se constituye como una unidad concreta en el espacio en la que los componentes existen a través de especificar el dominio topológico de su constitución como red de interacciones. Los sistemas autopoéticos, en este sentido, se enfocan primordialmente en las interacciones que sostienen con el ambiente con el fin último de asegurar su supervivencia. La teoría de la autopoiesis ha tenido aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento, tales como teoría de las organizaciones, sociología, terapia familiar, inteligencia artificial y recientemente el análisis de organizaciones educativas. Luhmann (1990), Maturana y Varela (1980) han sugerido que diversos tipos de entidades, particularmente sistemas sociales, muestran las mismas características que la teoría de la autopoiesis describe en sistemas vivos (auto-referencialidad, enfoque en las interacciones, etc.)

**Sistemas complejos adaptativos (SCA).** Esos son sistemas en los que su comportamiento es resultado de interrelaciones no lineales, a diferentes escalas espaciales y temporales, entre una gran cantidad de elementos (Holland, 2006). El enfoque de SCA permite analizar cómo los procesos en niveles más bajos de organización a nivel de genes producen patrones en niveles más altos de organización como los ecosistemas. Para efecto de la investigación en agroecosistemas, el concepto de SCA lo definimos como: Un sistema dinámico conformado por muchos agentes individuales (de las dimensiones ambiental y/o social) con libertad para actuar de forma diversa y cuyas acciones están interconectadas, lo que ocasiona que las acciones de un agente cambien el contexto para otros agentes, lo que a su vez provoca configuraciones variadas a nivel del sistema e impactos sobre otros sistemas. Por tanto, los SCA deben ser considerados en una instancia especial de sistemas, dado que, a diferencia de la definición tradicional de sistemas, los SCA contienen componentes y capacidades adaptativas (Preiser et al., 2018). Los componentes adaptativos permiten que los sistemas cambien y evolucionen con el tiempo en respuesta a las retroalimentaciones y cambios en el contexto del sistema

**Sistemas socio-ecológicos.** Estos se desarrollan a la par con el pensamiento agroecológico, que busca enfoques de integración de la naturaleza con la sociedad y comprender las relaciones humano-naturaleza (Altieri et al., 2015). Se entiende como un sistema complejo y adaptativo en el que distintos componentes culturales, políticos, sociales, económicos, ecológicos, tecnológicos, entre otros, están interactuando (Adger, 2016). Esto implica que el enfoque de la

gestión de los ecosistemas y recursos naturales, no se centra en los componentes del sistema sino en sus relaciones, interacciones y retroalimentaciones.

#### **4.7. Nuevas perspectivas de investigación desde enfoques metodológicos**

**Agricultura multifuncional.** El concepto de multifuncionalidad del paisaje agrícola es útil para comprender los múltiples servicios que los territorios agropecuarios proporcionan en cierta región en términos de conservación de los ecosistemas (Palm *et al.*, 2014), biodiversidad (Schulte *et al.*, 2017), patrimonio cultural (van Berkel y Verburg, 2014) y otros servicios básicos para la vida humana en el planeta.

**Una sola salud.** es un marco epistemológico que reconoce la interconexión de la salud humana-salud animal-salud ambiental en el contexto de la agricultura para lograr la seguridad alimentaria, prevenir la propagación de enfermedades y promover la sostenibilidad general.

**Provisión de servicios ecosistémicos.** Es decir, que una perspectiva de investigación a privilegiar en agroecosistemas y a lo largo de la cadena de valor en su conjunto que se promuevan y fomenten la gestión de servicios ecosistémicos, lo cual tendrá impactos en el bienestar de la sociedad, desarrollo regional y en la producción agrícola.

**Cero emisiones de CO<sub>2</sub>.** Se refiere a un sistema agrícola que equilibra las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidas con la cantidad eliminada de la atmósfera, logrando un balance final de cero.

#### **4.8. Conclusiones y recomendaciones**

Llegamos a la conclusión que lograr para la seguridad alimentaria ante retos como el cambio climático implica una transición hacia nuevas perspectivas de investigación en la agricultura bajo un esquema de disminuir emisiones de GEI. Lograr la seguridad alimentaria requiere realizar investigaciones en agroecosistemas bajo nuevas perspectivas. Es importante considerar que el estudio de estos temas ha evolucionado y tiende hacia el pensamiento sistémico complejo de última generación que permita diseñar agroecosistemas resilientes ante disturbios, como el cambio climático. Esto permitirá responder a la realidad agrícola compleja contemporánea, en donde se requiere explicar esa complejidad dada por las múltiples relaciones entre fenómenos de carácter social, ambiental, económico y político. Además, se vislumbra la importancia de emplear nuevas teorías para comprender los problemas de índole agrícola. Lo anterior es necesario para la generación de investigación a nivel teórico, metodológico y aplicado en estrategias pertinentes para la construcción de agroecosistemas resilientes a disturbios, como los ocasionados por el cambio climático. Se propone que una nueva perspectiva de investigación en agroecosistemas debeemerger de un cambio de pensar y de actuar, lo cual debe permear los aspectos ontológicos y epistemológicos desde un paradigma de la complejidad. Finalmente,

la investigación en agroecosistemas demanda una reformulación de estrategias y métodos de investigación con una integración interdisciplinaria y/o metadisciplinaria que permita el abordaje de las múltiples perspectivas a niveles jerárquicos distintos.

#### 4.9. Referencias bibliográficas

- Altieri, M.A., C.I. Nicholls, A. Henao, y M.A. Lana. 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development* 35(3): 869-890. doi: 10.1007/s13593-015-0285-2.
- Adger, W.N. 2016. Social and ecological resilience: are they related? *Progress in Human Geography* 24(3): 347-364. doi: 10.1191/030913200701540465.
- Bertalanffy, L. V. 1968. Teoría general de los sistemas. México: Fondo de Cultura Económica, 1976. 336pp.
- De Schutter. 2017. The political economy of food systems reform. *European Review of Agricultural Economics* 44(4):705-731. DOI:10.1093/erae/jbx009
- Duit, A., y V. Galaz. 2008. Governance and Complexity—Emerging Issues for Governance Theory. *Governance* 21(3): 311-335. doi: 10.1111/j.1468-0491.2008.00402.x.
- Morín, E. (2004). Introducción al pensamiento complejo. México, D. F.: Editorial Gedisa.
- Ge M., Friedrich J. and Vigna L. 2021. Cuatro gráficos que explican las emisiones de gases de efecto invernadero por país y por sector. World Resources Institute. <https://es.wri.org/insights/cuatro-graficos-que-explican-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-por-sector>
- Hernández X, E. 1977. Agroecosistemas de México. Contribuciones a la Enseñanza, Investigación y Divulgación Agrícola. Colegio de Postgraduados-Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, Estado de México.
- Holland, J.H. 1992. Complex Adaptive Systems. *Daedalus* 121(1): 17-30.
- Holland, J.H. 2006. Studying complex adaptive systems. *Journal of Systems Science and Complexity*. doi: 10.1007/s11424-006-0001-z. Holling, C.S. 1996. Surprise for Science, Resilience for Ecosystems, and Incentives for People. *Ecological Applications* 6(3): 733-735. doi: 10.2307/2269475.
- Holling, C.S. 1996. Surprise for Science, Resilience for Ecosystems, and Incentives for People. *Ecological Applications* 6(3): 733-735. doi: 10.2307/2269475

IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra,

IPCC. 2015. Food security. Special Report on climate change and land. 437-550 p.  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2022/11/SRCCL\\_Chapter\\_5.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2022/11/SRCCL_Chapter_5.pdf)

Suiza, 157 págs.Palm, C., H. Blanco-Canqui, F. DeClerck, L. Gatere, y P. Grace. 2014. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 187: 87-105. doi: 10.1016/j.agee.2013.10.010.

Luhmann, N. 2007. La sociedad de la sociedad. Universidad Iberoamericana.

Maturana, H., y F.J. Varela. 1990. El árbol del conocimiento. Ed. Universitaria Santiago.

Pérez-Vázquez, A. 1996. El Concepto de Agroecosistema: definiciones y enfoques. Notas para el Curso Teórico-Práctico de Introducción al Estudio de Agroecosistemas Tropicales. Colegio de Postgraduados. Campus Veracruz. Manlio Fabio, Altamirano, Veracruz, México: 2-19.

Pérez-Vázquez, A. y Landeros Sánchez C. 2009. Agricultura y deterioro ambiental. *Elementos* 73: 19-25.

Preiser, R., R. Biggs, A. De Vos, y C. Folke. 2018. Social-ecological systems as complex adaptive systems: organizing principles for advancing research methods and approaches. *Ecology and Society* 23(4). doi: 10.5751/ES-10558-230446.

Schulte, L.A., J. Niemi, M.J. Helmers, M. Liebman, J.G. Arbuckle, et al. 2017. Prairie strips improve biodiversity and the delivery of multiple ecosystem services from corn–soybean croplands. *PNAS* 114(42): 11247-11252. doi: 10.1073/pnas.1620229114.

van Berkel D.B. and Verburg P.H. 2014. Spatial quantification and valuation of cultural ecosystem services in an agricultural landscape. *Ecological Indicators* 37(A): 163-174.

## 5. PROCESOS PRÁCTICOS CON VALOR AGREGADO DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS

Isabel Araceli Amaro-Espejo<sup>8</sup>  
Rosa Elena Zamudio Alemán<sup>8</sup>  
Paula Zúñiga-Ruiz<sup>8</sup>

**Palabras Claves:** Inocuidad y calidad, Desarrollo rural sostenible, Valor agregado agroalimentario, Transferencia de tecnología, Capacitación técnica.

### 5.1. Introducción

En México, el desarrollo agropecuario es fundamental para elevar el bienestar de segmentos importantes de la población. Mediante nuevos procesos y tecnologías se busca que el sector productivo cumpla con las más estrictas normas de calidad e inocuidad que estipula la normatividad nacional mexicana. Aplicar técnicas de calidad e inocuidad en los procesos de producción, distribución y comercialización, es importante en la cadena de valor. A través de actividades de capacitación y asistencia técnica oportuna se ha fortalecido a productores para mejorar el aprovechamiento de los recursos y su capacidad socioeconómica. Actualmente, existen alternativas de transformación para la comercialización de los recursos agropecuarios, en su mayoría estas se desarrollan como resultado de los procesos industriales sistemáticos, bajo un esquema que asegura su calidad, valor comercial y su distribución en cadenas nacionales e internacionales en países como Canadá, Estados Unidos y la Comunidad Económica Europea.

El alto valor comercial de los productos agropecuarios se debe a su contenido de proteínas, vitaminas, minerales y ácidos grasos insaturados, que aportan beneficios para la salud humana. No obstante, estos son alimentos perecederos que requiere una adecuada transformación para mantener su calidad y seguridad (Cortés-Sánchez *et al.*, 2024). Para lograr el crecimiento con calidad es de vital importancia el impulso de la capacitación y la asistencia técnica oportuna en los procesos de producción, distribución y comercialización, bajo la normatividad mexicana que garantice la calidad final de los productos (Plan Nacional de Desarrollo, 2024).

### 5.2. Propuesta para el desarrollo agrícola, pecuario o forestal

Para apoyar la transferencia de tecnología al sector agropecuario en las zonas rurales se contemplan programas institucionales a través de cursos de capacitación y asistencia técnica; estos programas tienen como objetivo el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales a través de técnicas amigables con el medio ambiente que tendrán como beneficio un bajo impacto ambiental, ya que estas zonas, de alta marginalidad, tienen como única fuente de

<sup>8</sup> Profesora-Investigadora del Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Boca del Río.

ingreso los productos del campo. Se contemplarán estos beneficios ambientales desde la necesidad de realizar los trámites y permisos, hasta el proceso para darle un valor agregado bajo un esquema de buenas prácticas en la elaboración de nuevos productos, así como de la implementación de técnicas de producción acuícola que permita aprovechar los recursos de manera sustentable, creando así conciencia en la protección del ambiente y los recursos acuáticos.

Este programa de transferencia se da para apoyar a las cooperativas para fortalecer el desarrollo de procesos tecnológicos de conservación, que cumplan con los parámetros de calidad e inocuidad satisfactorios para su comercialización en los diferentes centros de consumo. Con el propósito de lograr un mejor aprovechamiento de los recursos agropecuarios, y obtener beneficios económicos que fortalezcan a las cooperativas y productores, se realizan procesos con características artesanales, de los cuales muchos carecen de tecnología y de certificación de calidad. Este apoyo tecnológico está dirigido para tener impacto en la cadena de valor de los principales productos que actualmente se producen en el Golfo de México.

### **5.3. Conclusiones y recomendaciones**

Los procesos de conservación aplicados a los productos agropecuarios otorgan una alternativa para incrementar el valor agregado y permitir su comercialización que fortalezcan el sector primario. La trasferencia del conocimiento científico al sector, y así el valor agregado, contribuirá a mejorar los ingresos y el nivel de vida de las cooperativas y que beneficien a la región. Se hace énfasis en que se pueden desarrollar procesos prácticos, que utilicen equipos menos sofisticados y accesibles a los productores, pero utilizando tecnologías estandarizadas y bajo el cumplimiento de las buenas prácticas de higiene y sanidad que garanticen la inocuidad hacia los consumidores.

El valor agregado de los productos, trae beneficios a todos los productores del sector agropecuario, aumenta la comercialización y reduce las pérdidas postcosecha. Para esto es necesario consolidar centros de capacitación, que integren el conocimiento de las tecnologías de conservación y al valor agregado, incluyendo aspectos administrativos, de producción, transformación y comercialización.

### **5.4. Referencias bibliográficas**

Cortés-Sánchez, Alejandro De Jesús, Mayra Diaz-Ramírez, Erika Torres-Ochoa, Luis Daniel Espinosa-Chaurand, Adolfo Armando Rayas-Amor, Rosy G. Cruz-Monterrosa, José Eleazar Aguilar-Toalá and Ma. de la Paz Salgado-Cruz. (2024). Processing, Quality and Elemental Safety of Fish" Applied Sciences 14, no. 7: 2903. <https://doi.org/10.3390/app14072903>

Gobierno, D. M. (2019). Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. México. Gobierno de México.

Roldán Cruz, E.I., Nicanor, A.B., González L.C., Porras, J. S. Saavedra. (2024). Modelo de transferencia al sector acuícola pesquero: producto ostión en “Experiencias del Tecnológico Nacional de México y sus aliados estratégicos en el sector agroalimentario”. Ed. Colegio del estado de Hidalgo, México

## 6. LA IMPORTANCIA DE LOS SUELOS SALUDABLES EN LA AGRICULTURA DEL FUTURO

Martín Solís Martínez<sup>9</sup>

**Palabras Claves:** Agricultura sostenible, Agricultura regenerativa, Recarbonización de suelos, Seguridad alimentaria, Salud del suelo.

### 6.1. Introducción

La función más universalmente reconocida del suelo es su apoyo a la producción de alimentos y la seguridad alimentaria. El suelo es la base de la agricultura y el medio en el que crecen casi todas las plantas de las que obtenemos alimentos. De hecho, se estima que el 95% de los alimentos se produce directa o indirectamente en los suelos. Los suelos sanos suministran los nutrientes esenciales, agua, oxígeno y el soporte para las raíces que las plantas productoras de alimentos necesitan para crecer y prosperar. El suelo también sirve como protección para las delicadas raíces de las plantas, frente a las fuertes fluctuaciones de temperatura.

Sin embargo, la degradación del suelo es un problema creciente que afecta la productividad y sostenibilidad de los sistemas agrícolas. La importancia de los suelos saludables en la agricultura del futuro es crucial para garantizar la seguridad alimentaria y mitigar el cambio climático.

En este capítulo se explora la importancia de los suelos saludables en la agricultura del futuro y se discutirán algunos de los desafíos y oportunidades para mejorar la salud del suelo.

### 6.2. Antecedentes

La salud del suelo se ha definido como su capacidad para funcionar como un sistema vivo. Los suelos sanos mantienen una comunidad variada de organismos del suelo que ayudan a controlar las enfermedades de las plantas, insectos y malezas, forman asociaciones simbióticas beneficiosas con las raíces, reciclan nutrientes esenciales para las plantas, mejoran la estructura del suelo con efectos positivos para el agua del suelo y la capacidad de retención de nutrientes, y en última instancia mejoran la producción agrícola. Un suelo sano también contribuye a la mitigación del cambio climático, manteniendo o aumentando su contenido de carbono.

Los suelos saludables son fundamentales para la producción de alimentos y la sostenibilidad de los ecosistemas. La degradación del suelo puede llevar a la pérdida de la biodiversidad, la

---

<sup>9</sup> Investigador del Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero.

disminución de la fertilidad y al aumento de la erosión; por tanto, es importante implementar prácticas agrícolas sostenibles que promuevan la salud del suelo.

La degradación del suelo es un problema global que afecta a millones de hectáreas de tierra agrícola. Según la FAO, el 33% de los suelos del mundo están degradados. La erosión, la salinización y la pérdida de nutrientes son algunas de las principales causas de esta degradación.

### **6.3. Estado del arte**

La salud del suelo es fundamental para la sostenibilidad de los ecosistemas y la producción de alimentos. La investigación sobre la salud del suelo ha avanzado significativamente en los últimos años. Se han desarrollado nuevas tecnologías que promueven la conservación y la mejora del suelo. Sin embargo, aún hay mucho que investigar e implementar para garantizar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

La disponibilidad de alimentos depende de los suelos: los alimentos nutritivos y de buena calidad y el forraje para los animales solo pueden producirse si nuestros suelos están sanos. Por tanto, un suelo vivo y sano es un aliado crucial para la seguridad alimentaria y la nutrición.

En los últimos 50 años, los avances en la tecnología agrícola han llevado a un salto cualitativo en la producción de alimentos y han impulsado la seguridad alimentaria mundial. Sin embargo, en muchos países, esta producción agrícola intensiva ha empobrecido el suelo, poniendo en peligro la capacidad para mantener la producción en estas áreas en el futuro. Con una población mundial que se estima superará los 9 000 millones de personas en 2050 y amenazada por la competencia por los recursos de tierra y agua y el impacto del cambio climático, nuestra seguridad alimentaria actual y futura depende de nuestra capacidad para aumentar los rendimientos y calidad de los alimentos utilizando los suelos que ya están en producción hoy en día.

Numerosos y diversos enfoques agrícolas promueven el manejo sostenible de los suelos con el objetivo de mejorar la productividad, por ejemplo: la agroecología, la agricultura de conservación, la agricultura orgánica, la agricultura de labranza cero y la agrosilvicultura.

La Gestión Sostenible del Suelo (GSS) es un concepto muy importante, plasmado en la Carta Mundial del Suelo 2015, cuya definición señala: "La Gestión del Suelo es sostenible si el apoyo, aprovisionamiento, regulación y servicios culturales proporcionados por el suelo son mantenidos o ampliados sin perjudicar de manera significativa, ya sea las funciones del suelo que permiten a dichos servicios o la biodiversidad".

El Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo (ITPS) (2016) considera que las siguientes acciones son prioritarias:

- La gestión sostenible del suelo puede incrementar el suministro de alimentos saludables y contribuir a reducir la inseguridad alimentaria de la población mundial. Específicamente, nosotros como población debemos minimizar la degradación de los suelos y restaurar la productividad de los suelos que ya están degradados, en aquellas regiones donde las personas son más vulnerables.
- Los depósitos globales de materia orgánica en el suelo (por ejemplo, COS y organismos del suelo) deben ser estabilizados o incrementados.
- Existen evidencias convincentes que la humanidad está cerca de los límites globales para la fijación total de nitrógeno y los límites regionales para el uso de fósforo. Por lo tanto, debemos actuar para estabilizar o reducir el uso global de fertilizantes con nitrógeno (N) y fósforo (P), y al mismo tiempo incrementar el uso de fertilizantes en las regiones con deficiencia de nutrientes. El incremento de la eficiencia en el uso del N y P por las plantas es un requisito clave para alcanzar este objetivo.

#### 6.4. Propuesta para el desarrollo agrícola, pecuario y forestal

Para promover la salud del suelo, se propone implementar diversas acciones como:

**La recarbonización de suelos agrícolas.** Es el proceso de aumentar el contenido de carbono orgánico en el suelo. Esto se puede lograr mediante prácticas como la rotación de cultivos, la incorporación de residuos de cultivos y la aplicación de compost. Este proceso es importante porque:

**Mejora la fertilidad del suelo.** El carbono orgánico es esencial para la vida microbiana en el suelo, lo que a su vez mejora la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

**Aumenta la retención de agua.** El carbono orgánico ayuda a retener el agua en el suelo, disminuyendo la erosión y mejorando la resistencia a sequía.

**Mitiga el cambio climático:** La recarbonización de suelos agrícolas puede ayudar a secuestrar carbono atmosférico, reduciendo la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

**La agricultura regenerativa.** Es un enfoque que busca mejorar la salud del suelo y la biodiversidad mediante prácticas como la rotación de cultivos y la reducción de insumos químicos. Este tipo de agricultura es importante por las siguientes razones:

- Mejora la salud del suelo, sobre todo en su estructura y fertilidad, lo que aumenta la productividad y la resistencia a la erosión.
- Aumenta la biodiversidad en el suelo y en la superficie, manteniendo los ecosistemas saludables.

- Reduce el uso de insumos químicos, mejorando la calidad del agua y del aire.

**El control biológico.** Es una estrategia para manejar plagas y enfermedades en los cultivos mediante el uso de organismos vivos. Este tipo de control es importante porque:

- Reduce el uso de pesticidas químicos, mejorando la calidad del agua y del aire.
- Mejora la salud del cultivo, aumentando la productividad y la calidad de la producción.
- Promueve la biodiversidad, manteniendo los ecosistemas saludables.

**La importancia de la biodiversidad.** Es esencial para la salud del suelo y la agricultura sostenible. Su importancia radica en lo siguiente:

- Mejora la salud del suelo, al mantener la estructura y la fertilidad del mismo, incrementando la productividad y la resistencia a la erosión.
- Aumenta la resiliencia y reduce el riesgo de colapso del ecosistema en caso de perturbaciones.
- Promueve la innovación y la adaptación en la agricultura, al mejorar la productividad y la sostenibilidad.

**Tecnologías emergentes.** Como la inteligencia artificial y el análisis de datos que pueden ayudar a mejorar la salud del suelo y la productividad agrícola por las siguientes razones:

- Optimiza la toma de decisiones informadas sobre la gestión del suelo y la producción agrícola.
- Aumentan la eficiencia en la producción agrícola, reduciendo los costos y mejorando la productividad.
- Promueven la sostenibilidad en la agricultura, lo que ayuda a mantener los ecosistemas saludables.

Algunas prácticas agrícolas sostenibles importantes son las siguientes:

- **Agricultura de conservación:** reducir la labranza y mantener la cobertura del suelo.
- **Rotación de cultivos:** alternar cultivos para mejorar la fertilidad y la estructura del suelo.
- **Uso de abonos orgánicos:** promover el uso de abonos orgánicos y reducir el uso de fertilizantes químicos.
- **Manejo de pasturas:** implementar prácticas de manejo de pasturas sostenibles para reducir la erosión y mejorar la fertilidad del suelo.

## 6.5. Recomendaciones para lograr la autosuficiencia alimentaria

El concepto de Seguridad Alimentaria surge en la década del 70, basado en la producción y disponibilidad alimentaria a nivel global y nacional. En los años 80, se añadió la idea del acceso, tanto económico como físico, y en la década del 90, se llegó al concepto actual que incorpora la inocuidad y las preferencias culturales, y se reafirma la Seguridad Alimentaria como un derecho humano. Según el Instituto de Nutrición para Centroamérica y Panamá (INCAP), la Seguridad Alimentaria Nutricional “es un estado en el cual todas las personas gozan, en forma oportuna y permanente, de acceso físico, económico y social a los alimentos que necesitan, en cantidad y calidad, para su adecuado consumo y utilización biológica, garantizándoles un estado de bienestar general que coadyuve al logro de su desarrollo”.

Según Vía Campesina, promotor de la idea, la soberanía alimentaria es el derecho de los pueblos, las naciones o las uniones de países a definir sus políticas agrícolas y de alimentos, sin ningún dumping frente a países terceros. La soberanía alimentaria organiza la producción y el consumo de alimentos acorde con las necesidades de las comunidades locales, otorgando prioridad a la producción para el consumo local y doméstico. La soberanía alimentaria proporciona el derecho a los pueblos a elegir lo que comen y de qué manera quieren producirlo. La soberanía alimentaria incluye el derecho a proteger y regular la producción nacional agropecuaria y a proteger el mercado doméstico del dumping de excedentes agrícolas y de las importaciones a bajo precio de otros países; reconoce así mismo los derechos de las mujeres campesinas. La gente sin tierra, el campesinado y la pequeña agricultura tienen que tener acceso a la tierra, el agua, las semillas y los recursos productivos, así como a un adecuado suministro de servicios públicos. La soberanía alimentaria y la sostenibilidad deben constituirse como prioritarias a las políticas de comercio”.

Algunas recomendaciones para lograr la autosuficiencia alimentaria son:

- **Promover la agricultura local:** apoyar la producción y consumo de alimentos locales.
- **Mejorar la eficiencia del uso del agua:** implementar prácticas de riego eficientes y reducir la pérdida de agua.
- **Reducir el desperdicio de alimentos:** implementar prácticas de reducción de desperdicio de alimentos y promover la conservación de alimentos.

## 6.6. Conclusiones y recomendaciones

La importancia de los suelos saludables en la agricultura del futuro es crucial para garantizar la seguridad alimentaria y mitigar el cambio climático. La recarbonización de suelos agrícolas, la agricultura regenerativa, el control biológico y la biodiversidad son algunos de los enfoques que pueden ayudar a mejorar la salud del suelo. Las tecnologías emergentes también pueden jugar un papel importante en la mejora de la salud del suelo y la productividad agrícola.

Se recomienda implementar prácticas agrícolas sostenibles y promover la conservación y mejora del suelo. Asimismo, es importante que los agricultores, los investigadores y los formuladores de políticas trabajen juntos para promover la salud del suelo y la sostenibilidad en la agricultura.

## 6.7. Referencias bibliográficas

- FAO. (2009). El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo. SOFI. Roma.
- FAO (2016). El estado mundial del recurso suelo. Resumen técnico. Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo. Roma.
- IPCC (2021). Cambio climático y tierra. Bases físicas. Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Suiza.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 304(5677), 1623-1627.
- Programa Especial para la Seguridad Alimentaria (PESA) en Centroamérica (2011). Seguridad Alimentaria Nutricional, Conceptos Básicos 3ra Edición. Proyecto Food Facility Honduras.

## 7. HÚMEDALES ARTIFICIALES EN EL AGRO MEXICANO

Fabiola Lango Reynoso<sup>8</sup>  
María del Refugio Castañeda Chávez<sup>8</sup>

**Palabras Claves:** Tratamiento de aguas residuales, Depuración natural, Sostenibilidad hídrica, Reúso de agua en agricultura, Economía circular del agua.

### 7.1. Introducción

El usuario de agua más importante en todo el mundo es la agricultura, la cual está significativamente expuesta a los efectos del cambio climático, al desarrollo socioeconómico y al crecimiento poblacional (Gerten *et al.*, 2020; Ward & Pulido-Velázquez, 2008). La intensificación de la escasez de agua en la agricultura afecta la producción de alimentos, lo que a su vez amenaza la seguridad alimentaria de todos los países, pero en particular la de los más pobres dentro de cada país (Huang *et al.*, 2017; Pastor *et al.*, 2019; Tong *et al.*, 2016; Yin *et al.*, 2017). Entre los esfuerzos más recientes para mejorar la representación de la escasez del agua con diferentes definiciones que se refieren al uso y disponibilidad del agua, Hoekstra *et al.* (2012) examinaron la escasez hídrica utilizando el concepto de huella hídrica. Dentro de los avances más recientes en este sentido, Veettill y Mishra (2020) utilizaron dos índices que relacionan el uso del agua con su disponibilidad en ambas dimensiones, la azul (definida como el uso consumtivo de acuíferos y ríos) y la verde (definida como el agua almacenada en cultivos y humedad del suelo). En un estudio posterior, Rosa *et al.* (2020) introdujeron un índice económico de escasez hídrica en la agricultura que evalúa para los cultivos la falta de infraestructura de riego que resulta de una limitada capacidad institucional y económica, en contraste con las limitantes hidrológicas naturales. Este estudio comprendió un análisis con resolución temporal mensual que identificó que 25% de los cultivos en todo el planeta están en regiones que son afectadas por una escasez hídrica de origen económico. Lo que queda claro en este y otros estudios es que, en todo el mundo, para tener una mejor perspectiva de los impactos de la escasez hídrica en la agricultura y bajo efectos del cambio climático se requiere una mejor representación de la relación entre la escasez hídrica y la agricultura.

### 7.2. Propuesta para el desarrollo agrícola, pecuario o forestal

El agua tratada por humedales artificiales puede reutilizarse para el riego de zonas verdes y agrícolas, la recarga de acuíferos, el uso industrial y otros fines, ya que este sistema natural y de bajo costo elimina eficientemente contaminantes, materia orgánica, nutrientes y metales pesados, mejorando la calidad del agua residual de manera sostenible. El modelo de humedales artificiales es un complemento ideal para la depuración de aguas residuales convencional. Este

<sup>8</sup> Profesora-Investigadora del Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Boca del Río.

modelo supone generar una lámina con aguas residuales ricas en materia orgánica que se ajuste a las necesidades adecuadas a cada terreno. Los humedales artificiales permitirían complementar y solucionar los déficits que no cubren las instalaciones tradicionales. El menor gasto energético de este sistema natural de depuración favorece los criterios de sostenibilidad, y ayuda a los municipios a tratar una mayor calidad de agua. Esto repercute directamente en la calidad del efluente y favorece una mejora del estado de los ríos y los ecosistemas fluviales. Otros países como EEUU y la República Checa han implementado sistemas basados en la ingeniería ambiental, que combinan la depuración convencional con humedales de aguas grises.

### 7.3. Conclusiones y recomendaciones

Integración ambiental y productivas de los humedales artificiales, esta tecnología de tratamiento de aguas presenta una magnífica integración visual y paisajística. Además de la función de saneamiento de aguas residuales genera unos espacios naturales protegidos con hábitat para la fauna (especialmente aves). Por estos motivos, los humedales artificiales gozan de una gran aceptación social y puede aprovechar y reciclar el agua, así como integrar el concepto de economía circular del agua. Además, que, hoy la tecnología permite la adecuación de sistemas de filtración y tratamiento adicionales para la eliminación de bacterias que permitan la sanidad e inocuidad de los productos que se cultiven con esta agua.

### 7.4. Referencias bibliográficas

- Gerten, D. (2013). A vital link: Water and vegetation in the Anthropocene. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(10), 3841–3852. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3841-2013>
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the national academy of sciences*, 109(9), 3232-3237.
- Huang, G., Chen, D., Li, T., Wu, F., Van Der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. (2017). Multi-scale dense networks for resource efficient image classification. *arXiv preprint arXiv:1703.09844*.
- Pastor, C. A. (2019). Diseño Universal para el Aprendizaje: un modelo teórico-práctico para una educación inclusiva de calidad. *Participación educativa*, 6(9), 55-68.
- Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D., & Terzi, S. (2020). Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1662-1687.
- Tong, T., & Elimelech, M. (2016). The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies, and future directions. *Environmental science & technology*, 50(13), 6846-6855.

- Yin, P., Chen, R., Wang, L., Meng, X., Liu, C., Niu, Y., ... & Kan, H. (2017). Ambient ozone pollution and daily mortality: a nationwide study in 272 Chinese cities. *Environmental health perspectives*, 125(11), 117006.
- Veettil, A. V., & Mishra, A. (2020). Water security assessment for the contiguous United States using water footprint concepts. *Geophysical Research Letters*, 47(7), e2020GL087061.
- Ward, F. A., & Pulido-Velazquez, M. (2008). Water conservation in irrigation can increase water use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(47), 18215-18220.

## 8. VERACRUZ ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO: ¿HACIA DÓNDE SE DESPLAZARÁ SU POTENCIAL PRODUCTIVO?

Gabriel Díaz Padilla<sup>6</sup>

Ignacio Sánchez Cohen<sup>10</sup>

Jesús Soria Ruiz<sup>11</sup>

**Palabras clave:** Modelación espacial, Adaptación agroclimática, Reconversión productiva, Zonificación agroecológica.

### 8.1. Introducción

Veracruz se considera uno de los principales estados productores agropecuarios de México gracias a su posición geográfica, variabilidad edafoclimática y potencial productivo, constituyéndose como pilar fundamental para la seguridad alimentaria nacional. No obstante, esta capacidad productiva es altamente vulnerable a los impactos del cambio climático, particularmente en el sector primario donde los cambios globales tienen mayor influencia (Rodríguez-Moreno et al., 2021). Factores como el aumento de temperatura, alteración en los patrones de precipitación y mayor frecuencia de eventos extremos -fenómenos son ampliamente documentados (IPCC, 2022) ya que amenazan con reconfigurar radicalmente la aptitud territorial del Estado. Este capítulo explora resultados y ejemplos concretos que ilustran el posible desplazamiento geográfico del potencial productivo de Veracruz bajo diferentes escenarios de cambio climático, proporcionando evidencia científica crucial para diseñar estrategias de adaptación multisectoriales que fortalezcan la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental. La urgente necesidad de abordar estos desafíos se hace evidente ante la aceleración de los fenómenos climáticos extremos y sus impactos crecientes en los sistemas productivos del Estado.

### 8.2. Antecedentes

La investigación en Veracruz ha documentado consistentemente los impactos del cambio climático en sus sistemas productivos durante las últimas dos décadas. Estudios hidrológicos exhaustivos proyectan una reducción significativa en la disponibilidad hídrica superficial y subterránea (Pereyra-Díaz et al., 2011), mientras investigaciones detalladas en cultivos estratégicos como el café demuestran cómo los cambios progresivos en los patrones de temperatura y lluvia afectarán directamente las fases fenológicas clave, mermando considerablemente tanto los rendimientos como la calidad final del producto (Villers et al., 2009). El proyecto de Observatorios Agrotecnológicos (2010-2012) representó un hito importante al

<sup>6</sup> Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Cotaxtla.

<sup>10</sup> Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-CENID RASPA.

<sup>11</sup> Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Valle de México.

desarrollar el primer sistema nacional integral (Agromapas) para evaluar de manera sistemática el potencial productivo de 55 cultivos de importancia socioeconómica y modelar sus posibles impactos climáticos a una alta resolución espacial sin precedentes (Díaz-Padilla *et al.*, 2012). Estudios complementarios como el de Álvarez-Bravo *et al* (2017) en la producción de aguacate en Michoacán evidencian de manera contundente cómo el aumento gradual pero constante de las temperaturas redefine completamente las zonas óptimas de producción y afecta directamente la productividad, subrayando la urgencia crítica de extraer y adaptar estos análisis avanzados a otros cultivos estratégicos y regiones prioritarias. Pese a estos avances significativos en la investigación, persiste una brecha crítica sustancial: la carencia de modelos integrados y actualizados que proyecten de manera espacialmente explícita y multisectorial - considerando simultáneamente los ámbitos agrícola, pecuario y forestal- el desplazamiento progresivo del potencial productivo de Veracruz bajo diversos escenarios de cambio climático futuros.

### **8.3. Desarrollo del tema**

El cambio climático, definido científicamente por el IPCC (2021) como una alteración persistente y significativa del estado del clima atribuible directamente a actividades humanas que modifican sustancialmente la composición atmosférica global (UNFCCC, 1992), se manifiesta mediante cambios medibles y progresivos en los patrones climáticos tradicionales, impulsados principalmente por la quema intensiva de combustibles fósiles (WHO, 2021). Esta alteración profunda del sistema climático constituye una realidad verificable empíricamente, como demuestran conclusivamente estudios regionales detallados en México donde de la Mora Orozco *et al.* (2017) documentaron tendencias significativas y preocupantes de calentamiento en el estado de Chiapas, con 42 de 60 combinaciones de índices climáticos analizados mostrando tendencias positivas estadísticamente significativas en temperaturas extremas y en el rango diurno de temperatura, indicadores clave del cambio climático regional.

El potencial productivo se define operativamente para esta investigación como la capacidad máxima intrínseca de un territorio determinado para sostener y optimizar la producción agropecuaria y forestal de manera sostenible mediante la interacción compleja y dinámica de condiciones biofísicas fundamentales (clima, suelo, agua, topografía) y condiciones socioeconómicas facilitadoras (tecnología, manejo, infraestructura). Su evaluación científica se fundamenta en dos pilares metodológicos esenciales: a) la definición precisa y cuantitativa de los requerimientos agroecológicos específicos de cada especie mediante bases de datos especializadas y validadas internacionalmente como ECOCROP (FAO, 2021), y b) el contraste espacial explícito y sistemático de estos requisitos biofísicos con las condiciones bioclimáticas y edáficas reales del territorio mediante el uso avanzado de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esta metodología robusta utiliza operaciones de álgebra de mapas y métodos de multicriterio como la suma lineal ponderada para identificar y clasificar áreas aptas, marginales y no aptas bajo diferentes escenarios climáticos futuros (Díaz-Padilla *et al.*, 2012), proporcionando una base científica sólida para la toma de decisiones.

El estado de Veracruz representa un caso emblemático y a la vez crítico por su excepcional diversidad agroecológica, su orografía compleja y variada, y su posición costera estratégica en el trópico húmedo. Esta heterogeneidad ambiental única genera una vulnerabilidad diferenciada y multifacética donde el aumento acelerado del nivel del mar afecta directamente las zonas costeras bajas, las alteraciones profundas en los patrones de precipitación impactan de manera diferencial cada piso altitudinal, y los eventos extremos cada vez más frecuentes comprometen simultáneamente todos los sectores productivos, requiriendo aproximaciones metodológicas sofisticadas que capturen adecuadamente esta complejidad espacial. La variabilidad altitudinal extrema crea microclimas particulares que responden de manera diferenciada a los cambios globales, exigiendo aproximaciones metodológicas precisas y localizadas para identificar tanto las áreas en riesgo inminente como las zonas con aptitud emergente, particularmente para cultivos estratégicos que son fundamentales para la economía estatal.

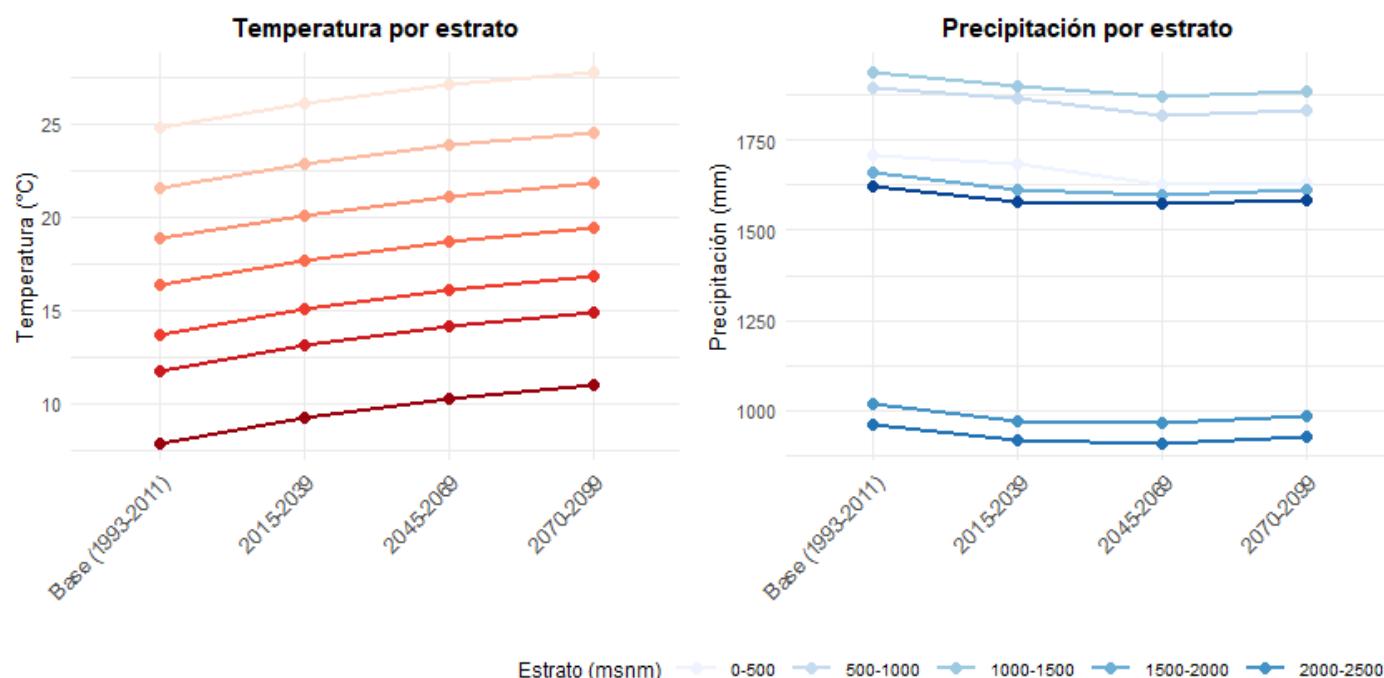
#### **8.4. Aplicación metodológica: variación temporal de precipitación y temperatura por estrato altitudinal en Veracruz**

Como ejemplo ilustrativo representativo de la aplicación práctica de los métodos y conceptos previamente descritos, se analizó exhaustivamente la variación proyectada de precipitación y temperatura considerando distintos horizontes temporales estratégicos: escenario base de referencia (1993-2011), corto plazo (2015-2039), mediano plazo (2045-2069) y largo plazo (2070-2099). Este análisis integral utiliza datos del modelo climático regional HADGEM2-ES bajo el escenario moderado RCP 4.5, obtenidos del Repositorio Geoespacial especializado (Fernández-Eguiarte *et al.*, 2015). La estratificación sistemática por altitud permitió identificar patrones claramente diferenciados de cambio climático en el territorio veracruzano, proporcionando una base científica esencial para la planeación detallada de acciones de adaptación específicas por región altitudinal y tipo de cultivo.

Los resultados revelan consistentemente una tendencia marcada de calentamiento progresivo en todos los estratos altitudinales sin excepción, con incrementos térmicos sustanciales que oscilan entre +2.5°C y +3.5°C hacia el periodo 2070-2099 (Figura 4), siendo más acentuados preocupantemente en las mayores altitudes. Paralelamente, se proyectan disminuciones significativas y potencialmente críticas en la precipitación anual, particularmente severas en los estratos bajos (0-500 msnm) con reducción superior a 70 mm respecto al escenario base histórico. Esta dualidad climática peligrosa -mayor calor intenso combinado con menor disponibilidad hídrica en zonas bajas- amenaza directamente cultivos estratégicos altamente sensibles al estrés térmico e hídrico como la caña de azúcar, los cítricos y el café de baja altitud.

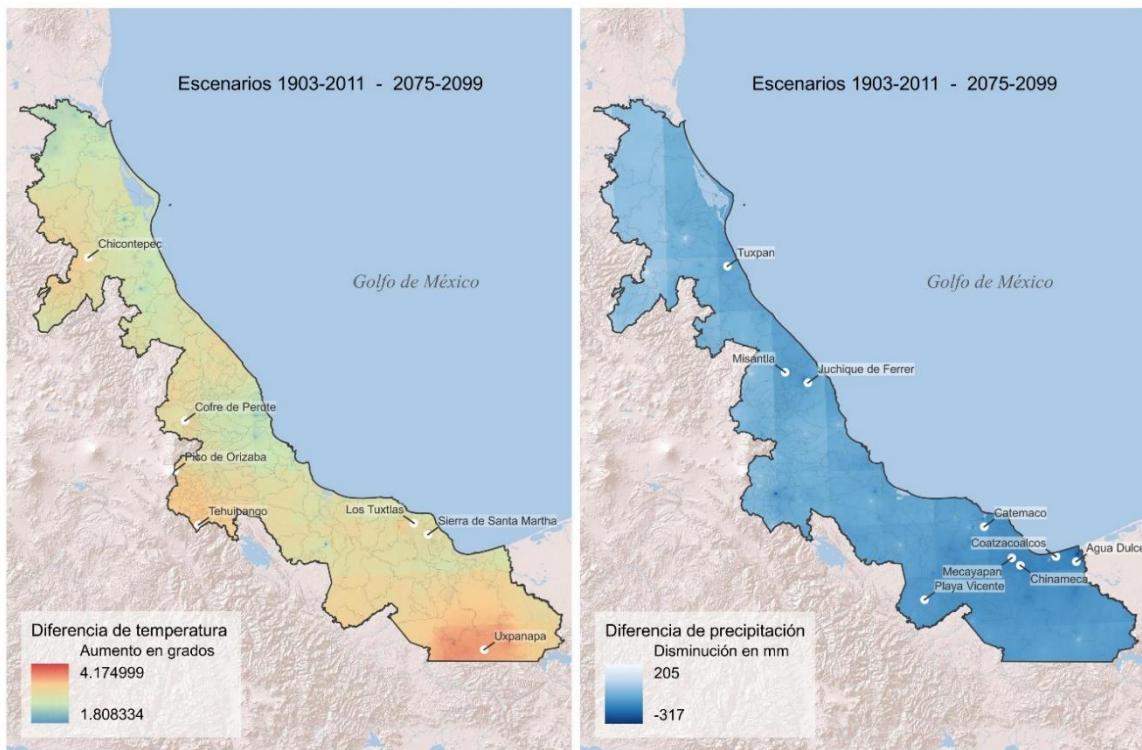
Las proyecciones climáticas regionales detalladas para el Golfo de México entre los periodos 1903-2011 y 2075-2099 (Figura 5) revelan cambios críticos que intensificarán sustancialmente los desafíos productivos y ambientales en el estado de Veracruz. El aumento de temperatura proyectado, que alcanzaría valores extremos de hasta 4.17°C en algunos escenarios, exacerbará el estrés térmico en cultivos y ecosistemas naturales, acelerando significativamente las tasas de

evapotranspiración y reduciendo drásticamente la disponibilidad hídrica efectiva. Paralelamente, la disminución sustancial de precipitación, con reducciones acumuladas que pueden llegar hasta 317 mm en algunas subregiones, agudizará severamente la escasez de agua, especialmente en zonas bajas costeras donde la agricultura de temporal y una porción significativa de la población dependen críticamente de las lluvias estacionales. Los estratos medios (1000-1500 msnm) muestran disminuciones moderadas pero significativas (-45 a -55 mm), mientras los estratos altos (>2500 msnm) presentan reducciones menos severas (-35 mm) pero aún relevantes. Estas variaciones diferenciadas sugieren fuertemente un posible desplazamiento altitudinal progresivo de la frontera agrícola tradicional y la necesidad imperiosa de implementar estrategias de adaptación diferenciadas y específicas por región altitudinal y tipo de productor.

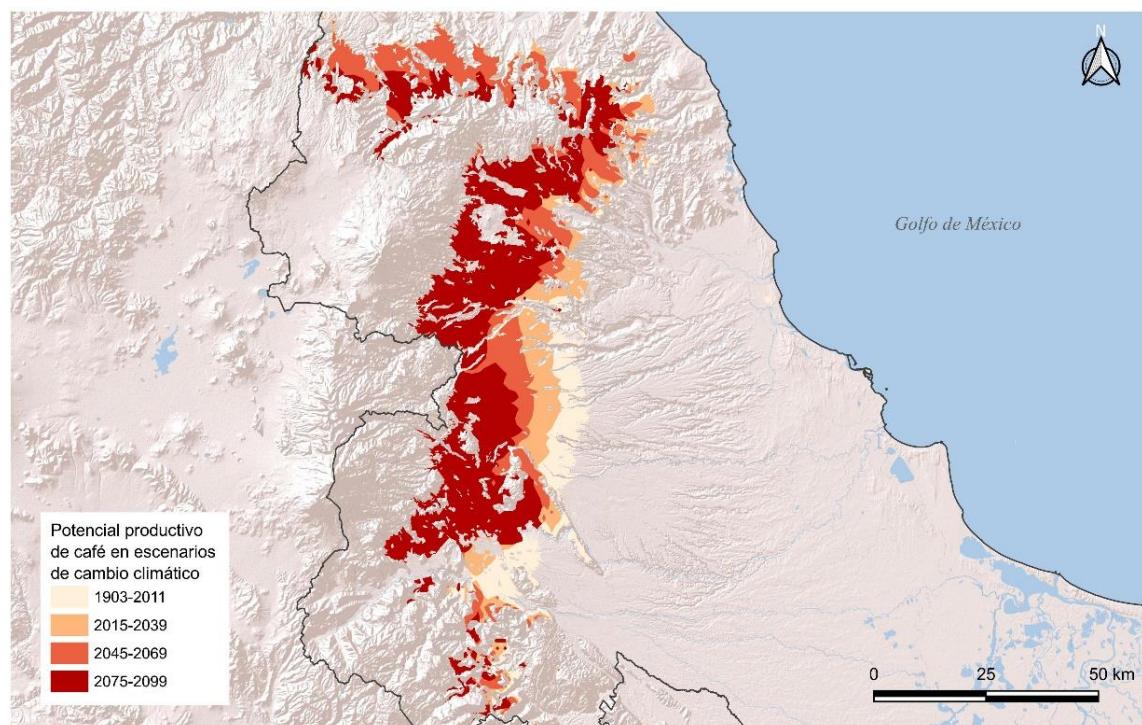


**Figura 4.** Proyección de cambios en temperatura y precipitación por estrato altitudinal en el estado de Veracruz bajo escenarios de cambio climático.

Una manera de representar cómo estos cambios repercutirían en el potencial productivo de diferentes cultivos se muestra en la Figura 6, donde se aprecia una clara disminución de la aptitud cafetalera en la zona central de Veracruz, especialmente en las áreas bajas. Como consecuencia del incremento de temperatura, el cultivo tiende a desplazarse progresivamente hacia zonas más altas, donde las condiciones térmicas resultan más favorables. Este patrón de migración altitudinal evidencia la vulnerabilidad del sector y la urgente necesidad de implementar estrategias de adaptación, como la reconversión productiva o el desarrollo de variedades tolerantes al estrés térmico.



**Figura 5.** Diferencia de temperatura y precipitación entre escenarios de cambio climático y escenario base.



**Figura 6.** Movilidad espacial y temporal del potencial productivo del café ante escenarios de cambio climático.

## 8.5. Estado del arte

La evaluación científica de impactos del cambio climático en la agricultura ha evolucionado sustancialmente desde los modelos globales iniciales (GCMs) de relativamente baja resolución hacia enfoques avanzados de downscaling (reducción de escala), tanto dinámico como estadístico, que permiten proyecciones regionales mucho más precisas y útiles para la planificación local (Ramírez-Cabral *et al.*, 2017). La vanguardia metodológica actual integra sofisticados Modelos de Cultivo (DSSAT, AquaCrop) con ensambles de múltiples GCMs bajo los escenarios de trayectorias de concentración representativa (RCP) del IPCC (2022) para cuantificar impactos detallados no solo en los rendimientos promedio, sino también en variables críticas como el estrés hídrico, la fenología de los cultivos y la incidencia de plagas y enfermedades. Para el caso específico de Veracruz, se priorizaron cuidadosamente modelos de la fase CMIP6 que han demostrado mejor desempeño en zonas tropicales continentales (CNRM-ESM2-1, MRI-ESM2-0), aplicando rigurosas técnicas de corrección de sesgos mediante quantile mapping (Andrade-Velázquez y Montero-Martínez, 2023) para aumentar la confiabilidad de las proyecciones.

La investigación de punta actual emplea técnicas avanzadas de Machine Learning (redes neuronales artificiales, random forest, support vector machines) para identificar umbrales bioclimáticos críticos no lineales y mapear la idoneidad futura de cultivos incluso en contextos de alta incertidumbre (Chlingaryan *et al.*, 2018), complementadas estratégicamente con SIG de alta resolución para la cartografía detallada de la aptitud agrícola presente y futura. La Inteligencia Artificial (IA) permite procesar y analizar grandes volúmenes de datos climáticos, edáficos y fenológicos de una manera imposible para los métodos tradicionales (Rolnick *et al.*, 2022), identificando patrones complejos no lineales en la extraordinaria diversidad agroecológica de Veracruz (Reichstein *et al.*, 2019). La modelización más avanzada integra explícitamente la vulnerabilidad específica a eventos extremos mediante el uso de imágenes de radar de apertura sintética (SAR) de la constelación Sentinel-1 combinadas con algoritmos de Machine Learning para mapear extensiones de inundación con precisión submétrica (Soria-Ruiz *et al.*, 2022), mientras el análisis multitemporal con imágenes ópticas de Sentinel-2 y algoritmos como SVM y Árboles de decisión validan casi en tiempo real el desplazamiento progresivo de zonas aptas (Espinosa-Herrera *et al.*, 2022, Maldonado-Velasco y Soria-Ruiz, 2024). El enfoque multisectorial integral y la evaluación de riesgos concurrentes son ahora estándar en la investigación de vanguardia, reconociendo que la principal amenaza no son solo los cambios graduales en los promedios climáticos, sino la mayor frecuencia, intensidad y duración de eventos extremos que tienen el potencial de devastar la producción de manera repentina (FAO, 2021).

## 8.6 Estrategias de mitigación

La mitigación efectiva del cambio climático requiere transitar urgentemente hacia sistemas productivos sustancialmente más bajos en emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y con mayor capacidad de secuestro de carbono en biomasa y suelos. La agricultura circular emerge

como un modelo clave al minimizar radicalmente los residuos y optimizar integralmente los recursos escasos (FAO, 2021). Adicionalmente, la agroforestería multifuncional y los sistemas silvopastoriles intensivos capturan carbono de manera significativa tanto en la biomasa aérea como en los perfiles del suelo. La agricultura de conservación, con sus prácticas de mínima labranza, coberturas permanentes y rotaciones diversificadas, contribuye sustancialmente al secuestro de carbono orgánico del suelo (Palm *et al.*, 2014), mientras que la incorporación de energías renovables en las actividades agropecuarias reduce drásticamente las emisiones fósiles (IPCC, 2022). Finalmente, el manejo sostenible integral de suelos y la restauración activa de ecosistemas degradados se confirman como estrategias altamente costo-efectivas tanto para la adaptación como para la mitigación (Griscom *et al.*, 2017).

## **8.7. Propuesta para el desarrollo agrícola, pecuario o forestal**

Se propone la creación e implementación de un Sistema Nacional de Adaptación Productiva Resiliente (SNAPR) con cuatro pilares estratégicos interconectados: 1) Reversión productiva basada en evidencia científica sólida, desarrollando y diseminando masivamente variedades tolerantes a sequía, calor y nuevas plagas mediante colaboración estratégica INIFAP-CIMMYT; 2) Infraestructura hídrica adaptativa con tecnificación masiva de riego, captación pluvial a múltiples escalas y regeneración activa de cuencas críticas; 3) Seguros agroclimáticos universalizados y asequibles vinculados operativamente a sistemas de alertas tempranas hiperlocales basados en TIC; 4) Implementación generalizada de herramientas computacionales de soporte decisional como ACUAC para la gestión adaptativa y participativa del agua en cuencas prioritarias.

Para el estado de Veracruz específicamente, se plantea una estrategia descentralizada y flexible basada en su microclimatología particular, articulada a través de los Consejos de Cuenca existentes y los clústers agroindustriales regionales. En zonas de alto riesgo climático (Papaloapan, Totonacapan), se debe implementar urgentemente programas de transición asistida y justa hacia cultivos resilientes como cítricos tolerantes, cacao bajo sombra diversificada, mango adaptado y sistemas agrosilvopastoriles integrados. En zonas de oportunidad emergente (Altos de Veracruz), se debe fomentar estratégicamente la caficultura de especialidad de alta calidad en nuevas áreas altitudinales con aptitud, apoyando integralmente con paquetes tecnológicos, certificación diferenciada y comercialización premium, además de promover intensamente la agricultura protegida (invernaderos, malla-sombra) para la producción de hortalizas de alto valor y berries. En ganadería, es imperativo masificar la adopción de sistemas silvopastoriles intensivos y establecer bancos comunitarios de proteína con especies arbóreas nativas forrajeras. El desarrollo forestal debe vincular creativamente los programas de PSA con especies nativas de valor económico maderable y no maderable y con la restauración activa de corredores biológicos estratégicos para la conectividad ecológica y la recarga hídrica.

## 8.8. Conclusiones y recomendaciones

El estudio proyecta consistentemente una reconfiguración radical y acelerada de la aptitud productiva del Estado hacia 2099, con pérdida sustancial e probablemente irreversible de aptitud en las extensas zonas bajas costeras y desplazamiento progresivo hacia las áreas serranas de mayor altitud. Se recomienda prioritariamente: 1) Actualizar urgentemente los instrumentos de ordenamiento territorial ecológico con escenarios climáticos explícitos como eje rector; 2) Crear un fondo estatal específico para financiar la reconversión productiva justa y la tecnificación masiva del riego; 3) Fortalecer significativamente los esquemas de pagos por servicios ecosistémicos en las regiones montañosas emergentes; 4) Adoptar y promover sistemas agroforestales diversificados y bancos comunitarios de germoplasma adaptado; 5) Desarrollar y transferir paquetes tecnológicos específicos para las nuevas zonas de aptitud y sistemas de alerta temprana localizados. La implementación articulada, concertada y urgente de estas medidas es absolutamente crucial para la transición efectiva hacia sistemas productivos resilientes, ya que la inacción tendría un alto costo socioeconómico y ambiental inaceptable, comprometiendo gravemente la seguridad alimentaria regional y la sostenibilidad de los medios de vida rurales. La ventana de oportunidad para actuar se reduce rápidamente, exigiendo medidas inmediatas, contundentes y coordinadas entre todos los actores relevantes.

## 8.9. Referencias bibliográficas

- Álvarez-Bravo A, Salazar-García S, Ruiz-Corral, JA, Medina-García G. Escenarios de cómo el cambio climático modificará las zonas productoras de aguacate 'hass' en Michoacán. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 2017; (19), 4035-4048. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i19.671>
- Andrade-Velázquez M, Montero-Martínez MJ. Statistical Downscaling of Precipitation in the South and Southeast of Mexico. Climate 2023; 11(9), 186. <https://doi.org/10.3390/cli11090186>
- Chlingaryan A, Sukkarieh S, Whelan B. Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review. Computers and Electronics in Agriculture 2018; 151, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.012>
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2019). Estrategia Nacional de Manejo Forestal Sustentable para el Incremento de la Producción y Productividad. México: CONAFOR.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2021). Programa Nacional Hídrico 2021-2024. México: CONAGUA.
- De La Mora Orozco, Celia & Flores-Garnica, José & Flores, Hugo & Rubio-Arias, Hector & Chávez-Durán, Álvaro & Ochoa-Rivero, Jesus & Garcia Velasco, Javier. (2018). Variaciones espacio-temporales y modelaje de la concentración de oxígeno disuelto en el lago de Chapala, México. Tecnología y Ciencias del Agua. 9. 39-52. 10.24850/j-tyca-2018-01-03.

Díaz-Padilla G, Guajardo-Panes RA, Medina-García G, Sánchez-Cohen I, Soria-Ruiz J, Ruiz-Corral JA. (2012). Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. Publicación Especial INIFAP No. 8.

Espinosa-Herrera JM, Macedo-Cruz A, Fernández-Reynoso DS, Flores-Magdaleno H, Fernández-Ordoñez YM, Soria-Ruiz J. Monitoring and identification of agricultural crops through multitemporal analysis of optical images and machine learning algorithms. Sensors 2022; 22(16), 6106. <https://doi.org/10.3390/s22166106>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2021. The impact of disasters and crises on agriculture and food security. Roma: FAO.

Fernández-Eguiarte A, Zavala-Hidalgo J, Romero-Centeno R, Trejo Vázquez RI. (2015). Repositorio geoespacial de escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS), Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México.

Google Earth Engine. (2023). Documentación oficial. <https://earthengine.google.com/>

Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., ... & Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. Proceedings of the National Academy of Sciences, 114(44), 11645-11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Maldonado-Velasco I, Soria-Ruiz J. Análisis de cambios de cobertura vegetal usando inteligencia artificial en Oaxaca, México. Revista de Geomática Aplicada 2024; 15(3), 45-60. <https://doi.org/10.5555/geomap.2024.12345>

Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., & Grace, P. (2014). Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. Agriculture, Ecosystems & Environment, 187, 87-105. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.05.010>

Pereyra-Díaz D, Cruz-Torres DG, Pérez-Sesma JAA. La Evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático. Investigaciones Geográficas 2011; 75, 37-50.

Ramírez-Cabral NY, Kumar L, Taylor S. Crop niche modeling projects major shifts in common bean growing areas. Agricultural and Forest Meteorology 2017; 240-241, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.012>

Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, Jung M, Denzler J, Carvalhais N, Prabhat. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. Nature 2019; 566(7743), 195-204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>

Rodríguez-Moreno VM, Medina-García G, Díaz-Padilla G, Ruiz-Corral JA, Estrada-Ávalos J, Ruvalcaba JEM. ¿Por qué México es un país altamente vulnerable al cambio climático? Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 2021; 12(25), 45-57. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i25.2819>

Rolnick D, Donti PL, Kaack LH, Kochanski K, Lacoste A, Sankaran K, Bengio Y. Tackling climate change with machine learning. ACM Computing Surveys 2022; 55(2), 1-96. <https://doi.org/10.1145/3485128>

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2020). Programa Especial de Cambio Climático. Sector Agroalimentario. México: SAGARPA.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2023). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Ciudad de México: SIAP. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Soria-Ruiz J, Fernandez-Ordoñez YM, Ambrosio-Ambrosio JP, Escalona-Maurice M J, Medina-García G, Sotelo-Ruiz ED, Ramirez-Guzman ME. Flooded extent and depth analysis using optical and SAR remote sensing with machine learning algorithms. Atmosphere 2022; 13(11),1852. <https://doi.org/10.3390/atmos13111852>

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change. Nueva York: Naciones Unidas.

Villers L, Arizpe N, Orellana R, Conde C, Hernández J. Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. Interciencia 2009; 34(5), 322-329.

WHO (World Health Organization), 2021. Climate change and health. Fact sheet. Ginebra: WHO. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>

## 9. INNOVACIÓN EN EL CULTIVO DE TEJIDOS VEGETALES Y SUS APLICACIONES

Jericó Jabín Bello-Bello<sup>12</sup>

**Palabras Claves:** Micropropagación, Biotecnología vegetal, Conservación de germoplasma, Mejoramiento genético, Metabolitos secundarios.

### 9.1. Introducción

El cultivo de tejidos vegetales (CTV) se refiere al conjunto de técnicas que permiten el establecimiento, mantenimiento y desarrollo de cualquier parte de una planta, desde una célula hasta un organismo completo, bajo condiciones artificiales, asépticas y controladas (Pérez et al., 1999).

El CTV ha demostrado ser una herramienta fundamental en la biotecnología vegetal con aplicaciones en la sanidad vegetal, la conservación de germoplasmas, la producción de metabolitos secundarios, el mejoramiento genético y la micropropagación. Las innovaciones en el CTV contribuyen para enfrentar los retos de la agricultura moderna mejorando los métodos biotecnológicos tradicionales, la productividad agrícola, la seguridad alimentaria y la conservación de recursos fitogenéticos. El objetivo de este capítulo es analizar la importancia de la innovación en el cultivo de tejidos vegetales y sus aplicaciones en el desarrollo sostenible.

### 9.2. Antecedentes

El CTV surgió a inicios del siglo XX (Haberlandt, 1902; Küster, 1909) pero fue hasta mediados de ese siglo cuando White (1934), White (1963), Gautheret (1934) y (Gautheret, 1942) desarrollaron las bases en que se fundamentan los métodos actuales de estas técnicas de biotecnología vegetal (Endress, 1994). Los primeros trabajos en este campo tuvieron por lo general un éxito limitado, debido a tres factores fundamentales. El primero de ellos era el desconocimiento de los requerimientos nutricionales de los tejidos vegetales cultivados *in vitro*; el segundo, era el uso frecuente de tejidos vegetales maduros y bien diferenciados para iniciar los cultivos, ya que estos tejidos, como se sabe actualmente, son los que muestran una menor capacidad de respuesta al cultivo *in vitro*; finalmente, el tercer factor que retardó el desarrollo de las técnicas de CTV fue la ignorancia de la existencia y del papel que juegan en el desarrollo vegetal las llamadas fitohormonas y reguladores del crecimiento vegetal, ya que estas substancias eran desconocidas hasta cuando Went y Thimann (1937) descubrieron el ácido Indolacético (AIA), y cuando Skoog (1955) descubrió la cinetina (CIN). Skoog y Miller (1957) fueron los primeros que consiguieron manipular la formación *in vitro* de brotes, raíces y tejido caloso mediante el uso de diferentes combinaciones de una auxina (AIA) y una citocinina (CIN). Otro de los pasos fundamentales para

<sup>12</sup> Profesor-Investigador del Colegio de Postgraduados-Campus Córdoba.

la consolidación de las técnicas de CTV lo dieron a conocer Murashige y Skoog (1962) al desarrollar un medio de cultivo (MS) que reunía las características apropiadas para ser utilizado en el cultivo de una gran variedad de tejidos de diferentes especies vegetales; dicho medio de cultivo sigue utilizándose de manera rutinaria en innumerables aplicaciones del CTV que se realizan actualmente (Murashige y Skoog, 1962). El CTV presenta cinco aplicaciones en biotecnología vegetal (Figura 7).



**Figura 7.** Aplicaciones del cultivo de tejidos vegetales.

### 9.3. Sanidad vegetal

La sanidad vegetal se refiere a la capacidad de mantener los explantes libres de microorganismos contaminantes, asegurando así la viabilidad del material vegetal. Una condición fundamental para lograrlo es la asepsia, es decir, la ausencia de organismos que puedan afectar los resultados o provocar la pérdida del cultivo (Grimaldi y Bastos, 2023).

Los contaminantes más comunes en los cultivos *in vitro* incluyen hongos, bacterias, levaduras, virus, viroides y micoplasmas. Estos microorganismos proliferan con facilidad debido a la riqueza de los medios de cultivo utilizados.

La importancia de la sanidad vegetal radica en que la presencia de contaminantes limita el establecimiento y desarrollo de los explantes, compromete la obtención de plantas viables y puede generar pérdidas significativas en los procesos de micropropagación y conservación de germoplasma. Para enfrentar la contaminación se emplean diversos métodos como:

- Esterilización superficial de explantes mediante agentes químicos como hipoclorito de sodio, etanol, peróxido de hidrógeno o nitrato de plata.
- Uso de antibióticos o fungicidas en casos específicos, aunque con limitaciones.
- Aislamiento y cultivo de meristemos combinado con termoterapia o quimioterapia para eliminar virus y viroides.
- La sanidad vegetal es esencial en el cultivo de tejidos, ya que asegura la producción de material libre de patógenos.

#### 9.4. Conservación de germoplasmas

La conservación de germoplasma vegetal constituye una estrategia esencial para preservar el patrimonio de la biodiversidad. Su objetivo es resguardar los recursos genéticos de especies silvestres amenazadas y de genotipos cultivados que se encuentran en riesgo de desaparecer, ya sea por la tala de bosques, la sustitución de variedades tradicionales por cultivares modernos, o por la presión de la sobreexplotación de los ecosistemas (Shahzad *et al.*, 2017).

La importancia de esta conservación radica en que el germoplasma representa una fuente invaluable de genes útiles para el mejoramiento vegetal y para garantizar la seguridad alimentaria futura. Se destacan diferentes tipos de germoplasma a proteger, como cultivares modernos, cultivares caducos, cepas reproductoras, razas locales o criollas, formas silvestres de especies cultivadas y especies silvestres relacionadas con las cultivadas. La pérdida de estos materiales implica la desaparición de variabilidad genética única e irreemplazable.

Los sistemas de conservación tradicionales, como reservas naturales, parques o bancos de semillas, resultan limitados por factores económicos, políticos y sociales. En este sentido, el cultivo de tejidos vegetales aporta alternativas innovadoras mediante la conservación in vitro, que incluye métodos a corto, mediano y largo plazo. Entre ellos destacan la criopreservación a temperaturas extremadamente bajas, los subcultivos periódicos y las técnicas de almacenamiento bajo condiciones de crecimiento mínimo.

Las ventajas de la conservación in vitro son múltiples: altos índices de multiplicación, bajos costos de mantenimiento, independencia de factores ambientales, intercambio seguro de material vegetal y mínima variación genética cuando se emplean tejidos adecuados como meristemos o yemas. Asimismo, estas técnicas permiten rescatar especies amenazadas o con muy pocos individuos vivos, garantizando así la permanencia de recursos genéticos vitales para las generaciones futuras.

## 9.5. Producción de metabolitos

La producción de metabolitos secundarios corresponde a la síntesis de compuestos orgánicos presentes en las plantas que, aunque no son esenciales para su supervivencia, cumplen funciones de defensa y adaptación al medio, como actuar contra plagas, condiciones ambientales adversas o en interacciones ecológicas. Estos metabolitos incluyen alcaloides, terpenos, fenoles, flavonoides y otros, se producen en cantidades reducidas y en especies limitadas (Jiménez, 2003). Su importancia es trascendental, ya que constituyen la materia prima para la industria farmacéutica, alimentaria, cosmética y agrícola. A partir de ellos se elaboran medicamentos, colorantes, fragancias, saborizantes y biopesticidas.

Se estima que una proporción significativa de fármacos prescritos actualmente proviene de metabolitos secundarios obtenidos de plantas. Sin embargo, la producción natural enfrenta limitaciones debido al bajo contenido en los tejidos, al lento crecimiento de las especies productoras y a la distribución restringida de estos compuestos. El CTV surge como una alternativa innovadora para superar dichas limitaciones, ya que permite obtener metabolitos en condiciones controladas, sin depender de la estacionalidad ni de la explotación de poblaciones silvestres. Además, mediante estas técnicas se han descubierto nuevos metabolitos nunca detectados en plantas cultivadas en campo, ampliando el potencial biotecnológico y científico. De este modo, la producción de metabolitos secundarios es considerada una herramienta estratégica para el aprovechamiento sostenible de compuestos naturales, garantizando un suministro constante y abriendo nuevas posibilidades para la biotecnología vegetal.

## 9.6. Mejoramiento genético

El mejoramiento genético en plantas consiste en modificar el genoma con información genética que les confiera características diferentes. Esto se logra mediante la fusión de protoplastos, mutagenesis in vitro, transformación genética, entre otras. Este último proceso es posible gracias al desarrollo de la tecnología del ADN recombinante y al avance de los sistemas de cultivo de tejidos vegetales, que permiten manipular y transferir genes, regenerar plantas completas a partir de una célula y controlar procesos morfogenéticos in vitro (Nazari *et al.*, 2024).

La importancia del mejoramiento genético radica en la agricultura y la biotecnología. Entre sus principales aplicaciones se encuentran: Resistencia a virus, insectos, hongos y herbicidas, reduciendo pérdidas por plagas y mejorando la productividad.

## 9.7. Mejoras en la calidad y fisiología de frutos y semillas, optimizando características nutricionales y organolépticas

Modificación de la arquitectura de la planta (tamaño, forma, periodo juvenil, metabolismo respiratorio), con el fin de incrementar el rendimiento y la adaptación a diferentes ambientes.

## 9.8. Incremento de la tolerancia a estrés ambiental, como sequías, heladas o exceso de sales

El mejoramiento genético vegetal es una herramienta estratégica que combina biotecnología y cultivo de tejidos para generar plantas más productivas, resistentes y adaptadas a las necesidades actuales de la agricultura y la seguridad alimentaria.

## 9.9. Micropagación

La micropagación es la propagación asexual de plantas utilizando las técnicas de cultivo de tejidos in vitro. Se considera una de las aplicaciones más utilizadas dentro de la biotecnología vegetal debido a su elevada productividad y a las ventajas que ofrece en comparación con los métodos tradicionales de propagación (Yasemin y Beruto, 2024). Para llevar a cabo la micropagación de cualquiera especie vegetal se consideran cinco etapas básicas.

- **Etapas 0.** Selección de la planta madre
- **Etapas 1.** Establecimiento in vitro
- **Etapas 2.** Multiplicación in vitro
- **Etapas 3.** Elongación y enraizamiento in vitro
- **Etapas 4.** Aclimatización

Las principales ventajas que ofrece la micropagación son las siguientes:

- Permite la propagación clonal, manteniendo las características genéticas del material inicial seleccionado, lo que la convierte en un sistema ideal para la multiplicación masiva de plantas o variedades con característica sobresalientes.
- El proceso se realiza en un laboratorio bajo ambientes controlados, se trata de un sistema totalmente independiente de las condiciones externas por lo que no se ve afectado por las estaciones del año, sequías, heladas, altas temperaturas u otros factores ambientales.
- El número de plantas que se puede obtener mediante micropagación es por su naturaleza prácticamente ilimitado.
- Las plantas obtenidas están libres de bacterias, hongos y nemátodos fitopatógenos, y con técnicas más específicas se pueden liberar incluso de virus y viroides.
- Las plantas pueden exportarse con mayor facilidad por presentar menos restricciones fitosanitarias.

- La micropropagación constituye una herramienta esencial para la agricultura moderna, al permitir la obtención rápida, segura y masiva de plantas de alta calidad, contribuyendo tanto a la producción comercial como a la conservación y mejora de cultivos de interés agrícola y biotecnológico.

## 9.10. Propuesta para el desarrollo agrícola y seguridad alimentaria

El CTV constituye una estrategia biotecnológica de gran relevancia para impulsar el desarrollo agrícola, pecuario y forestal. A través de esta técnica es posible establecer, mantener y regenerar material vegetal bajo condiciones controladas, lo que garantiza la obtención de plantas libres de patógenos, la conservación de germoplasma y la propagación masiva de especies de interés. El CTV con técnicas modernas de biotecnología, como la ingeniería genética y la edición génica, fortalece la capacidad de generar variedades mejoradas, más resistentes y adaptadas a condiciones adversas. De esta forma, se recomienda impulsar el desarrollo y la transferencia de estas tecnologías, acompañadas de programas de capacitación y apoyo institucional, para que los beneficios del CTV se traduzcan en seguridad y autosuficiencia alimentaria sostenible.

## 9.11. Conclusiones y recomendaciones

El CTV ha demostrado ser una tecnología de innovación agrícola, forestal y biotecnológica. Su evolución histórica y consolidación actual reflejan su potencial para responder a desafíos globales como el cambio climático, la disminución de recursos naturales y la necesidad de incrementar la productividad agrícola. Sin embargo, las aplicaciones del CTV juegan un papel importante para enfrentar desafíos en la agricultura moderna permitiendo garantizar un desarrollo agropecuario y forestal sustentable.

## 9.12. Referencias bibliográficas

Endress R. Plant Cell Biotechnology. Springer-Verlag, Berlin 1994: 353.

Gautheret RJ. Culture du tissus cambial. Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences 1934; 198:2195–2196.

Gautheret RJ. Hétéro-auxines et cultures de tissus végétaux. Bulletin de la Société de Chimie Biologique 1942; 24: 13–41.

Grimaldi F, Bastos F. Control of in vitro contamination during the establishment of *Pyrus communis* explants using Plant Preservative MixtureTM. Plant Cell Cult. and Micropropag 2023; 19:19-e185. <https://doi.org/10.46526/pccm.2023.v19.185>.

Haberlandt, G. Kulturversuche mit isolierten Pflanzenzellen. *Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien. Math. Naturwiss. Kl. Abt. J* 1902; 111:69–92.

Jiménez GMC. La participación de los metabolitos secundarios en la defensa de las plantas. RMF 2003;21: 355-363.

Küster E. Über die verschmelzung nachter Protoplasten. *Ber. Dtsch. Bot. Ges.* 1909;27: 589–598.

Murashige T, Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiol. Plant* 1962; 15: 473-497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>

Nazari M, Kordrostami M, Ghasemi-Soloklui A, Eaton-Rye J, Pashkovskiy P, Kuznetsov V, Allakhverdiev, S. Enhancing Photosynthesis and Plant Productivity through Genetic Modification. *Cells* 2024; 13(6):1319. <https://doi.org/10.3390/cells13161319>.

Pérez E, Ramírez H, Núñez H, Ochoa, N. Introducción al Cultivo de Tejidos Vegetales. (2nd ed.) Universidad Autónoma de Aguascalientes 1999:179.

Shahzad A, Parveen S, Sharma S, Shaheen A, Saeed T, Yadav V, Rakhshanda A, Upadhyay A. Plant tissue culture: applications in plant improvement and conservation. In *Plant Biotechnology: principles and applications* 2017 ;37-72. Singapore: Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2961-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2961-5_2).

Skoog F, Miller CO. Chemical regulation of growth and organ formation in plant tissue cultures in vitro. *Symp. Soc. Exp. Biol* 1957; 11:118–131.

Skoog, F. Growth factors, polarity and morphogenesis. First International Symposium on Plant Tissue Culture, Briancon (1954). *L'Année Biol* 1955;31: 201–213.

Went FW, Thimann KV. Phytohormones. Experimental Biology Monographs. Macmillan. New York, USA. 1937:194

White PR. Potentially unlimited growth of excised tomato root tips in a liquid medium. *Plant. Physiol* 1934; 9:585–600.

White PR. The cultivation of animal and plant cells (2nd ed.). New York: Ronald Press.1963;78(1):77.

Yasemin S, Beruto M. A Review on Flower Bulb Micropropagation: Challenges and Opportunities. *Hortic*; 2024: 10(3): 284. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030284>.

## 10. LA INVESTIGACIÓN FORESTAL: RETOS Y OPORTUNIDADES PARA LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

Vidal Guerra De la Cruz<sup>13</sup>  
Juan Carlos Tamarit Urias<sup>14</sup>

**Palabras Claves:** Manejo forestal sostenible, Silvicultura cuantitativa, Modelos alométricos y de volumen, Teledetección y sensores remotos.

### 10.1. Introducción

La diversidad de especies y ecosistemas presentes en el territorio nacional sitúan a México entre los primeros lugares en diversidad biológica en el mundo (Rodríguez y Baro, 2011), por ejemplo, ocupa el cuarto lugar a nivel mundial en diversidad de especies y el segundo por diversidad de ecosistemas. Se considera un país megadiverso porque su diversidad conjunta de especies representa aproximadamente 12% del total mundial y es debido a que posee una compleja topografía, geología y climas. Se estima que alrededor de 15,000 especies de plantas son endémicas de la república mexicana.

Históricamente los ecosistemas forestales de nuestro país, como en otras partes del mundo, han sido objeto de aprovechamientos para el beneficio de los pobladores locales y de la sociedad en general. Independientemente de que estos aprovechamientos sean regulados o no, es claro que su eficiencia en general, es variable en función de las características técnicas, socioeconómicas y ecológicas de los ecosistemas y regiones que conforman al país. En congruencia con su misión, visión y objetivos, desde su creación el INIFAP ha realizado investigaciones prioritarias y estratégicas que buscan contribuir al mejoramiento, la conservación, y a una mayor eficiencia en el manejo de los diversos ecosistemas forestales existentes en el territorio nacional, lo que a su vez busca favorecer el bienestar de las comunidades y el desarrollo socioeconómico ante un contexto de apertura económica global y del cambio climático.

Aunque en las tres últimas décadas la producción científica institucional ha mostrado tendencias de crecimiento positivas y constantes (Guerra et al., 2021), incluso cuando se analiza con respecto a otras instituciones nacionales de investigación forestal (Santillán et al., 2023), prevalece la percepción de que el impacto de estas investigaciones no se refleja debidamente en la productividad o competitividad del sector forestal en México (CONAFOR, 2015), por lo que es necesario identificar cuáles son las causas más probables de esta situación e implementar acciones orientadas a revertir esta tendencia. Esta percepción no es exclusiva para el INIFAP, aplica en general para la investigación forestal del país.

<sup>13</sup> Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Valle de México.

<sup>14</sup> Investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental San Martinito.

El sector forestal está conformado por una cadena productiva amplia y diversificada, que incluye importantes eslabones cuyas demandas o necesidades tecnológicas son también muy variadas. Por ejemplo, el aprovechamiento de bosques naturales para fines maderables y no maderables, requiere instrumentos técnicos que pueden diferir sustancialmente del manejo de plantaciones forestales comerciales o de sistemas agroforestales. Asimismo, el abastecimiento transformación, industrialización y comercialización de productos forestales maderables tienen aspectos diferentes y específicos que requieren ser atendidos desde la investigación. Así, en cada eslabón de la cadena productiva forestal se identifican aspectos técnicos que pueden ser mejorados o resueltos con base en resultados de la investigación científica.

A continuación, se presenta una breve reseña de las investigaciones forestales más relevantes realizadas por el INIFAP en las últimas décadas, particularmente en la producción maderable y no maderable, en las tres grandes regiones ecológicas que conforman el país: templada, tropical y árida.

## 10.2. Región templada

Las investigaciones en manejo forestal incluyen estudios básicos sobre especies maderables de coníferas de importancia comercial como *Pinus montezumae* Lamb., *Abies religiosa* (Kunth Schltl. et Cham.) y *Pinus patula* Schl. et Cham., para sustentar los fundamentos silvícolas de los métodos de manejo aplicados en bosques de estas especies. Los estudios incluyen calidad y dispersión de semillas, regeneración y crecimiento en bosques naturales. El INIFAP es pionero en estudios de largo plazo en bosques templado-fríos de México ya que el monitoreo forestal de largo plazo se remonta a antes de 1985, con el establecimiento de los primeros sitios permanentes de experimentación forestal y sitios permanentes de investigación silvícola. En estos sitios experimentales se han evaluado tratamientos de intensidades de corta de arbolado comercial, proporcionando datos importantes sobre la dinámica forestal en crecimiento, competencia, calidad de sitio, densidad, mortalidad y regeneración de especies como *Pinus arizonica* Engelm., *Pinus durangensis* Ehren, y *Pinus montezumae* (Salinas et al., 2010; Islas et al., 2021). A partir de estos sitios de investigación, el INIFAP desarrolló las bases para los primeros estudios en silvicultura cuantitativa en México, que a la fecha sigue siendo una de las fortalezas de la investigación forestal del INIFAP (Guerra et al., 2021). En Durango, algunas de estas investigaciones permitieron el desarrollo de aplicaciones tecnológicas (SICREMARS, versión 1.0 y 2.0; SIFOR-DGO versión 1.0) que han sido aplicadas en bosques de esta entidad. Para el manejo silvícola de bosques de coníferas de clima templado y frío de la región central de México se propuso el Sistema Silvícola de Selección (SISISE, 1990), y el Sistema de Cortas Sucesivas de Protección (SICOSUP, 1985). Para evaluar niveles de densidad y competencia, a fin de prescribir programas de aclareos en bosques coetáneos, se desarrolló una innovación tecnológica como aplicación en línea denominada SIIMADER (Sistema Informático INIFAP para Manejar la Densidad de Rodales), el cual permite realizar las tareas referidas en forma automatizada (Tamarit et al., 2022).

### 10.3. Región tropical

En bosques tropicales se han desarrollado diferentes relaciones alométricas de especies tropicales para facilitar los inventarios en selvas de Quintana Roo, que, por su confiabilidad y precisión, se han utilizado para cuantificar volúmenes en cortas no autorizadas en áreas afectadas por desastres naturales y en inventarios forestales para la elaboración de programas de manejo forestal. En relación a determinaciones de volumen maderable, se han generado ecuaciones aditivas para estimar el volumen de árboles de *Dendropanax arboreus*, en tanto que, para *Manilkara zapota*, *Burcera simaruba* y *Metopium brownei*, especies de importancia comercial maderable, se generaron sistemas de cubicación para estimar el volumen comercial, fustal y el perfil fustal o ahusamiento. Para el sur de Quintana Roo se han propuesto ecuaciones aditivas de volumen de fuste total, ramas y volumen total árbol, además de las respectivas funciones de ahusamiento para 12 especies maderables, también se desarrolló una ecuación para estimar la producción de látex de *Manilkara zapota*.

Con el uso de sensores remotos, en el INIFAP se han realizado estimaciones de área basal, volumen maderable y biomasa aérea en diferentes ecosistemas de selvas mediante imágenes Landsat ETM+ e información del Inventario Nacional Forestal en Quintana Roo, con errores menores a 10% (Hernández et al., 2020). En los últimos cinco años el INIFAP ha contribuido a incrementar el conocimiento de las selvas tropicales, mediante la identificación de los factores de riesgo ambiental y antropogénico en las selvas semihúmedas de la península de Yucatán, y de la evaluación de la vulnerabilidad ante el cambio climático de 25 especies forestales con importancia económica de esta región (Alfaro et al., 2023).

### 10.4. Región árida

Estos ecosistemas albergan una gran diversidad de recursos forestales maderables (RFM) y no maderables (RFNM), cuyo manejo y aprovechamiento ha sido históricamente relevante para productores de estas regiones. El manejo sustentable de estos recursos requiere consideraciones específicas sobre las características biofísicas y socioeconómicas de la región para desarrollar prácticas y técnicas de manejo que aseguren su conservación y el beneficio de las comunidades que las aprovechan. Entre las aportaciones más relevantes están más de 20 modelos para estimar parámetros de producción y rendimiento de especies no maderables, por ejemplo, *Agave lechuguilla* Torr., *Yucca carnerosana* (Trel.), *Euphorbia antisiphilitica*, *Prosopis* spp., *Dasyllirion cedrosanum* Trel., *Nolina cespitifera* Trel. y *Lippia graveolens* HBK., (Ríos et al., 2011).

Puede notarse que, a pesar de las diferencias geográficas y ecológicas presentes en el país, hay investigaciones que son de temas similares y recurrentes, por ejemplos, los desarrollados en biometría o sobre el uso de sensores remotos. En general, solo algunas de estas investigaciones han derivado en tecnologías o innovaciones (Cuadro 2) que puedan ser aplicados operativamente, aunque su utilización en la parte práctica sigue siendo limitada.

**Cuadro 2.** Algunos ejemplos temáticos de investigaciones que han derivado en aplicaciones tecnológicas o de innovación.

Tema	Región ecológica	Tecnología o innovación
<b>Ecuaciones de volumen</b>	Templada, Tropical, Árida	Modelos de estimación de volumen maderable y no maderable
<b>Tratamientos silvícolas</b>	Templada	SICREMARS versión 1.0 y 2.0), SIFOR-DGO versión 1.0 SIIMADER 1.0 (Guías de densidad)
<b>Relaciones alométricas</b>	Templada, Tropical, Árida	Modelos para estimaciones de atributos de interés comercial

En términos del proceso de investigación, muchos estudios requieren una fase final de adecuación tecnológica antes de derivar en innovaciones susceptibles de transferencia y adopción. Por ejemplo, las tecnologías forestales generadas en el INIFAP deben pasar por un proceso de validación, de transferencia y finalmente un proceso de adopción por parte de los usuarios finales, que son normalmente los prestadores de servicios técnicos forestales, este proceso completo puede durar de 4 a 5 años.

## 10.5. Consideraciones para una Estrategia de Desarrollo Tecnológico e Innovación en el sector forestal mexicano

Como en la mayoría de los procesos productivos del sector primario, las tecnologías e innovaciones en el sector forestal deben ser incorporados en acciones específicas y sistemáticas de trasferencia de tecnología para incidir en la mejora de los procesos de producción forestal. Sin embargo, existen dos aspectos de carácter estructural, que deben resaltarse en el caso particular de la investigación forestal. Por un lado, los resultados de investigación, aun los de naturaleza aplicada, no son utilizados directamente por los productores sino por los técnicos forestales, que son los encargados de elaborar y ejecutar los programas de manejo, además de aplicar prácticas silvícolas para la producción forestal. Los productores forestales, en la gran mayoría de los casos son entes pasivos en cuanto a la apropiación y aplicación de las tecnologías. Por otro lado, todos los programas de manejo, por normatividad oficial, deben ser revisados y si es el caso, aprobados y supervisados por la autoridad federal competente.

Estas dos condiciones implican que las tecnologías o innovaciones tecnológicas susceptibles de ser transferidos, deben ser primero probadas por los técnicos forestales, y una vez que deciden adoptarlas (incorporarlas en sus programas de manejo), aun requieren ser aprobadas por las autoridades normativas. Por su parte, las autoridades requieren para su aprobación, el soporte técnico-científico de la tecnología o innovación derivado del proceso de investigación, que es normalmente una publicación científica. Adicionalmente, en los casos donde las tecnologías son aceptadas y aprobadas por las partes involucradas e interesadas, la inherente dificultad técnica-

científica para la aplicación de las tecnologías o innovaciones en el campo obliga a un acompañamiento técnico puntual para su aplicación adecuada en programas operativos. Todo lo anterior sugiere que el desarrollo de tecnologías e innovaciones en el sector forestal no solo requiere cumplir el proceso de investigación y desarrollo de la misma, sino pasar por procesos técnicos, administrativos y normativos largos.

En consecuencia, una estrategia de desarrollo tecnológico formal en el sector forestal debe considerar la pertinencia de cambiar o ajustar estos procesos a fin de facilitar la adopción sistemática de innovaciones que mejoren la productividad y competitividad del sector productivo forestal. Por ejemplo, algunos aspectos a los que se debe prestar atención son: (1) Aumentar y diversificar el listado de conceptos de apoyos sobre transferencia de tecnologías que anualmente ofrece la CONAFOR; (2) Escalar los resultados de la investigación aplicada a una forma más asimilable por parte de los técnicos forestales, como podrían ser el desarrollo de aplicaciones informáticas en línea interactivas y amigables para los usuarios; (3) Implementar un programa de cursos de capacitación a técnicos y productores sobre tecnologías forestales existentes y en desarrollo; (4) Crear áreas institucionales afines para privilegiar el extensionismo forestal con énfasis en transferencia de tecnologías; (5) Impulsar el desarrollo de investigación orientada a los usuarios para resolver problemas específicos del manejo forestal que derive en tecnologías e innovaciones fácilmente transferibles; (6) Incorporar en las nuevas tecnologías el uso de herramientas digitales emergentes y disruptivas como sensores remotos, drones, algoritmos de inteligencia artificial, internet de las cosas, entre otras. Con el impulso de estas acciones se contribuirá a que se aumente el impacto positivo de la investigación en la práctica del manejo forestal en México para el beneficio del sector en su conjunto.

## 10.6. Conclusiones y recomendaciones

La investigación científica forestal en el INIFAP ha atendido la problemática, necesidad y oportunidades de productores, silvicultores y prestadores de servicios técnicos forestales de ecosistemas templados, tropicales y áridos de México, misma que se complementa con el esfuerzo que realizan otras instituciones pares. Sin embargo, aún está pendiente la generación de tecnologías e innovaciones que logren impactar positivamente en la productividad y competitividad del sector. En este sentido, resalta la urgente necesidad de diseñar estrategias orientadas a lograr una mayor eficiencia en los procesos de validación y transferencia de los desarrollos tecnológicos e innovaciones en toda la cadena productiva del sector forestal mexicano. Todo lo anterior sin descartar que la investigación forestal en los diferentes eslabones de la cadena productiva debe enfrentar los retos globales que afectan a los ecosistemas forestales, particularmente el cambio climático, la conservación de la biodiversidad, el agua y el suelo, en beneficio de los productores forestales y de la sociedad en general.

## 10.7. Referencias bibliográficas

- Alfaro-Reyna T, Delgado-Balbuena J, Arellano-Martín F, Maya-Martínez A, García-Cuevas X, Aguilar-Duarte Y, Aguirre-Gutiérrez CA. Vulnerability of forest species in the Yucatan peninsula to climatic and anthropogenic factors. *Trop and Subtrop Agroecosystems* 2023; 26(1). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.4516>
- CONAFOR. Programa Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Forestal 2014-2025. Comisión Nacional Forestal. Zapopan Jal. México. 2015. <http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/descargar.aspx?articulo=722>
- Guerra-De la Cruz V, Buendía-Rodríguez E, Cerano-Paredes J, Islas-Gutiérrez F, Monárrez-González JC, Flores-Ayala E, et al. (2021). Investigaciones del INIFAP en manejo forestal y servicios ambientales de bosques templados mexicanos: evolución, logros y perspectivas. Rev Mex Cien For 2021;12 (Especial), 4-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.1020>
- Hernández-Ramos, J, García-Cuevas X, Pérez-Miranda R, González-Hernández A, Martínez-Ángel L. Inventario y mapeo de variables forestales mediante sensores remotos en el estado de Quintana Roo, México. Mad y Bos 2020 26(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611884>
- Islas-Gutiérrez, F.; Guerra-De la Cruz, V., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., Pineda-Ojeda, T., Acosta-Mireles et al. Investigación en Manejo Forestal Sustentable y Servicios Ambientales. En: Espitia-Rangel E, Escobedo-López D, Cuevas-Reyes V, Martínez CE Compiladores. Logros y aportaciones del CEVAMEX a 35 años de la fundación del INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 2021.
- Mas PJ. (1985). El Sistema de Cortas Sucesivas de Protección (SICOSUP) y su aplicación en bosques de clima templado y frío. Seminario sobre Manejo Sustentable de los Recursos Forestales. México, D. F. 1985:115-139.
- Mas PJ. El Sistema Silvícola de Selección (SISISE) para Bosques de Coníferas de la Región Central de México. Pub. Especial No 1, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Morelia, Michoacán, México. 1990:61.
- Ríos-Saucedo JC, Valles-Gándara AG, Sosa-Pérez G, Sigala-Rodríguez JA, Albarrán-Alvarado D. Metodología para la estimación de volumen, biomasa y carbono para mezquite en la región norte-centro de México. En: Ríos-Saucedo JC, Trucios-Caciano R, Valenzuela-Núñez L, Sosa-Pérez G, Rosales-Serna R. Editores. Importancia de las poblaciones de mezquite en el norte-centro de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias 2011. Libro Técnico Num. 08.2

Rodríguez SC, Baro SJE. (2023). Diversidad biológica. En: Baro SJE Coordinador. Herramientas de Gestión Ambiental y Territorial. Gestión Ambiental y Territorial México. 2011:209-240.

Salinas-González H, Chávez-Ruiz G, Quiñones-Chávez A, Peña-Ramos A, Quiroga-Garza HM, Pajarito-Ravelero *et al.* Estrategias de investigación para la innovación tecnológica. Principales logros en el norte-centro de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. 2010;(1).

Santillán-Fernández A, Vásquez-Bautista N, Pelcastre-Ruiz LM, Ortigoza-García CA, Padilla-Herrera E, Tadeo-Noble AE *et al.* Bibliometric Analysis of Forestry Research in Mexico Published by Mexican Journals. For. 2023; 14: 648. <https://doi.org/10.3390/f14030648>

Tamarit-Urias JC, Rodríguez-Acosta M, Lerma SI. (2022). SIIMADER: Sistema Informático INIFAP para Manejar la Densidad de Rodales. e-CUCBA, 2022;9(17):147-155. <https://doi.org/10.32870/ecucba.vi17.223>

## 11. SISTEMAS ALTERNATIVOS DE PRODUCCIÓN DE CERDOS: EN CAMA PROFUNDA Y EN PASTOREO

José Antonio Torres Rivera<sup>15</sup>

**Palabras claves:** Ganadería sustentable, Bienestar animal, Emisiones de gases de efecto invernadero, Agroecología.

### 11.1. Introducción

La porcicultura es una actividad de gran relevancia económica, social y alimentaria en México, donde representa una fuente importante de proteína animal, empleo rural y dinamismo en las cadenas agroalimentarias. El estado de Veracruz destaca como una de las entidades con mayor tradición y potencial en la producción porcina, condiciones agroecológicas favorables y arraigo cultural entre pequeños y medianos productores. Sin embargo, los sistemas intensivos convencionales han generado preocupaciones por sus impactos negativos en el ambiente, el bienestar animal y la salud pública. Frente a ello, los sistemas alternativos de producción porcina, como la cama profunda y el pastoreo, ofrecen opciones más sostenibles y éticas, adaptadas al contexto rural. El presente documento analiza ambos sistemas de producción y propone estrategias para su implementación. La información presentada se basa, en gran medida, en investigaciones aplicadas desarrolladas por el Centro Académico Regional Huatusco de la Universidad Autónoma Chapingo (CARH-UACH), en colaboración con productores de la región de las Altas Montañas, el Colegio de Postgraduados (CP) y el Instituto de Ecología (INECOL). El objetivo es generar conocimientos útiles que impulsen prácticas sostenibles, fortalezcan la porcicultura regional y contribuyan a la autosuficiencia alimentaria.

### 11.2. Antecedentes

La cría de cerdos en pisos de cemento o rejillas ha sido ampliamente utilizada por su eficiencia productiva y control sanitario. Sin embargo, genera grandes cantidades de residuos contaminantes, limita el bienestar animal e implica altos costos por el uso de insumos externos, además de crear dependencia tecnológica y reducir la autonomía de los pequeños productores.

Como respuesta, han resurgido sistemas alternativos como la cama profunda y el pastoreo, que promueven el uso de recursos locales, reducen impactos ambientales y mejoran el bienestar de los animales. Estos sistemas también fortalecen la participación familiar y comunitaria en la producción. En los siguientes apartados se analizarán sus ventajas, limitaciones y potencial para una porcicultura más sustentable.

---

<sup>15</sup> Investigador de la Universidad Autónoma Chapingo-Centro Académico Regional Huatusco

### 11.3. Sistema de cama profunda

El sistema de cama profunda consiste en alojar a los cerdos sobre una capa de materiales orgánicos secos y absorbentes (como aserrín o viruta de madera, cascarilla de café o de arroz, bagazo de caña o paja), que se transforma progresivamente en compost. Este sistema ha demostrado ventajas frente al convencional, como la reducción de olores, menor proliferación de moscas, ahorro de agua y una mejora en la expresión de comportamientos naturales como el hozado y la interacción social.

Una de las principales ventajas ambientales del sistema de cama profunda es la reducción significativa en el consumo de agua, ya que no requiere lavado diario de instalaciones como ocurre en los sistemas convencionales. Estos últimos generan grandes volúmenes de aguas residuales contaminadas que afectan el ambiente y la salud pública (Kesari *et al.*, 2021).

Un estudio realizado por Caldara *et al.* (2021) en Brasil comparó el comportamiento de cerdos en cama profunda y en sistemas convencionales, observando que los animales en cama profunda presentaban mayor actividad, mayor frecuencia de visitas a bebederos y menor incidencia de estereotipias, lo que sugiere una mejora en el bienestar animal.

Asimismo, Foppa *et al.* (2021) evaluaron indicadores de bienestar en cerdos alojados en cama profunda durante las fases de crecimiento y finalización, encontrando una baja incidencia de lesiones, mejor condición corporal y menor prevalencia de enfermedades respiratorias en comparación con sistemas convencionales.

### 11.4. Sistema en pastoreo

La cría de cerdos en pastoreo representa una práctica tradicional que ha resurgido como alternativa sostenible frente a los sistemas intensivos. Este sistema permite a los animales expresar comportamientos naturales como el hozado, el forrajeo y la interacción social, además de mejorar la calidad del aire, reducir el estrés térmico y favorecer la regeneración del suelo mediante el manejo rotacional.

Según Kerr (2024), el sistema de pastoreo ofrece beneficios significativos en términos de bienestar animal, al permitir que los cerdos se comporten de manera más natural. Sin embargo, también plantea desafíos como la necesidad de suplementación nutricional, protección contra depredadores y control de enfermedades parasitarias. A pesar de ello, con un manejo adecuado, el sistema puede ser altamente beneficioso para productores y consumidores preocupados por la sostenibilidad y la ética en la producción de alimentos.

Por otro lado, Becker *et al.* (2024) demostraron que la producción porcina en pastoreo no afecta negativamente la calidad de la carne, aunque puede influir en la composición corporal, como el grosor de la grasa dorsal. Esto sugiere que, si bien el sistema puede requerir más tiempo para

alcanzar pesos de mercado, ofrece ventajas en términos de percepción del consumidor y bienestar animal.

### **11.5. Estado del arte**

En los últimos años, la producción porcina ha experimentado una transformación hacia sistemas más sostenibles y centrados en el bienestar animal. Entre estos, destacan el sistema de cama profunda y el sistema de pastoreo, ambas consideradas alternativas viables frente al sistema convencional intensivo basado en confinamiento sobre piso de cemento o rejillas.

### **11.6. Sistema de cama profunda**

El sistema de cama profunda ha sido objeto de múltiples estudios que evalúan su impacto en el bienestar animal, la salud, el comportamiento y el rendimiento productivo. En comparación con los sistemas convencionales, este sistema permite a los cerdos expresar comportamientos naturales como el hozado, reduce el estrés térmico, mejora la calidad del aire y disminuye la incidencia de lesiones por contacto con superficies duras.

Un estudio realizado por Foppa *et al.* (2021) en Brasil, que evaluó 16,500 cerdos en 15 instalaciones durante las fases de crecimiento y finalización, concluyó que los animales alojados en cama profunda presentaron una baja incidencia de condiciones como morder colas, cojera, heridas y problemas respiratorios, con indicadores generales de bienestar superiores a los de sistemas convencionales.

Asimismo, investigaciones como las de Hötzl *et al.* (2023) han demostrado que el uso de materiales como viruta de madera o cascarilla de arroz en camas profundas mejora el comportamiento de los cerdos, promoviendo actividades lúdicas y reduciendo conductas agresivas. Aunque las temperaturas del sustrato pueden ser más elevadas, no se observaron efectos negativos significativos en el rendimiento ni en la calidad de la carne.

### **11.7. Sistema de cerdos en pastoreo**

La producción porcina en pastoreo ha ganado popularidad por su potencial para mejorar el bienestar animal, reducir costos de infraestructura y acceder a nichos de mercado que valoran prácticas éticas y sostenibles. Este sistema permite a los cerdos vivir en ambientes más naturales, con acceso a forraje, espacio para moverse y menor exposición a contaminantes.

En un estudio piloto realizado por Becker *et al.* (2024), se compararon cerdos criados en sistemas de pastoreo y en confinamiento. Los resultados mostraron que no hubo diferencias significativas en la calidad de la carne entre ambos sistemas, aunque los cerdos criados en interiores

presentaron un mayor grosor de grasa dorsal. Esto sugiere que el sistema de pastoreo ofrece productos de calidad comparable, con beneficios en bienestar.

Por otro lado, Pietrosemoli y Tang (2020) realizaron una revisión sobre los desafíos del bienestar animal en sistemas de pastoreo. Identificaron riesgos como la exposición a temperaturas extremas, contacto con fauna silvestre, depredadores y enfermedades parasitarias. No obstante, concluyen que, con un diseño adecuado y buenas prácticas de manejo, estos sistemas pueden superar los retos y ofrecer condiciones superiores de bienestar respecto al confinamiento intensivo.

Estas propuestas también buscan mitigar el impacto ambiental de la porcicultura convencional, especialmente en lo referente al uso excesivo de agua y la generación de aguas residuales contaminadas.

### **11.8. Propuesta para el desarrollo de la porcicultura**

La transición hacia sistemas alternativos de producción porcina requiere una estrategia integral que considere aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales. A continuación, se presentan propuestas específicas para fomentar el desarrollo de la porcicultura en cama profunda y en pastoreo, especialmente orientadas a pequeños y medianos productores.

### **11.9. Infraestructura adaptada al contexto rural**

Para el sistema de cama profunda, se recomienda la construcción de porquerizas con pisos de tierra compactada o concreto con pendiente, muros de materiales locales (block, madera, bambú) y techos con aleros para protección contra lluvia. La cama debe tener una profundidad mínima de 40 cm, compuesta por materiales orgánicos disponibles en la región, como cascarilla de café, viruta de madera, paja de cereales o rastrojo de maíz.

En el sistema de pastoreo, se propone el diseño de parcelas rotativas con cercas eléctricas móviles, sombreaderos portátiles y bebederos adaptados. La orientación del terreno debe facilitar el drenaje y el acceso a fuentes de agua. Se recomienda la implementación de sistemas silvopastoriles con árboles forrajeros como morera, leucaena o ramón, que aportan sombra y proteína vegetal.

### **11.10. Manejo zootécnico eficiente**

El manejo en cama profunda debe incluir la incorporación periódica de material seco, monitoreo de la temperatura interna de la cama, volteo del sustrato y control de la humedad. En pastoreo,

se requiere un calendario de rotación de parcelas, basado en la disponibilidad de forraje y el estado del suelo, para evitar el sobrepastoreo y favorecer la regeneración vegetal.

Se propone implementar la cama profunda y el pastoreo tipo Voisin con cerdos como estrategia de ganadería regenerativa en potreros degradados. El sistema Voisin, basado en el pastoreo racional, permite una recuperación activa del suelo mediante el uso controlado de los animales como agentes de fertilización y aireación. Al integrar cerdos en este sistema, se aprovecha su capacidad de hozar y remover el suelo, lo que facilita la incorporación de materia orgánica y la activación biológica del terreno.

La cama profunda puede utilizarse como complemento en áreas de descanso o confinamiento temporal, permitiendo la producción de compost que posteriormente se incorpora a los potreros. Esta sinergia contribuye a mejorar el suelo, cerrar ciclos de nutrientes y reducir la dependencia de insumos externos, alineándose con los principios de la agroecología y la ganadería regenerativa.

La alimentación debe adaptarse a los recursos locales, combinando alimento balanceado comercial con subproductos agroindustriales (suero de leche, salvado de trigo, melaza, tubérculos cocidos) y forrajes frescos. En pastoreo, se recomienda ofrecer concentrados después del consumo de pastura para estimular el aprovechamiento del forraje.

Desde el punto de vista productivo, en nuestras investigaciones hemos encontrado que los cerdos en granjas semi-tecnificadas convencionales alcanzan ganancias diarias de peso entre 750 y 850 gramos, mientras que en cama profunda se sitúan entre 700 y 800 gramos, y en pastoreo entre 600 y 700 gramos. La conversión alimenticia también varía, siendo más eficiente en el sistema convencional (2.8–3.2 kg de alimento por kg de carne), seguido por cama profunda (3.0–3.4) y pastoreo (3.5–4.0). En cuanto a los días de engorda desde el destete hasta el sacrificio (de 10 kg a 100 kg), los sistemas convencionales requieren entre 120 y 140 días, mientras que los alternativos pueden durar menos tiempo (unos 15 días menos cuando se utiliza igual tipo de alimentación que los convencionales, debido a mejoras en bienestar animal y salud) o durar más tiempo: 130–150 días en cama profunda y 150–180 días en pastoreo (debido a retrasos por alto consumo de fibra).

## **11.11. Sanidad y bioseguridad**

La reducción del estrés y la mejora del ambiente físico disminuyen la necesidad de antibióticos y promotores de crecimiento, lo que contribuye a la producción de carne más saludable y libre de residuos farmacológicos.

## 11.12. Capacitación y asistencia técnica

Es fundamental establecer programas de capacitación para productores, técnicos y estudiantes, enfocados en el diseño, manejo y evaluación de sistemas alternativos. Se recomienda la colaboración con universidades, centros de investigación y organizaciones campesinas para generar materiales didácticos, manuales técnicos y espacios de formación práctica.

La transferencia de tecnología debe considerar las condiciones locales, el nivel educativo de los productores y la disponibilidad de recursos, promoviendo soluciones accesibles y replicables.

## 11.13. Evaluación económica

El análisis económico en granjas cooperantes muestra que el costo actual por kilogramo producido en sistema convencional está entre \$35 y \$40 MXN, mientras que en cama profunda se reduce a \$25–\$30 MXN y en pastoreo a \$22–\$28 MXN. Este ahorro se debe, en parte, a la reducción en el uso de alimento comercial, con un ahorro estimado de 20–30% en cama profunda y 30–40% en pastoreo. La utilidad neta por animal también mejora: \$400–\$600 MXN en convencional, \$600–\$800 MXN en cama profunda y \$700–\$900 MXN en pastoreo. Además, se han observado mejoras en la calidad de la carne producida bajo estos sistemas, siendo muy buena en cama profunda y excelente en pastoreo, lo que representa una oportunidad para acceder a mejores precios de venta en mercados diferenciados; por tal razon algunos de los productores cooperantes ya están logrando incrementos del 11 al 33% en el precio de animales en pie con compradores locales.

## 11.14. Evaluación ambiental

Estamos empezando a evaluar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la mejora en la calidad del suelo y el uso eficiente del agua. Datos preliminares indican que los sistemas alternativos presentan ventajas significativas: las emisiones de gases de efecto invernadero por kilogramo de carne producida son de 50 a 60% menos en los sistemas de cama profunda y pastoreo respecto al sistema convencional con piso de cemento. El consumo de agua para limpieza de porqueriza y aseo de cerdos también se reduce drásticamente, pasando de casi 20 mil litros por ciclo de engorda en el sistema convencional a prácticamente cero en los sistemas alternativos. La incidencia de lesiones en los animales, que en sistemas convencionales puede alcanzar entre 20 y 30%, se reduce a valores cercanos a cero en cama profunda (0–2%) y pastoreo (0–1%), reflejando un mayor bienestar animal. La integración con cultivos sucesorios (maíz, hortalizas) permite aprovechar los nutrientes aportados por los cerdos y cerrar ciclos productivos bajo un enfoque agroecológico. Asimismo, se han encontrado mejoras en la fertilidad del suelo y una reducción significativa de la compactación, lo que contribuye a la recuperación de la estructura y funcionalidad del terreno.

## 11.15. Recomendaciones para lograr la autosuficiencia alimentaria

Para avanzar hacia la autosuficiencia alimentaria en el contexto de la producción porcina, se recomienda:

- Promover la producción local de insumos, como materiales para cama profunda y cultivos forrajeros para pastoreo.
- Establecer redes de cooperación entre productores para compartir conocimientos, recursos y experiencias.
- Incentivar el consumo de carne porcina producida bajo sistemas sostenibles mediante campañas de concientización y certificaciones.
- Desarrollar modelos de negocio inclusivos que integren a pequeños productores en cadenas de valor locales.
- Fortalecer la investigación y extensión rural adaptadas a cada región.

## 11.16. Conclusiones y recomendaciones

- a) Los sistemas alternativos de producción de cerdos, como la cama profunda y el pastoreo, representan una oportunidad para transformar la porcicultura hacia sistemas más sostenibles, resilientes y socialmente responsables. Su implementación requiere un enfoque técnico-científico que considere las condiciones locales, el bienestar animal y la eficiencia productiva.
- b) La adopción de estos sistemas puede contribuir significativamente a la autosuficiencia alimentaria, al reducir la dependencia de insumos externos, mejorar la calidad de los productos y fortalecer las economías rurales. Es fundamental que los actores del sector agropecuario, las instituciones gubernamentales y la academia trabajen de manera articulada para promover su desarrollo.
- c) Estos sistemas representan pilares fundamentales para una porcicultura del siglo XXI, orientada hacia la sostenibilidad, el bienestar animal y la resiliencia agroalimentaria.

## 11.17. Referencias bibliográficas

Becker T, Schmidt H, Müller A. Meat quality and carcass traits of pigs raised in pasture and confinement systems. *Meat Sci* 2024;110:105-112.

Caldara FR, dos Santos LS, dos Santos RKR, Garcia RG, Nääs IA, de Almeida Paz ICR. Behavior and performance of pigs reared in deep bedding and conventional systems. *Rev Bras Zootec* 2021;50:e20200020.

Foppa L, dos Santos LS, Caldara FR, Garcia RG, Nääs IA, de Almeida Paz ICR. Welfare indicators in pigs housed in deep bedding systems during growth and finishing phases. Rev Bras Zootec 2021;50:e20200021.

Hötzl MJ, Vieira FMC, Nunes J, Oliveira D. Bedding materials and pig behavior in deep litter systems. Appl Anim Behav Sci 2023; 250:105-112.

Kerr BJ. Pasture-based pig production systems: benefits and challenges. J Anim Sci 2024;102(4):1234-1245.

Kesari KK, Kumar S, Behari J. Mobile phone usage and male infertility in Wistar rats. Indian J Exp Biol 2021;59(3):187-193.

Pietrosemoli S, Tang C. Animal welfare challenges in pasture-based pig systems: a review. Animals 2020;10(3):456.

## 12. SALUD DEL SUELO Y GANADERÍA REGENERATIVA

Lucrecia Arellano Gámez<sup>16</sup>

**Palabras Claves:** Fertilidad del suelo, Biodiversidad en el suelo, Sistemas silvopastoriles, Servicios ecosistémicos Pastoreo racional Voisin.

### 12.1. Introducción

El suelo es el resultado de la interacción a lo largo del tiempo, de factores ambientales como el clima, la topografía, la presencia y actividad de los organismos vivos (flora, fauna y ser humano), y los materiales parentales (rocas y minerales originarios) (Arias *et al.*, 2018). El suelo funciona como almacén de nutrientes y agua, y es el sustrato donde se desarrolla la vegetación destinada al pastoreo y la alimentación del ganado. Este es esencial para el desarrollo de la vida y es la base de las actividades estratégicas para el bienestar social y económico de las personas (Núñez *et al.*, 2020). Un suelo saludable mantiene su capacidad para proporcionar diferentes servicios ecosistémicos tales como hábitat para plantas y animales, regulación del ciclo del agua y el clima, así como la provisión de alimentos y materias primas (Etchevers y cotler, 2020).

Los seres humanos tenemos necesidades vitales que satisfacemos mediante la toma de decisiones diarias. Estas tienen consecuencias de índole local y regional, tanto a corto como a largo plazo. Cuando realizamos manejos intensivos o prácticas productivas no adecuadas, basadas en paradigmas arraigados y sin respeto a los estados, propiedades y funciones de los ecosistemas, los transformamos negativamente, ocasionando disminución en la resiliencia y pérdidas en los servicios ecosistémicos indispensables para las poblaciones humanas (ME Assessment, 2005; Walker *et al.*, 2004).

En la ganadería existen prácticas que afectan directamente la salud del suelo como el manejo del ganado en potreros sin árboles, sin rotación y por tiempos prolongados, el uso de ganado no adaptado a condiciones locales y grande, la labranza a profundidad, el subsoleo, el uso de terrenos con pendientes pronunciadas, la utilización de una baja diversidad de árboles en los potreros, las quemas no controladas, el control de arvenses (malezas) mediante el uso de herbicidas (ej. glifosato) y el uso excesivo de desparasitantes, insecticidas y fungicidas (ej. hexaclorobenceno) y abonos químicos, entre otras.

Como resultado de las prácticas mencionadas, el suelo se deteriora y sufre un proceso de erosión y compactación (Medina, 2016), lo que conlleva a una reducción en el volumen de los poros entre los agregados. Además, se evidencia una disminución en el flujo de aire (Torres *et al.*, 2017), un aumento en la densidad aparente (Kulli B *et al.*, 2003) y una disminución en la infiltración del agua (Drewry, 2006). Esta situación puede resultar en un mayor flujo de agua superficial y,

<sup>16</sup> Investigadora del instituto de Ecología A.C.

potencialmente, en una mayor escorrentía (Trilleras *et al.*, 2015; Rojas y Villegas, 2016). Asimismo, se presenta pérdida de materia orgánica, aumento en la superficie ocupada por suelos desnudos, deslizamiento de tierra y pérdida de suelo. Hay una disminución de la riqueza de especies, densidad, abundancia, biomasa y funciones ecológicas en los organismos del suelo (Martínez y Cruz, 2009), desequilibrios en el funcionamiento y composición de la microbiota del suelo, así como una disminución en la biomasa microbiana (Alvear *et al.*, 2006; Sánchez *et al.*, 2022). Es importante reconocer que el daño de las propiedades físicas del suelo junto con la pérdida de nutrientes constituye un “costo oculto” para los sistemas de producción, y, en muchos casos, ya se están haciendo “visibles y tangibles”, lo cual hace difícil sostener los niveles productivos (Peralta *et al.*, 2025).

Los síntomas de deterioro de los suelos han generado preocupaciones en nuestro país. El 52.86% de los suelos están afectados por erosión hídrica. Como resultado de la erosión, el suelo pierde paulatinamente su fertilidad natural y su productividad biológica. Por otra parte, en al menos 24 Estados mexicanos, el número de cabezas de ganado es superior a la capacidad de carga, en función de la producción de forrajes y se realiza pastoreo continuo (Enríquez *et al.*, 2021) aunque se sabe que manteniendo a las vacas en la misma área los 365 días del año se puede perder un rango de 7.69 a 8.35 t/ha de suelo, lo que proyectado de forma anual da un aproximado de 350 t/ha de suelo (Rojas y Villegas, 2016).

Es complicado y costoso recuperar o mejorar las propiedades del suelo cuando se deteriora. En este capítulo se expone la situación y la problemática de los suelos en el contexto de la ganadería extensiva y se presenta a la ganadería regenerativa como una alternativa para mejorar la salud del suelo, la conservación de la biodiversidad y la integridad funcional de los ecosistemas. Se enuncian algunos desafíos que tiene la transición hacia ese tipo de ganadería. Finalmente se presentan algunas recomendaciones para la rehabilitación y conservación del suelo.

## 12.2. La ganadería como actividad esencial

En México se destinan alrededor de 109 millones de ha a la actividad ganadera, lo que representa el 56% del territorio nacional. Eso se refleja también a nivel estatal, pues el estado de Tabasco dedica el 65.7% de su superficie a la ganadería, Tamaulipas el 58.2%, Sinaloa el 50.6% y Veracruz el 50.2%. Nuestro país es el 8º productor de carne en canal de bovino (Compendio estadístico, 2025) y 8º lugar en compra de leche líquida a nivel mundial (México entre los principales países productores de leche de vaca, 2025).

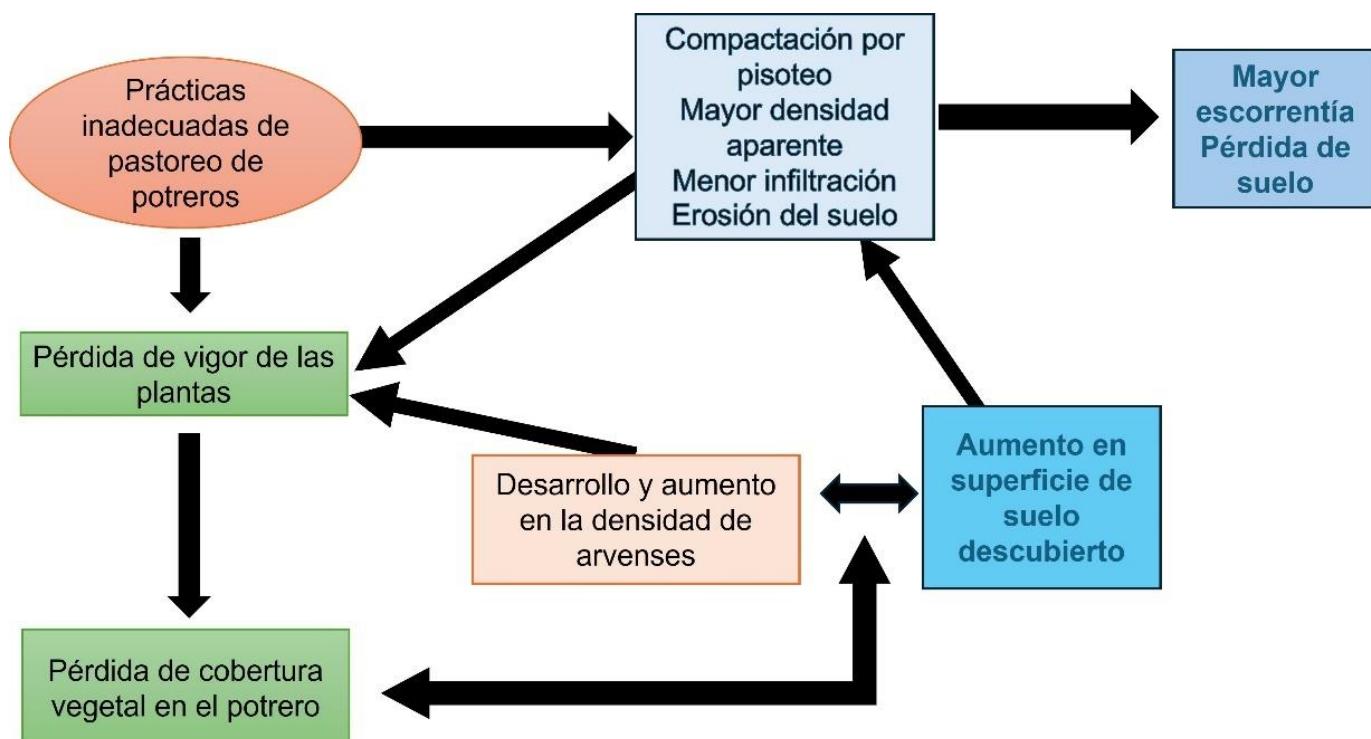
La ganadería es una de las actividades dinamizadoras de las economías comunitarias locales, y constituye una fuente de empleo e ingresos para el sector rural. En 2019 se comercializaron a nivel internacional 257,637 toneladas de carne de res, y 1,293,335 cabezas de ganado en pie. Asimismo, en 2020 se batió un récord nacional con la venta al exterior de 1,418,093 de bovinos (GANARE, 2022). Además, se generaron 23.78 millones de toneladas de proteína animal con un valor de 550,000 millones de pesos y se exportaron 302,000 toneladas de productos cárnicos, con

un valor de 150,000 millones de pesos (La Ganadería Mexicana en Cifras, 2025). En 2023, nuestro país alcanzó una producción de 7,999,901 toneladas de carne en canal, con un hato bovino de 36.6 millones de cabezas, lo que demuestra la importancia de este sector en la agricultura nacional (Ganadería Bovina en México, 2025). El país tiene una de las industrias ganaderas más grandes de América Latina, lo que le da una oportunidad única para liderar la transición hacia una ganadería más sostenible y responsable.

### 12.3. La ganadería y la degradación de los suelos

El suelo se degrada cuando sus propiedades no pueden regenerarse de forma natural. La degradación de los suelos en el mundo es acelerada, lo que representa una amenaza para los sistemas de producción agrícola y para la seguridad alimentaria (Verhulst *et al.*, 2015).

En América Latina, la deforestación para la expansión de la ganadería (Wassenaar *et al.*, 2007; Gibbs *et al.*, 2010) y el sobrepastoreo han sido las causas más frecuentes de la degradación del suelo (Gardi *et al.*, 2014). En nuestro país, el sobrepastoreo ha disminuido la fertilidad en un 92.7% y ha aumentado la compactación del suelo en 68.2% (Bautista *et al.*, 2022). Alrededor del 20% de los pastos globales y el 73% de los pastos nativos están degradados (Enríquez *et al.*, 2021), lo que impacta directamente al suelo (Figura 8).



**Figura 8.** Degradación de praderas e impactos en el suelo. Modificado de Enríquez-Quiroz *et al.* 2021.

La degradación de los suelos no sólo es física y química, sino también biológica. La biodiversidad edáfica regula numerosas funciones del suelo (descomposición, mineralización, etc.) que son esenciales para sostener los servicios ecosistémicos y soportar las distintas perturbaciones (Menta y Remelli, 2020).

En México, una estimación promedio basada en distintos reportes indica que el 69.7% de las tierras presentan algún grado de degradación del suelo, donde la erosión hídrica aparece como la más importante con un 25.4%, seguida por la degradación química y la erosión eólica con el 20.1% y por último la degradación física con el 4.1% (López, 2016). La regeneración del suelo es esencial para mantener la producción agrícola y la soberanía alimentaria a largo plazo. Una alternativa sostenible a la problemática anterior es la ganadería regenerativa.

#### **12.4. La ganadería regenerativa como alternativa**

La ganadería regenerativa es un enfoque que trasciende los parámetros de la sostenibilidad, centrándose en la restauración y optimización del funcionamiento y conservación de la biodiversidad de los ecosistemas donde se implementa. Este enfoque es una alternativa esperanzadora y profundamente transformadora, que se articula con las dinámicas naturales para mejorar la productividad, reducir costos y simultáneamente regenerar y conservar el ecosistema, tomando en cuenta que los ecosistemas tienen una tendencia natural a la estabilidad, a la resiliencia y a la constante renovación. Su objetivo es optimizar la rentabilidad por hectárea. Aunque no existe una fórmula única para lograrlo, existen principios y prácticas que facilitan su implementación. Se consideran diversos factores relevantes, tales como el clima, la topografía, las razas de animales, la vegetación disponible, el tipo de suelo, y, sobre todo, el contexto donde la ganadería se desarrollará.

#### **12.5. Beneficios de las prácticas de ganadería regenerativa en el suelo**

Una buena planeación del pastoreo favorece una mejor condición del suelo. Esto se logra con una rotación basada en el ajuste del número de animales que pastorean en una superficie determinada, mediante la estimación de la disponibilidad de forraje disponible (kg de MS/ha) y/o el área con cobertura foliar en el potrero y la cantidad de forraje que consume un animal en un tiempo determinado (consumo diario de MS por animal con base al 3% del peso vivo). Por ejemplo, en San Rafael, Durango, con más de 20 años de aplicación de un sistema rotacional, se identificaron mejoras significativas en el suelo para niveles de nitratos, sodio y potasio (Cuadro 3), en comparación con un sistema de pastoreo continuo de la misma edad (Loera *et al.*, 2025). El pastoreo rotativo mantiene el suelo cubierto por acumulación del material en superficie (Jacobo *et al.*, 2006), lo que incrementa no solo su estabilidad estructural, sino también su carbono orgánico (Teague *et al.*, 2011). Un sistema de pastoreo rotacional por franjas presenta menores valores de pérdida de suelo total anual con respecto a otros tipos de pastoreo como el continuo (Rojas y Villegas, 2016).

El pastoreo racional Voisin (PRV) es un sistema eficiente de manejo del ganado y los recursos naturales (Pinheiro, 2011; López, 2018) que fomenta el manejo armonioso y equilibrado del ganado, las plantas, el agua y el suelo. En este tipo de pastoreo se usa el pasto en el momento óptimo de reposo y con reservas suficientes en la raíz para permitir un rebrote vigoroso. Los tiempos de ocupación y descanso adecuados garantizan la restauración de la fertilidad de los suelos y la productividad del sitio en el tiempo.

En Veracruz central, en un paisaje de selva baja de clima subhúmedo, a 14 meses de implementarse el PRV en ambientes sujetos a pastoreo extensivo por más de 50 años, se encontraron cambios positivos en las condiciones fisicoquímicas y biológicas del suelo (densidad aparente, fósforo disponible, materia orgánica y carbono orgánico) y se redujo la compactación del suelo con respecto a la ganadería extensiva (Bautista *et al.*, 2022).

**Cuadro 3.** Cambios en variables promedio del suelo entre pastoreo continuo y rotacional en Durango.

Variable	Continuo	Rotacional	P
Conductividad eléctrica mS/cm	69.47b	183.81a	0.004177***
NO <sub>3</sub> (ppm)	375.50b	460.64a	0.004212***
Na (ppm)	88.56b	167.93a	0.0003839***
Ca (ppm)	89.68	77.35	0.2909NS
K (ppm)	235.37b	367.74a	0.0002008***
pH	7.27 <sup>a</sup>	7.04b	0.0328**

Significancia:  $\alpha = 0.05$ ,  $\alpha = 0.01$ ; \*\* indica 95% de confianza; \*\*\* indica 99% de confianza, NS= no significativa; mS/cm: microSiemens/centímetro, ppm= partes por millón. Tomado de Loera-Sánchez *et al.* 2025.

Otra ventaja de un pastoreo planeado es que las vacas, al estar en períodos controlados dentro del potrero, efectúan en el suelo una especie de masaje con sus patas, generando una ligera depresión que almacena agua para infiltrarse en el suelo, permitiendo así que las raíces de las plantas y los microorganismos obtengan el agua requerida. Como resultado de la infiltración del agua, se produce la germinación de semillas y la activación de microorganismos en el suelo (Suárez, 2022). Una vaca de producción lechera de 450 kg produce entre 36 y 39 kg de estiércol diariamente. El estiércol producido contiene 0.186 kg de N, 0.033 kg de P y 0.122 kg de K (Espinosa, 2021). El aprovechar los residuos orgánicos para abonar naturalmente el suelo, como en el PRV, permite que los nutrientes y microorganismos de las excretas, así como el nitrógeno de la orina, se incorporen en el suelo y se incremente la materia orgánica y la actividad biológica.

En el suelo hay redes alimenticias complejas, donde la macrofauna (organismos > 2 mm y < 20cm) es transformadora de la materia orgánica pues participa en su fragmentación y descomposición, modifica la estructura del suelo y regula la actividad de otros organismos (Brown *et al.*, 2015). Dentro de la macrofauna se encuentran los llamados “ingenieros” del ecosistema (lombrices, hormigas, escarabajos estercoleros) que son quienes mantienen la estructura del suelo por los agregados que forman con sus excretas y las galerías que construyen. Los escarabajos estercoleros, a través de su actividad de remoción y enterramiento de estiércol, facilitan la infiltración del agua y la aireación del suelo, a la vez que reducen la compactación por medio de las galerías que construyen. Estos organismos mejoran la fertilidad porque la materia

orgánica del suelo aumenta, y también el rendimiento del pasto. Sin la presencia de escarabajos estercoleros, el estiércol puede permanecer en la superficie terrestre por meses o incluso años sin degradarse (Arellano *et al.*, 2018).

La agrobiodiversidad en potreros se refiere al fomento y mantenimiento de una variedad de especies de plantas herbáceas, arbóreas, y/o animales en el sistema que benefician al ecosistema y al ganado. Esta promueve la recuperación de flora y fauna nativas en los ecosistemas ganaderos, mediante el aumento en la disponibilidad de hábitat para más especies. Además, cada especie de planta responde a diferentes situaciones de disturbio y perturbación y esto aumenta la resiliencia del ecosistema.

El ganado utiliza la diversidad de pastos, plantas herbáceas comestibles y de diversas especies de árboles y arbustos disponibles en los ambientes de pastoreo (Espinosa *et al.*, 2018), obteniendo múltiples beneficios. El aumento en la biodiversidad permite que los animales tengan una dieta más equilibrada y mejor digestibilidad, lo que disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero. Cada especie de planta segregá un conjunto único de secreciones en sus raíces que le permiten comunicarse con una comunidad microbiana única cuyos microorganismos consumen los exudados de la rizósfera, que corresponde a los 5 mm de suelo que rodea la raíz y es la parte por la que la planta percibe su entorno y realiza sus funciones. Las raíces de las plantas herbáceas (Franzluebbers y Stuedemann, 2008; Greenwood y Mckenzie, 2001) y la actividad biológica de los organismos del suelo (Drewry, 2006; Kulli, 2003) juegan un papel importante en la recuperación de un suelo compactado por el ganado. Se ha encontrado una relación positiva entre la biomasa de raíces y la porosidad (Houlbrooke; Stavi; Bell, 2011).

Por otro lado, los árboles funcionan como barreras para control de escorrentía, reducen el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo y aumentan el contenido de materia orgánica por desprendimientos de raíces finas y caída de hojarasca, aumentando el aporte de nutrientes por actividad biótica y reduciendo la erosión. El aumento en la densidad arbórea disminuye la compactación y la densidad aparente del suelo (Leyva *et al.*, 2018) y aumenta la infiltración y la porosidad del mismo.

La introducción de leguminosas como forraje en pastizales tropicales aumenta la capacidad de acumulación de carbono en el suelo, que va de 58.2 a 69.9%, comparado con la producción de ganado en pastizales (Del Ángel Lozano *et al.*, 2023). La presencia de árboles de leguminosas como Vachellia macracantha (81 árboles/ha) disminuye hasta en 3.5°C la temperatura ambiental y en 3.2°C la temperatura del suelo. Además, los árboles de este sistema silvopastoril neutralizan los niveles de pH en el suelo (Romero *et al.*, 2021).

Los sistemas silvopastoriles tienen algunas ventajas medioambientales y económicas como la mayor absorción de CO<sub>2</sub> (Robert y Saugier, 2003), la disminución de la erosión del suelo en las laderas (García y López, 2009), la mejora de la calidad de las aguas de escorrentía, la disminución del ritmo de aterramiento de embalses y el incremento de la producción de madera (Goldfarb *et al.*, 2022).

La protección de la superficie del suelo con el uso de mantillo (Nicholls *et al.*, 2015) y de cultivos de cobertura (ej. leguminosas) previene el suelo desnudo, lo protege de la erosión por viento y agua, y disminuye o suprime el crecimiento de arvenses mediante competencia. Se ha demostrado que los pastos combinados con plantas de trébol blanco (*Trifolium repens*), plátano (*Musa paradisiaca*), diente de león (*Taraxacum officinale*) y el manejo integrado de arvenses, logran obtener mayores concentraciones de minerales (Del Ángel Lozano *et al.*, 2023). Además, los cultivos de cobertura regulan los cambios de temperatura del suelo y reducen las pérdidas de agua a nivel superficial, los cuales son factores clave en la actividad de la macrofauna edáfica (Morel y Acosta, 2022).

La labranza de conservación considera el menor movimiento posible del suelo y requiere manejar los residuos de la cosecha anterior (al menos 30%) para evitar la erosión y aumentar la fertilidad. Esta práctica, que incluye a la labranza reducida (LR) y a la labranza cero (LZ) (FAO, 2001) tiene capacidad potencial para secuestrar carbono en el suelo (Rasmussen y Parton, 1994) y mantener su estructura y funciones, al evitar su manipulación mecánica.

Hay que evitar, en lo posible, las actividades ganaderas en pendientes. Si esto no se logra, el uso de sistemas silvopastoriles o de pastos como el Vetiver, puede retener el suelo y controlar la erosión. Es muy importante para el suelo es el control de la velocidad del agua, mediante un diseño hidráulico, considerando las curvas de nivel y con una visión de cuenca. Esto evita la pérdida de suelo, la turbidez y la cantidad de sólidos suspendidos totales que pueden afectar a los organismos que viven en los cuerpos de agua.

## 12.6. Desafíos de la ganadería regenerativa y el suelo

No existe información actualizada, precisa y confiable, del estado de la degradación de los suelos a nivel nacional que permita tomar decisiones basadas en datos confiables (Etchevers *et al.*, 2020).

Entre productores y técnicos extensionistas en general, hay una falta de conocimiento de métodos de monitoreo del suelo.

La implementación de la ganadería regenerativa a gran escala se ve limitada por la falta de apoyo institucional, el desconocimiento técnico, ciertas barreras culturales y los altos costos iniciales para los productores.

A nivel individual, aún hay paradigmas muy afianzados, lo que genera una resistencia y un temor al cambio. Hay una percepción de riesgo, la cual parece estar influenciada por factores socioeconómicos, la edad de los productores, el acceso a servicios de extensión, y las percepciones negativas sobre el clima y el mercado (Bravo Peña *et al.*, 2024).

No se efectúan diagnósticos antes de iniciar la transición hacia prácticas regenerativas.

Hay un alto costo inicial de inversión para los productores y existe aún un acceso limitado a financiamiento para transitar a prácticas regenerativas y un apoyo gubernamental limitado, así como una falta de políticas públicas que consideren o se enfoquen en el suelo.

## 12.7. Recomendaciones generales

Entre las sugerencias que se pueden hacer para conservar, mantener y restaurar las condiciones de los suelos, además de las prácticas regenerativas anteriormente descritas, se encuentran las siguientes:

- Capacitación sobre muestreo, interpretación y análisis de suelos para extensionistas y productores.
- Análisis de laboratorio y técnicas complementarias al análisis de laboratorio (calidad visual, cromatografía de Pfeiffer) para conocer la condición del suelo. Existen manuales muy claros y con prácticas fáciles y evaluaciones claras, como el de Doctores del suelo (PUEIS; UNAM).
- Para utilizar los abonos o agregar nutrientes al suelo se debe hacer un análisis o perfiles biológicos del suelo pues la sobre fertilización afecta a las poblaciones de microorganismos.
- No aplicar enmiendas ni microorganismos (EM, JMS, LAB, té de compost), sin conocimiento o capacitación. Si se usa mucho fertilizante, la planta deja de producirlos.
- Es recomendable el uso de ganado adaptado al entorno local, pues los suelos no están capacitados para sostener a animales muy grandes. Los animales criollos y más pequeños son mejores y más eficientes.
- Incentivos gubernamentales, difusión, educación.
- Desarrollar un marco de toma de decisiones de políticas públicas para la conservación y mejoramiento del suelo.
- Trabajo colaborativo, interinstitucional. Compromiso colectivo de actores.
- Ampliación de la base científica a través de más investigación sobre impactos a largo plazo de las prácticas ganaderas sobre el suelo y consenso sobre indicadores, lo que posibilitará el diseño de estrategias ajustadas y sustentadas en evidencia técnica.
- Todo lo anterior permitiría un mejor desarrollo pecuario a corto, mediano y sobre todo a largo plazo y una autosuficiencia alimentaria.

## 12.8. Conclusiones

La ganadería regenerativa es una alternativa para mejorar la salud del suelo, la conservación de la biodiversidad y la integridad funcional de los ecosistemas. Sin embargo, aún se presentan retos para lograr esa transición.

## 12.9. Referencias bibliográficas

Alvear M, Pino M, Castillo C, Trasar-Cepeda C, Gil-Sotres F. Efecto de la cero labranza sobre algunas actividades biológicas en un Alfisol del sur de Chile. *RC Suelo Nutr Veg* 2006;6(2):38-53. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912006000200004>

Arellano L, Menegaz de Farías P, Barois I, Torres-Rivera JA, E Meza. La importancia de un suelo saludable para la ganadería sustentable. En: G. Halffter, M. Cruz y C. Huerta (Compiladores). *Ganadería sustentable en el Golfo de México*. Instituto de Ecología, A. C: Xalapa, Veracruz, México. 2018:75-105.

Arias NM, Rangel MDCN, López ICP, Sánchez EC, de la Cruz JM. El suelo y su multifuncionalidad: ¿qué ocurre ahí abajo?. *CIENCIA ergo-sum, Rev Cient Multidis* 2018;25(3) <https://doi.org/10.30878/ces.v25n3a9>

Bautista-García G, López-Ortiz S, Murillo-Cuevas FD, Pérez-Hernández P, Ortega-Jiménez E, López-Collado CJ. Estudio preliminar del pastoreo racional Voisin como herramienta para mejorar las condiciones del suelo después del pastoreo extensivo. *Terra Latinoamericana* 2022;40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.893>

Bell LW, Kirkegaard JA, Swan A, Hunt Jr, Huth Ni, Fettell NA. Impacts of soil damage by grazing livestock on crop productivity. *Soil Till Res* 2011;113:19-29. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.02.003>

Bravo-Peña F, Toro-Letelier JJ, Cabrera NA, Méndez MH, Rojas CA. Ganadería regenerativa: definición, caracterización y recomendaciones de políticas. Documentos de Proyectos (LC/TS.2024/134). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL): Santiago; 2024.

Brown GG, Niva CC, Zagatto MRG, Ferreira S, Nadolny HS, Cardoso GBX, Santos A, Martínez GA, Pasini A, Bartz MLC, Sautter KD, Thomazini MJ, Baretta D, da Silva E, Antoniolli ZI, Decaëns T, Lavelle PM, Souza JP, Carvalho F. Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais. En: Parron LM, García J, Oliveira E, Brown GG, Prado RB (editores). *Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica*. Embrapa:Brasilia, Brasil. 2015:121-154. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1024236>

COMECAÑE. Compendio Estadístico 2025. [www.comecarne.org](http://www.comecarne.org)

Del Ángel-Lozano GD, Escalona-Aguilar MÁ, Baca del Moral J, Cuevas-Reyes V. Principios y prácticas agroecológicas para la transición hacia una ganadería bovina sostenible. Revisión. Rev mex de cienc Pecuarias 2023;14(3):696-724. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v14i3.6287>

Drewry JJ. Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral soils in New Zealand and Australia: A review. Agr Ecosyst Environ 2006;114: 159-169. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.028>

Enríquez-Quiroz JF, Esqueda Esquivel VA, Martínez Méndez D. Rehabilitación de praderas degradadas en el trópico de México. Rev mex de cienc Pecuarias 2021;12:243-260. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12s3.5876>

Espinosa-Palomeque O, Castillo-Campos G, Arellano L, Pérez-Hernández P, López-Ortiz S. Floristic diversity and animal loading in dry forest secondary vegetation used for grazing. Glob Ecol Conserv 2020;23 e01088. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01088>

Espinosa-Velázquez E. Actividad ganadera y contaminación ambiental. An R Acad Dr 2021;6(2):245-260. <https://www.radoctores.es/pagina.php?item=944>

Etchevers BJD, Cotler H, Hidalgo C. Salir de la invisibilidad: nuevos retos para la ciencia del suelo. Terra Latinoamericana 2020;38(4):931-938. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.867>

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Soil carbon sequestration for improved land management. World soil reports 96. Rome, Italy. 2001.

Franzluebbers AJ, Stuedemann JA. Soil physical responses to cattle grazing cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA. Soil Till Res 2008;100:141-153. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.05.011>

García-Ruiz JM, López-Bermúdez F. La erosión del suelo en España. Sociedad Española de Geomorfología: Zaragoza. 2009.

Gardi C, Angelini M, Barceló S, Comerma J, Cruz Gaistardo C, Encina Rojas A, Vargas R. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe. Luxembourg: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. 2014. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1001699>

Gibbs HK, Ruesch AS, Achard F, Clayton MK, Holmgren P, Ramankutty N, Foley JA. Tropical forest were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. PNAS 2010;107(38):16732-16737. <https://doi.org/10.1073/pnas.0910275107>

Goldfarb MC, Francisco-Casco J, Oscar-Verdoljak JJ, Esquivel J, Martínez-González JC, Castillo-Rodríguez SP. Sistema Silvopastoril con Pino Híbrido en Corrientes, Argentina. Rev Mex Agroecosist 2022; 9(1):25-39.

Greenwood KI, Mckenzie BM. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. Aust J Exp Agric 2001;41:1231-1250. <https://doi.org/10.1071/EA00102>

Houlbrooke DJ, Paton RJ, Littlejohn RP, Morton JD. Land-use intensification in New Zealand: effects on soil properties and pasture production. J Agr Sci 2011;149:337-349. <https://doi.org/10.1017/S002185961000082>

Jacobo EJ, Rodríguez AM, Bartoloni N, Deregibus VA. Rotational grazing effects on rangeland vegetation at a farm scale. Rangel Ecol Manag 2006;59: 249-257. <https://doi.org/10.2111/05-129R1.1>

Kulli B, Gysi M, Fluhler H. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. Soil Till Res 2003;70:29-40. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00121-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00121-6)

La ganadería en México, un orgullo nacional.  
<https://www.gob.mx/agricultura/puebla/articulos/ganaderia-bovina-en-mexico-un-orgullo-nacional-378112> consultada el 20 de septiembre de 2025

La ganadería mexicana en cifras. <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/es/articulos/la-ganaderia-mexicana-en-cifras?idiom=es> consultada el 28 de septiembre de 2025

Leyva S, Baldoquin A, Reyes M. Propiedades de los suelos en diferentes usos agropecuarios, Las Tunas, Cuba. Rev Cienc Agr 2018;35(1):36-47. <http://dx.doi.org/10.22267/rca.183501.81>

Loera-Sánchez JM, Serrano PML, Luna RG, Carrete-Carrón FÓ, Carrillo ARQ. Respuesta del pastizal al pastoreo continuo y rotacional en el norte de México. Rev. mex. de cienc. Pecuarias 2025;16(3):698-713. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v16i3.6827>

López Santos A. Neutralizar la degradación de las tierras, una aspiración global. ¿Es posible lograrlo en México? Terra Latinoamericana 2016;34: 239-249. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792016000200239&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792016000200239&script=sci_arttext)

López-Moreno JI, García-Ruiz JM. Influencia de los embalses sobre el régimen fluvial en los Pirineos centrales. Cuadernos de investigación geográfica 2003; 29: 7-21

López-Ortiz S. ¿Qué es la ganadería sustentable? En G. Halffter, M. Cruz, & C. Huerta (Compiladores). Ganadería sustentable en el Golfo de México. México: Instituto de Ecología, A.C. 2018:65-73.

Martínez I, Cruz-Rosales M. El uso de químicos veterinarios y agrícolas en la zona ganadera de Xico, centro de Veracruz, México, y el posible impacto ambiental. *Acta Zool Mex* 2009;25(3):673-681. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0065-17372009000300021&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0065-17372009000300021&script=sci_arttext)

ME Assessment. Ecosystems and human well-being: our human planet-summary for decision-makers. | Washington D. C., USA: Island Press. 2005. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/28979>

Medina C. Efectos de la compactación de suelos por el pisoteo de animales, en la productividad de los suelos. *Remediaciones. Rev Colombiana Cienc Anim (RECIA)* 2016;8(1):88-93. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=595879099014>

Menta C, Remelli S. Soil health and arthropods: from complex system to worthwhile investigation. *Insects* 2020;11: 54. <https://doi.org/10.3390/insects11010054>

México entre los principales países productores de leche de vaca. <https://bmedidores.mx/ganaderia/mexico-entre-los-principales-paises-productores-de-leche-de-vaca/>

Morel A, Acosta OO. Calidad del suelo en diferentes usos y manejo por medio de la macrofauna como indicador biológico. *Braz J Anim Environ Res* 2022;5(1):996-1006. <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n1-074>

Nicholls CI, Henao A, Altieri MA. Agroecología y el diseño de sistemas agrícolas resilientes al cambio climático. *Agroecología* 2015;10(1):7-31.

Núñez P, Colocco J, Encina A. Breve visión sobre el suelo: rol, importancia, funciones, calidad e indicadores. APF 2020; 9(1):97-114. Recuperado a partir de <https://www.sodiaf.org.do/apf/index.php/apf/article/view/118>

Peralta-Rivero C, Beltrán-Santoyo MÁ, Cuellar-Álvarez N, Álvarez-Fuentes, G. Impacto de la ganadería sobre la vegetación, emisiones y captura de carbono en el Chaco Boliviano. *Rev mex de cienc pecuarias* 2025;16(3):593-609. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v16i3.6570>

Pinheiro-Machado LC. Leyes universales del pastoreo racional. En L. C. Pinheiro-Machado (Ed.). *Pastoreo racional Voisin: tecnología agroecológica para el tercer milenio* (pp. 63-83). Buenos Aires, Argentina: Hemisferio Sur; 2011.

Rasmussen PE, Parton WJ. Long term effect of residue management in wheat - fallow: I. Inputs, yield, and soil organic matter. *Soil Sci Soc Am J* 1994;58:523-530. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800020039x>

Robert M, Saugier B. Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. Comptes rendus. Géoscience 2003;335(6-7):577-595. [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(03\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(03)00094-4)

Rojas-Paez D, Villegas-Rapalino ZP. Determinación de pérdida de suelo bajo distintas prácticas de ganadería altoandina. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Facultad De Medio Ambiente y Recursos Naturales. Proyecto Curricular: Ingeniería Ambiental, Bogotá. An R Acad Dr 2016;6(2):245-260. <http://hdl.handle.net/11349/3304>

Romero Delgado G, Trillo Zárate F, Orellana Chirinos J, Quiroga Espilco P, Gamarra Bojorquez J, Rojas Egoavil D, Nuñez Delgado J. Efecto de Acacia macracantha en las propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema silvopastoril. Rev investig vet Perú 2021;32(3): e20389. <http://dx.doi.org/10.15381/rivep.v32i3.20389>

Sánchez López DB, Tapia Coronado JJ, Atencio Solano LM. Microorganismos del suelo en la sostenibilidad de los sistemas ganaderos de la región Caribe de Colombia. Mosquera, Colombia: Agrosavia. 2022. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/37367>

Solorio SFJ. Programa de capacitación para impulsar prácticas de ganadería bovina con enfoque regenerativo o sostenible y sistemas agroforestales en Chiapas, Chihuahua, Jalisco Y Veracruz. Proyecto “La ganadería regenerativa como herramienta para la conservación de la biodiversidad (GANARE)”. FMCN 2022. Recuperado de Informe-Final-FMCN-Programa-de-Formacion-julio-2022.pdf

Stavi I, Lal R, Owens LB. Effects of cattle grazing during the dormant season on soil surface hydrology and physical quality in a moist-temperate region. Ecohydrology 2011;4:106-114. <https://doi.org/10.1002/eco.137>

Suárez, D. (2022, 23 marzo). La pata de la vaca. A Regenerar. <https://www.ganaderiaregenerativa.com/post/la-pata-de-la-vaca>

Teague WR, Dowhower SL, Baker SA, Haile N, Delaune PB, Conover DM. Grazing management impacts on vegetation, soil biota and soil chemical, physical and hydrological properties in tall grass prairie. Agric Ecosyst Environ 2011;141: 310-322. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.009>

Torres J, Gutiérrez JA, Beltrán HA. Compactación, una de las causas más comunes de la degradación del suelo. Rev cienc téc agropecu 2017;3(3):18-22. <https://doi.org/10.36436/24223484.225>

Trilleras JM, Jaramillo VJ, Vega EV, Balvanera P. Effects of livestock management on the supply of ecosystem services in pastures in a tropical dry region of western Mexico. Agric Ecosyst Environ 2015;211:133-144. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.011>

Verhulst N, François I, Govaerts B. Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor. México, D.F.: CIMMYT. 16p. 2015.

Walker B, Holling CS, Carpenter SR, Kinzig A. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecol Soc* 2004; 9(2).  
<http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>

Wassenaar T, Gerber P, Verburg PH, Rosales M, Ibrahim M, Steinfeld H. Projecting land use changes in the Neotropics: The geography of pasture expansion into forest. *Glob Environ Change* 2007;17(1):86-104.<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.007>

### **Coordinadores de la información**

Dr. Rubén Santos Echeverría  
Dr. Héctor Daniel Inurreta Aguirre  
M.C. Jeremías Nataren Velázquez

### **Edición**

M.C. Rosa Laura Rebolledo García  
Dr. Rubén Santos Echeverría

### **Diseño y fotografía**

Dr. Héctor Daniel Inurreta Aguirre  
M.C. Rosa Laura Rebolledo García  
Mtra. Claudia Perdomo Montes  
Imagen de portada: Dr. Gabriel Díaz Padilla

### **Código INIFAP** **MX-0-310309-52-04-19-14-14**

La presente publicación en formato electrónico, se terminó de editar en diciembre de 2025, en el Centro de Investigación Regional Golfo Centro del INIFAP. Km. 22.5 Carretera Veracruz-Córdoba, Paso del Toro, mpio. de Medellín, Ver., México. CP. 94277, Teléfono: 5538 718 700, ext. 87809

Publicación electrónica disponible en  
la biblioteca digital del INIFAP:  
[https://vun.inifap.gob.mx/BibliotecaWeb/\\_Content](https://vun.inifap.gob.mx/BibliotecaWeb/_Content)

**Publicación revisada por el Comité Editorial  
del Campo Experimental Cotaxtla**

**Comité Editorial del Campo Cotaxtla**

**Presidente**

M.C. Jeremías Nataren Velázquez

**Secretario**

M.C. Rosa Laura Rebollo García

**Vocales**

Mtra. María Enriqueta López Vázquez

Dr. Isaac Meneses Márquez

**Personal Investigador del  
Campo Experimental Cotaxtla**

<b>Nombre del Investigador</b>	<b>Especialidad</b>
Acevedo Cortes María de Los Ángeles	Maíz
Cabrera Mireles Héctor	Sanidad vegetal
Capetillo Burela Ángel*	Suelo
Couttolenc Brenis Edgar	Café
Curti Díaz Sergio Alberto	Cítricos
Díaz Padilla Gabriel	Vulnerabilidad climática
Fadda Lucas Alejandro	Vulnerabilidad climática
Guajardo Panes Rafael Alberto*	Vulnerabilidad climática
Hernández Estrada Carmen Aridai*	Maíz
López Morgado Rosalío	Café
López Vázquez María Enriqueta	Piña
Mendoza Mexicano Maurilio	Caña de azúcar
Meneses Márquez Isaac	Hortalizas
Miranda Marini Rogelio*	Caña de azúcar
Montiel Vicencio Gerardo*	Sanidad vegetal
Nataren Velázquez Jeremías	Agrobiodiversidad
Peralta Antonio Nain*	Piña
Rebolledo Martínez Andrés	Frutales tropicales
Reynolds Chávez Marco Antonio	Maíz
Rodríguez Escobar Jorge Gustavo	Sanidad vegetal
Rosas González Xóchitl	Agrobiodiversidad
Sánchez Galindo Madai	Agua
Sierra Macías Mauro	Maíz
Tinoco Alfaro Carlos Alberto	Maíz
Toral Juárez Marco Antonio	Café
Tosquy Valle Oscar Hugo	Frijol
Ugalde Acosta Francisco Javier	Frijol
Uribe Gómez Sergio	Suelo
Uriza Ávila Daniel Emigdio	Piña
Vásquez Hernández Andrés	Suelo
Vázquez Hernández Marcos Ventura	Maíz
Zetina Lezama Rigoberto	Suelo

\*en estudios de posgrado





**Agricultura**  
Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural

**inifap**  
Aniversario  
Bienestar para el campo

[www.gob.mx/inifap](http://www.gob.mx/inifap)