

Tecnologías agroforestales para la adaptación y mitigación al cambio climático

Opciones y perspectivas

José Manuel Palma García
José Antonio Torres Rivera
Eduardo Valdés Velarde
COORDINADORES



UNIVERSIDAD DE COLIMA

Tecnologías agroforestales para la adaptación y mitigación al cambio climático

Opciones y perspectivas

UNIVERSIDAD DE COLIMA

Dr. Christian Jorge Torres Ortiz Zermeño, Rector

Mtro. Joel Nino Jr., Secretario General

Mtra. Vianey Amezcua Barajas, Coordinadora General de Comunicación Social

Mtra. Gloria Guillermina Araiza Torres, Directora General de Publicaciones

Tecnologías agroforestales para la adaptación y mitigación al cambio climático

Opciones y perspectivas

José Manuel Palma García
José Antonio Torres Rivera
Eduardo Valdés Velarde

COORDINADORES



UNIVERSIDAD DE COLIMA

© UNIVERSIDAD DE COLIMA, 2022
Avenida Universidad 333
C.P 28040, Colima, Colima, México
Dirección General de Publicaciones
Teléfonos: 312 316 1081 y 312 316 1000, extensión: 35004
Correo electrónico: publicaciones@ucol.mx
<http://www.ucol.mx>

Derechos reservados conforme a la ley
Impreso en México / *Printed in Mexico* - Publicado en México / *Published in Mexico*

ISBN eBook: 978-607-8814-24-4
DOI: 10.53897/LI.2022.0011.UCOL



Este libro está bajo la licencia de Creative Commons, Atribución – NoComercial - CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Usted es libre de: Compartir: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato. Adaptar: remezclar, transformar y construir a partir del material bajo los siguientes términos: Atribución: Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante. NoComercial: Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales. CompartirIgual: Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

You are free to: Share: copy and redistribute the material in any medium or format. Adapt: remix, transform, and build upon the material under the following terms: Attribution: You must give appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made. You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use. NonCommercial: You may not use the material for commercial purposes. ShareAlike: If you remix, transform, or build upon the material, you must distribute your contributions under the same license as the original.

Portada

Dueño de la obra: Colegio Mexicano de Agroforestería Pecuaria
Terrisoicaro | Víctor M. Rodríguez | 2008
Técnica: Litoespátula | 50 x 70 cm

Proceso editorial certificado con normas ISO desde 2005
Dictaminación y edición registradas en el Sistema Editorial Electrónico PRED
Registro: LI-004-21
Recibido: Junio de 2021
Publicado: Septiembre de 2022

Índice

Prólogo	11
I. Agroforestería en la adaptación y mitigación	13
I.1. La función de la agroforestería en la mitigación y adaptación al cambio climático en México	15
<i>Alejandro Ismael Monterroso-Rivas</i> <i>Leticia Citlaly López-Teloxa</i>	
II. Adaptación-tecnologías agrosilvopastoriles	33
II.1. Adaptabilidad de ganaderos de Chiapas, México, frente a cambios socioambientales: perspectivas para la implementación de tecnologías agroforestales	35
<i>José Roberto Aguilar-Jiménez</i> <i>Francisco Guevara-Hernández</i> <i>José Nahed-Toral</i> <i>Carlos Ernesto Aguilar-Jiménez</i> <i>Lucio Alberto Pat-Fernández</i> <i>Ingrid Abril Valdivieso-Pérez</i> <i>Romeo Josué Trujillo-Vázquez</i> <i>Manuel Roberto Parra-Vázquez</i>	
II.2. Módulos integrales con sistemas silvopastoriles y especies ganaderas menores como estrategia de adaptación al cambio climático	53
<i>Carolina Flota-Bañuelos</i> <i>Bernardino Candelaria-Martínez</i> <i>Víctor Daniel Cuervo-Osorio</i> <i>Juan Antonio Rivera-Lorca</i>	

II.3. El meteplante asociado con ganado y árboles: tecnología agrosilvopastoril para mejorar la lechería familiar	67
<i>Daniel Hernández Archundia</i>	
<i>Julio Baca del Moral</i>	
<i>Venancio Cuevas Reyes</i>	
<i>Francisco Javier Hernández Archundia</i>	
<i>Jorge Vargas Monter</i>	
<i>Diana Ayala Montejo</i>	
<i>Carlos Montes de Oca Sanchez</i>	
II.4. Transición de una producción de monocultivo a un sistema agrosilvopastoril con enfoque de economía circular	81
<i>Gabriela Rodríguez Licea</i>	
<i>Eric Amaro Peralta</i>	
<i>José Manuel Palma García</i>	
<i>Francisco Ernesto Martínez Castañeda</i>	
III. Adaptación-tecnologías silvopastoriles	95
III.1. Elementos para el diseño de paisajes silvopastoriles sustentables en el trópico seco	97
<i>Rosa Sánchez Romero</i>	
<i>Carlos E. González Esquivel</i>	
III.2. Tecnologías agroforestales (TAF) en ganadería: estrategia de adaptación al cambio climático en territorios costeros	111
<i>Alma Liz Vargas de la Mora</i>	
<i>Vera Camacho Valdéz</i>	
<i>Timothy O. Randhir</i>	
<i>María del Carmen Hernández Moreno</i>	
<i>Manuel Jesús Cach Pérez</i>	

III.3. Hoja de <i>Ricinus communis</i> L., forraje no convencional de tipo proteico-energético para el desarrollo de tecnologías silvopastoriles	133
<i>José Manuel Palma García</i>	
<i>José Manuel Zorrilla Ríos</i>	
<i>Alejandra del Viento Camacho</i>	
<i>Cesar Lara González</i>	
<i>Luis Antonio Ramírez Navarro</i>	
<i>Jacqueline Zamora Beltrán</i>	
IV. Mitigación-tecnologías silvopastoriles	151
IV.1. Uso de vainas de fabáceas arbóreas tropicales en la mitigación de metano entérico	153
<i>Diego Felipe Portela-Díaz</i>	
<i>Nicolás Torres-Salado</i>	
<i>Marco Antonio Ayala-Monter</i>	
<i>Jerónimo Herrera-Pérez</i>	
<i>Paulino Sánchez-Santillán</i>	
IV.2. Beneficios de la <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit en sistemas silvopastoriles utilizado por ganado vacuno y su efecto en la emisión del óxido nitroso	165
<i>Francisca Avilés Nova</i>	
<i>Tania Guadalupe Osorio Montor</i>	
<i>Octavio A. Castelán Ortega</i>	
<i>Francisco Salazar Sperberg</i>	
V. Adaptación y mitigación-tecnologías agrosilvopastoriles	183
V.1. Tecnología agrosilvopastoril basada en cocotero <i>Cocos nucifera</i> L + <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit + <i>Cenchrus purpureus</i> Cuba 115 en pastoreo con bovinos	185
<i>José Manuel Palma García</i>	
<i>José María Anguiano Cárdenas</i>	
<i>Wilberth Chan Cupul</i>	

VI. Adaptación y mitigación-tecnologías silvopastoriles	205
VI.1. Una visión holística del sistema agroforestal cítricos-ovinos: posibilidades de adaptación y mitigación frente al cambio climático	207
<i>José Antonio Torres Rivera</i>	
<i>Juan Guillermo Cruz Castillo</i>	
<i>Sergio Alberto Curti Díaz</i>	
VI.2. Experiencias del uso de tecnologías agroforestales en sistemas ganaderos de Chiapas, México, como estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático	223
<i>Deb Raj Aryal</i>	
<i>René Pinto Ruiz</i>	
<i>Francisco Guevara Hernández</i>	
<i>Adalberto Hernández López</i>	
<i>Francisco J. Medina Jonapá</i>	
<i>Mariela B. Reyes Sosa</i>	
<i>José A. Venegas Venegas</i>	
<i>Luz María Macías Morales</i>	
VI.3. Escarabajos estercoleros: adaptación y mitigación al cambio climático en sistemas agroforestales pecuarios	237
<i>Lucrecia Arellano</i>	
<i>David Douterlungne</i>	
<i>José Antonio Torres Rivera</i>	
<i>Alfredo Ramírez Hernández</i>	
<i>Felipe Barragán Torres</i>	
VI.4. Importancia de accesiones nativas de <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit para la adaptación y mitigación al cambio climático	261
<i>Claudio Vite Cristóbal</i>	
<i>José Manuel Palma García</i>	
<i>Enrique Cortés Díaz</i>	
<i>Pedro Arturo Martínez Hernández</i>	
<i>Ponciano Pérez Hernández</i>	

Abreviaturas, siglas, unidades de medida, unidades y sus equivalencias, y elementos y compuestos químicos	279
Epílogo	283
Autores	291

Prólogo

La agrosilvicultura o agroforestería plantea la presencia de árboles, arbustos o plantas similares (palmas, bambúes, cactáceas, hierbas gigantes) en las tierras utilizadas con cultivos agrícolas y/o con ganadería, de ahí se derivan los sistemas agrosilvícolas, silvopastoriles, agrosilvopastoriles y otros sistemas especiales que en nuestro territorio existen abundantes ejemplos, pues la necesidad por resolver las limitantes, pero también la creatividad de nuestros productores e investigadores, hacen que existan diseños que desafían el manejo convencional de los sistemas dominantes o recomendados por la revolución verde.

Por ello, se plantea a la agroforestería como una ciencia, cultura y arte, dado que existe una mezcla de conocimientos científicos y tecnológicos, teóricos y prácticos, modernos y ancestrales, con enormes ventajas dada la biodiversidad existente en México y en donde existen ejemplos de aprovechamiento de las especies nativas o naturalizadas, con un enfoque de sustentabilidad y que pretenden formar parte del enfoque de soberanía alimentaria que tanta falta les hace a nuestros pueblos, pero también la necesidad de conocer y de desarrollar alternativas en los diferentes agroecosistemas de nuestro país, para que enfrentemos el cambio climático.

La agroforestería es más que la diversificación en el uso del suelo, se presenta como alternativa viable ante los problemas que genera la agricultura convencional moderna, ante un enfoque mercantil que en un afán mezquino genera problemas de deforestación, erosión, degradación, contaminación y a la vez sumado al uso de energía fósil que provoca modificación del ambiente, por lo que desde esta primera década del siglo XXI se acepta que existe el cambio climático y que es urgente hacer frente con múltiples acciones. La agroforestería indudablemente juega un papel sustancial para contribuir en esta emergencia.

Cada vez son más las evidencias que indican que la agrosilvicultura o agroforestería aportan estrategias de adaptación, mitigación, o ambas, a través de las tecnologías que proveen este enfoque productivo.

Razón por la cual se planteó la elaboración de la presente obra, para ello se les solicitó a un colectivo de expertos que participaran con el objetivo de que aportaran tecnologías desarrolladas con enfoque agroforestal para hacer frente a esta situación climática, que el capítulo propuesto reflejara una tecnología producto de la investigación realizada en sus líneas de investigación y que dejarán constancia de la tecnología agroforestal propuesta en donde hubiera evidencia de las tecnologías: agrosilvícolas, silvopastoriles o

agrosilvopastoriles asociadas a la adaptación, mitigación, o ambas, al cambio climático, para que ello les permitiera a los lectores interesados visualizar opciones.

Producto de lo cual se lograron 15 capítulos, donde en la primera sección se presenta uno como propuesta general que explica el papel de la agroforestería en la mitigación y adaptación al cambio climático en México. Las siguientes cinco secciones consideran las tecnologías y sus aportes para enfrentar el cambio climático, en donde en la segunda sección se propusieron tecnologías agrosilvopastoriles para la adaptación, con cuatro capítulos: uno de ellos para los ganaderos de Chiapas, otro sobre el diseño de módulos integrales con conejos y con codornices, el tercero el uso de magueyes asociado a árboles frutales y a ganado, y por último, en esta sección, una propuesta de economía circular de un sistema agrosilvopastoril que provenía de una visión de monocultivo.

En la sección tres también se habla de adaptación, pero ahora con tecnologías silvopastoriles, en esta sección se tuvieron tres contribuciones; la primera planteada como paisajes silvopastoriles, la segunda como propuesta de territorios costeros y la tercera el uso de *Ricinus communis* L. como forraje no convencional de tipo proteico-energético como propuesta original en la nutrición de rumiantes. Para la cuarta sección se consideró la mitigación con el uso de tecnologías silvopastoriles con dos capítulos: uno de los capítulos aborda el uso de vainas de leguminosas arbóreas tropicales y el segundo el uso de la *Leucaena leucocephala* con óxido nitroso como una visión necesaria de abordar. La quinta y sexta secciones consideraron aquellas tecnologías que combinan atributos de adaptación y mitigación con tecnologías agrosilvopastoriles y silvopastoriles, respectivamente. En la quinta sección se aportó un sólo capítulo basado en la integración de *Cocos nucifera* L + *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit + *Cenchrus purpureus* Cuba 115 en pastoreo con bovinos en ganadería de doble propósito y, finalmente, en la sexta sección se aportaron cuatro tecnologías: la primera es una visión holística del sistema cítricos-ovinos, la segunda es para sistemas ganaderos en Chiapas, la tercera es la valoración de los escarabajos estercoleros en donde se enfatiza la importancia de este grupo en la agroforestería pecuaria y, en el último capítulo, se reconoce la importancia de las accesiones nativas de *Leucaena leucocephala*, en México.

Por lo tanto, existen una variedad de tecnologías agroforestales, de especies animales utilizadas, así como de especies arbóreas manejadas que alienta la propuesta, para que en un futuro otros colegas puedan aportar sus experiencias dado que la pandemia y diferentes motivos personales, y de procedimiento en la construcción de este libro, limitaron la participación de más autores con otras tecnologías. Ello nos alienta a pensar que este libro es una muestra de lo que diferentes grupos de investigación están realizando en el país y que los grupos de investigación del área aportan soluciones ante esta compleja realidad, con una visión de lo local como ventana de lo universal.

José Manuel Palma García

I. Agroforestería en la adaptación y mitigación

I.1. La función de la agroforestería en la mitigación y adaptación al cambio climático en México

Alejandro Ismael Monterroso-Rivas*
Leticia Citlaly López-Teloxa

Departamento de Suelos y Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo.

*Autor de correspondencia: aimrivas@correo.chapingo.mx

Introducción

Para hacer frente al cambio climático es necesario promover acciones de mitigación y adaptación. Mitigación se refiere a reducir, capturar y almacenar gases de efecto invernadero que se encuentran en la atmósfera de la Tierra. Para el IPCC (2019) son las intervenciones humanas que reducen las emisiones o mejoran los sumideros de gases efecto invernadero. Adaptación por su parte consiste en ajustar los sistemas humanos para disminuir el impacto u obtener algún beneficio del cambio. Para el grupo IPCC (2019) es importante diferenciar entre sistemas humanos y sistemas naturales, así como entre el clima actual y futuro. En ambos casos, los sistemas agroforestales ofrecen soluciones viables de mitigación y adaptación conjunta al cambio climático.

A nivel global el año 2019 fue reportado como el año más caluroso en el registro histórico, ya que fue 0.98 °C más cálido que el promedio de los años 1951-1980 (GIS-TEMP Team, 2020). El aumento se debe principalmente al incremento de las emisiones, a la atmósfera, de dióxido de carbono y de otros gases de efecto invernadero (GEI) producidos por diversas actividades humanas. Desde hace varios años se ha documentado el calentamiento del planeta, por lo que el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su quinto informe (2013) señaló que “el calentamiento en el sistema climático es inequívoco”. Incluso, indican que es probable que la temperatura global sea superior en 1.5 °C respecto del periodo 1850-1900 (se incluyen todos los escenarios socioeconómicos y de emisiones de los GEI). Con relación al comportamiento planetario de la precipitación, los cambios que se proyectan no son uniformes (IPCC, 2013). Es de resaltar que el comportamiento en precipitaciones se magnificará y se diferenciará de acuerdo con la forma en cómo sucede actualmente: entre regiones húmedas y secas y entre las estaciones húmedas y secas, con excepciones regionales.

Ante el panorama que implica el cambio climático, a nivel global, los retos a escala regional y local son diversos. Así, varios estudios subrayan que México es un país altamente vulnerable al cambio climático (SEMARNAT, 2014a; INECC-SEMARNAT, 2018; Monterroso-Rivas *et al.*, 2018; Maldonado-Méndez y Monterroso-Rivas, 2019). Incluso, se indicó que en México son 319 municipios (13% del total) los que presentan mayor vulnerabilidad a impactos por el cambio climático, en particular a sequías, inundaciones y

deslaves (SEMARNAT, 2014b). Ante ello, y considerando el inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, el gobierno nacional presentó ante las Naciones Unidas (2015) los compromisos nacionales de reducción de emisiones y adaptación, conocidos como Contribuciones Nacionales Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés). Las cuales, durante el año 2020, se actualizaron.

En el documento se presentan los compromisos adquiridos por el país para mitigación: 1) reducción no condicionada del 51% del volumen de carbono negro¹ para el año 2030; 2) reducción del 22% de emisiones de gases efecto invernadero al año 2030 (reducción de 210 megatoneladas). En materia de adaptación los compromisos, son: 1) fortalecer la resiliencia en el 50% de los municipios más vulnerables del territorio nacional; 2) establecer sistemas de prevención, alerta temprana y gestión de riesgo en todos los órdenes de gobierno; 3) alcanzar la tasa cero de deforestación en 2030 (SEMARNAT, 2014a).

Cabe resaltar que el compromiso es la protección y desarrollo de los pilares ecosistémico, social, productivos y de infraestructura con la finalidad de disminuir la vulnerabilidad de la población. De acuerdo con la SEMARNAT-INECC (SEMARNAT-INECC, 2018), el uso responsable de los recursos naturales y la mejora en la calidad de vida y en la resiliencia al cambio climático se logrará con el crecimiento económico, la sustentabilidad ambiental y con la inclusión social.

Los retos que México tiene en mitigación y adaptación deben complementarse con mejores prácticas en los sistemas de uso de la tierra. Entre los usos y tecnologías que muestran fuerte potencial se encuentran los sistemas agroforestales. Se debe a que la agroforestería deliberadamente introduce plantas perennes (árboles, arbustos, palmas, bambúes, entre otras) en el mismo espacio en el que se realiza la actividad agrícola o ganadera, en algún arreglo espacial o temporal. La agroforestería presenta gran potencial en la mitigación de los GEI y captura de carbono orgánico en suelo (COS), por ejemplo, se conservan los residuos de cosecha, se emplea la labranza de conservación y se introducen cultivos de cobertura (Lal, 2003; Casanova *et al.*, 2011). Al manejarse adecuadamente se logran interacciones ecológicas entre los componentes del sistema (FAO, 2015). Dado que la agroforestería se practica tanto en climas templados como en áridos, semiáridos y tropicales, su relevancia y potencial aumenta considerablemente.

Así, el objetivo del capítulo es documentar el potencial que tiene la actividad agroforestal para mitigar y para fomentar la adaptación al cambio climático. Para ello, el método consistió en hacer una revisión bibliográfica dando prioridad a fuentes publicadas en revistas científicas y con aplicación para México. También, se consultaron fuentes oficiales de información de gobierno federal en materia de cambio climático. Los resultados se presentan en dos secciones: 1) los posibles impactos del cambio climático en la actividad agrícola nacional, para mostrar el nivel de afectación que se espera; y 2) el potencial que se tiene en mitigación y adaptación al incluirse sistemas e innovaciones agroforestales, mediante ejemplos desarrollados en el país.

¹ El carbono negro es el carbono puro, resultado de la combustión incompleta de diésel, biocombustibles y biomasa y es lo que da el color negro al *hollín*. Calienta al planeta mediante la absorción de radiación solar.

Impactos del cambio climático en agricultura

Frente a la amenaza del cambio climático, variables como precipitación y temperatura presentarán cambios importantes, los cuales podrían causar severas afectaciones y así impactar la producción agrícola (Altieri y Nicholls, 2008). Sin lugar a duda las actividades agrícolas enfrentan año con año los impactos del cambio y la variabilidad climáticos. Particularmente aquéllos que dependen del temporal o lluvia para producir, en la mayoría de los casos, con bajos rendimientos. Por ello, el estudio del impacto del cambio climático sobre actividades agrícolas, en el país, tiene más de dos décadas (Monterroso-Rivas *et al.*, 2015). Particularmente se estudia el cambio en la aptitud para establecimiento de cultivos; cambio en los rendimientos y sobre el cambio en necesidades hídricas por los cultivos.

Un primer acercamiento a los impactos del cambio climático se refiere a la aptitud natural de la tierra para producir alimentos. En el caso del maíz, por ejemplo, puede disminuir entre 2.4-5.5%, donde los estados de Jalisco, Campeche, Oaxaca, Chiapas y Michoacán son los más afectados (López-Blanco *et al.*, 2018). Sobre rendimientos proyectados, en un estudio reciente (2020) se modelaron rendimientos de maíz, frijol, trigo, soya, sorgo, cebada y papa, para México. El rendimiento de maíz en climas cálidos y secos podría disminuir hasta en 84%, el frijol podría tener decrementos de 10 a 40% en el norte del país. En el noroeste se prevén rendimientos de trigo 15% menores. La soya podría beneficiarse, con incrementos de 15 a 40%, esto debido al aumento de la lluvia disponible de aproximadamente 10%. Respecto al sorgo y a la papa se esperarían decrementos generalizados, mientras que la cebada tendría incrementos y decrementos según la zona del país.

La aptitud de la tierra para la producción agrícola se compromete al cambiar el clima. Para el país se documenta que en los últimos 50 años las temperaturas promedio aumentaron (aproximadamente 0.85 °C), y las temperaturas mínimas y máximas tienden también a incrementar (SEMARNAT, 2020). En el caso de la precipitación, el patrón de lluvias cambió pero no así las cantidades, en la mayoría de los casos. Un resultado de lo anterior es que se espera que la evapotranspiración (ETP) aumente prácticamente en todo el territorio nacional y el periodo de crecimiento (PECRE) se reduzca como consecuencia del incremento generalizado de la temperatura y la disminución de la humedad relativa (Monterroso-Rivas y Gómez-Díaz, 2021). Además, hay que agregar que se tendrán aumentos en la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos y el recurso agua será cada vez más escaso en las áreas afectadas por sequía. Asimismo, se desconoce sobre aparición y expansión de plagas y de enfermedades agrícolas que se prevén en los escenarios de cambio climático (Wilson *et al.*, 2015). Estudios específicos sobre afectación a cultivos son necesarios. Es decir, el panorama para la actividad agrícola, preferentemente monocultivo, no es alentador y se encuentra amenazada.

En cuanto a los bosques y a la producción forestal las proyecciones de cambio climático, para México, indican una importante reducción del hábitat climático propicio para los biomas de clima templado, y una expansión del hábitat climático propicio para biomas de climas cálidos y secos (Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez, 1997; Gómez-Díaz *et al.*, 2011; Rehfeldt *et al.*, 2012). Los bosques de coníferas de la Sierra Madre Occidental sufrirán una disminución en la extensión del hábitat climático propicio de un 85%, los bosques de coníferas del Eje Transvolcánico una disminución de 92%, en cambio los biomas de selva

seca decidua de Sinaloa, y los de Yucatán, tendrán una expansión de 184% y de 293%, respectivamente, en la extensión del hábitat climático propicio (Rehfeldt *et al.*, 2012). En el caso de bosques de oyamel en el centro de México (Romahn-Hernández *et al.*, 2020) se evidencia migración a zonas más elevadas, debido al cambio climático. También en bosques templados se encontró que puede haber reducción de 3.5% en la distribución potencial con posible desplazamiento hacia mayor altitud (Santos-Hernández *et al.*, 2021).

Los impactos de cambio climático sobre la ganadería van relacionados con aspectos nutricionales (disponibilidad de pastos y su contenido nutricional como resultado del incremento de temperatura y cambios en precipitación); sanitarios (presencia de plagas o enfermedades); sociales (bienestar de ganado, manejo en pastoreo libre o estabulado, precio de alimento para ganado) y ambientales (ganadería como emisores de gases de efecto invernadero), entre algunos otros. Los cambios en las condiciones actuales modificarán los coeficientes de agostadero en el futuro (Monterroso-Rivas *et al.*, 2011).

Altieri y Nicholls (2013) aseguran que los agricultores más pobres son especialmente vulnerables a los impactos del cambio climático, debido a su exposición geográfica, bajos ingresos, mayor dependencia de la agricultura para su sobrevivencia y a su limitada capacidad de adquisición de otras alternativas de vida. Ante la expectativa, el sector agrícola debe visualizar y evaluar ventajas de diversos usos de suelos más eficientes con los recursos y el espacio. Se espera resaltar el carácter multifuncional de la actividad agrícola, con el propósito de proveer más y mejores beneficios a la sociedad humana, no únicamente alimentos. Así, en los siguientes apartados se describe el papel de los sistemas agroforestales en proveer beneficios particularmente en materia de mitigación y adaptación al cambio climático.

Mitigación del cambio climático por sistemas agroforestales

Mitigación se refiere a reducir, capturar y almacenar gases efecto invernadero que se encuentran en la atmósfera de la Tierra. En materia de emisiones de gases invernadero a la atmósfera, el compromiso del país para el año 2030 es reducirlos en 22%. Para dimensionar, en el año 2015 se reportó que, durante el periodo 1990-2015, el dióxido de carbono (CO₂) emitido hacia la atmósfera se incrementó a causa de la quema de combustibles fósiles y el cambio de uso del suelo en 117.4% y 208%, respectivamente (SEMARNAT-IN-ECC, 2018). Sólo para el año 2015 la emisión neta ascendió a 503,473.80 Gg de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), de los cuales 11,340 Gg de CO₂eq corresponden a la deforestación para nuevas tierras de cultivo. El cambio de uso de suelo y los cambios en las prácticas de manejo pueden modificar de manera importante el balance de carbono (Franchioni *et al.*, 2019).

Para reducir las emisiones los esfuerzos se concentran en las fuentes industriales. Sin embargo, existe potencial en los suelos, en sus usos naturales y, particularmente, en los agroforestales. Por consiguiente, el potencial de los sistemas agroforestales para mitigar el cambio climático se encuentra en la captura de gases de efecto invernadero y en la reducción de emisiones de CO₂ por respiración del suelo (figura 1), entre otros.

La mayoría de los sistemas agroforestales (SAF) son sumideros potenciales de emisiones de gases efecto invernadero, aunque algunas prácticas (aumento de cultivos, quemas, fertilización en exceso, sobrepastoreo) pueden volverlos fuentes o emisores (Swamy y Tew-

ari, 2017). Al comparar diversos usos de suelo, de Araújo *et al.* (2019) informaron que un monocultivo de maíz emite $0.99 \mu\text{mol CO}_2 / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ y maíz intercalado con frijol $1.00 \mu\text{mol CO}_2 / \text{m}^2 \cdot \text{s}$. A su vez, Costa *et al.* (2018) evaluaron la respiración del suelo en un bosque preservado y con SAF de cacao con y sin manejo, donde encontraron que el primero emite $45.03 \text{ mg CO}_2\text{-C}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, mientras que SAF sin manejo emite hasta $125 \text{ mg CO}_2\text{-C}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ con manejo $41.8 \text{ mg CO}_2\text{-C}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$. En el contexto de cambio climático el suelo puede actuar como fuente de CO_2 o sumidero de C.

Los SAF juegan un papel decisivo en el microclima del suelo, en la disponibilidad de sustratos y en los patrones de carbono en la planta y, por lo tanto, en la salida de CO_2 del suelo a la atmósfera (Manjaiah *et al.*, 2017). Por ello, es fundamental que los usos agroforestales promuevan el mantenimiento de cobertura, así como la incorporación de materia orgánica al suelo.

Al comparar tres sistemas localizados en el centro de México con clima predominante templado se encontró que el carbono almacenado es menor en monocultivos que en sistemas agroforestales (López-Teloxa y Monterroso-Rivas, 2020a). Para el CO_2 emitido, por el contrario, se observa más en monocultivos que en sistemas agroforestales (cuadro 1). En el estudio, el sistema agrícola de monocultivo (SAM) consiste en maíz (*Zea mays*) sembrado en surcos y con sistema de riego; en el sistema forestal templado (SFT) los tipos dominantes de vegetación son los bosques *Pinus spp*, *Abies spp* y *Quercus spp*, mientras que el sotobosque está representado por pastos como *Muhlenbergia macroura*, *M. quadridentata* y *Festuca tolucensis*; y el sistema agroforestal (SAF), el cual se caracteriza por la aplicación de tecnología de cultivo en callejones con árboles frutales de *Prunus persica*, *Pyrus communis* y *Malus domestica* en el porte arbóreo. Anualmente se siembran hortalizas *Beta vulgaris sp.*, *Lactuca sativa* y *Cucurbita pepo*. Con base en lo anterior, el orden de los sistemas evaluados de acuerdo con el C almacenado en suelo es el siguiente: $\text{SFT} > \text{SAF} > \text{SAM}$, mientras que para C emitido es $\text{SFT} < \text{SAF} < \text{SAM}$, es decir, un punto intermedio que permita mayor diversidad de productos y beneficios ambientales son los sistemas agroforestales.

Cuadro 1

Comparación del balance de carbono emitido y almacenado del suelo

Uso del suelo	Época	C emitido (t/ha)	C almacenado (t/ha)			
			Profundidad (cm)			Total
			0 - 10	10 - 20	20 -30	
Sistema forestal templado	Verano	3.98	77.21	64.54	57.14	198.90
	Invierno	1.91	66.59	58.30	46.46	171.36
Sistema agroforestal	Verano	5.55	29.24	28.74	23.36	81.34
	Invierno	4.36	25.88	24.41	20.85	71.14
Sistema agrícola de monocultivo	Verano	9.28	14.94	14.99	20.39	50.31
	Invierno	3.86	21.42	21.32	24.04	66.78

SFT= Sistema forestal templado, SAF= Sistema agroforestal, SAM= Sistema agrícola de monocultivo.

Fuente: López-Teloxa y Monterroso-Rivas, 2020a.

Los SAF en general tienen el potencial de absorber y de almacenar entre 42 y 90 Pg de carbono de la atmósfera en un lapso de 50 a 100 años, así como 30-300 Mg C/ha en un suelo de 1 m de profundidad (Manjaiah *et al.*, 2017). La absorción de carbono desde el reservorio atmosférico a los reservorios terrestres se considera acumulación, por lo tanto, este proceso contribuye genuinamente a la mitigación del cambio climático (Powlson *et al.*, 2011). En el caso de México, diversos estudios muestran el potencial de almacenar carbono en sistemas agroforestales (cuadro 2). Comparados con algunos sistemas tradicionales de monocultivo, la diferencia es considerable.

Cuadro 2
Comparación de carbono orgánico almacenado por sistemas tradicionales y agroforestales

Entidad	Cultivo / Sistemas agroforestales	Carbono orgánico almacenado		Fuente
		Suelo (%)	Biomasa aérea (Mg/ha)	
Campeche, Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Tabasco, Veracruz	Maíz	4.57±4.20	SD	Mendoza <i>et al.</i> , 2003; Vergara y Etchevers, 2006; Medina <i>et al.</i> , 2006; León <i>et al.</i> , 2006; González <i>et al.</i> , 2008; Geissen <i>et al.</i> , 2009; Matus <i>et al.</i> , 2011; Bautista <i>et al.</i> , 2012; Campos, 2014; Candelaria <i>et al.</i> , 2014; Cervantes <i>et al.</i> , 2014; Ruiz <i>et al.</i> , 2015
Oaxaca	Maíz con árboles frutales	2.20*	SD	Vergara y Etchevers, 2006
Chiapas, Oaxaca, Yucatán	Milpa	3.98±2.23	18.4*	De Jong <i>et al.</i> , 1999; Shangl y Tiessen, 2003; González <i>et al.</i> , 2008; Roncal <i>et al.</i> , 2008; Matus <i>et al.</i> , 2011; Soto <i>et al.</i> , 2010
Oaxaca, Quintana Roo	Milpa con árboles	4.77±2.37	SD	González <i>et al.</i> , 2008; Flores <i>et al.</i> , 2011,
Tabasco, Guerrero	SAF con cacao	1.46*		Cervantes <i>et al.</i> , 2014; Salvador <i>et al.</i> , 2017
Chiapas	Taungya	2.89±1.64	36.7*	Roncal <i>et al.</i> , 2008; Soto <i>et al.</i> , 2010

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

Entidad	Cultivo / Sistemas agroforestales	Carbono orgánico almacenado		Fuente
		Suelo (%)	Biomasa aérea (Mg/ha)	
Campeche, Yucatán	Huerto casero con cedro	2.67*	369*	Benjamin <i>et al.</i> , 2001; Chanatásig <i>et al.</i> , 2011
Michoacán, Chiapas	Agrosilvopastoril	2.98±2.65	21.28±18.34	Villanueva-López <i>et al.</i> , 2015; Aryal <i>et al.</i> , 2019; López- Santiago <i>et al.</i> , 2019
Colima	Agrosilvopastoril cocotero- leguminosa- pasto	2.42*	128.62*	Anguiano <i>et al.</i> , 2013
Veracruz	Silvopastoril	1.9*	2.2*	Torres-Rivera <i>et al.</i> , 2011
Chiapas, Oaxaca	Café a la sombra	3.95±1.16	39.4*	Romero-Alvarado <i>et al.</i> , 2002; Vergara y Etchevers, 2006; González <i>et al.</i> , 2008; Soto <i>et al.</i> , 2010

Notas: *Se refiere a datos únicos con imposibilidad de estimar rango, y SD sin datos reportados.

Además, los SAF pueden producir una variedad de beneficios económicos, ambientales y socioeconómicos debido a que se combinan árboles o plantas leñosas perennes con cultivos, pastos y ganado (Swamy y Tewari, 2017). Otros beneficios que abonan a la regulación climática es la cobertura vegetal, que en los SAF da protección al suelo, principalmente de la erosión y regula el flujo de CO₂ del suelo o respiración del suelo (Rs) (Dowhower *et al.*, 2020), ya que controla las condiciones del microclima, la calidad física, biológica y química del suelo (Tang y Baldocchi, 2005). Aunado a lo anterior, también es sabido que un mayor contenido de C en el suelo aumenta la emisión de CO₂ (Kwak *et al.*, 2019). Factores de perturbación del suelo como la aplicación de diferentes tipos y concentraciones de fertilizante (Chi *et al.*, 2020), así como el manejo inadecuado del suelo (Zsolt *et al.*, 2020) influyen en la respiración del suelo.

Los sistemas de producción agrícola que combinan árboles entre cultivos, además de secuestrar C en la biomasa vegetal, incrementan la entrada de residuos de materia orgánica en el suelo (Gomes *et al.*, 2016). Por lo tanto, existe la necesidad de adoptar prácticas sostenibles de gestión del ecosistema para fomentar el secuestro de C en los suelos a fin de reducir la emisión de CO₂ a la atmósfera (Dhillon y Van Rees, 2016). En los primeros 30 cm de profundidad, un bosque conservado puede almacenar hasta 174.28 t C/ha, comparado contra un sistema perturbado que almacena hasta 58 t C/ha. Un sistema agrícola conserva menores cantidades de carbono en el suelo, liberando hasta 9.28 t de C/ha en la temporada de mayor temperatura, en contraste con un sistema natural (3.98

t de C/ha), por lo que un punto intermedio que permita asegurar la alimentación, pero a la vez conservar lo más posible el suelo, son los sistemas agroforestales. Incluso se estudia la posibilidad de regresar a algunas prácticas de cultivo milenarias ya que podrían contribuir en la mitigación del cambio climático y asegurar la seguridad alimentaria (Arenas, 2015).

Por otro lado, los sistemas silvopastoriles (SSP) también presentan potencial para incrementar reservorios de carbono en el sistema y favorecen las características físico-químicas del suelo por tener una mayor biomasa radicular, lo que podría reducir la compactación del suelo provocada por el pisoteo de los animales comparado con un monocultivo de pasturas (López-Santiago *et al.*, 2019). Mientras que los sistemas agro-silvopastoriles (SASP) brindan a las familias campesinas una serie de beneficios como alimentos, leña, madera, frutas y cercas vivas; también son más productivos que los monocultivos y proporcionan una serie de beneficios ambientales (Albarrán-Portillo *et al.*, 2019). López-Teloxa y Monterroso-Rivas (2020b) evaluaron el impacto sobre las emisiones de CO₂ antes, durante y después del pastoreo en un sistema agrosilvopastoril. Reportaron que las emisiones más altas se llevan a cabo después del pastoreo (emisiones de CO₂ del suelo antes, durante y después del pastoreo, 0.93, 0.61 y 1.03 g CO₂/m²·h, respectivamente), mientras que durante el pastoreo las emisiones registradas son menores.

Estos sistemas fomentan una ganadería eficiente en términos productivos y de conservación de los recursos naturales al disminuir la presión de la deforestación sobre los bosques con la finalidad de la ampliación de la frontera agrícola-ganadera y por lo tanto cumplen un papel importante en la mitigación del cambio climático (Buitrago-Guillen *et al.*, 2018). De hecho, se reporta que los sistemas silvopastoriles almacenan mayor concentración de carbono orgánico en el sistema comparado con los sistemas de pastoreo convencionales, como reportaron Torres-Rivera *et al.* (2011), quienes encontraron que un sistema silvopastoril almacena hasta 12.64 t de C/ha más que un sistema convencional de pastoreo. En todos los casos, es importante llevar a cabo un proceso selectivo de especies arbóreas y forrajeras en los sistemas silvopastoriles que permitan el incremento de carbono en la biomasa y suelo, así como también la disminución de gas metano, al mismo tiempo se mejora el desempeño productivo, su transformación y evolución a sistemas sustentables (Martínez-Hernández *et al.*, 2019; Palma *et al.*, 2019).

Gases efecto invernadero como óxidos nitrosos (N₂O) y metano (CH₄) se producen principalmente en regiones tropicales, este último proveniente de la fermentación entérica y de los cultivos de arroz. El óxido nitroso proviene, principalmente, del uso excesivo e inadecuado de fertilizantes nitrogenados en la agricultura. Ambos poseen un poder de calentamiento 28 y 265 veces más, respectivamente, en comparación con el CO₂ (Saynes *et al.*, 2016). Diferentes estudios (Moore *et al.*, 2018; Chavan *et al.*, 2020) concuerdan en que los SAF tienen la capacidad de reducir GEI como CO₂, N₂O y CH₄ y, por lo tanto, contribuir en la mitigación del cambio climático. Acuña *et al.* (2020) evaluaron las emisiones de metano y de óxido nitroso en un sistema agroforestales y en un sistema tradicional agrícola. Sus resultados reflejan que los valores más altos de N₂O se obtuvieron en un sistema tradicional de maíz (5 mg N₂O /m²·año) 25 días después de la fertilización, mientras que el SAF presentó los valores más bajos (4 mg N₂O /m²·año). Para el caso del CH₄,

el SAF actuó como sumidero de este gas, y el sistema tradicional emitió hasta 10 mg CH₄/m²·año.

Determinar ambos factores de emisiones de GEI y de carbono orgánico del suelo (COS), en diferentes sistemas, ayuda a comprender mejor su dinámica para así contribuir en la mitigación el cambio climático. Es decir, determinar qué sistemas contribuyen a almacenar mayor carbono orgánico y a reducir las pérdidas de éste a la atmósfera.

Adaptación al cambio climático en sistemas agroforestales

El mayor reto de enfrentar el cambio climático se encuentra en el diseño de estrategias de adaptación. De acuerdo con el IPCC (IPCC, 2019), adaptación ocurre en los sistemas humanos y en los naturales. En los primeros se refiere a los ajustes realizados para moderar el daño o sacar algún beneficio. En los segundos, los procesos de ajustarse al clima y sus efectos, donde la intervención humana puede facilitar los ajustes. Debido a la riqueza de biodiversidad y de las formas de producción que tienen los sistemas agroforestales, el reto es aún mayor comparado con otros sistemas. Así, adaptación en los sistemas agroforestales implica visualizar el ambiente ecológico, (principalmente en el estrato arbóreo, disponibilidad hídrica y de sanidad), así como el entorno humano (o no-ambiental) que lleva a cabo las actividades productivas (aspectos familiares, comunitarios y económicos) en las parcelas (figura 1).

Las iniciativas de adaptación que se basan en el ambiente ecológico se denominan Adaptación basada en Ecosistemas o recientemente Adaptación basada en la Naturaleza. Bajo este enfoque se trata de manejar y rehabilitar los ecosistemas para promover su resiliencia y mejorar las estructuras y funciones ecológicas que son esenciales para que los ecosistemas se adapten al cambio climático. Algunos ejemplos sobre el ambiente ecológico en los sistemas agroforestales resaltan el estudio del nicho de los principales árboles utilizados como sombra o fruto. Por ejemplo, Arce-Romero *et al.* (2017) estudiaron el nicho potencial de las ciruelas mexicanas, comúnmente utilizadas en SAF. Con escenarios de cambio climático, a nivel nacional, encontraron que para *Spondias mombin* podrá registrarse 13.3% de disminución en las zonas aptas, mientras que para *Spondias purpurea* 5.7% menos superficie apta para crecer. También, para algunas especies representativas del bosque mesófilo de montaña se aprecia que hay potencial de restricción en su distribución (López-Arce *et al.*, 2019). En ecosistemas templados los escenarios son similares (Romahn-Hernández *et al.*, 2020; Santos-Hernández *et al.*, 2021). Cabe subrayar la capacidad de los SAF para proveer servicios ecosistémicos que incluye la conservación de la biodiversidad nativa (Ruiz-García *et al.*, 2020). Los sistemas silvopastoriles (Nahed-Toral *et al.*, 2018) ofrecen captura y almacenamiento de carbono, reducen emisiones de N₂O mediante la disminución del uso de fertilizantes nitrogenados, y aumentan la fijación de nitrógeno al suelo mediante las especies leguminosas, disminuyen emisiones de gas metano al ofrecer a los animales forrajes diversos y de mejor calidad nutritiva, mayor digestibilidad y mejor patrón de fermentación ruminal.

Algunas estrategias de adaptación en sistemas agroforestales que consideren a la naturaleza, pueden ser: selección de variedades resistentes y adaptadas, cambio en las fechas de siembra, manejo de cultivo (espacio entre plantas, cobertura de cultivo), conservación y retención de agua por manejo de residuos. Además, los enfoques de agricultura

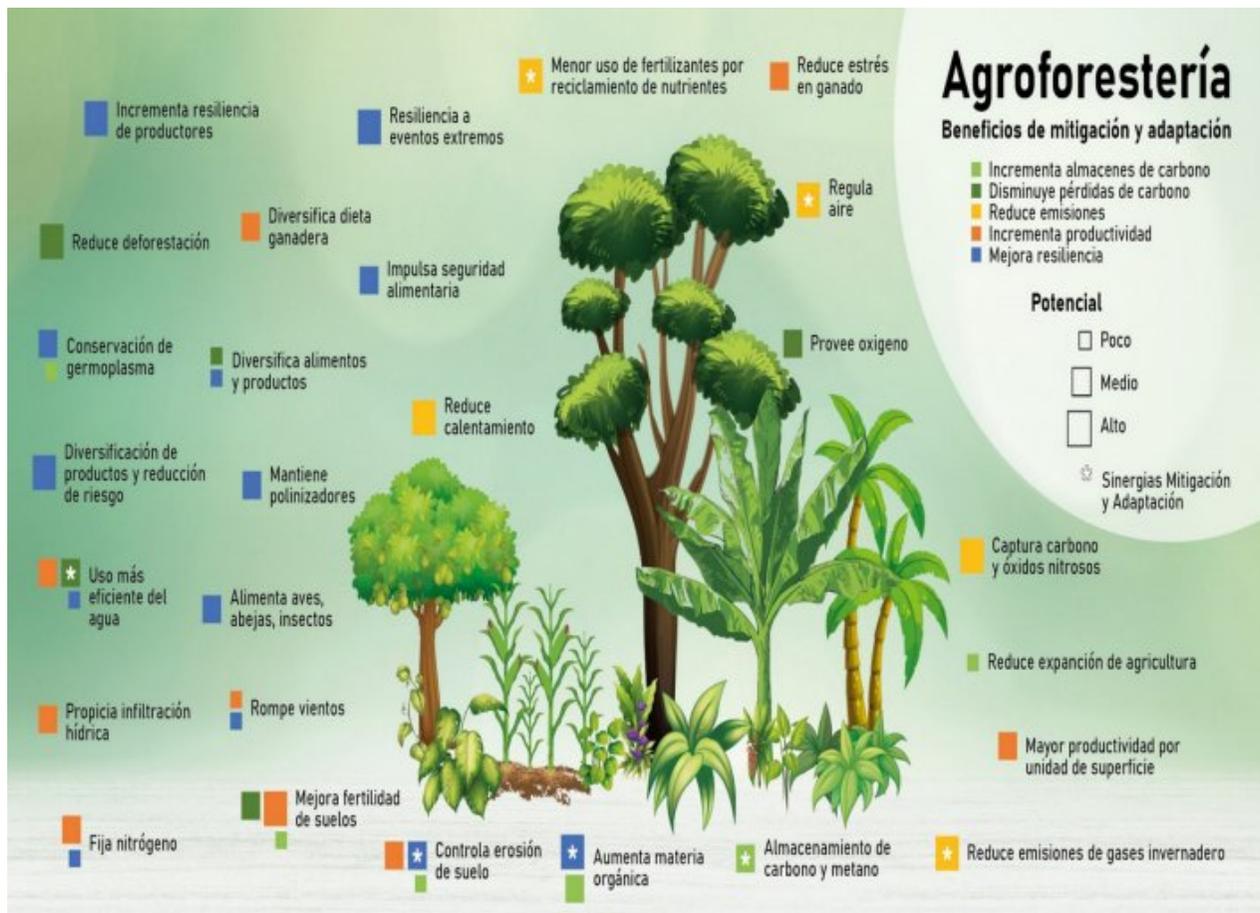
climáticamente inteligente y agricultura de precisión podrán ser considerados. Técnicas agroforestales como las barreras y árboles rompevientos, árboles fijadores de nitrógeno, árboles multipropósito o de crecimiento rápido para recuperación del suelo son algunos ejemplos.

Sobre el entorno humano los enfoques de adaptación pueden ser Adaptación basada en Comunidades o Adaptación basada en la reducción del riesgo. El primero se produce cuando las comunidades colaboran y resuelven problemas comunes, documentan e intercambian conocimientos de iniciativas de adaptación climática. Sobre el segundo, se refiere a todos los esfuerzos y acciones que se anticipan para reducir el impacto previsto. Prevención, mitigación, transferencia y estar preparados son actividades claves en este enfoque. Algunas estrategias de adaptación comprenden los sistemas de información climática y de alerta temprana frente a eventos extremos, manejo del riesgo, infraestructura para hacer frente a eventos climáticos y la organización para el fomento de nuevos productos como la venta de servicios ecosistémicos.

Los sistemas agroforestales son reconocidos por aumentar la resiliencia de las familias y sus entornos inmediatos, al proveer mayor diversidad de productos alimenticios. Técnicas agroforestales como barreras y árboles rompevientos, manejo de cobertura y productos maderables y no maderables, como el establecimiento de orquidearios, son algunos ejemplos. Es deseable que se incluya entre productores agroforestales el pronóstico climático y planeación ante escenarios de riesgo, intercambio de experiencias e incluso el uso de analogías (espaciales o temporales) para hablar de los cambios futuros.

Como se observa, adaptación puede buscar mantener en el tiempo la esencia e integridad del sistema o proceso (adaptación incremental); pero también puede fomentar cambios en los atributos socioeconómicos del sistema (adaptación transformativa) de manera anticipada (Smithers y Smit, 2009). Así, es relativamente importante conocer las exposiciones climáticas y vulnerabilidades que se manifiestan en los sistemas agroforestales para impulsar la permanencia de la actividad, o bien sugerir anticipadamente cambios en el sistema. Sin embargo, la decisión deberá ser tomada en cada caso particular y de acuerdo con las condiciones locales proyectadas, así como la decisión de los dueños de la tierra.

Figura 1
Beneficios de mitigación, adaptación y sinergias entre éstos por sistemas agroforestales



Fuente: Elaborada por los autores.

Debido a la prontitud y espontaneidad en el tipo de respuesta, la adaptación puede darse de manera *autónoma* o *planeada*; también, por el momento de respuesta podrá ser *reactiva* o *anticipada* (Smit *et al.*, 2009). Estudios como el presente libro invitan a continuar con los esfuerzos para que en los territorios con tecnologías agroforestales se impulsen respuestas de adaptación planeadas y anticipadas. El efecto que se busca es evitar acciones y consecuencias (la mayoría de las veces no intencionadas) que conlleven incrementar el riesgo, aumentar emisiones, vulnerabilidad o afectar el bienestar futuro de las personas y ecosistemas (también llamado “mala adaptación”).

Por último, es de resaltar que es posible encontrar efectos positivos de una política o medida adaptativa, para uno o varios objetivos, por ejemplo, entre mitigación y adaptación. Las *sinergias* en sistemas agroforestales pueden incrementar el total de beneficios para el ambiente y para la sociedad. De acuerdo con el IPCC (2007) las sinergias se refieren a los efectos mayores combinados en lugar de si se implementan por separado. Así, conociendo el potencial de mitigación se deberá también conocer el impacto al que se pretende adaptar la tecnología agroforestal y las capacidades de los productores para fomentar una adecuada adaptación.

Reflexión final

Los sistemas agroforestales muestran potencial para fomentar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, en México. Los impactos previstos por cambio climático cada vez se sienten más en la actividad agrícola nacional, por lo que es imperante incluirlos en las agendas políticas y de desarrollo regional. Los estudios aquí mostrados abonan a las estrategias que deben atenderse frente a cambio climático, particularmente sobre los sistemas agroforestales, sus suelos y la gente que los maneja. La producción de alimentos bajo algún sistema agroforestal mejora la resiliencia de las familias y protege la biodiversidad y los nutrientes. El suelo puede contribuir a la mitigación del cambio climático en la medida en que se conserve el carbono orgánico del mismo. Por último, es necesario un llamado a los técnicos e investigadores de las ciencias agroforestales para impulsar innovaciones agroforestales reales, que respondan tanto a las necesidades actuales como a las proyectadas con cambio climático.

Aspectos destacados

1. Las actividades agrícolas enfrentan año con año los impactos del cambio y la variabilidad climática.
2. Los sistemas agroforestales muestran potencial para mitigar el cambio climático al capturar y almacenar gases de efecto invernadero.
3. El manejo del suelo en sistemas agroforestales mejora el almacén de carbono en 25% en invierno y hasta 50% en verano, comparado con monocultivos.
4. Los sistemas agroforestales proveen mayor diversidad de productos alimenticios y mejoran la resiliencia de las familias.

Literatura citada

- Acuña, B.; Loaiza, S.; Mendoza Corrales, R.B. y Chirinda, N. (2020). Sistema agroforestal Quesungual como fuente natural de emisiones de gases de efecto invernadero en la microcuenca Tecomapa, Somotillo-Nicaragua. *La Calera*. 20(35), 1–12. <https://doi.org/10.5377/calera.v20i35.10217>
- Albarrán-Portillo, B.; García-Martínez, A.; Ortiz-Rodea, A.; Rojo-Rubio, R.; Vázquez-Armijo, J.F. y Arriaga-Jordán, C. M. (2019). Socioeconomic and productive characteristics of dual purpose farms based on agrosilvopastoral systems in subtropical highlands of central Mexico. *Agroforestry Systems*. 93: 1939–1947. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0299-2>
- Altieri, M.A. y Nicholls, C. (2008). Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas. *Agroecología*. 3: 7–28. <https://doi.org/http://revistas.um.es/agroecologia/article/view/95471>
- Altieri, M.A. y Nicholls, C.I. (2013). Agroecología y resiliencia al cambio climático: Principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología*. 8(1): 7–20. <https://doi.org/10.1300/J064v25n03>
- Anguiano, J.M.; Aguirre-Rivera, J. y Palma, J.M. (2013). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de *Cocos nucifera*, *Leucaena leucocephala* Var. *Cunningham* y *Pennisetum purpureum* Cuba CT-115. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 17(1): 149–160.
- Arce-Romero, A.; Monterroso-Rivas, A.I.; Gómez-Díaz, J.D. y Cruz-León, A. (2017). Mexican plums (*Spondias* spp.): Their current distribution and potential distribution under climate change scenarios for Mexico. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*. 23(1). <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2016.06.020>
- Arce Romero, A.; Monterroso Rivas, A.I.; Gómez Díaz, J.D.; Palacios Mendoza, M.Á.; Navarro Salas, E.N.; López Blanco, J. y Conde Álvarez, A.C. (2020). Crop yield simulations in Mexican agriculture for climate change adaptation. *Atmósfera*. 33(3): 215–231. <https://doi.org/10.20937/ATM.52430>

- Arenas Calle, L.N. (2015). Diseño de cámara estática cerrada y medición de flujos de gases de efecto invernadero (GEI) en suelos. Universidad Nacional de Colombia.
- Aryal, D.R.; Gómez-González, R.R.; Hernández-Nuriasmú, R. y Morales-Ruiz, D.E. (2019). Carbon stocks and tree diversity in scattered tree silvopastoral systems in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*. 93: 213–227. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0310-y>
- Bautista, A.; Del Castillo, R.F.; Etchevers, J.D.; Gutiérrez, M. del C. y Baez, A. (2012). Selection and interpretation of soil quality indicators for forest recovery after clearing of a tropical montane cloud forest in Mexico. *Forest Ecology and Management*. 277: 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.013>
- Benjamin, T.J.; Montañez, P.I.; Jiménez, J.J.M. y Gillespie, A.R. (2001). *Carbon, water and nutrient flux in Maya homegardens in the Yucatán peninsula of México*. Pp. 103–111.
- Buitrago-Guillen, M.E., Ospina-Daza, L.A. y Narváez-Solarte, W. (2018). Silvopastoral systems: An alternative in the mitigation and adaptation of bovine production to climate change. *Boletín Científico del Centro de Museos*. 22(1): 31–42. <https://doi.org/10.17151/bccm.2018.22.1.2>
- Campos, C.A. (2014). Trends in soil respiration on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico): Environmental contributions. *Catena*. 114: 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.010>
- Candelaria, B.; Ruiz, O.; Pérez, P.; Gallardo, F.; Vargas, L.; Martínez, Á. y Flota, C. (2014). Sustentabilidad de los agroecosistemas de la microcuenca Paso de Ovejas 1, Veracruz, México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*. 11(73): 87–104. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.CDR11-73.sdsm>
- Casanova, F.; Petit, J. y Solorio, J. (2011). Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 17(1), 133–143. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.047>
- Cervantes, V.; Gama, J.E.; Roldán, I.E. y Hernández, G. (2014). Basis for implementing restoration strategies: San Nicolás Zoyatlán social-ecological system (Guerrero, Mexico). *Terra Latinoamericana*. 32(2): 143–159.
- Chanatásig, C.; Huerta, E.; Rojas, P.; Ponce, A.; Mendoza, J.; Morón, A.; Van Der Wall, H. y Dzib, B. (2011). *Efecto del uso de suelo en las hormigas (Formicidae: Hymenoptera) de Tikinmul, Campeche, México*. Pp. 441–461.
- Chavan, S.B.; Newaj, R.; Rizvi, R.H.; Ajit.; Prasad, R., Alam, B.; Handa, A.K.; Dhyani, S.K.; Jain, A. y Tripathi, D. (2020). Reduction of global warming potential vis-à-vis greenhouse gases through traditional agroforestry systems in Rajasthan, India. En *Environment, development and sustainability*. 23: 4573–4593. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00788-w>
- Chi, Y.; Yang, P.; Ren, S.; Ma, N.; Yang, J. y Xu, Y. (2020). Effects of fertilizer types and water quality on carbon dioxide emissions from soil in wheat-maize rotations. *Science of The Total Environment*. 698(134010): 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134010>
- Costa, E.N.D. da, Landim de Souza, M.F. de, Lima Marrocos, P.C., Lobão, D. y Lopes da Silva, D.M. (2018). Soil organic matter and CO₂ fluxes in small tropical watersheds under forest and cacao agroforestry. *PLoS ONE*. 13(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200550>
- de Araújo Santos, G.A.; Moitinho, M.R.; de Oliveira Silva, B.; Xavier, C.V.; Teixeira, D.D. B.; Corá, J.E. y Júnior, N.L.S. (2019). Effects of long-term no-tillage systems with different succession cropping strategies on the variation of soil CO₂ emission. *Science of the Total Environment*. 686: 413–424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.398>
- De Jong, B.; Cairns, M.; Haggerty, P.; Ramírez, N.; Ochoa, S.; Mendoza, J.; González, M. y March, I. (1999). Land-use change and carbon flux between 1970s and 1990s in central highlands of Chiapas, Mexico. *Environmental Management*. 23(3): 373–385. <https://doi.org/10.1007/s002679900193>
- Dhillon, G.S. y Van Rees, K.C.J. (2016). Soil organic carbon sequestration by shelterbelt agroforestry systems in saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*. 97(3): 394–409. <https://doi.org/10.1139/cjss-2016-0094>
- Dowhower, S.L.; Teague, W.R.; Casey, K.D. y Daniel, R. (2020). Soil greenhouse gas emissions as impacted by soil moisture and temperature under continuous and holistic planned grazing in native tallgrass prairie. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 287(October 2019): 106647. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106647>
- FAO (2015). *Promoviendo la agroforestería en la agenda política - Una guía para tomadores de decisiones*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <http://www.fao.org/3/a-i3182s.pdf>

- Flores, L.; Fedick, S.L.; Solleiro, E.; Palacios, S.; Ortega, P.; Sedov, S. y Osuna, E. (2011). A sustainable system of a traditional precision agriculture in a Maya homegarden: Soil quality aspects. *Soil and Tillage Research*. 113(2): 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.03.001>
- Francioni, M.; D’ottavio, P.; Lai, R.; Trozzo, L.; Budimir, K.; Foresi, L.; Kishimoto-Mo, A. W.; Baldoni, N.; Allegrezza, M.; Tesei, G. y Toderi, M. (2019). Seasonal soil respiration dynamics and carbon-stock variations in mountain permanent grasslands compared to arable lands. *Agriculture (Switzerland)*. 9(8). <https://doi.org/10.3390/agriculture9080165>
- Geissen, V.; Sánchez, R.; Kampichler, C.; Ramos, R.; Sepulveda, A.; Ochoa, S.; De Jong, B. H.J.; Huerta, E. y Hernández, S. (2009). Effects of land-use change on some properties of tropical soils — An example from Southeast Mexico. *Geoderma*. 151(1): 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.011>
- GISTEMP Team (2020). *GISS Surface temperature analysis (GISTEMP v4)*. NASA Goddard Institute for Space Studies.
- Gomes, L. de C.; Cardoso, I.M.; Mendonça, E. de S.; Fernandes, R.B.A.; Lopes, V.S. y Oliveira, T.S. (2016). Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology*. 224: 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.001>
- Gómez-Díaz, J.; Monterroso-Rivas, A.; Tinoco-Rueda, J.; Toledo-Medrano, M.; Conde-Alvarez, C. y Gay-García, C. (2011). Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera*. 24(1): 31–52. <http://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/23801>
- González, L.; Etchevers, J.D. y Hidalgo, C. (2008). Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*. 42(7): 741–751.
- INECC-SEMARNAT. (2018). *Sexta comunicación nacional ante la convención de Naciones Unidas CM-NUCC*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <https://www.gob.mx/inecc/articulos/sexta-comunicacion-nacional-ante-la-cmnucc?idiom=es>
- IPCC (2007). Summary for Policymakers. En M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. Linden, y C. E. Hanson (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- IPCC (2013). IPCC Fifth Assessment Report (AR5) - The physical science basis. En IPCC. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- IPCC (2019). Annex I: Glossary. En P. R. Shukla, J. Skea, y E. Calvo (Eds.), *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. 28 p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/11/11_Annex-I-Glossary.pdf
- Kwak, J.H.; Lim, S.S.; Baah-Acheamfour, M.; Choi, W.J.; Fatemi, F.; Carlyle, C.N. Bork, E.W. y Chang, S.X. (2019). Introducing trees to agricultural lands increases greenhouse gas emission during spring thaw in Canadian agroforestry systems. *Science of the Total Environment*. 652: 800–809. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.241>
- Lal, R. (2003). Offsetting global CO₂ emissions by restoration of degraded soils and intensification of world agriculture and forestry. *Land Degradation y Development*. 14(3): 309–322. <https://doi.org/10.1002/ldr.562>
- León, J.A., Gómez, R., Hernández, S., Álvarez, J.D. y Palma, D.J. (2006). Mineralización en suelos con incorporación de residuos orgánicos en Los Altos de Chiapas, México. *Universidad y Ciencia*. 22(2): 163–174.
- López-Arce, L.; Ureta-Sánchez Cordero, C.; Granados-Sánchez, D.; Rodríguez-Esparza, L. y Monterroso-Rivas, A. (2019). Identifying cloud forest conservation areas in Mexico from the potential distribution of 19 representative species. *Heliyon*. 5(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01423>
- López-Blanco, J.; Pérez-Damián, J.L.; Conde-Álvarez, A.C.; Gómez-Díaz, J.D., y Monterroso-Rivas, A.I. (2018). Land suitability levels for rainfed maize under current conditions and climate change projections in Mexico. *Outlook on Agriculture*. 47(3): 181–191. <https://doi.org/10.1177/0030727018794973>
- López-Santiago, J.G.; Casanova-Lugo, F.; Villanueva-López, G.; Díaz-Echeverría, V.F.; Solorio-Sánchez, F.J.; Martínez-Zurimendi, P.; Aryal, D.R. y Chay-Canul, A.J. (2019). Carbon storage in a silvopastoral system compared to that in a deciduous dry forest in Michoacán, Mexico. *Agroforestry, the future of global land use*. 93: 199–211. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0259-x>

- López-Teloxa, L.C. y Monterroso-Rivas, A.I. (2020a). Estrategias de mitigación de CO₂ a partir de la respiración del suelo. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. 32(2): 30–41. <https://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.03>
- López-Teloxa, L. C. y Monterroso-Rivas, A. I. (2020b). Respiración del suelo en un sistema agrosilvopastoril en el centro de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 23(2): 1–15.
- Maldonado-Méndez, L. y Monterroso-Rivas, A.I. (2019). Capítulo 25: Panorama de la vulnerabilidad de los municipios de México ante el aumento global de 1.5 °C. En C. Rueda-Abad (ed.), *¿Aún estamos a tiempo para el 1.5 °C? Voces y visiones sobre el reporte especial del IPCC*. Pp. 18. UNAM-PINCC. www.pincc-unam.mx
- Manjaiah, K.M.; Sandeep, S.; Ramesh, T. y Mayadevi, M.R. (2017). Soil Organic Carbon Stocks Under Different Agroforestry Systems of North-Eastern Regions of India. En J. Chander Dagar y V. Prasad Tewari (eds.), *Agroforestry*. Pp. 299–316.
- Martínez-Hernández, P.A.; Cortés-Díaz, E.; Purroy-Vásquez, R.; Palma-García, J.M.; Pozo-Rodríguez, P.P. Del, y Vite-Cristóbal, C. (2019). *Leucaena leucocephala* (lam.) de Wit especie clave para una producción bovina sostenible en el trópico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 22: 331–357.
- Matus, F., Hidalgo, C., Monreal, C., Estrada, I., Fuentes, M. y Etchevers, J. (2011). *Land use impacts on physical-based soil organic matter Fractions on three hillside Ferrasols in Mexico*. 71(June): 283–292.
- Medina, J., Volke, V., González, J., Galvis, A., Santiago, M. y Cortés, J. (2006). Cambios en las propiedades físicas del suelo a través del tiempo en los sistemas de maíz bajo temporal y mango bajo riego en luvisoles del estado de Campeche. *Universidad y Ciencia*. 22(2): 175-189.
- Mendoza, J., Karlun, E. y Olsson, M. (2003). Estimations of amounts of soil organic carbon and fine root carbon in land use and land cover classes, and soil types of Chiapas highlands, Mexico. *Forest Ecology and Management*. 177(1–3): 191–206. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00439-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00439-5)
- Monterroso-Rivas, A.; Gómez-Díaz, J.; Toledo-Medrano, M.; Tinoco-Rueda, J.; Conde, C. y Gay, C. (2011). Simulated dynamics of net primary productivity (NPP) for outdoor livestock feeding coefficients driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera*. 24(1): 69–88. <http://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/23803>
- Monterroso-Rivas, A.I.; Conde-Álvarez, A.C.; Pérez-Damian, J.L.; López-Blanco, J.; Gaytan-Dimas, M. y Gómez-Díaz, J.D. (2018). Multi-temporal assessment of vulnerability to climate change: insights from the agricultural sector in Mexico. *Climatic Change*. 147(3–4): 457–473. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2157-7>
- Monterroso-Rivas, A.I. y Gómez-Díaz, J.D. (2021). Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*. 39(e774), 1–19. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.774>
- Monterroso Rivas, A.; Gómez Díaz, J.; Sáenz Romero, C.; Emilio Lluch Cota, S.; Pérez Espejo, R.; Javier Salvadeo, C.; Lluch Cota, D.; Saldívar Lucio, R.; Ponce Díaz, G.; Martínez Córdova, C.; Ramírez García, G. y Baca del Moral, J. (2015). Capítulo 5. Sistemas de producción de alimentos y seguridad alimentaria. En C. Gay García y J. Rueda Abad (eds.), *Reporte Mexicano de Cambio Climático: Grupo II, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación* (pp. 97–118). UNAM-PINCC.
- Moore, B.D.; Kaur, G.; Motavalli, P.P.; Zurweller, B.A., y Svoma, B.M. (2018). Soil greenhouse gas emissions from agroforestry and other land uses under different moisture regimes in lower Missouri River Floodplain soils: a laboratory approach. *Agroforestry Systems*. 92(2): 335–348. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0083-8>
- Nahed-Toral, J.; Guevara-Hernández, F.; Palma-García, J.M.; López-Tecpoyotl, Z.G.; Sánchez-Muñoz, J.B.; Ruiz-Rojas, J.L.; Aguilar-Jiménez, J.R. y Parra-Vázquez, M.R. (2018). Innovación para el desarrollo sustentable de la ganadería mediante sistemas silvopastoriles y producción orgánica en la frontera sur. En R. García Ochoa y J. L. León-Cortés (eds.), *Norte-sur: Diálogos de frontera*. Pp. 103–133.
- Palma, J.M.; Zorrilla, J.M. y Nahed, J. (2019). Integración de especies arbóreas con residuales agrícolas y agroindustriales en la generación de sistemas ganaderos resilientes. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 53(1): 73–90.
- Powlson, D.S.; Whitmore, A.P. y Goulding, K.W.T. (2011). Soil carbon sequestration to mitigate climate change: A critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science*. 62(1): 42–55. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x>

- Rehfeldt, G.; Crookston, N.; Sáenz-Romero, C. y Campbell, E. (2012). North American vegetation model for land use planning in a changing climate: A statistical solution to large classification problems. *Ecological Applications*. 22(1): 119–141.
- Romahn-Hernández, L.F.; Rodríguez-Trejo, D.A.; Villanueva-Morales, A.; Monterroso-Rivas, A.I. y Pérez-Hernández, M.D.J. (2020). Rango altitudinal: factor de vigor forestal y determinante en la regeneración natural del oyamel. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*. 8(22). <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2020.22.72751>
- Romero-Alvarado, Y.; Soto-Pinto, L.; García-Barrios, L. y Barrera-Gaytán, J. F. (2002). Coffee yields and soil nutrients under the shades of Inga sp. vs. multiple species in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*. 54: 215–224.
- Roncal, S.M.; Soto, L.; Castellanos, J.; Ramírez, N. y De Jong, B. (2008). Sistemas agroforestales y almacenamiento de Carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia*. 33(3): 200–206.
- Ruiz-García, P.; Gómez-Díaz, J.D.; Valdes-Velarde, E. y Monterroso-Rivas, A.I. (2020). Sistemas agroforestales de café como alternativa de producción sustentable para pequeños productores de México. *Ra Ximhai*. 16(4): 137–158. <https://doi.org/10.35197/rx.16.04.2020.07.pr>
- Ruiz, J.; Mena, N.; Diego, F. y Herrera, M. (2015). Productivity and energy efficiency of three tillage systems for maize (*Zea mays* L.) production. *Revista Facultad de Ingeniería*. 76: 66-72. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n76a08>
- Salvador, P.; Salvador, R.; Sánchez, D.; López, U.; Alejo, G.; Valdés, E. y Gallardo, J.F. (2017). Evolution of soil organic carbon during a chronosequence of transformation from cacao (*Theobroma cacao* L.) plantation to grassland. *Acta Agronómica*. 66(4): 525–530. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n4.62543>
- Santos-Hernández, A.F.; Monterroso-Rivas, A.I.; Granados-Sánchez, D.; Villanueva-Morales, A. y Santacruz-Carrillo, M. (2021). Projections for Mexico's tropical rainforests considering ecological niche and climate change. *Forests*. 12(2): 1–17. <https://doi.org/10.3390/f12020119>
- Saynes, V.; Etchevers, J.D.; Paz, F. y Alvarado, L.O. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*. 34(1): 83–96.
- SEMARNAT-INECC (2018). Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático. En SEMARNAT.
- SEMARNAT (2014a). *Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/162974/2015_indc_esp.pdf
- SEMARNAT (2014b). Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018 (PECC). *Diario Oficial de la Federación, DCCXXVII*(28 abril 2014). 151 p.
- SEMARNAT (2020). Contribución Determinada a nivel Nacional: México. Versión actualizada 2020. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Shangl, C. y Tiessen, H. (2003). Soil Organic C Sequestration and Stabilization in Karstic Soils of Yucatan. *Biogeochemistry*. 62(2): 177–196.
- Smit, B.; Burton, I.; Klein, R. y Wandel, J. (2009). An anatomy of adaptation to climate change and variability. En L. Schipper y I. Burton (eds.), *The Earthscan reader on adaptation to climate change*. 450 p. The Earthscan Reader.
- Smithers, J. y Smit, B. (2009). Human adaptation to climatic variability and change. En L. Schipper y I. Burton (Eds.), *The Earthscan Reader on Adaptation to climate change*. 450 p. The EarthscanReader.
- Soto, L.; Anzueto, M.; Mendoza, J.; Jimenez, G. y De Jong, B. (2010). Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*. 78(1): 39–51. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9247-5>
- Swamy, S.L. y Tewari, V.P. (2017). Mitigation and Adaptation Strategies to Climate Change Through Agroforestry Practices in the Tropics. En J. Chander Dagar y V. Prasad Tewari (eds.), *Agroforestry* (pp. 725–738).
- Tang, J. y Baldocchi, D.D. (2005). Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components. *Biogeochemistry*, 73(1), 183–207. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-5889-6>
- Torres-Rivera, J.A.; Espinoza-Domínguez, W.; Reddiar-Krishnamurthy, L. y Vázquez-Alarcón, A. (2011). Secuestro de carbono en potreros arbolados, potreros sin árboles y bosque caducifolio de Huatusco, Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 13(3): 543–549.

- Vergara, M.A. y Etchevers, J.D. (2006). Relación entre el uso de la tierra y su fertilidad en las laderas de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*. 40(5): 557–567.
- Villanueva-López, G.; Martínez-Zurimendi, P.; Casanova-Lugo, F.; Ramírez-Avilés, L. y Montanez-Escalona, P. I. (2015). Carbon storage in livestock systems with and without live fences of *Gliricidia sepium* in the humid tropics of Mexico. *Agroforestry Systems*. 89: 1083–1096. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9836-4>
- Villers-Ruiz, L. y Trejo-Vazquez, I. (1997). Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. *Climate Research*. 9: 87–93.
- Wilson, M.J.; Digweed, A.J.; Brown, J.; Ivanonva, E.S. y Hapca, S. H. (2015). Invasive slug pests and their parasites - temperature responses and potential implications of climate change. *Biol Fertil Soils*. 51: 739–748. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1022-3>
- Zsolt, S.; Tállai, M.; Kincses, I.; László, Z.; Kátai, J. y Vágó, I. (2020). Effect of various soil cultivation methods on some microbial soil properties. *DRC Sustainable Future: Journal of Environment, Agriculture, and Energy*. 1(1): 14–20. <https://doi.org/10.37281/drcsf/1.1.3>

II. Adaptación-tecnologías agrosilvopastoriles

II.1. Adaptabilidad de ganaderos de Chiapas, México, frente a cambios socioambientales: perspectivas para la implementación de tecnologías agroforestales

José Roberto Aguilar-Jiménez¹
Francisco Guevara-Hernández^{2*}
José Nahed-Toral³
Carlos Ernesto Aguilar-Jiménez²
Lucio Alberto Pat-Fernández³
Ingrid Abril Valdivieso-Pérez³
Romeo Josué Trujillo-Vázquez³
Manuel Roberto Parra-Vázquez³

¹Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Campus II.

²Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad de Ciencias Agronómicas, Campus V.

³El Colegio de La Frontera Sur

*Autor de correspondencia: francisco.guevara@unach.mx

Introducción

Los ganaderos de Chiapas, al igual que los de otras regiones, enfrentan cambios socioambientales en el tiempo y en el espacio manifestados en una serie de perturbaciones que, por lo general, actúan de forma simultánea, tales como las variaciones anuales en los patrones de precipitación y temperatura, eventos climáticos extremos, volatilidad de los precios de los productos e insumos, regulaciones en el acceso y uso de los recursos naturales, entre otros, cuya frecuencia y severidad probablemente se incrementen en el futuro (Eakin y Lemos, 2010), que conducen a pérdida de sostenibilidad. Frente a ello, y con la finalidad de sostener sus modos de vida, los productores comúnmente despliegan mecanismos de respuesta que se entienden como reacciones, o bien, como estrategias de adaptación (Speelman *et al.*, 2014).

Una reacción es una respuesta efectiva en el corto plazo, cuyo objetivo es soportar los impactos de una determinada perturbación, pese a que la respuesta no reduzca la vulnerabilidad del sistema en el largo plazo en caso de una nueva exposición frente a la misma u otras amenazas. Por su parte, las estrategias de adaptación representan cambios en las prácticas que reducen la vulnerabilidad frente a futuras exposiciones y amenazas, por lo tanto, son efectivas en el largo plazo (Vincent *et al.*, 2013). Algunos ejemplos de reacción incluyen la migración temporal, el incremento de fuentes de ingreso no agrícola, o la venta de activos (como el ganado) para solventar una emergencia. Las estrategias de adaptación incluyen el fortalecimiento de las redes sociales, la re-orientación de la pro-

ducción agrícola, el manejo sustentable de la tierra, el mejoramiento de la infraestructura, el fortalecimiento de las estructuras de organización locales, la diversificación de los sistemas de producción, entre otras (Saldaña-Zorrilla, 2008; Speelman *et al.*, 2014).

La mayoría de estudios de adaptación no distinguen claramente entre reacción y estrategias de adaptación, y típicamente se enfocan en evaluar las respuestas de los productores frente a un solo tipo de perturbación (por ejemplo, el cambio climático) más allá de explorar sus respuestas frente a múltiples perturbaciones (Pischke *et al.*, 2018). La adaptabilidad o capacidad adaptativa de un sistema es la base para transitar de las respuestas tipo reacción al desarrollo de estrategias de adaptación, y se define como la habilidad de los individuos o comunidades para modificar el manejo de recursos naturales en una forma sostenible, en respuesta a presiones o conductores de cambios actuales o esperados (Armitage, 2005). En este sentido la capacidad adaptativa influye positivamente en el sistema ya que reduce su vulnerabilidad y aumenta su resiliencia (Engle, 2011).

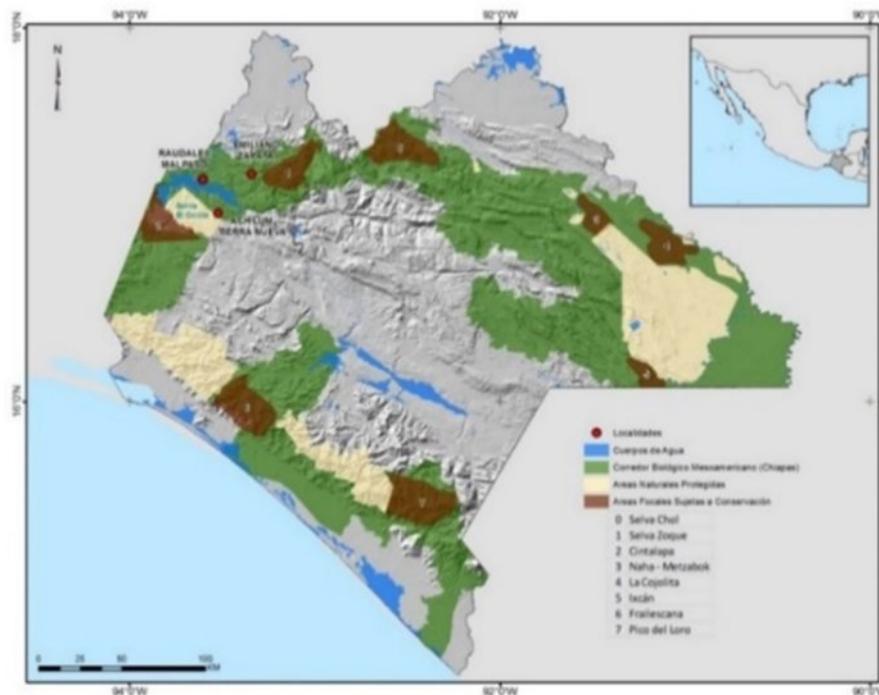
En este capítulo se analiza la adaptabilidad de ganaderos ubicados en una región montañosa del noroeste de Chiapas, México, frente a cambios socioambientales, mediante el análisis de sus mecanismos de respuesta (reacción o estrategias de adaptación) y la evaluación de sus recursos base o capitales. Posteriormente, se describen las innovaciones (con tecnologías agroforestales) en el sistema agrosilvopastoril tradicional, las cuales son estrategias de adaptación que facilitan la transición de la ganadería convencional hacia la ganadería orgánica sostenible en la región, y se discuten algunos factores que favorecen o que limitan su implementación.

Aspectos metodológicos

Área de estudio

El área de estudio (figura 1) se ubica en el noroeste del estado de Chiapas, México, entre las coordenadas 93° 15' 39" y 93° 37' 38" de longitud oeste y 16° 55' 59" y 17° 16' 1" de latitud norte, y forma parte de la cuenca media del río Grijalva y del corredor biológico mesoamericano. El estudio incluyó a ganaderos orgánicos y convencionales del ejido Emiliano Zapata (perteneciente al municipio de Tecpatán) y de Raudales Malpaso (perteneciente al municipio de Mezcalapa, Chiapas).

Figura 1
Localización del área de estudio en la región
noroeste de Chiapas, México



Fuente: Laboratorio de análisis de información geográfica y estadística de El Colegio de La Frontera Sur.

El territorio que ocupan los municipios de Tecpatán y de Mezcalapa tiene una altitud promedio de 320 msnm, y una topografía accidentada en su mayor parte. El tipo de suelo predominante es luvisol. El pH de los suelos es de 5.1 a 6.4. El clima es cálido húmedo con lluvias todo el año en el norte del territorio y cálido húmedo con abundantes lluvias en verano hacia el sur. La temperatura media anual es de 25 °C y la precipitación pluvial de 1932 mm anuales. Este territorio cuenta con una amplia red hidrográfica, la más importante es el río Grijalva que conforma el embalse de la presa hidroeléctrica Nezahualcóyotl (Vázquez, 2000).

Mecanismos de respuesta frente a múltiples perturbaciones

Las principales perturbaciones asociadas a cambios socioambientales y que los productores de la región enfrentan se identificaron mediante revisión de fuentes de información secundaria, entrevistas con informantes clave, y la aplicación de cuestionarios a los productores para conocer su percepción sobre el tema.

Una vez que las principales perturbaciones fueron identificadas, se analizaron las respuestas de los productores frente a ellas con base en dos criterios: (1) el tipo de perturbación que desencadenó la respuesta (pasado, presente o esperado); y (2) el objetivo de la respuesta. Las respuestas que se desencadenaron por perturbaciones pasadas o presentes y que sólo buscaron amortiguar los efectos de esas perturbaciones fueron consideradas como reacciones. En cambio, las respuestas que además de lo anterior consideraron también perturbaciones esperadas a futuro y cuyo objetivo fue desarrollar

sistemas resilientes y sostenibles frente a múltiples perturbaciones fueron categorizadas como estrategias de adaptación.

Evaluación de la adaptabilidad de los ganaderos frente a múltiples perturbaciones

La evaluación de la adaptabilidad o capacidad adaptativa se realizó de forma comparativa entre las dos trayectorias ganaderas principales que existen en la región: ganadería convencional y ganadería orgánica. La adaptabilidad se evaluó mediante el análisis de las dinámicas entre perturbaciones y respuestas, y a través de un marco de evaluación basado en capitales o recursos (adaptado de Eakin y Lemos, 2006). Las variables se agruparon en capital natural, físico, financiero, social y humano, tal como se realizó en otros estudios similares que abordan los temas de adaptabilidad y resiliencia en sistemas campesinos (Kusters *et al.*, 2006; Speelman *et al.*, 2014; Quandt, 2018).

Al inicio del estudio se realizaron dos reuniones con ganaderos orgánicos y convencionales de las Sociedades de Producción Rural (SPR) La Pomarroza y Grupo Malpaso, pertenecientes a las comunidades de Emiliano Zapata y Raudales Malpaso, respectivamente. Como resultado de las reuniones se incluyeron a todos los productores orgánicos (n=21) certificados por la agencia de certificación de productos y procesos ecológicos (CERTIMEX) y 14 productores convencionales con disposición de colaborar en el estudio. La información se obtuvo mediante la observación directa en campo y la aplicación de cuestionarios a todos los productores.

Análisis estadístico de la información

La información fue sistematizada y analizada estadísticamente en el programa SPSS versión 15.0 (Statistical Package for Social Sciences; SPSS, 2006)

Para presentar los resultados se utilizaron herramientas tabulares de estadística descriptiva. En el análisis de adaptabilidad se realizó un contraste de medias entre productores convencionales y orgánicos mediante la prueba de t de Student para variables con distribución normal y mediante la prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney para variables que no presentaron distribución normal.

Cambios y perturbaciones socioambientales en la ganadería del noroeste de Chiapas

Los cambios socioambientales que inciden en los modos de vida de los ganaderos del noroeste de Chiapas se manifiestan en distintos tipos de perturbaciones que comúnmente actúan de forma simultánea. En el presente estudio, las principales perturbaciones señaladas por los productores fueron dos de tipo ambiental (lluvias excesivas y enfermedades del ganado) y una socioeconómica (dificultades de mercado).

Perturbaciones de tipo ambiental

Al igual que en otras regiones de América Latina (Magrin *et al.*, 2007), en México y particularmente en las comunidades rurales de la cuenca Grijalva-Usumacinta (cuenca en la que se encuentra la región de estudio) se pronostica una disminución en las precipitacio-

nes y un aumento de los eventos climáticos extremos (Enríquez *et al.*, 2016). En Chiapas se observa un incremento en la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos, como los huracanes y las lluvias extremas, deslizamientos e inundaciones (Ramos y Morales, 2010). En la región de estudio el 85% de los productores evaluados señaló que perciben un aumento gradual de la temperatura en los últimos años.

En cuanto a las precipitaciones, 80% de los productores menciona que no experimentan sequías críticas como ocurre comúnmente en las regiones tropicales secas. Por el contrario, una importante proporción de productores (82%) señaló que en la región de estudio las lluvias excesivas asociadas a eventos climáticos temporales (huracanes, tormentas tropicales) afectan el crecimiento del pasto, aumentan la incidencia de enfermedades en los animales, se reduce el consumo voluntario y en consecuencia disminuyen los niveles de producción animal, además se dificulta la higiene e inocuidad en la ordeña en aquellas unidades de producción sin instalaciones adecuadas para ello.

De acuerdo con los productores, los eventos climáticos asociados con lluvias excesivas comúnmente deterioran las vías de comunicación, lo cual dificulta el transporte y comercialización de los productos, además de que implica mayor carga de trabajo comunitario para la reducción de riesgos por inundaciones o deslaves.

La mayoría de los productores evaluados (95%) señaló también la presencia de enfermedades del ganado bovino como una perturbación ambiental importante. De acuerdo con el reporte más reciente de la SAGARPA (2018), el estado de Chiapas se encuentra en fase de erradicación de la tuberculosis. En cuanto a la brucelosis, rabia paralítica bovina (derriengue), e infestaciones por garrapatas, la mayor parte del estado se encuentra aún en la fase de control. El control y erradicación de estas cuatro enfermedades del ganado bovino es importante debido a su carácter zoonótico y a su impacto en la productividad ganadera. Los productores reconocen que la presencia de estas enfermedades representa un riesgo para la salud de las familias ganaderas y en general para la salud pública, disminuye los niveles de producción, reduce la calidad de la leche y por ende afecta negativamente la comercialización, los ingresos familiares, y a nivel de las organizaciones productivas es un factor que las debilita.

Perturbaciones de tipo socioeconómico

Los cambios en la política agraria de México dirigida inicialmente a la autosuficiencia alimentaria y a la protección de los productores, y luego hacia la implementación de políticas neoliberales orientadas a la apertura del mercado generaron una crisis en la producción agrícola, particularmente del maíz (Appendini, 2014). A partir de ello el gobierno incentivó fuertemente la ganadería bovina. Bajo el mismo contexto de políticas neoliberales, los precios de los productos ganaderos también están sujetos a los precios internacionales. Así mismo, la globalización del agronegocio generó que las grandes corporaciones controlen en gran parte de los procesos ganaderos, desde la producción a nivel agroecosistema hasta la transformación y comercialización de los productos, que afecta principalmente a los productores más pobres.

De acuerdo con los productores de la región de estudio, para la comercialización de ganado bovino históricamente los intermediarios controlan el precio del ganado bovino, el cual comúnmente se determina por el peso y la raza. Los intermediarios ofrecen un

precio más alto por kilogramo de peso vivo en animales cuyo peso es inferior a los 200 kg. En cuanto a la raza, estos ofrecen un mejor precio por los animales de raza pardo suizo o simmental en comparación con los animales de razas cebuinas o de biotipo criollo (Orantes *et al.*, 2014).

En cuanto a la producción de leche, la mayoría de productores de la región de estudio dependieron por varios años de la venta de la leche a las empresas Nestlé y Pradel (de 1990 a 2005). La mayoría de productores señaló que generan dificultades en las relaciones comerciales con este tipo de empresas, tales como recibir precios bajos por su producto, retraso en los pagos, y alta exigencia en cuanto a la calidad de la leche.

Otro mercado importante para ofertar la leche está controlado por queseros locales y regionales. Los productores consideran que el precio que pagan los queseros por su producto es bajo, y que este precio se reduce cuando la oferta de leche es mayor, la cual generalmente coincide con la temporada de máxima precipitación pluvial y disponibilidad de forraje en la región.

Los productores señalan que las dificultades de mercado no son completamente superadas mediante las organizaciones productivas, las cuales presentan conflictos en su interior y propicia que estas sean efímeras, lo que a su vez conduce a que reciban menor atención institucional.

En la región de estudio, la leche, los animales en pie y la carne se vendían usualmente como productos convencionales; sin embargo, en años recientes los productores que lograron certificar su producción como orgánica, venden quesos artesanales en mercados especializados; sin embargo, los animales en pie y la carne aún se venden como productos convencionales (Nahed *et al.*, 2013a).

Mecanismos de respuesta de los ganaderos del noroeste de Chiapas frente a perturbaciones socioambientales

En el cuadro 1 se presentan las principales respuestas de los productores frente a las perturbaciones socioambientales identificadas en la región de estudio.

En cuanto a las enfermedades del ganado, los productores responden con un mecanismo de reacción y con tres estrategias de adaptación. Particularmente, frente a los problemas ocasionados por la presencia de garrapatas en los potreros, los productores aumentan el uso de desparasitantes externos de síntesis química, lo cual es un mecanismo de reacción poco sostenible debido a: (i) el costo del producto por sí mismo, (ii) ineficacias en el uso de los productos, (iii) desarrollo de resistencia de los parásitos a los desparasitantes utilizados, (iv) residuos de desparasitante en carne y en leche, (v) daños al medioambiente, y (vi) riesgos a la salud pública (Benavides *et al.*, 2016). En contraste, el uso de razas mejor adaptadas a las condiciones ambientales de la región como el biotipo cebuino (*Bos indicus*) es una estrategia de adaptación frente a las condiciones climáticas tropicales, que permite aumentar la resistencia del hato frente a garrapatas y otras enfermedades. Así mismo, la implementación de esquemas de vacunación apropiados en el hato y la participación de los productores en las campañas nacionales de control y erradicación de las enfermedades más importantes, son estrategias de adaptación con implicaciones positivas en la salud del hato, y en consecuencia favorecen la salud pública, la comercialización de los productos y la sostenibilidad.

Cuadro 1
Mecanismos de respuesta de productores de ganado bovino del noroeste de Chiapas, México, frente a múltiples perturbaciones

Tipo de perturbación	Respuesta	Tipo de respuesta
Enfermedades del ganado	Mayor uso de medicamentos	Reacción
	Uso de razas bovinas más adaptadas	Adaptación
	Aplicación de esquemas de vacunación apropiados	Adaptación
	Participación en campañas nacionales de control de enfermedades	Adaptación
Lluvias excesivas	Uso de instalaciones apropiadas	Adaptación
	Compra de forraje externo	Reacción
	Renta de potreros	Reacción
	Venta de ganado	Reacción
	Bancos forrajeros con pasto de corte	Adaptación
	Sistemas silvopastoriles	Adaptación
Dificultades de mercado	Venta de leche a queseros locales y regionales	Reacción
	Elaboración artesanal de queso y venta local	Adaptación
	Ganadería orgánica	Adaptación

Fuente: Elaboración propia con base en información obtenida en el estudio.

A nivel del hato, las estrategias de adaptación frente a las enfermedades del ganado tienen como finalidad favorecer la tasa de natalidad y la tasa de animales destetados, lo cual está directamente relacionado con una baja tasa de mortalidad de becerros, que a su vez conduce a una relación más equilibrada entre animales de desecho y de reemplazo en el hato.

Por otro lado, los productores identifican que las lluvias intensas en la región dificultan el manejo apropiado del ganado, la higiene y la inocuidad de la ordeña. Frente a este tipo de perturbación los productores señalaron tres mecanismos de reacción y tres estrategias de adaptación. El uso de instalaciones apropiadas para contrarrestar los efectos de las lluvias (corrales de manejo, salas de ordeña techadas y con piso de concreto) es una estrategia de adaptación de mediano y de largo plazo que favorece el bienestar animal y la inocuidad en la ordeña. Sin embargo, esta estrategia requiere una inversión financiera por parte de los productores, por lo que resulta difícil implementarla por aquellos que tienen menos recursos.

De acuerdo con los productores, los eventos climáticos con lluvias tienen efecto negativo en la disponibilidad de pasto en los potreros. Frente a ello los productores suelen recurrir a la compra de forraje externo y/o a la renta temporal de potreros. Estas respuestas se consideran mecanismos de reacción puesto que solucionan el requerimiento de forraje para los animales en el corto plazo; sin embargo, estas acciones incrementan el costo de producción y en consecuencia se reduce el margen de ganancia. En otros casos, cuando

los productores carecen de recursos para la compra de forraje externo o para la renta temporal de potreros en épocas de crisis, recurren a la venta de sus animales, mecanismo de reacción mediante el cual reducen riesgos de pérdidas en la unidad de producción ganadera (UPG).

Por otra parte, algunos productores de la región responden frente a la falta de forraje con estrategias de adaptación tales como el establecimiento de bancos forrajeros con pasto de corte y la implementación de técnicas agroforestales, particularmente distintas modalidades de sistemas silvopastoriles. En la última parte del capítulo se describen con más detalle estas técnicas.

En cuanto a las dificultades de mercado, para superar las limitantes en la comercialización de leche con empresas acopiadoras nacionales y transnacionales, la mayoría de productores vende actualmente este producto a queseros locales y regionales, quienes comúnmente tienen menor exigencia en cuanto a calidad. Sin embargo, los productores señalan que el precio recibido por la venta de leche a queseros locales y regionales no mejoró con respecto al precio que recibían anteriormente. El precio de la leche varía de acuerdo con la oferta y la demanda, es decir en temporadas de alta producción el precio de la leche baja, y en temporadas de menor producción el precio es ligeramente más alto. Por otra parte, algunos productores optan por la elaboración artesanal de distintos tipos de queso para venta local. En esta estrategia de adaptación los productores generan un pequeño valor agregado a la leche, con beneficio económico para la familia.

Finalmente, la ganadería orgánica surge como una estrategia de adaptación para hacer frente a las dificultades de mercado, para competir por calidad de los productos. Además, esta forma de producción incluye entre sus bondades beneficios ecológicos, promueve el bienestar animal y la salud de productores y de consumidores, además de la comercialización de los productos en mercados más justos. Los productores orgánicos tienen la oportunidad de vender sus productos artesanales en tianguis de productos orgánicos y agroecológicos regionales.

En el análisis de las dinámicas entre perturbaciones y respuestas se diferencian dos grandes trayectorias: (I) la ganadería convencional, y (II) la ganadería orgánica. En la siguiente sección se analiza comparativamente la adaptabilidad en ambos casos.

Adaptabilidad de los ganaderos del noroeste de Chiapas frente a cambios socioambientales

La adaptabilidad o capacidad adaptativa depende en gran medida de la base de recursos (capitales) y del acceso efectivo a ellos. Aunque la base de recursos o capitales por sí sola no es un indicador de adaptabilidad, ésta contribuye a su desarrollo. La evaluación de la base de recursos o capitales permite identificar aspectos clave en el proceso de construcción de adaptabilidad y resiliencia, al aportar información valiosa para la toma de decisiones (Quandt, 2018).

En el cuadro 2 se presenta la base de recursos o capitales de los grupos de ganaderos orgánicos y convencionales. En el capital natural los productores orgánicos poseen mayor ($p \leq 0.01$) superficie total de tierra, y mayor ($p \leq 0.05$) superficie de pastizal en comparación con los ganaderos convencionales. En cuanto a tipos de pastizales, los productores orgánicos destacan por tener mayor ($p \leq 0.01$) proporción de pastizal con árboles dispersos

respecto a los productores convencionales, quienes presentan mayor ($p \leq 0.01$) proporción de pastizal abierto (sin árboles) en sus UPG. Los productores orgánicos cuentan también con mayor ($p \leq 0.01$) diversidad (número de especies) de árboles forrajeros. Otro indicador de calidad del capital natural es la presencia de parches de bosque y acahual, el cual fue mayor ($p \leq 0.05$) en el grupo de productores orgánicos, quienes tienen mayor proporción de tierra con este tipo de vegetación dentro de sus UPG. Así mismo, en comparación con los ganaderos convencionales, los ganaderos orgánicos han reforestado mayor ($p \leq 0.01$) superficie dentro de sus UPG en los últimos seis años. En el indicador cultivo de leñosas forrajeras no se observó diferencia significativa entre los dos grupos evaluados.

En el capital físico, pese a las tendencias observadas (cuadro 2) ninguna de las tres variables evaluadas mostró diferencia estadística entre los dos grupos ($p \leq 0.05$).

En el capital financiero los productores orgánicos obtuvieron valores promedio más altos ($p \leq 0.01$) en tres de los cuatro indicadores evaluados. Los productores orgánicos cuentan con mayor ($p \leq 0.01$) superficie de tierra, mayor ($p \leq 0.01$) número de unidades animal, y también obtienen el mayor ($p \leq 0.01$) ingreso total anual en la unidad familiar en comparación con los productores convencionales. El número de productos ganaderos obtenidos en la unidad de producción (animales en pie, leche, y distintos tipos de queso) no difirió significativamente entre ambos grupos evaluados.

Cuadro 2

VARIABLES QUE INTEGRAN LA BASE DE RECURSOS O CAPITALES DE DOS TIPOS DE GANADEROS DEL NORESTE DE CHIAPAS, MÉXICO

	Trayectoria ganadera		CV (%)	Valor de P
	Ganaderos convencionales (n=14)	Ganaderos orgánicos (n=21)		
Capital natural				
Superficie total de tierra (ha)	30.7±3.6	45.9±6.5	65.2	0.01
Superficie total de pastizal (ha)	26.0±6.1	40.4±3.8	69.5	0.05
Pastizal abierto (%)	86.6±12.4	54.6±7.8	60.5	0.01
Pastizal con árboles dispersos (%)	13.4±12.4	45.4±8.0	106.0	0.01
Diversidad de especies árboles forrajeros (No)	2.1±0.2	2.9±0.2	34.6	0.01
Proporción de tierra con bosque y acahual (%)	4.7±2.5	10.3±2.6	137.5	0.05
Superficie reforestada últimos 6 años (ha)	2.5±0.7	16.3±4.2	187.2	0.01
Cultiva leñosas forrajeras (% de productores)	75.0±10.5	85.7±7.8	46.4	N.S.

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

	Trayectoria ganadera		CV (%)	Valor de P
	Ganaderos convencionales (n=14)	Ganaderos orgánicos (n=21)		
Capital físico				
Disponibilidad de infraestructura del rancho (grado*)	1.6±0.4	2.1±0.3	63.9	NS
Posesión de instalaciones (grado*)	2.3±0.3	3.0±0.2	40.7	NS
Servicios con los que cuenta el hogar (No)	5.1±0.2	5.4±0.4	28.2	NS
Capital financiero				
Superficie total de tierra (ha)	30.7±3.6	45.9±6.5	65.2	0.01
Total de unidades animal (UA)	37.7±6.3	53.3±6.9	59.1	0.01
Diversidad de productos ganaderos obtenidos (No)	1.5±0.3	2.2±0.2	40.0	NS
Ingreso total anual de la familia (MX \$)	209 508±33 693	284 360±36 490	58.0	0.01
Capital humano				
Experiencia en la ganadería bovina (años)	29.4±2.8	31.0±3.1	42.9	NS
Asistencia técnica y capacitación (% de productores)	25.0±7.9	76.2±9.5	79.5	0.01
Último grado de educación formal	3.9±0.5	5.0±0.1	61.6	NS
Capital social				
Productores afiliados al menos a una organización (% de productores)	63±18.3	95.0±4.8	40.7	0.05

Promedio ± error estándar.

Fuente: Elaboración propia con datos generados en el estudio. *El grado respecto al máximo poseído o disponible; **asociaciones de productores ganaderas y agrícolas locales y regionales. CV=Coefficiente de variación.

Los resultados del cuadro 2 sugieren que los productores orgánicos presentan mejores características con base en sus recursos o capitales (siete de ocho indicadores evaluados), financiero (tres de cuatro indicadores evaluados) y social (uno de un indicador evaluado) en comparación con los productores convencionales. En el capital humano los productores orgánicos muestran superioridad en uno de los tres indicadores evaluados (asistencia técnica y capacitación). En el capital físico ambos grupos son similares. Por lo tanto, los productores orgánicos presentan mayor adaptabilidad frente a cambios

socioambientales y ésta se explica principalmente por sus mejores características en el capital natural, financiero y social, y en menor medida por el capital humano. Al respecto Nahed *et al.* (2018) reportan mayor grado de sustentabilidad y adaptabilidad en las unidades de producción ganaderas orgánicas de la misma región de estudio. Por su parte, Speelman *et al.* (2014) señalan que la capacidad de organización (capital social) y la adopción de formas de manejo sustentable de la tierra en territorios campesinos favorece la capacidad adaptativa y resiliencia en el largo plazo.

Tal como se señaló anteriormente, uno de los elementos clave en el proceso de transición de la ganadería convencional hacia la ganadería orgánica en la región es la implementación de tecnologías agroforestales que se abordan a continuación.

Tecnologías agroforestales: uno de los pilares para la transición hacia la ganadería orgánica en el noroeste de Chiapas

En las regiones montañosas del noroeste del estado de Chiapas predomina la ganadería bovina de doble propósito bajo un sistema de producción agrosilvopastoril tradicional (Nahed *et al.*, 2013b). El sistema agrosilvopastoril tradicional integra la producción ganadera, agrícola y forestal a través del abono de cultivos con estiércol, la alimentación del ganado con subproductos agrícolas y el uso de potreros con distinto grado de arborización (desde pastizales sin árboles, hasta pastizales con cercos vivos, con arbustos y/o acahuales, con árboles dispersos y pastoreo en áreas forestales) utilizados de forma alterna durante el ciclo anual (Nahed *et al.*, 2013b).

La composición arbórea y arbustiva en la mayoría de los potreros de la región está constituida por especies de frutales, forrajeras y maderables. Entre las especies de frutales son comunes la naranja (*Citrus sinensis*), la mandarina (*Citrus aurantium*), el nance (*Byrsonima crassifolia*) y la guayaba (*Psidium guajava*). Entre las especies forrajeras más utilizadas se encuentran el caulote (*Guazuma ulmifolia*), el cocoite (*Gliricidia sepium*) y el guash (*Leucaena leucocephala*). Además de especies frutales en el sistema agrosilvopastoril tradicional es posible encontrar especies leñosas con uso maderable como el cedro (*Cedrela odorata*), el macuil (*Tabebuia* sp.), el bojón (*Cordia alliodora*), el popistle (*Blepharidium* sp.) y el jaboncillo (*Sapindus saponaria*). Los ganaderos utilizan las especies forrajeras para proporcionar sombra, protección, follaje, frutos a los animales en pastoreo, y en algunas ocasiones como material para construcción, medicinal y leña (Nahed *et al.*, 2013b). En el sistema agrosilvopastoril tradicional la especie *Gliricidia sepium* se utiliza comúnmente para cercos vivos (Nahed *et al.*, 2013b).

Las técnicas agroforestales implementadas en las unidades de producción ganaderas del área de estudio se construyen de forma participativa (entre productores, técnicos, académicos y otros actores sociales interesados en la producción limpia y amigable con el ambiente) y toman como base los elementos del sistema agrosilvopastoril tradicional que los productores de la región practican. Dichas técnicas consisten básicamente en innovaciones al sistema agrosilvopastoril tradicional mediante sistemas silvopastoriles más intensivos tales como el uso de callejones para pastoreo directo (figura 2), bancos proteínicos (figura 3), y establecimiento de plantaciones en distintos diseños con *Moringa oleifera* (figura 4).

Figura 2
Pasturas en callejones con leñosas (*Gliricidia sepium* y *Erythrina* sp.) en unidades de producción ganaderas del noroeste de Chiapas



Fuente: Romeo Josué Trujillo Vázquez.

Figura 3
Banco proteínico con asociación de *Gliricidia sepium* y *Leucaena leucocephala* en unidades de producción ganaderas del noroeste de Chiapas



Fuente: Romeo Josué Trujillo Vázquez.

Las pruebas de establecimiento, gustocidad, y diseño de las plantaciones con moringa (*Moringa oleifera*) se realizan participativamente con los productores. Un elemento constante que se realiza en las plantaciones de moringa de la región es su cultivo en laderas para evitar el exceso de humedad y aumentar su viabilidad (figura 4). Pese a que el clima óptimo de esta especie es el trópico seco, con precipitaciones menores a 1 000 mm anuales, se observa que esta especie tolera precipitaciones mayores siempre y cuando sus raíces no se inundan (Olson y Alvarado-Cárdenas, 2016). Sin embargo, es incipiente la investigación existente respecto a su producción en zonas fuera de su clima ideal.

Figura 4
Plantación de *Moringa oleifera* en ladera de una unidad de producción ganadera de la región noroeste de Chiapas



Fuente: Romeo Josué Trujillo Vázquez.

Los resultados presentados en el cuadro 2 reflejan mejores condiciones en el capital natural de las UPG orgánicas, particularmente en la presencia del componente arbóreo. De tal forma, del total de tierra destinada a pastizales en las UPG orgánicas, la mayor parte corresponde a pastizales con árboles dispersos, cuentan con mayor presencia de parches de bosque y acahual dentro de la UPG, existe una mayor diversidad de especies de árboles forrajeros, y los ganaderos orgánicos realizan mayor reforestación dentro de sus predios. Lo anterior se explica por la capacitación continua (fortalecimiento de capital humano) e innovaciones con sistemas silvopastoriles durante más de 10 años de trabajo con los productores orgánicos. Las mejores características en la mayoría de indicadores de capital natural, del grupo de ganaderos orgánicos, favorecen en el mediano y largo plazo la resiliencia y adaptabilidad del agroecosistema (Altieri *et al.*, 2015; Solorio *et al.*, 2017), por lo tanto, resulta importante su fortalecimiento.

La innovación con sistemas silvopastoriles en las UPG favorece el cumplimiento de tres criterios fundamentales de la ganadería orgánica: manejo alimenticio adecuado en el

hato, manejo sostenible del pastizal y bienestar animal, relacionados con mayor índice de conversión orgánica y sostenibilidad (Nahed *et al.* 2013a).

A diferencia de la ganadería convencional, los sistemas silvopastoriles promueven de forma importante la biodiversidad en los agroecosistemas. Diversos estudios señalan que a mayor biodiversidad en los sistemas ganaderos éstos tendrán mayor resiliencia y adaptabilidad frente al cambio (Nahed *et al.*, 2014; Hodbod y Eakin, 2015).

Los sistemas silvopastoriles contribuyen a (Nahed *et al.*, 2014): a) mitigar los efectos del cambio climático mediante la captura y almacenamiento de C, b) reducir las emisiones de CO₂, óxido nitroso, y gas metano, y c) incrementar la capacidad de infiltración y retención de agua, así como a disminuir la escorrentía superficial.

En cuanto a los beneficios económicos de los sistemas silvopastoriles en la producción ganadera orgánica, Nahed *et al.* (2018) reportan, para la misma región, que el establecimiento de bancos forrajeros y módulos silvopastoriles reducen el costo por concepto de compra de forraje y mejoran la rentabilidad, en comparación con las unidades de producción ganadera convencional.

Por otra parte, los resultados del capital financiero reflejan que las UPG orgánicos corresponden con las unidades de producción de mayor tamaño en cuanto a superficie, número de unidades animales e ingresos, lo cual podría favorecer el proceso de transición. Ante ello, se requieren acciones acordes a la situación de los productores con UPG de menor escala para que se motiven a innovar con los sistemas silvopastoriles y eventualmente incursionar en la ganadería orgánica.

Los sistemas silvopastoriles y la ganadería orgánica representan conjuntamente una forma de reducir la dependencia de insumos externos, disminuir los costos de producción, y aumentar los precios de los productos por su calidad en comparación con los convencionales, lo cual resulta más atractivo para los productores, al favorecer así los ingresos económicos de la unidad de producción ganadera.

En términos generales, los sistemas silvopastoriles y la ganadería orgánica requieren impulso del capital humano, mediante capacitación continua a los productores. Por otro lado, es necesario superar las limitaciones observadas en las organizaciones de productores. La ubicación del área de estudio, dentro del corredor biológico mesoamericano, es un elemento importante para promover y gestionar apoyos para la difusión de los sistemas silvopastoriles y la ganadería orgánica, dada la importancia particular de conservación de estas áreas. Speelman *et al.* (2014) sugieren que las estrategias de adaptación basadas en formas de manejo sostenible de la tierra (como los sistemas silvopastoriles y la ganadería orgánica) difícilmente tendrán éxito sin fuertes estructuras de organización efectivas. Pese a las dificultades del proceso, la mayoría de los productores inicialmente certificados continúa con la producción de leche orgánica y comercializa sus productos en tianguis orgánicos ubicados en las principales ciudades de Chiapas.

De acuerdo con los productores, la ganadería orgánica propicia el aprendizaje y la adopción de tecnologías agroecológicas y agroforestales, que hasta ahora están vigentes en las unidades de producción ganaderas. Así mismo despierta una concientización en los productores respecto a la importancia de conservar el ambiente y evitar el uso de sustancias riesgosas para la salud, y la importancia de producir de forma sustentable para el bienestar de las generaciones futuras.

Reflexiones finales

El uso de tecnologías agroforestales, particularmente los sistemas silvopastoriles representan uno de los pilares en la transición de la ganadería convencional hacia la ganadería orgánica en la región noroeste de Chiapas. Esta tecnología parte del fortalecimiento del sistema agrosilvopastoril que ya practican, de manera tradicional, los productores de la región.

La ganadería orgánica representa una estrategia de adaptación que promueve el manejo sustentable de la tierra y propicia el fortalecimiento de la mayoría de los capitales de los productores. Además, incorpora simultáneamente la mayor cantidad posible de las estrategias de adaptación identificadas en este estudio y por lo tanto tiene la capacidad de responder a las múltiples perturbaciones enfrentadas por los productores. Por lo anterior, resulta importante promover los sistemas silvopastoriles y la ganadería orgánica en la región a través de las políticas públicas.

Los resultados de la evaluación del capital financiero reflejan que las UPG de mayor tamaño (en superficie, número de unidades animal e ingresos) corresponden con las certificadas como orgánicas. Por lo tanto, las políticas públicas que promuevan la ganadería orgánica deben considerar los incentivos necesarios para que los productores de menor escala se motiven a incursionar en este tipo de producción.

Se requiere superar las limitantes del proceso de certificación orgánica, particularmente fortalecer el capital social y humano, a través del acompañamiento a los grupos de productores actuales para que se mantengan y que otros continúen motivándose a incursionar en esta forma de producción. Esto permitiría transitar paulatinamente de las respuestas de tipo reacción, efectivas en el corto plazo, a la implementación de estrategias sostenibles de adaptación y de largo plazo, como la ganadería orgánica. Para ello se requiere la participación activa y comprometida de todos los actores involucrados y lograr el éxito y la sustentabilidad de la producción ganadera. Los resultados presentados en este capítulo sugieren continuar con el impulso de la ganadería orgánica en la región de estudio y en otras regiones tropicales húmedas de México para promover la adaptabilidad y la resiliencia de los sistemas ganaderos.

Aspectos destacados

1. Desde una perspectiva multidimensional, se identifican las respuestas de los ganaderos del noroeste de Chiapas frente a las perturbaciones socioeconómicas y ambientales que enfrentan. Las respuestas van desde mecanismos de reacción de corto plazo, a verdaderas estrategias de adaptación de largo plazo, tales como los sistemas silvopastoriles, y la ganadería orgánica.
2. El diseño y establecimiento participativo de sistemas silvopastoriles intensivos en la región, fortalece los capitales de los productores (en particular el capital natural), y favorece la transición de la ganadería convencional hacia la ganadería orgánica.
3. Con una base fortalecida en los capitales natural, financiero, social, y humano, los ganaderos orgánicos tienen mayor adaptabilidad frente a los cambios socioambientales que enfrentan.

Literatura citada

- Altieri, M.A.; Nicholls, C.I.; Henao, A. y Lana, M.A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agron Sustain Dev.* 35(3): 869-890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- Appendini, K. (2014). Reconstructing the maize market in rural Mexico. *J Agrar Change.* 14: 1–25. <https://doi.org/10.1111/joac.12013>
- Armitage, D. (2005). Adaptive capacity and community-based natural resource management. *Environ Manage.* 35: 703–715. DOI: 10.1007/s00267-004-0076-z
- Benavides, O.E.; Romer, P.J. y Vilamil, J.L. (2016). Las garrapatas del ganado bovino y los agentes de enfermedad que transmiten en escenarios epidemiológicos de cambio climático: Guía para el manejo de garrapatas y adaptación al cambio climático. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 93 p.
- Eakin, H. y Lemos, M.C. (2006). Adaptation and the state: Latin America and the challenge of capacity-building under globalization. *Global Environ Change.* 16: 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.10.004>
- Eakin, H. y Lemos, M.C. (2010). Institutions and change: the challenge of building adaptive capacity in Latin America. *Global Environ Change.* 20: 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.08.002>
- Engle, N.L. (2011). Adaptive capacity and its assessment. *Global Environ Change.* 21: 647-656. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.01.019>
- Enriquez, S.; Camacho, R.; Laird, M.O. y Wilk, D. (2016). *Climate change adaptation and socio-economic resilience in Mexico's Grijalva Usumacinta watershed.* En Climate change adaptation, resilience and hazards Springer International Publishing. Pp. 209–223.
- Hodbod, J. y Eakin, H. (2015). Adapting a social-ecological resilience framework for food systems. *Journal of Environmental Studies and Science.* 5: 474-484. <https://doi.org/10.1007/s13412-015-0280-6>
- Kusters, D.; Achdiawan, R.; Belcher, B. y Ruiz Perez, M. (2006). Balancing development and conservation? An assessment of livelihood and environmental outcomes of nontimber forest product trade in Asia, Africa, and Latin America. *Ecol Soc.* 11(2): 20. <https://doi.org/10.5751/ES-01796-110220>
- Magrin, G.; Gay García, C.; Cruz Choque, D.; Giménez, J.C.; Moreno, A.R.; Nagy, G.J.; Nobre, C. y Villamizar, A. (2007). *Latin America.* En Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Pp. 581–615.
- Nahed, T.J.; Sánchez-Muñoz, B.; Mena, Y.; Ruiz-Rojas, J.L.; Aguilar-Jiménez-J. R.; Castel, J.M.; De Asis Ruiz, F.; Orantes, Z.M.A.; Manzur, C.A.; Cruz, L.J.; Delgadillo, P.C. (2013a). Feasibility of converting agrosilvopastoral systems of dairy cattle to the organic production model in southeastern Mexico. *J Clean Prod.* 43: 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.019>
- Nahed, T.J.; Valdivieso-Pérez, I.A.; Aguilar-Jiménez, R.; Cámara-Cordova, J.; Grande-Cano, D. (2013b). Silvopastoral systems with traditional management in southeastern Mexico: a prototype of livestock agroforestry for cleaner production. *J Clean Prod.* 57: 266-279. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.020>
- Nahed, J.; Palma, J.M. y González, E. (2014). La adaptación como atributo esencial en el fomento de sistemas agropecuarios resilientes ante las perturbaciones. *Avances en Investigación Agropecuaria.* 18: 7–34.
- Nahed, T.J.; González, P.S.; Grande, C.D.; Aguilar, J.R.; Sánchez, B.; Ruiz, R.J.; Guevara, H.F.; Leon, M.N.; Trujillo, V.R. y Parra, V.M.R. (2018). Evaluating sustainability of conventional and organic dairy cattle production units in the Zoque Region of Chiapas, Mexico. *Agroecol Sustain Food Syst.* 43(6). <https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1534302>
- Nahed-Toral, J.; Guevara-Hernández, F.; Palma-García, J.M.; López-Tecpoyotl, Z.G.; Sánchez-Muñoz, J.B.; Ruiz-Rojas, J.L.; Aguilar-Jiménez, J.R. y Parra-Vázquez, M.R. (2018). *Innovación para el desarrollo sustentable de la ganadería mediante sistemas silvopastoriles y producción orgánica en la frontera sur.* En: García, R., León, J.L. Eds. Norte-Sur, Diálogos de Frontera. México. El Colegio de la Frontera Norte. Pp. 103-133.
- Olson, M.E. y Alvarado-Cárdenas, L.O. (2016). ¿Dónde cultivar el árbol milagro, Moringa oleifera, en México? Un análisis de su distribución potencial. *Rev Mex Biodiv.* 87(3): 1089-1102.

- Orantes, Z.M.; Platas, R.D.; Córdova, A.V.; De los Santos, L.M. y Córdova, A.A. (2014). Caracterización de la ganadería de doble propósito en una región de Chiapas, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*. 1(1): 49-58. <http://132.248.10.25/conacyt/index.php/ERA/index>
- Pischke, E.C.; Mesa-Jurado, M.A.; Eastmond, A.; Abrams, J. y Halvorsen, K.E. (2018). Community perceptions of socioecological stressors and risk-reducing strategies in Tabasco, Mexico. *J. Environ Stud Sci*. 8: 441–451. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s13412-018-0493-6>
- Quandt, A. (2018). Measuring livelihood resilience: The Household Livelihood Resilience Approach (HLRA). *World Dev*. 107: 253–263. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.02.024>.
- Ramos, S. y Morales, H. (2010). Escenarios climáticos para el estado de Chiapas. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. 196 p.
- SAGARPA (2018). Situación zoonosaria en los estados de la República mexicana. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 8 p.
- Saldaña-Zorrilla, S.O. (2008). Stakeholders' views in reducing rural vulnerability to natural disasters in Southern Mexico: hazard exposure and coping and adaptive capacity. *Global Environ Chang*. 18: 583–597. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2008.09.004>
- Solorio, S.F.J.; Wright, J.; Franco, M.J.A.; Basu, S.K.; Sarabia, S.L.; Ramírez, L.; Ku, V.J. C. (2017). *Silvo-pastoral systems: Best agroecological practice for resilient production systems under dryland and drought conditions*. En Quantification of Climate Variability, Adaptation and Mitigation for Agricultural Sustainability Springer. Pp. 233-250.
- Speelman, E.N.; Groot, J.C.J.; García-Barrios, L.E.; Kok, K.; van Keulen, H. y Tittonell, P. (2014). From coping to adaptation to economic and institutional change: Trajectories of change in land-use management and social organization in a Biosphere Reserve community, Mexico. *Land Use Policy*. 41: 31-44. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.04.014>
- SPSS (2006). Statistical Package for Social Sciences Users Manual Base 15.0. SPSS Inc: Chicago, USA.
- Vázquez, P.D. (2000). *El impacto socioeconómico de la presa Nezahualcoyotl*. Tesis de licenciatura en economía. Facultad de Ciencias Sociales de la UNACH. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas.
- Vincent, K.; Cull, T.; Chanika, D.; Hamazakaza, P.; Joubert, A.; Macome, E. y Mutonhodza-Davies, Ch. (2013). Farmers' responses to climate variability and change in southern Africa – is it coping or adaptation? *Clim. Dev*. 5(3): 194-205. <https://doi.org/10.1080/17565529.2013.821052>.

Agradecimientos

Esta investigación se realizó gracias al apoyo financiero del proyecto “Transversal y multidisciplinario de agricultura familiar” [CONACYT 2015-2018-No.1106610270]. Así mismo, se agradece al CONACYT por la beca otorgada al primer autor en su convocatoria 2020 (01) “Estancias posdoctorales por México”.

II.2. Módulos integrales con sistemas silvopastoriles y especies ganaderas menores como estrategia de adaptación al cambio climático

Carolina Flota-Bañuelos¹
Bernardino Candelaria-Martínez^{2*}
Víctor Daniel Cuervo-Osorio²
Juan Antonio Rivera-Lorca³

¹CONACYT-Colegio de Postgraduados, Campus Campeche.

²Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico de Chiná.

³Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico de Conkal.

*Autor de correspondencia: bernardino.cm@china.tecnm.mx

Introducción

El mundo en el que se desenvuelve la sociedad está determinado por relaciones multidireccionales entre elementos bióticos y abióticos que se organizan en sistemas complejos. En este sentido se puede interpretar que la alteración de los elementos del clima alejados de la intervención humana puede influir negativamente sobre los sistemas agropecuarios. En este sentido, Altieri y Nicholls (2008) mencionan que el calentamiento global produce un efecto adverso sobre la oferta de alimentos de calidad a la sociedad; así, se estima que la productividad puede disminuir hasta un 50%. En contraste, el incremento de la población ejerce una creciente y especializada demanda de alimentos, creándose complejas sinergias de causas y efectos, y las alternativas para resolverlas parecen ser limitadas. Por lo tanto, para cumplir con los objetivos de los sistemas, es cada vez más difícil y tienen que recurrir a una mayor cantidad de insumos externos (Paneque-Rondón *et al.*, 2017).

Los sistemas agropecuarios son contrastantes; por un lado, existen los industrializados con grandes capitales y volúmenes de producción y, por otro, los de subsistencia y pequeña escala manejados por familias rurales. Las estrategias en los primeros se centran en una especialización extrema, usando tecnología de punta orientada a alcanzar indicadores de alta eficiencia para satisfacer la demanda de alimentos de las zonas urbanas y obtener alta rentabilidad económica; sin embargo, pueden originar una gran huella ecológica, mientras que los segundos son más sensibles (Altieri y Nicholls, 2008), por lo que sus estrategias deben basarse en el desarrollo de sistemas que consideren los saberes tradicionales campesinos y técnicas agroecológicas.

Desde esta perspectiva, para enfrentar el cambio climático es necesario el diseño de sistemas de producción integral basados en la agrobiodiversidad (da Costa *et al.*, 2017), en donde se favorezcan las interacciones positivas entre los elementos de los subsiste-

mas, manteniéndolos estables, resilientes y en equilibrio, con capacidad de contribuir a la seguridad alimentaria y a la generación de ingresos, elevando la calidad de vida de los productores.

El objetivo del capítulo es explorar y mostrar evidencia técnica de la viabilidad de usar módulos integrales de producción sustentable de especies ganaderas menores y técnicas agroforestales bajo los escenarios de cambio climático. Para ello, se revisó bibliografía científica y técnica reciente acerca de los escenarios presentados por efecto del cambio climático ocasionado por el calentamiento global, sobre factores ambientales que afectan la actividad agrícola y por consecuencia a la sociedad. Se exploró además el concepto de los módulos integrales de producción ligados al manejo de sistemas silvopastoriles en sus diferentes modalidades. Finalmente, se presenta parte de la información generada en el Instituto Tecnológico de Chiná y en el Colegio de Postgraduados, Campus Campeche, sobre el diseño y manejo de módulos integrales con la presencia de conejos o codornices, y sistemas silvopastoriles.

Retos ambientales y socioeconómicos, en México

Actualmente, a nivel mundial se presenta una serie de retos ambientales que pueden afectar el cumplimiento de los objetivos de la agenda 2030, que son generar desarrollo económico, reducir los niveles de pobreza e incrementar el bienestar y la calidad de vida de los habitantes, sin comprometer los recursos naturales. En México, estos retos trascienden y se relacionan con el bienestar social y con el desarrollo económico, y algunos de sus impactos se reflejan en los índices de pobreza, salud, seguridad alimentaria, migración y en la actividad económica (Zeind-Chávez y Castañeda-Camacho, 2019).

El calentamiento global es uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial, originado por actividades antropogénicas (gases de efecto invernadero) (Cardona-Iglesias *et al.*, 2016). Este fenómeno afecta los recursos hídricos, ecosistemas, biodiversidad, procesos productivos, infraestructura, salud pública y, en general, a las diversas dimensiones que configuran el proceso de desarrollo (CONAFOR, 2013). Se estima que el sector agropecuario contribuye con el 60% de las emisiones anuales de metano (CH₄) y de éste aproximadamente el 33% tiene su origen en los sistemas ganaderos de rumiantes (Wanapat *et al.*, 2015). En el trópico se espera incremento de la temperatura ambiental, velocidad del viento y humedad relativa, lo cual afectará la productividad (Botero-Uribe, 2015).

En el territorio nacional la superficie preferentemente agropecuaria es 56.7 millones de hectáreas que corresponde al 30% del territorio nacional. Desde los años 70 del siglo pasado el 24% se dedicó a la agricultura y 12% para pastizales ganaderos; de los suelos considerados no aptos para la agricultura se ocuparon el 10%, para el 2014 el 30% estaba representado por la agricultura y 15% por pastizales y la superficie utilizada pero no apta fue de 15% (8% en la agricultura y 7% en pastizales). En México los tipos de degradación más frecuentes para pérdida de suelo superficial son la erosión hídrica y eólica que están presentes en el 88% y 95% de la superficie nacional, respectivamente (CONAGUA, 2018). Esto se refleja en la baja fertilidad y capacidad de resiliencia del suelo, y alteración del ciclo hidrológico. Sin embargo, las consecuencias sociales más importantes son la in-

suficiencia alimentaria, pobreza y problemas de salud, por la producción insuficiente de alimentos.

A nivel mundial el reto socioeconómico, está dado por la inseguridad alimentaria y por la pobreza que afecta a más de 795 millones de personas que presentan algún grado de desnutrición, por falta de acceso a recursos alimentarios (FAO, 2019). En el caso de México, alrededor de 22 millones de personas se encuentran en condiciones de pobreza alimentaria (CONEVAL, 2019). Esta cifra puede incrementarse por la pandemia ocasionada por el virus SARS-CoV 2; se espera un aumento de la desnutrición infantil y pobreza, debido a cambios en la disponibilidad y la asequibilidad de los alimentos saludables e interrupciones en los servicios de salud y nutrición en lo urbano y en lo rural (Flores, 2020). Por lo tanto, se requieren esquemas que fomenten y desarrollen modelos productivos dinámicos, estables y eficaces en las comunidades rurales que impulsen la soberanía alimentaria (Vega-Pérez *et al.*, 2014).

En la actualidad existen dos formas alternas a la producción industrial: la agricultura orgánica a pequeña escala y la denominada agricultura sostenible. La primera está orientada a la autosuficiencia a nivel de finca, donde los solares representan un espacio estratégico para contribuir a la seguridad alimentaria (Toledo *et al.*, 2008), y es idónea para la preservación de la biodiversidad y la cultura (Salazar *et al.*, 2015). Con esta actividad se pueden generar excedentes e ingresos económicos para cubrir otras necesidades, mejorando la provisión de alimentos en las familias (Gutiérrez *et al.*, 2007). La segunda es una visión de producción a largo plazo que mejora la calidad del entorno y la base de recursos de los que depende, produce alimentos en cantidad suficiente, es económicamente viable y mejora la calidad de vida del agricultor por la venta de excedentes. En ambos casos es necesario conocer la estructura y aporte de nutrientes, así como el empleo de módulos integrales usando técnicas agroecológicas que promuevan la disponibilidad y accesibilidad a alimentos inocuos y nutritivos de manera económica y permanente (Traversa y Alejano, 2013). Ambas opciones dependen de la disponibilidad de recursos como capital, mano de obra y de tierra; el balance de estos tres junto con la oferta tecnológica, determinan y condicionan el diseño del sistema de producción (objetivo, estructura, elementos, componentes particulares y sus interacciones).

Diseños de módulos integrales con especies ganaderas menores y sistemas silvopastoriles

En el contexto actual, es necesario plantear nuevos modelos productivos o adecuación de los actuales, diseñados con una visión hacia la intensificación y diversificación de actividades; es decir, deben ser sistemas flexibles que se adecuen biológicamente a las particularidades de las condiciones agroecológicas, a las relaciones económicas y culturales, al proceso histórico de desarrollo y recursos disponibles, para que sean económicamente viables, socialmente aceptables, técnicamente apropiados y no afecten el ambiente. No se pueden diseñar sistemas para aplicarse de manera general y en un contexto global.

Los agroecosistemas convencionales actuales requieren de una constante intervención humana para mantenerse, presentan inestabilidad, una estructura simplificada y frágil que especializa sus comunidades y regula de manera particular sus poblacio-

nes. Son dependientes de fuentes auxiliares de energía para el aumento de producción, la biodiversidad es reducida siendo el monocultivo la forma más extrema, las especies utilizadas son seleccionadas por el hombre y con un fin que éste persigue. Así mismo, existen factores externos dependientes de la acción humana (precios, políticas, insumos), la producción de biomasa se destina preferentemente para consumo externo y en muchas ocasiones entre sus componentes existen pocas interacciones positivas de retroalimentación interna.

Bases para el diseño de módulos integrales con ganadería y sistemas silvopastoriles

La agroecología proporciona las bases para el diseño de sistemas sustentables, siendo necesario reconocer el nivel de manejo que es establecido por el hombre, la diversificación, la habilidad para minimizar riesgos, el reciclaje de nutrientes, la capacidad de carga; es decir, el potencial productivo debe considerar los límites fisiológicos de cultivos y animales y la capacidad del uso de la tierra.

Biodiversidad

Constituye la base conceptual para el diseño de los módulos integrales, ya que forma parte de los subsistemas suelo, animal y cultivo. Es importante reconocer la existencia de una diversidad funcional que son los elementos clave que se necesitan para alcanzar los objetivos y estabilidad de los subsistemas. Esta funcionalidad depende de los niveles de interacción, la abundancia de recursos, así como el grado de aislamiento del sistema respecto a los ecosistemas naturales circundantes. El incremento de la diversidad favorece el reciclaje de nutrientes, control de microclima, disminución de organismos plaga, eliminación de contaminantes, conservación de suelo, agua y germoplasma.

Subsistema suelo

Este subsistema evoluciona con la acción de factores externos e internos. Su función no es sólo aportar nutrientes a las plantas, sino que debe tener la capacidad de mantener un nivel de producción sostenible a largo plazo, sin perder con esto su diversidad biótica ni su complejidad estructural, brindando la posibilidad de mantener la productividad biológica, la calidad del ambiente y promover la sanidad en cultivos, animales y el humano. Con la finalidad de incrementar la disponibilidad de los elementos que participan en los ciclos biogeoquímicos, es necesario seleccionar cultivos de acuerdo con la vocación del suelo, incorporando elementos orgánicos que aporten nutrientes en forma equilibrada, estimulando el desarrollo y crecimiento de los cultivos.

Subsistema cultivo

En los sistemas agrícolas convencionales está ausente el subsistema animal lo que limita el uso de los esquilmos agrícolas, el ciclaje de nutrientes y finalmente el mantenimiento de la fertilidad del suelo, por lo que se tiene que importar los nutrientes del exterior. Bajo el enfoque propuesto, los subsistemas de cultivo deberán diseñarse considerando los requerimientos de las plantas, sus etapas fenológicas y periodos de producción. Esto debe hacerse usando preferentemente cultivos diversificados como los cultivos mixtos, poli-

cultivos y asociaciones específicas. El uso de especies arbóreas mejora la utilización de la profundidad del suelo por la longitud de sus raíces, lo que llevaría implícita una mayor eficiencia en el uso del agua y nutrientes, propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Así mismo, conserva y aumenta la materia orgánica acumulada en el suelo, estimula la actividad microbiana, reduce la incidencia de arvenses, plagas y enfermedades, mantiene un equilibrio de nutrientes en el suelo, conserva el agua y minimiza la erosión.

Subsistema animal

En los sistemas de producción animal convencionales está ausente la producción de la biomasa, por lo que los insumos para su alimentación provienen de fuentes externas, y en muchas ocasiones son causa de contaminación aérea y de los mantos acuíferos. El subsistema animal es considerado como un proveedor de satisfactores directamente al humano, ya sea como productos o como ingreso económico. Los animales dependen directamente de los subsistemas suelo y cultivos, ya que la producción de biomasa depende de estos dos, por lo que las acciones llevadas a cabo en estos subsistemas influyen directamente y son de gran importancia para este subsistema. De tal manera, un papel relevante de este subsistema es la generación de abonos orgánicos (excretas), debido a que los animales reducen el tamaño de partícula de la biomasa, y pueden ser incorporados de forma rápida al suelo, generando los beneficios mencionados en el subsistema suelo.

El subsistema animal tiene una alta dependencia a la precipitación pluvial, es decir los nutrientes para su alimentación se encuentran determinados por la disponibilidad de biomasa a través del año. Por lo tanto, existe una estación de alta producción de biomasa de calidad y cantidad, suficientes para satisfacer los requerimientos nutricionales en todos sus estados fisiológicos; y otra donde la restricción más importante es la ausencia de precipitación y por ello la baja producción de biomasa de calidad. En este sentido, el diseño de los sistemas de producción animal estará condicionado por esa disponibilidad de nutrientes en las diferentes épocas del año, esta condición afecta por igual a especies rumiantes y no rumiantes.

Diseño de módulos integrales como estrategia para la adaptación al cambio climático

Para implementar estrategias para adaptarse a los escenarios impuestos por el cambio climático, es necesario identificar los factores que incrementan el riesgo, pero lo más importante es incrementar la resiliencia de los agroecosistemas. Dada la interconexión entre el ambiente, recursos naturales, amenazas naturales y seguridad alimentaria, se hace necesario reducir la vulnerabilidad mediante la adopción de estrategias de manejo sustentable de recursos naturales como suelo y agua. Simultáneamente, es necesaria la implementación de prácticas agroecológicas para estabilizar los agroecosistemas incluyendo diversificación de cultivos, conservación y manejo orgánico de suelos, cosecha de aguas de lluvia y restauración de tierras degradadas (Altieri y Nichols, 2013).

En este sentido, los módulos integrales con especies ganaderas menores alternativas como conejos y codornices, incluyen prácticas agroecológicas para afrontar el cambio climático, a través de una serie de prácticas como el uso de plantas locales tolerantes a

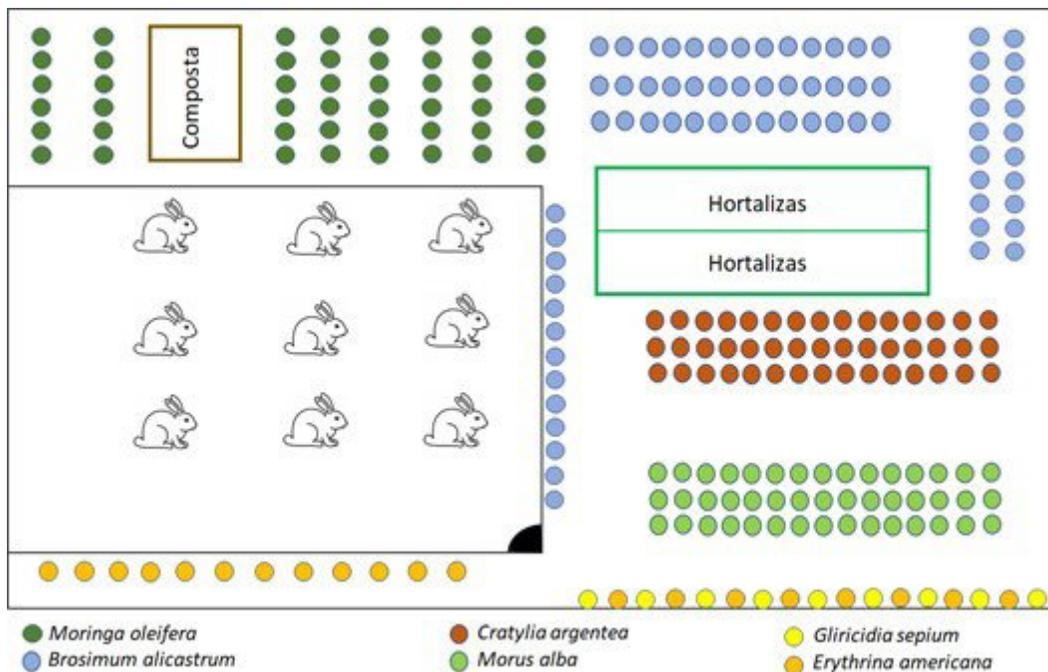
sequía y en diferentes arreglos agroforestales, prácticas de conservación de suelo y una serie de otras técnicas tradicionales (Altieri y Koohafkan, 2008) para, finalmente, obtener productos proteicos de alta calidad con el menor uso de recursos (SAGARPA, 2012). La integración de estos elementos permite por un lado disminuir la dependencia de granos y cereales producidos en sistemas de alto impacto al ambiente, al basar la alimentación de las especies ganaderas en follaje de árboles y arbustos endémicos que no requieren el uso de insumos. En estos sistemas se obtienen fuentes de proteína de alta calidad, y la emisión de desechos al ambiente disminuye al establecer procesos de reincorporación de los subproductos como heces compostadas para la fertilización de las especies forrajeras. Se establece además un sistema para la captación de agua de lluvia que debe representar una parte significativa del agua utilizada en el mismo.

Módulo integral de cría de conejos

La carne de conejo es de excelente calidad biológica y se posiciona como una especie prometedora para el abasto de alimento de alta calidad proveniente de modelos de producción sustentable (SAGARPA, 2015; Criado-Flórez y Deháquiz-Mejía, 2019). Debido a los procesos fermentativos que se llevan a cabo en el ciego, esta especie puede hacer un uso eficiente de follaje de especies arbóreas y arbustivas (Mora-Valverde, 2010), lo que permite tener una baja dependencia de granos y demás insumos, por lo que es factible su empleo en módulos integrales de escala menor con el uso de recursos disponibles. Además, las características organolépticas de la carne son superiores cuando los conejos son alimentados o suplementados con follajes, como en el caso del conejo de monte que es altamente apreciado en zonas rurales.

Figura 1

Sistema integral de conejos, arbóreas, arbustivas y hortalizas implementado en el Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico de Chiná, en el municipio de Campeche, Campeche



Fuente: Elaborada por los autores.

En el Instituto Tecnológico de Chiná se dispone de un módulo integral con una superficie de 800 m², con un año de funcionamiento. El área de alojamiento para los conejos tiene una dimensión de 6x8 m, consta de una pared de 1.2 m de concreto y malla hexagonal en la parte superior. La altura de la pared es de 2.5 m y el techo es de lámina galvanizada a dos aguas con un caballete central de 0.4 m para facilitar la circulación de aire caliente. En las paredes se instalaron cortinas de plástico que permiten regular las corrientes de aire a lo largo del año, especialmente en invierno, así como evitar el acceso de agua de lluvia y los rayos del sol en verano y en primavera. El área de alojamiento presenta una elevación de 0.8 m sobre el nivel del suelo para evitar inundaciones. Se dispone de jaulas individuales especializadas para conejos con comederos galvanizados de tolva y chupones automáticos, en el caso de las jaulas para los vientres se dispone de nidos externos. El diseño permite disminuir el estrés por manejo de los conejos y promueve su bienestar en las todas las etapas fisiológicas. El área de especies forrajeras del módulo está conformada por 90 arbustos de *Morus alba* como banco de proteína con una densidad de siembra de 1 x 1 m, 90 arbustos de *Cratylia argentea* como banco de proteína con una densidad de siembra de 1 m entre hilera y 0.5 m entre plantas, 90 árboles de *Brosimum alicastrum* como banco de proteína con una densidad de siembra de 1 m entre hilera y 0.5 m entre plantas, 50 árboles de *Moringa oleifera* como cultivo en callejones, 1.5 m entre hilera y 1 m entre plantas, 30 árboles de *Gliricidia sepium* y 20 árboles de *Erythrina americana* como cerco vivo intercalado con una distancia de 1 m entre plantas a hilera simple. Del total de las especies sólo *M. alba* y *M. oleifera* se consideran esta-

blecidas, el resto aún está en proceso de establecimiento y aún no se realizan podas ni evaluaciones de su follaje ni como alimento de conejos. Este módulo tiene la capacidad para soportar una producción continua de 10 vientres de conejas y dos sementales, con un promedio de siete partos anuales por coneja y seis gazapos destetados vivos. Los conejos destetados son cebados hasta un peso de sacrificio de 2.5 kg y un rendimiento de la canal del 60% como resultado del uso de follaje de las especies asociadas al sistema; en la alimentación de los conejos se lograría una producción anual de 735 kg de conejo en canal. Además, en el sistema se compostan las heces y se utilizan para la producción biointensiva de hortalizas en dos camas de 4 x 1.2 m (figura 1). Para incrementar la autosuficiencia es necesario establecer un sistema de captura de agua de lluvia utilizando el techo del alojamiento cuya área es de 48 m²; con una precipitación promedio de 1 050 mm, resultaría en una colecta aproximada de 48 000 l de agua/año. Las podas de los árboles y arbustos se realizarán de manera escalonada y la biomasa excedente de la época de lluvias se almacenará para cubrir el déficit del periodo de estiaje. En experimentos desarrollados se observó que la suplementación de conejos con 100 g de follaje fresco de *Guazuma ulmifolia* y *Leucaena leucocephala* cuando recibían una dieta con base de alimento balanceado (100 g) disminuyó la proporción de grasa disecable de la canal (escapular y perirrenal). También se documentó que conejos alimentados con sólo alimento balanceado (16% PC), con bloques nutricionales con 40% de inclusión de follaje de *M. oleifera* o con bloques nutricionales con 40% de inclusión de follaje de *M. alba*, presentaron consumos de 96.7, 50.2 y 45.5 g/día ($P \leq 0.05$); la ganancia de peso fue de 17.9, 16.8 y 13.4 g/día ($p \leq 0.05$), respectivamente. Además, este sistema brinda la oportunidad de producir carne de alta calidad biológica que en México cada vez es más preferida por los consumidores informados (Jaramillo-Villanueva *et al.*, 2015).

Módulo integral de cría de codorniz

Las características de la codorniz *Coturnix coturnix japonica*, tales como rusticidad, reproducción rápida (Obregón *et al.*, 2012), madurez sexual temprana, resistencia a enfermedades (Abbas *et al.*, 2015), alta producción de huevo y de carne (Ismail *et al.*, 2015), con rendimiento de 76% de carne (Santos *et al.*, 2012), hacen de esta especie apta para considerarse dentro de las más propicias para implementarse dentro de módulos integrales, y posteriormente promover su disponibilidad para la población rural (Jesuyon *et al.*, 2021).

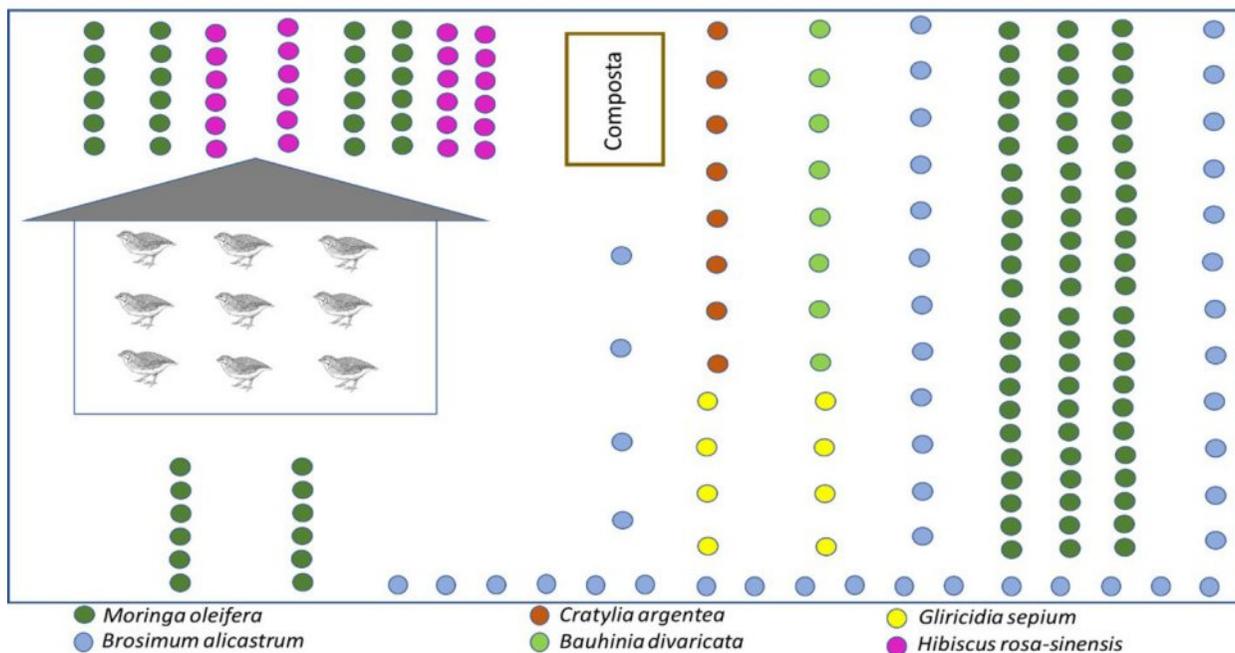
Debido a lo anterior, en el Colegio de Postgraduados, Campus Campeche, se diseñó un módulo integral con dimensiones de 35 x 21 m, que tiene tres años de establecido, dividido en tres secciones: área de alojamiento, área de especies forrajeras y área de composta (figura 2).

Para la construcción del área de alojamiento con dimensiones de 5 x 4 m se consideró el confort y el bienestar animal para que el manejo sea eficiente, considerando la temperatura del trópico de 25 y 32 °C. El suelo donde está la cimentación de la construcción no tiene problemas de hundimientos, humedad o erosión, tiene un buen drenaje, favorece el escurrimiento de las aguas de lluvias y el desagüe de los líquidos provenientes de la misma instalación. La orientación es de oriente a occidente; de esta forma, los

rayos del sol no penetran dentro del módulo y, al medio día, sólo el techo estará expuesto a ellos. En época de norte, se colocan cortinas para proveerles un ambiente óptimo.

La capacidad del módulo puede atender una producción continua de 200 hembras y 15 machos. Se espera que las hembras entren a la madurez a los 45 días, poniendo un huevo cada 22 horas, con alto contenido proteico y bajo nivel de colesterol; durante un año pone 290 huevos como mínimo. Por lo tanto, la producción de huevos con este tamaño de parvada será de 150 huevos/día considerando el 75% de postura, lo que suma 1 500 huevos semana, 4 200 huevos mes y 50 400 huevos/año. En la producción de carne alcanzan un peso al sacrificio de 200 g con un rendimiento de la canal del 80%.

Figura 2
Sistema integral de codorniz, instalación y plantas forrajeras implementados en el Colegio de Postgraduados, Campus Campeche, México



Fuente: Elaborada por los autores.

El área de especies forrajeras consiste en un establecimiento diversificado de temporal en un área irregular de 650 m² que incluye: bancos de proteína de *Moringa oleifera* e *Hibiscus rosa-sinensis* con una densidad de siembra de 1 x 1 m, callejones de *Gliricidia sepium*, *Bauhinia divaricata* y *Cratylia argentea* con una densidad de siembra de 1 x 1 m y cerca viva de *Brosimum alicastrum* con una densidad de siembra de 1.5 x 1.5 m. Esta plantación es fertilizada con composta de excretas de codorniz, para el ciclaje de nutrientes. Las podas para *M. oleifera* se realizan escalonadamente cada 45 días. Así mismo, el follaje se corta y ofrece en verde para suplementar las dietas, otorgando el 10% del peso vivo de las aves al día. En época de estiaje, se otorga harina de los follajes, previamente almacenados. La harina de *M. oleifera* y *L. leucocephala* presentan la siguiente composición bromatológica: 88.1 y 88.3% de MO (materia orgánica), 25.3 y 23.7% PC (proteína cruda), 3.2 y 4.4% extracto etéreo y 11.8 y 9.5% de ceniza, respectivamente. Para realizar la harina, primero se seleccionan las plantas, se cortan las ramas con follaje, se separan

los tallos de las hojas y se pone a secar el follaje al sol por un lapso de 48 h, posteriormente se muele y guarda (figura 3).

Dentro de los estudios realizados en el módulo, se comprobó que la suplementación de 60 hembras adultas con harina de *M. oleifera* o *L. leucocephala*, provenientes de granjas comerciales, tuvieron aceptación de hasta el 10% peso vivo, mantuvieron la ganancia diaria de peso (0.015, 0.016 y 0.02 g para *L. leucocephala*, *M. oleifera* y alimento comercial, respectivamente), aumentó el número de huevos (44, 55 y 10 para *L. leucocephala*, *M. oleifera* y alimento comercial, respectivamente), y disminuyó el consumo de alimento comercial en 75% en un periodo de 12 días (López-Salazar *et al.*, 2020).

Figura 3
Elaboración de harina con hojas de plantas forrajeras



Fuente: Elaborada por los autores.

De igual forma se demostró que con la sustitución del 50% de alimento comercial con harina de *M. oleifera* o *L. leucocephala*, en polluelos hasta los 84 días, se obtuvieron pesos finales promedio de 150 g por individuo, se mantuvo la conversión alimenticia y no varió el peso final de la carne entre tratamientos, mejorando el rendimiento de la canal hasta en 80%, sin modificar el porcentaje de proteína, ceniza, pH, y extracto etéreo, en comparación con codornices alimentadas solamente con alimento comercial (López-Salazar *et al.*, 2019). Durante el desarrollo de las pruebas se observó que las codornices jóvenes presentaron mayor aceptación de harina de *M. oleifera* o *L. leucocephala* que codornices adultas provenientes de granjas comerciales. Esto demuestra que el comportamiento de los componentes del módulo y la interacción entre los subsistemas es

dinámico y se fortalece en el tiempo. Así mismo, la capacidad de sostenimiento del módulo permite mantener un lote de 215 codornices como pie de cría para obtener una producción de polluelos para la engorda.

Reflexión final

El calentamiento global es una de las principales determinantes de la crisis ambiental más severa que enfrentamos como humanidad, al causar efectos sobre el deterioro acelerado de los recursos naturales comprometiendo la capacidad de producir alimentos de calidad. Hoy en día existe un alto porcentaje de personas vulnerables en situación de pobreza alimentaria. Este reto no es factible solucionarlo con los sistemas de producción de alimentos convencionales ya que, en parte, éstos han contribuido a acelerar el calentamiento del planeta y la degradación de los recursos. La sociedad debe apelar a modelos alternativos de producción para obtener soluciones más sustentables. Desde esta perspectiva se plantea que las personas que dispongan de acceso a tierra podrán establecer módulos integrales de producción que representan una posibilidad para obtener alimento de calidad haciendo uso de los recursos disponibles con un bajo impacto ambiental al ser capaces de adaptarse y de resistir los efectos del cambio climático. Dichos módulos emplean el conocimiento local junto con técnicas agroecológicas que permiten establecer interacciones entre diferentes componentes como especies ganaderas menores, cultivos, árboles, arbustos, entre otros.

Los módulos integrales de conejos y de codornices vinculados a diferentes arreglos silvopastoriles con especies arbóreas y arbustivas locales e introducidas que se han presentado, se encuentran en evaluación y rediseño continuo, donde se vislumbra aumento en la funcionalidad, productividad y estabilidad a mediano plazo. Se contará cada vez con más información generada en los módulos para promover su implementación en las áreas de influencia de las instituciones, toda vez que estas especies son consumidas por los pobladores cuando son obtenidas de la caza.

Aspectos destacados

1. La agroforestería no es sinónimo de grandes extensiones, se puede usar a nivel de traspatio familiar.
2. Los sistemas de producción integrales con especies ganaderas menores generan una rápida disponibilidad de carne.
3. La incorporación de especies forrajeras en módulos integrales de conejos y de codornices disminuyen en 70% el consumo de alimento comercial.

Literatura citada

- Abbas, Y.; Sahota, W.; Akram, M.; Mehmood, S.; Hussain, J.; Younus, M.; Awais, M. y Sial, R. (2015). Effect of Different Feed Restriction Regimes on Growth Performance and Economic Efficiency of Japanese Quails. *The Journal of Animal and Plant Sciences*. 4: 966-970.
- Altieri, M.A. y Koohafkan, P. (2008). Enduring farms: climate change, smallholders, and traditional farming communities. http://sa.indiaenvironmentportal.org.in/files/Enduring_Farms.pdf
- Altieri, M. A. y Nicholls, C. (2008). Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas. *Agroecología*. 3: 7-24.
- Altieri, M. A. y Nicholls, C. I. (2013). Agroecología y resiliencia al cambio climático: Principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología*. 8(1): 7-20. Recuperado a partir de <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/182921>
- Botero-Uribe, E. (2015). Estudios del cambio climático en América Latina. El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39855/S1501295_en.pdf?sequence=1 (Consultado 24 julio 2020)
- Cardona-Iglesias, J.L.; Mahecha-Ledesma, L. y Angúlo-Arizala, J. (2016). Arbustivas forrajeras y ácidos grasos: estrategias para disminuir la producción de metano entérico en bovinos. *Agronomía Mesoamericana*. 28(1): 273-288. DOI: <http://doi.org/10.15517/am.v28i1.21466>.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2018). Estadísticas del agua en México. <https://agua.org.mx/biblioteca/estadisticas-de-agua-en-mexico-2018/> (Consultado 24 julio 2020)
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2013). Bosques, cambio climático y REDD+ en México. Guía básica. http://www.enaredd.gob.mx/wp-content/uploads/2014/11/3-Guia-Basica-de-Bosques-Cambio-Climatico-y-REDD_-.pdf (Consultado 27 agosto 2020)
- CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social) (2019). Pobreza y género en México: Hacia un Sistema de Indicadores. <https://www.coneval.org.mx/Paginas/principal.aspx>. (Consultado 27 agosto 2019)
- Criado-Flórez, C.M. y Deháquiz-Mejía, J.E. (2019). Modelo de producción cunícola: alternativa de seguridad alimentaria para familias rurales del municipio de Sogamoso. *Pensamiento y Acción*. 27(julio-diciembre): 91–110. https://revistas.uptc.edu.co/index.php/pensamiento_accion/article/view/10487
- da Costa, J.A.A.; Pérez Luna, E.J.; Espinosa Villafuerte, S.G.; Kichel, A.N. y Reis, F.A. (2017). Sistemas integrados de producción agropecuaria-SIPA, todos los motivos para iniciarlos. In *Embrapa Caprinos e Ovinos-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: Reunión Científica de la Asociación Mexicana para la Producción Animal y Seguridad Alimentaria, 44., Chiapas, México. Programas de Conferencias. Universidad Autónoma de Chiapas, 2017. 35 f.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2019). The State of Food Insecurity in the World, Roma. 71-85. <http://www.fao.org/3/a-i4646e.pdf>. (Consultado 10 noviembre 2020)
- Flores, M. (2020). Covid-19: alimentación, salud y desarrollo sostenible. En R. Cordera & E. Provencio (eds.), *Cambiar el rumbo: el desarrollo tras la pandemia*. UNAM. Ciudad de México, México. Pp. 195-201.
- Gutiérrez-Triay, M.A.; Segura-Correa, J.C.; López-Burgos, L.; Santos-Flores, J.; Santos-Ricalde, R.H.; Sarmiento-Franco, L.; Carvajal-Hernández, L. y Molina-Canul, G. (2007). Características de la avicultura de traspatio en el municipio de Tetiz, Yucatán, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 7(3): 217–224.
- Ismail, F.S.A.; Hayam M.A.; Abo, E.M.; Rabie, M.H. y Aswad, A.Q. (2015). Productive Performance of Bovans White Laying Hens Fed High Nutrient Density Diets Under Egyptian Summer Conditions. *Asian Journal of Animal and Veterinary Advances*. 10: 865-874.
- Jaramillo-Villanueva, J.L.; Vargas-López, S. y Guerrero-Rodríguez, J.D. (2015). Preferencias de consumidores y disponibilidad a pagar por atributos de calidad en carne de conejo orgánico. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 6 (2): 221-232. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11242015000200007&lng=es&tlng=es.
- Jesuyon, O.M.A.; Aganga, A.A.; Orunmuyi, M. y Falade, G.T. (2021). Effect of dietary protein level on egg production and egg-quality characteristics of Japanese quail (*Coturnix coturnix japonica*) in the tropical environment. *Animal Production Science*. <https://www.publish.csiro.au/an/AN20399>

- López-Salazar, S.E. (2019). Producción agroecológica de *Coturnix coturnix* japonica suplementada con *Leucaena leucocephala* y *Moringa oleifera* (México). Tesis de maestría en Ciencias en Bioprospección y Sustentabilidad Agrícola en el Trópico (BIOSAT). Colegio de Postgraduados, Campus Campeche, Campeche, México.
- López-Salazar, S.E.; Flota-Bañuelos, C. y Fraire-Cordero, S. (2020). Producción agroecológica de codorniz (*Coturnix coturnix japonica*) como estrategia para la seguridad alimentaria en Campeche, México. *AgroProductividad*. 13 (1): 3-7.
- Mora-Valverde, D. (2010). Usos de la morera (*Morus alba*) en la alimentación del conejo. El rol de la fibra y la proteína en el tracto digestivo. *Agronomía Mesoamericana*. 21(2): 357-366. <https://doi.org/10.15517/am.v21i2.4900>
- Obregón, J.F.; Bell, C.; Elenes, I.; Estrada, A.; Portillo, J. y Rios, F. (2012). Efecto de la cocción de garbanzos descartados (*Cicer arietinum* L.) sobre la respuesta productiva y el rendimiento de la codorniz japonesa (*Coturnix coturnix japonica*) en la etapa de engorde. *Revista de Ciencia Cubana Agrícola*. 2(1): 169-173.
- Paneque-Rondón, P.; Jiménez, W.; Hernández-Alfonso, P.; Gómez-Águila, M.V.; De las Cuevas-Milán, H.R. y Miranda-Caballero, A. (2017). Comparación del costo energético en el cultivo del maíz con Sistemas Convencional y de Conservación. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 26(3): 58-70. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542017000300007&lng=es&tlng=es.
- Salazar, L.L.; Magaña-Magaña, M.A. y Latournerie-Moreno, L. (2015). Importancia económica y social de la agrobiodiversidad del traspatio en una comunidad rural de Yucatán, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. 12(1): 1-14.
- Santos, T.C.; Murakami, A.E.; Oliveira, C.A.L. y Giralde, N. (2012). Sperm egg interaction and fertility of Japanese breeder quails from 10 to 61 weeks. *Poultry Science*. 1: 205-210.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) (2015). Manual de buenas prácticas de producción de carne de conejo. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/95448/Manual_de_Buenas_Prcticas_de_Produccion_de_Carne_de_Conejo.pdf
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) (2012). Memoria del componente reconversión productiva 2006-2012. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Subsecretaría de Agricultura, Dirección General de Fomento a la Agricultura. <http://www.sagarpa.gob.mx/irc/Memorias%20Documentales/SUBSR%C3%8DA.%20AG>
- Toledo, V.M.; Bassols, N.B.; Frapolli, E.G. y Chaires, P.A. (2008). Uso múltiple y biodiversidad entre los mayas yucatecos (México). *Interciencia. Revista de ciencia y tecnología de América*. 33(5): 345-352.
- Traversa, I. y Alejano, R. (2013). Caracterización de los huertos familiares del norte de Uruguay y metodología para su diagnóstico. *Revista De Ciencias Ambientales*. 45(1): 72-87. <https://doi.org/10.15359/rca.45-1.7>
- Vega-Pérez, C.A.; Grajales-Lombana, H.A., y Afanador-Téllez, G. (2014). Prácticas ganaderas en sistemas de producción en ovinos y caprinos: desafíos para el mejoramiento de la competitividad del sector en Colombia. *Revista de Ciencia Animal*. 8: 41-65. <https://ciencia.lasalle.edu.co/ca/vol1/iss8/4/>
- Wanapat, M.; Cherdthong, A.; Phesatcha, K. y Kang, S. (2015). Dietary sources and their effects on animal production and environmental sustainability. *Animal Nutrition*. 1(3): 96-103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2015.07.004>.
- Zeind-Chávez, M.A. y Castañeda-Camacho, G.E. (2019). Los retos de la Agenda 2030: perspectivas y prospectivas para un desarrollo sostenible. *Hechos y derechos*. 49: 1-4. <https://revistas.juridicas.unam.mx/index.php/hechos-y-derechos/article/view/13084/14> 577

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, campus Conkal y Chiná, y al Colegio de Postgraduados, Campus Campeche, a la Red de Sistemas Agroforestales México (RedSAM), por las facilidades otorgadas para el desarrollo de este documento. Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento otorgado para el desarrollo del proyecto "Rendimiento y calidad de la canal de conejos suplementados con follaje de *Moringa oleifera* y *Guazuma ulmifolia*", y al proyecto 2181 Cátedras-CONACYT "Estrategias agroecológicas para la seguridad alimentaria en zonas rurales de Campeche".

II.3. El meteplante asociado con ganado y árboles: tecnología agrosilvopastoril para mejorar la lechería familiar

Daniel Hernández Archundia¹

Julio Baca del Moral^{1*}

Venancio Cuevas Reyes²

Francisco Javier Hernández Archundia³

Jorge Vargas Monter⁴

Diana Ayala Montejo¹

Carlos Montes de Oca Sanchez⁵

¹Departamento de Fitotecnia, Doctorado en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuaria, México.

³Dirección General de Logística y Alimentación, SADER, México.

⁴Ingeniería en Producción Animal. Universidad Politécnica de Francisco I. Madero, México.

⁵Centro de Economía Social Julián Garcés, A.C., México.

*Autor de correspondencia: julio.baca56@gmail.com

Introducción

La palabra metepantle viene del náhuatl *metl* (maguey) y *pantl* (entre), lo que literalmente quiere decir *entre magueyes*. El metepantle es considerado un sistema agroforestal tradicional de México como lo indican Álvarez (2020), Galán (2018) y Moreno *et al.* (2013) en el cual el maguey se establece en hileras contrarias a la pendiente (García *et al.*, 2020), intercalado con otras especies perennes arbustivas, arbóreas y no arbóreas (nopales y cactus columnares), junto con cultivos generalmente bajo el sistema milpa o forrajeras anuales, además de plantas silvestres (Álvarez, 2018). Galán (2018) lo considera un sistema agroforestal de suma importancia, cuyos componentes bióticos y abióticos interactúan en función de elementos socioculturales que dan como resultado una amplia variedad de usos.

El metepantle es un modo de gestión tradicional del agroecosistema en el altiplano central mexicano que genera múltiples productos y beneficios y que está estrechamente ligado a la producción de la lechería familiar, el cual a través de un enfoque agroforestal puede mejorar la producción de leche mediante un uso racional de sus elementos, respeto al bienestar animal y con la implementación de innovaciones biotecnológicas, esto siempre de la mano y participación de los productores, redundando en la adaptación y mitigación al cambio climático.

El presente trabajo se realizó en una unidad de lechería familiar del altiplano de México, a partir del año 2018 hasta 2020, en el cual se trabajó con pequeños productores en la comunidad de la Reforma, municipio de Españita en el estado de Tlaxcala.

La Reforma según datos del INAFED (2012) se encuentra ubicada en el Altiplano Central mexicano a una altura de 2 640 metros sobre el nivel del mar. Cuenta con vegetación representada por bosque de pino-encino, con un clima templado frío, con régimen de lluvias en los meses de julio a septiembre y precipitación promedio anual de 1 195.2 milímetros.

En este municipio se desarrollan actividades productivas en pequeñas unidades de producción relacionadas con la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca (Baca, 2007).

El objetivo de este trabajo fue el desarrollo tecnológico metepantle con ganado y árboles para la producción de alimentos en un sistema de lechería familiar, que en conjunto con los productores implica un proceso participativo; en él se logró desarrollar innovaciones biotecnológicas para mejorar la calidad nutricional de los componentes vegetales del metepantle (nopal y maguey) que tradicionalmente no se emplean para la alimentación animal por su bajo aporte proteico y energético, además por la presencia de compuestos tóxicos, como tecnología que mejore el manejo del ganado como propuesta de adaptación al cambio climático.

Desarrollo de la propuesta

En este sitio se encuentran establecidos 6 ha de metepantle (figura 1), donde el maguey está plantado en líneas contrarias a la pendiente a una distancia entre sí de 4 m donde también se pueden encontrar intercalados árboles frutales (durazno, ciruela, membrillo, tejocote o capulín) y nopal verdura o tunero, además de árboles relictos de la vegetación original (pino, encino y sabinos); y, entre líneas de maguey, existen callejones donde se desarrolla el cultivo tradicional de milpa (en la cual se asocia maíz, calabaza, frijol o frijol ayocote y haba), o siembra de maíz o avena (cuadro 1). Este arreglo y composición típico del sistema agroforestal dentro del municipio es semejante al descrito por Rosas *et al.* (2016). Entre mayor es la pendiente el ancho de los callejones se reduce (6 m o menor), para mejorar la retención de suelo y agua, mientras que cuando se reduce la pendiente el ancho de los callejones aumenta (≥ 8 m).

Se cultivan diferentes variedades locales de maíz, uno llamado “cañuela” de ciclo precoz con dos variantes de color, uno blanco y otro café claro “aguardientado”, de grano tipo cristalino, con mazorca de ocho carreras de olote muy delgado y alto peso hectolítrico, otra es de grano de color amarillo, tipo cristalino de ciclo tardío. La importancia de sembrar en el metepantle dos maíces de diferente ciclo de crecimiento radica en cómo se presenta el establecimiento de lluvias; cuando el temporal inicia en forma temprana se siembra el maíz amarillo y cuando se retrasan las lluvias en forma tardía se siembra el “cañuela”. Generalmente se establecen las dos variedades ya que de presentarse heladas tempranas el maíz amarillo puede perderse, pero el “cañuela” se encuentra maduro y no recibe daños.

Las fabáceas (frijol, frijol ayocote y haba) se siembran de forma simultánea al maíz para beneficiarse de las labores culturales que recibe éste, a partir de su asociación con

bacterias fijadoras de nitrógeno que realizan aporte de nitrógeno al suelo del cual se benefician todas las especies presentes en la asociación de la milpa.

La calabaza de igual forma se asocia en la milpa para beneficiarse de la interacción de los diversos cultivos además de que, con sus hojas, ayuda a sombrear a las arvenses y reducir su incidencia.

Además de los cultivos de la milpa, y las forrajeras como la avena, se presentan varios tipos de arvenses que en el manejo agroecológico del metepantle cobran gran importancia más allá de ser competidoras; son plantas que pueden tener usos alimenticios como los quelites (*Amaranto spp.*, *Chenopodium berlandieri*, *Portulaca oleracea*, entre otros), medicinales (*Eryngium heterophyllum*, *Argemone mexicana*, *Chenopodium graveolens*, entre otros), su floración permite que el metepantle sea una área de pecoreo (recolección de polen y néctar de la flora del lugar), la cual es importante y es fuente alternativa de forraje como en el caso del acahual forraje (*Heterotheca inuloides*), misma que tradicionalmente es tolerada y aprovechada con este fin.

Figura 1

Dos representaciones de tecnología agrosilvopastoril basada en el metepantle



Autores: Carlos Mones de Oca Sánchez y Daniel Hernández Archundia.

Los productos obtenidos en el metepantle en su mayoría se destinan para el autoabasto y el excedente para la comercialización local (cuadro 2), lo que coincide con Pérez (2017), quien indica que la producción del metepantle se destina al consumo familiar, alimento para el ganado, aves de corral y una parte se destina al mercado local. En la milpa se producen maíz, frijol, haba y frijol ayocote; se destinan para la alimentación humana, y la calabaza tierna junto con sus flores y guías se consumen como hortalizas, mientras que la semilla de calabaza se comercializa para bocadillo, las frutas son sólo para el autoabasto en temporada. Los rastrojos de maíz, haba, frijol, frijol ayocote y la penca de nopal y de maguey son empleados como fuente de alimentación para el ganado, ya sea que se suministren a través del corte y acarreo o por el pastoreo directo

Los árboles frutales cumplen con la función de producir fruta para el autoabasto y junto con relictos de vegetación originaria proporcionan leña a través de la eliminación de

ramas secas como podas de saneamiento y de formación para reducir competencia por espacio o sombra para los cultivos establecidos en los callejones. Además de ello, junto con el maguey y nopal cumple la función de retención de suelo y agua, generan un microclima más estable y son hábitat de gran cantidad de fauna silvestre.

Cabe mencionar que el manejo que se realiza en la asociación de cultivos complementa la propuesta agroforestal, entre ellos el empleo de la biofertilización tipo sólido (bocashi) y líquido (bioles) fabricados a partir de estiércol bovino, melaza y enriquecido con micro minerales, además se emplearon caldos minerales (caldo sulfocálcico) para el control de enfermedades fúngicas. Se abona con estiércol biomadurado, lo cual se realiza a partir de su acumulación en alguna esquina del metepantle por varios meses para que actúen los microorganismos locales, posterior a ello es distribuido e incorporado al callejón o en la fertilización de magueyes, nopales y árboles, con lo cual se logra un manejo libre de agrotóxico, más sano y con el objetivo de cumplir con la visión de una sola salud en el eje suelo, planta, animal, humano y ambiente, además el enfoque de economía circular baja los costos en producción del sistema y, junto con un buen manejo, mantiene la productividad maximizando la rentabilidad total del metepantle y de la tecnología agroforestal propuesta.

Cuadro 1
Especies del sistema tradicional metepantle

Nombre	Especie	Cantidad (plantas/ha)	Ciclo
Maguey	<i>Agave salmiana</i> Otto ex Salm.	100	Anual (perenne)
Nopal	<i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Mill.	200	Anual (perenne)
Maíz amarillo	<i>Zea maiz</i> L.	50 000	Precoz
Maíz cañuela	<i>Zea maiz</i> L.	50 000	Tardío
Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	10 000	Precoz
Ayocote	<i>Phaseolus coccineus</i> L.	10 000	Tardío
Haba	<i>Vicia faba</i> L.	500	Precoz
Calabaza	<i>Cucurbita pepo</i> L. var. <i>pepo</i> L.H. Bailey.	1 000	Tardío
Durazno	<i>Prunus persica</i> L. Batsch.	100	Anual (perenne)
Tejocote	<i>Crataegus mexicana</i> Moc. Sessé	50	Anual (perenne)
Ciruelo	<i>Prunus domestica</i> L.	100	Anual (perenne)
Capulín	<i>Prunus serotina</i> subsp. <i>capuli</i> (Cav.) McVaugh	100	Anual (perenne)
Membrillo	<i>Cydonia vulgaris</i> Pers.	100	Anual (perenne)
Pino	<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	2	Perenne
Encino	<i>Quercus rugosa</i> Née.	1	Perenne
Sabino	<i>Juniperus deppeana</i> Steud.	3	Perenne

Fuente: Elaborado por los autores.

Cuadro 2
Productividad del metepantle

Forraje	Rendimiento (t/ha)	Autoabasto (%)	Venta (%)
Avena (forraje)	4.50	100	0
Avena (grano)	1.00	100	0
Magüey	0.50	50	50
Nopal	0.50	100	0
Maíz grano	3.50	90	10
Rastrojos	9.00	100	0
Frijol ayocote	0.15	100	0
Frijol	0.10	100	0
Calaza	0.10	0	100

Fuente: Elaborada por los autores.

Metodología participativa

Se empleó la metodología participativa de diagnóstico, planificación, monitoreo, y evaluación, planteada por Geifus (2002), en una unidad de producción familiar con el propósito de fomentar la comunicación asertiva para el intercambio de saberes en la presentación, adaptación y transferencia de tecnologías agroecológicas para la producción de leche.

El diagnóstico de la unidad de producción se realizó a través de observación participativa y seguimiento durante un periodo de dos años. La caracterización de la unidad de producción familiar incluyó aspectos relacionados a la estructura familiar, la identificación de saberes locales y la organización para la producción, accesibilidad a servicios de asesoría y a programas gubernamentales.

La tenencia de la tierra es de tipo privada con una extensión de 6 hectáreas donde está establecido el metepantle que lleva en uso 54 años, gestionada por tres generaciones de la familia Montes de Oca, que se integra por dos matrimonios con tres hijos, dos de los cuales son adultos con profesión y un menor de edad. El trabajo cotidiano como el ordeño y alimentación de las vacas lo realizan todos los miembros de la familia, las actividades agrícolas en el metepantle y la limpieza de corrales lo desarrollan los varones y las mujeres se encargan de la transformación de la leche en queso y otros lácteos.

Los integrantes de la familia están familiarizados con el manejo agroecológico ya que recibieron capacitación en ese ámbito por parte del Centro de Economía Julián Garcés A. C., al cual pertenecen y son miembros activos.

El rebaño con el que cuenta la familia se integra por ocho vacas adultas de raza Holstein con certificado de hato libre de brúcela y tuberculosis y tres becerras y dos becerros menores a un año.

La planificación y el seguimiento de la unidad de producción se llevaron a cabo en sesiones participativas con los integrantes de la unidad de producción, para enlistar los recursos disponibles para la crianza de los bovinos productores de leche. Durante el pro-

ceso participativo se les capacitó para la producción de leche con enfoque agroecológico para hacer un manejo sustentable de los recursos naturales disponibles y la apropiación de tecnologías pertinentes a las necesidades de los productores.

De las metas que se plantearon en este proyecto fueron dar una nutrición adecuada en calidad y en cantidad a los animales, el respeto al manejo tradicional del agroecosistema a través del sistema metepantle y el uso integral de todos los recursos disponibles. La apropiación de las tecnologías se valoró a partir de la adopción de éstas, los aspectos técnicos de la unidad de producción de leche y de bienestar mediante la identificación de prácticas de manejo de los animales.

El bienestar animal en la lechería familiar

El bienestar animal es considerado por la FAO y la FIL (2012) como la aplicación de prácticas de manejo de los animales sensatas y sensibles, relacionadas principalmente con el buen estado de los animales. Por lo anterior, en compañía de los productores que integran la unidad de producción familiar, se diseñaron estrategias para lograrlo, siguiendo las siguientes directrices:

- Asegurarse de que los animales están libres de hambre, sed y mal nutrición, para lo cual fue necesario calcular y diseñar una estrategia para abastecer alimento en cantidad y calidad para el ganado.
- Asegurarse de que los animales están libres de incomodidades, se consideró el estándar de 15 m² de espacio en el establo por vaca, sin el empleo de ataduras ni restricciones físicas.
- Asegurarse de que los animales están libres de dolores, lesiones y enfermedades. Las vacas no se les infringe daño físico de ninguna índole y sólo se empleó medicamento (bolos uterinos para tratamiento de retención placentaria) o tratamientos hormonales (prostaglandinas para retención placentaria) cuando la salud de las vacas se vio comprometida.
- Asegurarse de que los animales están libres de temores. Los animales son tratados con respeto y cariño, considerados como elementos esenciales dentro de la unidad familiar.
- Se permite la socialización libre de los animales dentro del establo, se respetan los ciclos reproductivos naturales, y sólo se emplean recursos de reproducción asistida en casos extraordinarios.
- La crianza de los becerros se hace con leche de sus madres, sin el uso de sustitutos lecheros, realizándose el destete a los tres meses.

Cálculo de disponibilidad de forraje en el sistema agrosilvopastoril basado en el metepantle

La disponibilidad de forraje (DF) que se produce en el metepantle se estimó a partir de los promedios anuales de rendimiento (Re) expresados en t/ha de las especies forrajeras que ellos cultivan, esto como materia seca (MS); este dato se multiplicó por las hectáreas destinadas (ha) para su siembra (cuadro 3).

Cuadro 3
Disponibilidad de forraje en el metepantle

Forraje	Superficie (ha)	Rendimiento (t/ha)	Disponibilidad de forraje (t)
Avena	6	2.0	12
Maíz grano	9	4.0	36
Rastrojo de maíz	3	9.0	27
Maguey	6	0.5	3
Nopal	2	0.5	1
Disponibilidad de forraje total			78

Fuente: Elaborado por los autores.

Cálculo de capacidad de carga en el sistema agrosilvopastoril basado en el metepantle

El cálculo del número de animales que es posible alimentar (NA) con los recursos disponibles, dentro de la unidad de producción familiar, se determinó considerando el requerimiento diario de materia seca (Req. MS) para la alimentación de una vaca lechera con base en un 3% de su peso vivo con un promedio (PV) de 450 kg, el cual es un estándar para la raza Holstein.

Se determinó el requerimiento anual (RA) de materia seca por cada vaca que es el requerimiento de materia seca diario (Req Ms) por 365 que son el número de días del año.

Para estimar la capacidad de carga del sistema agroforestal propuesto se dividió la disponibilidad de forraje entre el requerimiento anual de materia seca por vaca ($NA = DF_{total}/RA$) (cuadro 4).

Cuadro 4
Capacidad de carga en el sistema agrosilvopastoril basado en el metepantle

Fórmula	Operación	Resultado
$Req\ MS = 0.03(PV)$	$Req\ MS = 0.03 (450\ kg)$	13.5 kg
$RA = Req\ MS (365)$	$RA = 13.5\ kg/vaca (365)$	4927 kg/vaca
$NA = DF_{total}/RA$	$NA = 78000\ kg/4.927\ kg\ /vaca$	15.83 vacas

Req MS=Requerimiento de materia seca. RA=Requerimiento animal de materia seca año. NA=Número de animales con posibilidad de ser alimentados. DFtotal=Disponibilidad de forraje.

Fuente: Elaborado por los autores.

La unidad de producción familiar dispone de recursos forrajeros a través de la producción anual del metepantle para la alimentación de 15 vacas de manera permanente (figura 2). En esta región la disponibilidad de tierra para la producción de forraje indica que se requieren de 1.2/ha para sostener la alimentación de una vaca.

Figura 2
Alimentación del ganado con recursos del metepantle



Fuente: Carlos Montes de Oca Sánchez y Daniel Hernández Archundia.

Manejo biotecnológico del maguey a través del ensilaje

El maguey y el nopal son dos recursos forrajeros disponibles dentro del metepantle, pero éstos presentan baja calidad nutricional o contienen compuestos tóxicos que limitan su utilización en la alimentación animal, por lo cual fue necesario implementar recursos biotecnológicos sencillos para su aprovechamiento, ya que estas dos especies vegetales están disponibles en época donde escasean otro tipo de forrajes convencionales.

Ensilado de maguey

Mediante este proceso se eliminan compuestos tóxicos (saponinas y alcaloides) y se mejoran sus características nutricionales. Para la elaboración del ensilado de maguey se recolectaron las pencas en los metepantles, las que se picaron en trozos no mayores a 2 cm para facilitar la compactación y reducir la cantidad de aire; se mezclaron con zacate de maíz molido, esta mezcla se colocó en capas de entre 5 a 10 cm en bidones de plástico de capacidad de 200 litros, compactándose y adicionando una mezcla elaborada con melaza, agua y cultivo lácteo (suero de leche), al final se realizó el sellado con la tapa del bidón (figura 3). Las transformaciones químicas necesarias para la eliminación de sustancias tóxicas se producen en un periodo aproximado de 30 días, transcurrido este tiempo se abrió el silo para la alimentación de los animales ofreciendo la cantidad de 7 a 10 kg para vacas en producción y de 5 a 8 kg para becerros, todo ello previo a un proceso de adaptación de la alimentación de los animales que demoró cinco días.

Enriquecido proteico de nopal

Es una tecnología adaptada de Miranda *et al.* (2009) mediante la cual se pueden mejorar las características nutricionales del nopal, en específico el nivel de proteína cruda al aumentarla de 3 al 20%. De esta forma, se crea una alternativa viable para la utilización sustentable del nopal.

La elaboración de la sopa de nopal se enriquece con alguna fuente de nitrógeno, energía y de minerales. Miranda *et al.* (2009) recomiendan emplear por cada 100 kg de nopal molido o picado en partículas pequeñas, 600 gramos de urea, 80 gramos de sulfa-

to de amonio y 600 gramos de superfostato simple, disueltos previamente en 4 litros de agua y mezclados en forma homogénea, la fermentación se puede enriquecer con lactobacilos o levaduras, las cuales pueden adicionarse de fuentes tan simples como yogurt, suero de quesería o levadura de panificación.

Una forma que se ideó para evitar el uso de fertilizantes de síntesis química fue el emplear una fuente de nitrógenos como alfalfa henificada y como fuente de minerales y energía a través de melaza. Por cada 100 kg de nopal cosechado en los metepantles se empleó 5 kg de alfalfa y 2 kg de melaza, disueltos en agua e integrados con el nopal, todos juntos con levaduras (levadura para pan) y lactobacilos (suero de leche) en un bidón de plástico de 200 litros de capacidad, dándose un tiempo de fermentación de 48 horas, mezclándolo frecuentemente (figura 4).

Se suministró a los animales posterior al periodo de fermentación, mezclado con zacate molido para que adsorbiera la gran cantidad de humedad de la sopa de nopal y previo a un periodo de adaptación a razón de 2 kg por vaca y medio kg para becerros. Para nuevas preparaciones se dejaba una cantidad del 20% de la sopa anterior como inoculante y se agregan nuevos ingredientes a excepción de la levadura y el suero de leche.

Figura 3
Proceso de elaboración de ensilado de maguey



Autor: Daniel Hernández Archundia.

Figura 4
Proceso de elaboración del enriquecido proteico de nopal



Autor: Daniel Hernández Archundia.

Manejo reproductivo

Posterior al parto se presentó el primer celo alrededor de los 60 días, se esperó para dar el primer servicio hasta los 90 días post parto a través de monta natural con sementales pertenecientes a productores vecinos de la comunidad, para que la vaca recuperara peso y el tracto reproductivo involucionará en forma completa. Para asegurar en un futuro contar con semental en el momento que se requiriera se tomó la decisión de criar un becerro macho que no estuviera emparentado con las vacas de hato.

Resultados

Al realizar un proceso participativo con un acercamiento estrecho con los integrantes de la unidad familiar se logró hacer intercambio de saberes para el desarrollo de estrategias y de tecnologías encaminadas a hacer un uso sustentable de los recursos disponibles, facilitado por el conocimiento previo del manejo agroecológico.

El considerar como base de la producción el bienestar animal permite tener directrices a seguir junto con la propuesta agroforestal y agroecológica; así, se logró el mantenimiento, mejora de la salud y productividad del hato lechero. El manejar con respeto y amor a los animales permitió mansedumbre, gran facilidad de manejo y bajos niveles de estrés. Se logró un 100% en la sobrevivencia de las crías nacidas en la unidad familiar, así como el destete exitoso de becerros sanos y fuertes para aumentar el hato, remplazo o comercialización.

Las 6 ha en las que se establece la tecnología agroforestal basada en metepantle tiene una capacidad para generar los forrajes y granos para la alimentación de un máximo de 15 vacas adultas y a sus becerros, con lo cual se garantiza un abasto continuo y

adecuado para una nutrición y una salud apropiadas para una producción sustentable de leche.

Cuando se alcance la cantidad de vacas adultas en producción máxima según los cálculos antes expuestos se podrán comercializar las becerras excedentes a otras pequeñas unidades locales, siendo ello una parte importante de los ingresos por esta actividad.

La utilización de recursos forrajeros del metepantle de poco valor nutricional como el nopal o limitados para su uso por presencia de sustancias tóxicas como el maguey abre la puerta para la suplementación y mejora de la dieta a partir del empleo de biotecnología de fácil aplicación, además de ser recursos disponibles en época de escases de forraje.

El bienestar animal junto con un manejo nutricional adecuado a dado como resultado que las vacas entren en celo en un lapso no mayor a 90 días post parto, reduciéndose el apoyo de manejo hormonal y reproductivo exógeno, aumentando la fertilidad y preñez por el uso de monta natural, con lo que se asegura la continuidad de la producción.

Además de la interacción del metepantle con el ganado a través del corte y acarreo de forraje, el estiércol bovino es una fuente de abono. Al estar los callejones en periodo de descanso durante la temporada de sequía, se extiende y se incorpora el estiércol biomadurado.

El promedio de producción fue 12 l/día por vaca nivel bajo para la raza Holstein en establo tecnificado que puede duplicar o triplicar esta cantidad, pese a ello es superior a lo reportado para el estado de Tlaxcala por Cesín *et al.* (2007), donde el rendimiento por vaca (nivel de hato) es bajo, 7.3 l (en dos ordeñas por día). Este bajo rendimiento se ve compensado por un bajo costo de producción, y a que el rendimiento a la transformación es de 7 kg de leche por uno de queso, mientras que lo normal es 10 kg de leche por un kg de queso, lo cual beneficia a los productores debido a que la mayoría de la leche se destina para la transformación de quesos tipo panela, manchego, Oaxaca, además de yogurt (figura 5) y en segundo lugar venta de leche fluida y una mínima cantidad para autoabasto. La calidad de la leche en primer lugar ha propiciado la mejora en la dieta familiar, los productos resultantes de la transformación tienen una alta aceptación entre los consumidores y una gran demanda, agotando en su totalidad la producción destinada al mercado con un precio mayor en comparación con productos convencionales, similar a lo considerando por Cesín *et al.* (2007). Los ganaderos que transforman leche en derivados lácteos y las queserías artesanales tienen como fortaleza, para competir en un mercado asimétrico, los fuertes vínculos de sus productos con la cultura gastronómica local, pues permiten mejorar la economía familiar brindando una fuente interna de trabajo y de bienestar.

Figura 5
Transformación de la leche



Autor: Carlos Montes de Oca Sánchez.

A través del proceso de trabajo participativo para un uso sustentable del metepantle en la alimentación y manejo de ganado lechero, bajo una visión agroecológica, se logró transferir y adaptar tecnologías adecuadas y acordes a las condiciones socioambientales, con una producción lechera que vela por el bienestar animal, respeto al medioambiente a través de la sustitución y eliminación de uso de agrotóxicos y que es económicamente viable, lo que permite tener una fuente de empleo e ingresos dignos para los integrantes de la unidad familiar por lo que, de acuerdo con Lopera *et al.* (2017), “la demanda cada vez mayor de productos lácteos locales, saludables y sostenibles, puede ser un incentivo importante para muchos productores. Por lo tanto, el acceso a mercados diferenciados y la posibilidad de agregarle valor a la leche serán determinantes en la adopción generalizada de este tipo de tecnologías”.

Reflexión final

En el metepantle asociado a ganado bovino en la producción de leche con árboles frutales y forestales como tecnología agrosilvopastoril en donde se producen los forrajes y cereales necesarios para la alimentación del ganado lechero familiar que es suministrado a través del sistema de corte y acarreo, los cultivos agrícolas y especies perennes se ven beneficiados por el aporte de nutrientes por medio del estiércol biomadurado y de la aplicación de biofertilizantes producidos con éstos.

Los diferentes cultivos con sus ciclos productivos, las interacciones biológicas positivas y la gran agrobiodiversidad es una estrategia que está sirviendo para hacer frente a los embates del cambio climático, mediante la tecnología agrosilvopastoril basada en el metepantle más adaptable y resiliente, no sólo para la alimentación de ganado lechero sino también para generar seguridad alimentaria, ya que la mayoría de sus productos también son básicos para la gastronomía tradicional del altiplano mexicano.

Aspectos destacados

1. El manejo de especies nativas y criollas, rotación de cultivos, y especies adaptadas a déficit hídrico, evidencian que el metepantle agrosilvopastoril es un sistema resiliente y adaptable ante los embates de las variaciones ambientales.
2. La utilización de procesos de biotecnología básica como el ensilado de maguey y sopa de nopal es un medio por el cual se aprovechan elementos del metepantle de baja calidad y que potencializan su uso para mejorar la nutrición del ganado lechero familiar.
3. La combinación de los componentes y manejo agroecológico en el metepantle permiten la resistencia del sistema; por tanto, es necesario difundir su establecimiento para contribuir a la sostenibilidad de la lechería familiar.

Literatura citada

- Álvarez, M.C.P. (2018). Caracterización del uso y manejo de *Juniperus deppeana* dentro de un sistema agroforestal en la comunidad El rosario, Tlaxcala, México. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias biológicas, UNAM, 125 p.
- Álvarez, R.G.D.; Figueredo, U.C.J. y Casas A. (2020). Sistemas de manejo de maguey pulquero en México. *Revista Etnobiología*. 18(2): 3-23. <https://revistaetnobiologia.mx/index.php/etno/article/view/377/362>
- Baca, M.J. (2007). Evolución de PESA - FAO en México. Seguridad alimentaria en Puebla; importancia, estrategias y experiencias. En: Jiménez, F. A. (coord.). Secretaría de Desarrollo Rural del Gobierno del estado de Puebla. Colegio de Postgraduados Campus Puebla. 87 p. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&pid=S2007-0934201500090213900002&lng=
- Cesín, V.A.; Ramírez, V.B.; Aliphath, F.M. y Martínez, C.D. (2010). Producción de forraje y ganadería lechera en el suroeste de Tlaxcala, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 12(3): 639-648. <https://www.redalyc.org/pdf/613/61345105.pdf>.
- Espinoza-Villavicencio, J.L.; Palacios-Espinosa, A.; Ávila-Serrano, N.; Guillén-Trujillo, A.; de Luna-de la Peña, R.; Ortega-Pérez, R. y Murillo-Amador, B. (2007). La ganadería orgánica, una alternativa de desarrollo pecuario para algunas regiones de México: Una revisión. *Interciencia*. 32(6): 385-390.
- García, N.R.M.; Galán, R.M.; Cuevas, S.J.A. y Álvarez, H.R. (2020). Identificación y caracterización morfológica de agaves en sistemas agroforestales con metepantle en tierras campesinas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 11(4): 917-920. <http://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/editorial/index.php/agricolas/article/view/2468/3257>.
- FAO (2013). The state of food and agriculture: Food systems for better nutrition. 114 p. Roma. Italia. <http://www.fao.org/docrep/018/i3300e/i3300e.pdf>.
- Galán, R.M. (2018). Contribución al entendimiento del sistema agroforestal con metepantle en Tepetlaoxtoc, México, Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México. <http://repositorio.chapingo.edu.mx:8080/bitstream/handle/20.500.12098/544/mcads-grm-18.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Geilfus, F. (2002). 80 herramientas para el desarrollo participativo: diagnóstico, planificación, monitoreo, evaluación. IICA. San José, Costa Rica. 217p. <http://repiica.iica.int/docs/B0850e/B0850e.pdf>.
- INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal) (2019). Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. Estado de Tlaxcala. H. Ayuntamiento de Españaita. 15 p. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM29tlaxcala/municipios/29012a.html>.
- Lopera, J.J.; Márquez, S.M.; Ochoa, D.E.; Calle, Z.; Sossa, C.P. y Murgueitio, E. (2017). Producción agroecológica de leche en el trópico de altura: sinergia entre restauración ecológica y sistemas silvopastoriles. *Agroecología*. 10(1): 79-85. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/300761>.
- Miranda-Osorio, G.; Flores-Valdez, C.A.; Miranda-Romero, L.A. y Cruz-Miranda, M. (2009). El nopal como forraje. *Revista Extensión al Campo. UACHapingo*. 2(10-11): 23-27. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&pid=S2007-0705201700010014900025&lng=
- Moreno, C. I.; Toledo, M.V.M. y Casas, A. (2013). Los sistemas agroforestales tradicionales de México: una aproximación biocultural. *Botanical Sciences* 91(4): 375-398. <http://www.scielo.org.mx/pdf/bs/v91n4/v91n4a1.pdf>

José Manuel Palma • José Antonio Torres • Eduardo Valdés | Coordinadores

- Rosas, C.J.I.; Romero, L.M. del R.; Uribe G.M.; Romo, L.J.L. y Cruz, L.A. (2016). Sistema agroforestal y alimentación familiar en Vicente Guerrero, municipio de Españita, Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 16: 3197-3206. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7nspe16/2007-0934-remexca-7-spe16-3197.pdf>
- Pérez, S.J.M.; Moctezuma, P.; Sales, C.S.; Reyes, M.L.J., y Juan, P. I. (2017). Manejo del suelo en la agricultura tradicional de laderas en Tlaxcala y el Valle de Toluca, México. En Carreño, F., Rodríguez, C. y Castellanos, J. A. *Patrimonio biocultural. Experiencias integradoras*. México (México): Universidad Autónoma Chapingo. 99 p. <https://www.academica.org/sergio.moctezuma/22.pdf>

Agradecimientos

Un gran agradecimiento por el apoyo y por la colaboración brindados por la familia Montes de Oca Sánchez de la comunidad de la Reforma para la realización de este trabajo, de igual forma al Centro de Economía Social Julián Garcés A.C., por todas las facilidades brindadas.

II.4. Transición de una producción de monocultivo a un sistema agrosilvopastoril con enfoque de economía circular

Gabriela Rodríguez Licea^{1*}

Eric Amaro Peralta¹

José Manuel Palma García²

Francisco Ernesto Martínez Castañeda¹

¹Universidad Autónoma del Estado de México.

²Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Colima.

*Autor de correspondencia: gabyrl1972@hotmail.com

Introducción

El monocultivo es una práctica agrícola en la que la superficie territorial disponible se utiliza para la siembra de una sola especie vegetal sin rotación de cultivo: no obstante, a pesar del incremento que se pudiera generar en la producción a gran escala, esta actividad deriva en afectaciones negativas medioambientales, socioeconómicas y culturales. Los sistemas diversificados de producción por su parte, que permitan la rotación de las especies, resultan en alternativas que protegen la biodiversidad, el suelo y el agua.

El presente trabajo tiene por objetivo identificar el impacto técnico-productivo y económico generado por un sistema agrosilvopastoril que fue introducido en una unidad productiva de monocultivo como estrategia de adaptación, ubicada en Atlautla, Estado de México. La identificación de los componentes agrícolas, forestales, pecuarios y piscícolas se dio a través de información primaria obtenida de recorridos realizados en campo y de la aplicación de encuestas y de entrevistas al productor, así como de la toma de fotografías. A través de la información recopilada se identificaron las tecnologías implementadas asociadas al sistema agrosilvopastoril y se determinó la relación que éste tiene con la transición de una economía lineal a una economía circular. Se estimó la función de producción y el óptimo técnico de la unidad analizada.

Para cumplir con el objetivo planteado, el trabajo comprende diez secciones organizadas de la siguiente manera: modelo de economía lineal; modelo de economía circular; sistemas agrosilvopastoriles; contexto regional; descripción de la unidad de producción; óptimo técnico-económico en la producción de ovinos; análisis diferencial estructural en el sistema agrosilvopastoril; hallazgos de tecnología agrosilvopastoril; aspectos productivos y reflexiones finales.

Modelo de economía lineal

De acuerdo con Monchón y Beker (2008), el modelo económico lineal se basa en prácticas empresariales que buscan la productividad. Se basa en el ciclo extraer-producir-desechar y en la innovación tecnológica. La cultura del consumo propició que el ser humano adqui-

riera constantemente bienes a fin de reemplazar los desactualizados y obsoletos por otros nuevos y destinara los anteriores a la basura, dando pauta esto al ciclo, extraer-producir-comprar-utilizar-desechar, el cual se repite ininterrumpidamente y forma parte fundamental en un crecimiento económico permanente y a un consiguiente deterioro medioambiental.

Al estar la economía centrada en un sistema económico capitalista lineal y consumo desenfrenado, no se da pausa a que los productos se reutilicen, reaprovechen o reciclen, por lo que se convierten en basura o desechos que terminan en vertederos sanitarios o incineradores, limitando esto la posibilidad de ser devueltos al proceso productivo. Ante esta ineficiencia (2018) refieren que, de continuar las empresas operando bajo este modelo, para el año 2050 no sólo los costos sociales y ambientales serán insostenibles, sino que se necesitarán tres veces más de materiales, 70% más de alimentos y las necesidades de agua y energía se incrementarán en un 40%.

La Organización Internacional para la Conservación de la Naturaleza (WWF por sus siglas en inglés), 2018, registró una reducción en 60% de la población global de invertebrados entre 1970 y 2014, la desaparición del 20% de la Amazonía en sólo 50 años, pérdida de la mitad de los corales en los últimos 30 años, reducción del 83% de las poblaciones de agua dulce desde 1970, presencia de fragmentos de plástico en el estómago de aves marinas, la disminución del 89% de poblaciones de especies en Centro y Sudamérica en relación con 1970 y del 22% entre 1970 y 2010 del hábitat de los mamíferos. La “Huella Ecológica” utilizada por la WWF, identifica la relación entre el número de habitantes y su consumo de recursos naturales, así como la cantidad de dióxido de carbono que generan; además, a partir de la “Biocapacidad” mide la capacidad que tiene un ecosistema para regenerar lo que la población toma de los recursos naturales.

El modelo económico lineal basado en la estructura tomar-hacer-tirar ya es no sostenible, tal y como lo refieren Steffen *et al.* (2015) al plantear que, ante el fácil acceso de materiales y energía, y la disponibilidad de medios baratos para deshacerse de lo que ya no les interesa se alcanzaron los límites físicos. La economía circular representa una alternativa atractiva y viable para que las empresas reparen, reciclen, reaprovechen y reutilicen los residuos y, en consecuencia, los conviertan en recursos, generando con ello procesos productivos eficientes y sustentables.

Modelo de economía circular

La EEA (2016) refiere que la economía circular es un ciclo de desarrollo continuo positivo que preserva e incrementa el capital natural, optimiza los rendimientos de los recursos y minimiza los riesgos del sistema, gestionando *stocks* finitos y flujos renovables. Los tres principios en los que se basa este modelo, son: preservar y aumentar el capital natural controlando los *stocks* finitos y equilibrando los flujos de recursos renovables; optimizar el rendimiento de los recursos circulando siempre productos, componentes y materiales en su nivel más alto de utilidad en los ciclos técnico y biológico; promover la efectividad del sistema a través de la generación de patentes y de eliminación de externalidades negativas.

Este modelo plantea como objetivos: reducir los insumos, el uso de recursos naturales, la dependencia de importaciones de recursos naturales, las emisiones y las pérdidas de materiales y residuos; compartir en mayor medida la energía y los recursos renovables

y reciclable; mantener el valor de los productos, componentes y materias en la economía. El cumplimiento de estos objetivos se puede dar a través de modelos innovadores de negocios y el eco-diseño y diseño para sostenibilidad.

Desde el punto de vista económico, el modelo de economía circular implica crear valor, operar bajo comercio justo, participar en las cadenas de valor, prolongar la vida útil de los productos y reestructurar estrategias de marketing. Lacy y Rutqvist (2015) refieren que prolongar la vida útil implica fabricar para durar, acondicionamiento-renovación, mercados de segunda mano, actualización, repuesto, reparación; mientras que, los tres roles asociados a los modelos de negocios, involucran: *reducir*, minimizar el input de energía primaria, materias primas y residuos a través de la eco-eficiencia (Ghisellini *et al.*, 2016); *reutilización*, operación en la cual productos no sean residuos, *reciclado*, los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos, materiales o sustancias.

Webster (2015) refiere que para materiales biológicos la esencia de creación de valor está en la oportunidad de extraer valor adicional de los productos y materiales haciendo que vayan en cascada a través de otras aplicaciones. Como resultado de lo anterior, los beneficios al implementar el modelo de economía circular, son: reutilización y disminución de residuos, incremento de la rentabilidad como resultado de un mejor aprovechamiento de los materiales, compromiso empresarial con el medioambiente, generación de ventajas competitivas.

Es importante referir que desde el punto de vista de la producción sostenible la economía circular se basa en tres principios: preservar y mejorar el capital natural, controlando existencias finitas y equilibrando los flujos de los recursos renovables; optimizar el uso de los recursos, rotando productos, componentes y materiales con la máxima utilidad en todo momento, tanto en los ciclos técnico como en los biológicos; fomentar la eficacia del sistema, revelando y eliminando externalidades negativas (EMF, 2017). El objetivo de estos principios es incrementar la producción con la misma materia prima generando valor agregado y reduciendo el daño que afecta a las personas: suelo, agua, aire y cambio climático.

La figura 1 presenta la estructura de una economía circular, la cual se basa en la generación de valor, en la reducción de recursos a partir del uso de energías limpias que permitan la regeneración del ecosistema, la reutilización, redistribución y aprovechamiento de residuos que permitan la sustitución de materiales vírgenes usados como materia prima, hasta la creación de nuevos productos a partir de estos desechos. Es común encontrar prácticas ganaderas que utilizan una gran cantidad de derivados y desechos agroindustriales que, en el mercado, tienen valor de desecho y carga ambiental positiva, sin embargo, al ser utilizados como insumos en la producción animal este valor mercantil cambia y su carga ambiental es incorporada a un nuevo ciclo. Desafortunadamente, este tipo de prácticas son poco documentadas o tratadas como parte de un sistema de economía circular, por lo que los costos y las cargas ambientales pueden ser sobre estimadas.

El ecodiseño también es importante en la integración de aspectos ambientales y del concepto y desarrollo de los productos. Sanz (2014) refiere que debe enfocarse en el rediseño de productos existentes en busca de mejoras y en el diseño de productos que sean eficientes y sostenibles, derivándose esto en la ecosustentabilidad y conservación

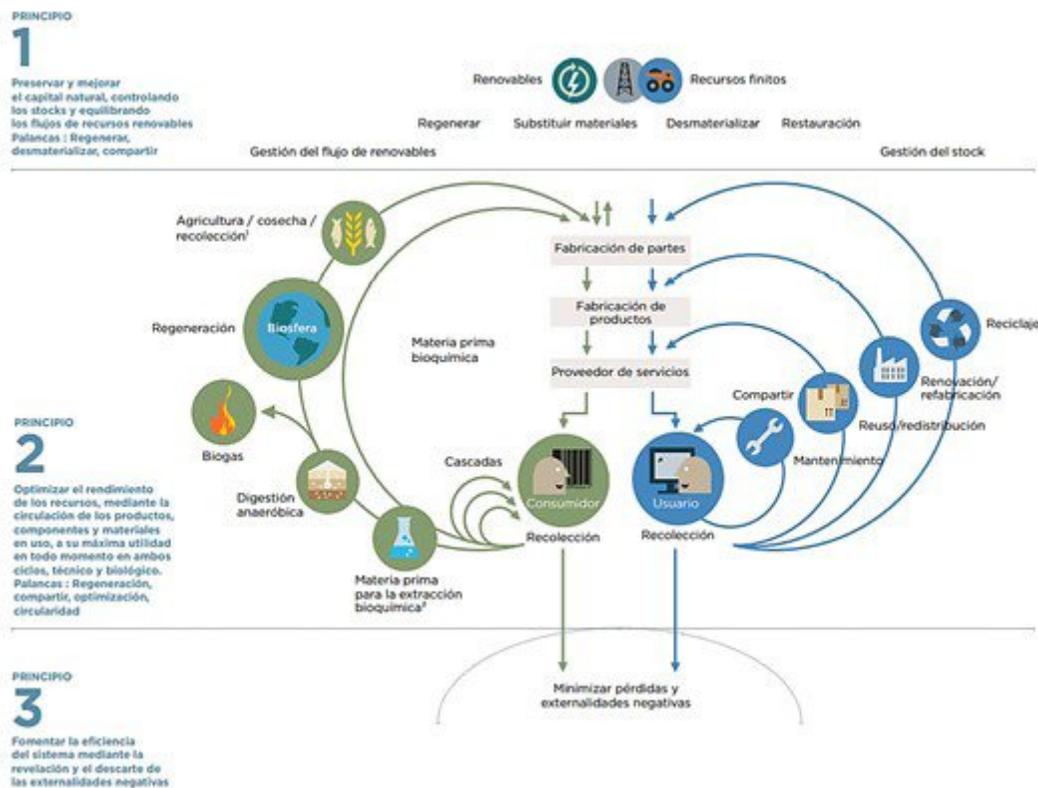
del medioambiente. Por otra parte, Luttopp y Lagerstedt (2006) describen que un producto que integra el ecodiseño debe estar libre de materiales tóxicos, optimizar y reutilizar el material de tal forma que no haya desperdicio y que genera energías limpias, que reduzca la contaminación por su desecho o si lo hay se pueda reutilizar a través de su previa elaboración ecosostenible.

Sistemas agrosilvopastoriles

Los sistemas agrosilvopastoriles (SASP) derivan de los sistemas agroforestales y tienen por objetivo incrementar la productividad, diversificar la producción, generar ventajas para el bienestar animal y la prestación de servicios ambientales.

Son una opción de producción que favorecen la preservación de la biodiversidad y se ajustan a las estrategias de los programas de reducción de emisiones de deforestación y degradación de los bosques, dado que permiten ampliar la cobertura forestal, producir madera y contribuir a la disminución de emisiones.

Figura 1
Representación estructural de una economía circular



Fuente: Ellen MacArthur Foundation, SUN, y McKinsey Centro para negocios y medio ambiente. Dibujo de Braungart y McDonough, Cradle to Cradle (C2C). (MacArthur, 2015).

De acuerdo con Iglesias *et al.* (2011) los SSP representan una oportunidad desde el punto de vista *económico* al diversificar la producción que posibilita obtener ingresos a corto, mediano y largo plazo, atenuar las fluctuaciones de precios y del mercado de productos, y generar ingresos adicionales por la producción de madera y derivados, *pro-*

ductivo al generar insumos como pasturas y sombra para el abrigo y resguardo de los animales, *social* al incrementar la calidad de vida y resiliencia de los que co-habitan el sistema y *ambiental* al conservar la flora y la fauna nativa de la región, propiciar el retorno de aves silvestre como las garzas y evitar la erosión del suelo.

La agroforestería combina espacial y temporalmente el componente arbóreo con el pecuario a fin de maximizar el uso de la tierra, aunque en algunos casos no es necesario que el componente leñoso esté en el mismo sitio que el animal, dado que el forraje puede ser trasladado de bancos forrajeros o cercas vivas, las cuales son podadas y el forraje producto de la poda es suministrado a los animales estabulados. La integración y dinámica de estos sistemas produce cuatro efectos: de los árboles sobre el suelo, del dosel sobre pasturas y animales, del suelo sobre pasturas y animales, del manejo o gestión del SASP.

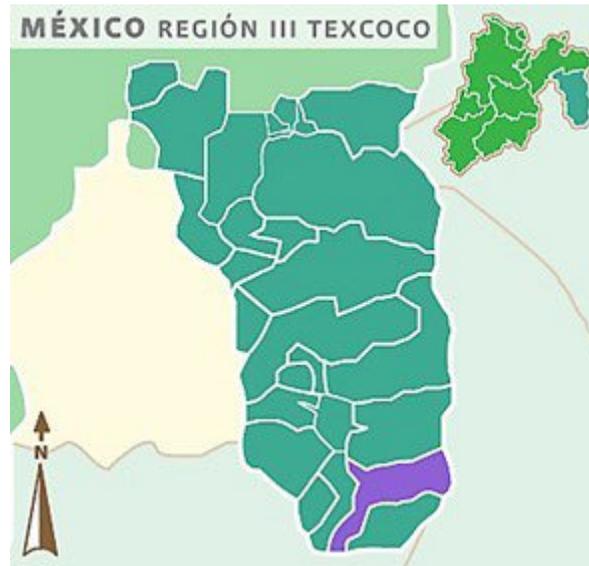
Es importante referir que los aspectos que involucran a la agroforestería están asociados con los siete pilares de la economía circular, dado que en ambos casos los materiales se reciclan con un alto valor continuo, la energía está basada en fuentes renovables, el agua se extrae a un ritmo sostenible y la recuperación se maximiza, la biodiversidad es estructuralmente apoyada y mejorada, la sociedad y la cultura humana se preservan, la salud y el bienestar de los humanos y de otras especies se respaldan estructuralmente, y las actividades humanas generan valor, aspectos que pueden integrarse desde el punto de equidad, resiliencia y transparencia.

Contexto regional

La palabra *Atlautla* es de origen náhuatl, proviene de dos vocablos; *atlautli*, *barranca* y *tla*, *partícula de abundancia*, lo que se traduce como “lugar donde abundan las barrancas”.

Se ubica en la Región III-Texcoco, del Estado de México; sus colindancias, son: norte, Amecameca; este, Puebla y Morelos; sur, Ozumba y Tepetlixpa (figura 2). La superficie es de 162.06 km², con altura de 5 438 msnm (cerros Tesanto, Olotepec, Yoloxóchitl, Techalotepece, Ventorrillo, Hualcintepatl, Tlapizatepetl, Tepeixtle) y diferentes afluentes de agua (ríos Nexpayantla, Tecamacapa, Cuauhxolo, Huiclasioc, Camautitla, Tequixquiala, Huixilac y Tecuancalco, y los manantiales Apitza, Amalacaxco, Hueyatla y Acaltitla).

Figura 2
Municipio de Atlautla



Fuente: Tomado de la *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones del Estado de México*.

Se registra una temperatura media de 14.1 °C, precipitación pluvial 133.6 mm, evaporación 950 partes por millón; éstas son favorables para pinos, oyameles, cedro, encinos, madroños, plantas medicinales, zacatón y pastizales, los cuales son el hábitat de coyotes, gato montés, tejón, venado, zorra, tlacuache, teporingo, puma, armadillo y aves. Otros recursos naturales son arenas y ceniza arrastradas desde las faldas del volcán, lipilli y piedra pómez. Del suelo municipal, más del 50% se destina a la silvicultura y menos del 0.5% a actividades pecuarias (figura 3). Por otro lado, de PEA, 57% se emplea en el sector primario, dentro del que destacan la producción bovina y ovina (figura 4).

En la agricultura sobresalen aguacate, alfalfa, avena forrajera, calabacita, capulín, ciruela, durazno, ebo, frijol, haba, limón, maguey, maíz, nabo forrajero, nuez, tejocote, tomate rojo y verde, trigo grano (SIAP, 2019).

Descripción de la unidad de producción

La unidad productiva (UP), objeto de estudio, se ubica en el municipio de Atlautla, tiene una superficie de 500 m² y se adquirió en 2007. Desde el punto de vista técnico-productivo la UP trabajaba únicamente al 50% de su capacidad operativa bajo sistema agrícola tradicional de monocultivo enfocado a la producción de maíz. Se identificaron árboles como fresnos, encinos y algunos aguacates de variedades criollas (*Persea americana var. Drymofilia*), que no tenían un enfoque de negocios. La producción de la UP se destinaba para autoabasto familiar.

Figura 3
Atlautla: Uso de suelo

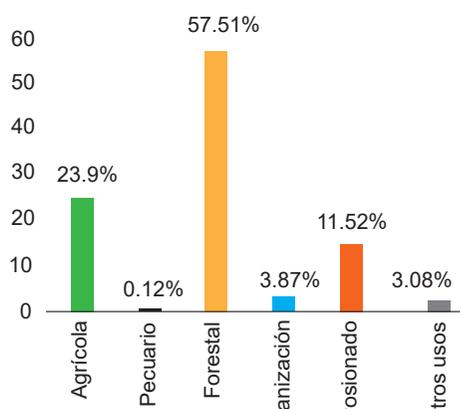
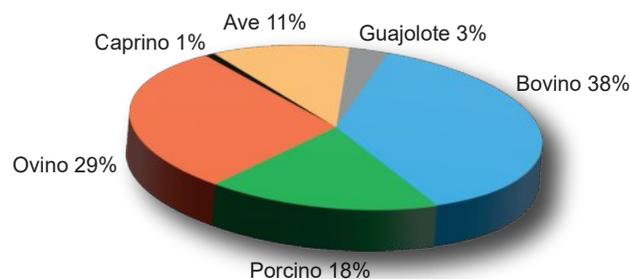


Figura 4
Atlautla: PEA por sector productivo



Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por la *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones del Estado de México* y por el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2020.

La UP se transformó hacia un sistema agrosilvopastoril (SASP). Inicialmente se introdujo un sistema de cultivos mixtos donde destacaban el maíz, frijol (*Phaseolus vulgaris*), calabaza italiana (*Cucurbita pepo*), tomate verde (*Physalis philadelphica*) y chícharo (*Pisum sativum*). En el 2011 se iniciaron con prácticas de agricultura orgánica y siembra de aguacate Hass (*Persea americana*). Para resolver el problema de escasez de agua,¹ en 2016 se construyó un estanque para la captación de agua pluvial, la cual se utiliza para el sistema de riego introducido para la siembra de calabacita y para el riego de aguacate y pastos de corte, específicamente maralfalfa (*Cenchrus sp.*) durante la temporada de sequía; en dicho estanque se produce carpa koi (*Cyprinus carpio*).

En 2019, se introdujo un rebaño de ovinos (*Ovis aries*) de la raza Dorper con 15/16 de pureza y aves de corral como guajolotes criollos (*Meleagris gallopavo*), gallos (*Gallus gallus domesticus*) miniatura y gallinas de postura Rhode Island. Para alimentar el rebaño y la parvada se introdujo la siembra de avena forrajera (*Avena sativa*) y se elaboró ensilaje con base de maíz grano de la cosecha del ciclo agrícola anterior.

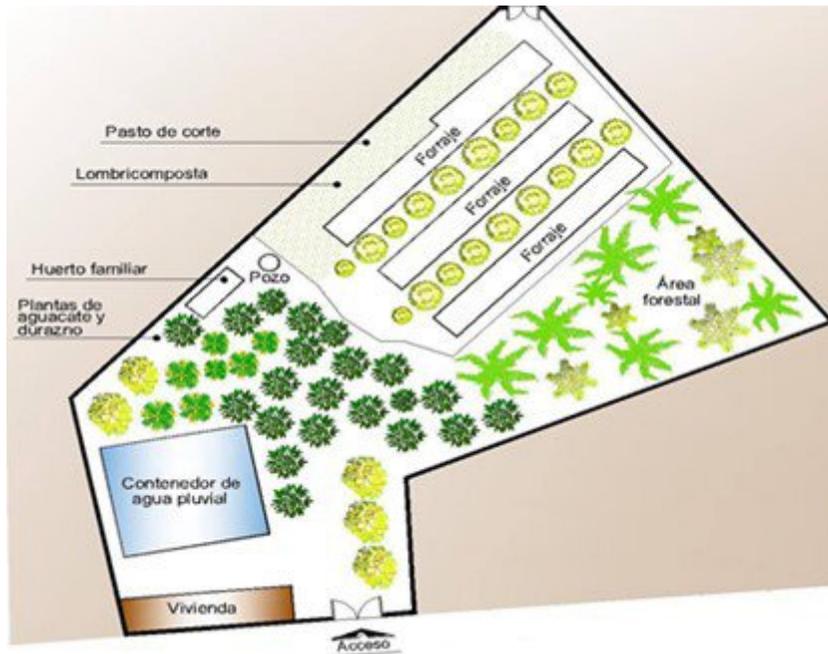
Finalmente, se introdujo un huerto familiar para la producción de jitomate saladel (*Solanum lycopersicum*), pepino (*Cucumis sativus*), chile poblano (*Capsicum annuum var. Annum 'Poblano'*), ejote (*Phaseolus vulgaris*), cilantro (*Coriandrum sativum*), fresa (*Fragaria mexicana*); así como árboles frutales: durazno (*Prunus persica*), plátano (*Musa paradisiaca*), guayaba (*Psidium guajava*), chirimoya (*Annona cherimola*), níspero (*Eriobotrya japonica*), granada roja (*Punica granatum*), granadilla (*Passiflora ligularis*), papaya (*Carica papaya*), limón (*Citrus limon*), lima (*Citrus limetta*), zapote blanco (*Casimiroa edulis*) y manzana (*Malus domestica*). Con la finalidad de aprovechar todos los cultivos y

¹ De acuerdo con información reportada por la *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones del Estado de México*, la disponibilidad de agua no alcanza para cubrir las necesidades de la población de Atlautla, por lo que el municipio tiene la necesidad de llevar agua de los pozos de Tenango del Aire.

frutos que no están en su punto de corte o que rebasaron su grado de maduración, se introdujo la lombricomposta.

El SASP comprende las siguientes actividades económicas: forestería, fruticultura, agricultura, ovinocultura, piscicultura y lombricultura, cuya distribución espacial se presenta en la figura 5.

Figura 5
Distribución espacial del sistema agrosilvopastoril, 2020



Fuente: Elaboración propia a partir de información recopilada en campo, 2020.

Óptimo técnico-económico en la producción de ovinos

Para identificar el impacto bioeconómico que se generó como resultado de la implementación de la transición a un SASP se planteó una función de producción a través de la cual se estimaron el óptimo-técnico y el óptimo-económico de un rebaño de ovinos adquiridos al destete de dos meses de edad y un peso vivo de 20 kilogramos (kg) hasta su venta.

La función de producción expresó la relación entre el producto obtenido y la combinación de los factores que se utilizaron en su obtención; se obtuvo el producto medio (PMe) que representa la producción que se obtiene por unidad de factor empleado (Nicholson, 2007); el producto marginal (PMg) o tasa de variación del producto total ante la variación en la cantidad de un factor variable; y el producto total (PT) obtenido a partir de diferentes factores de producción. De acuerdo con Lafranco y Helguera (2006), en el punto en el que la función de producción alcanza su máximo en términos de producción se le conoce como óptimo-técnico, y el óptimo-económico hace referencia al nivel de producción donde se maximizan los beneficios relacionados a costos e ingresos.

El análisis temporal correspondió a un periodo de engorda realizado en 2020 durante tres meses, el cual cubrió por mes las etapas de crecimiento, desarrollo, y finalización. Las principales variables de análisis fueron para el óptimo-técnico, consumo de alimen-

to, conversión alimenticia (cantidad de alimento que consume un ovino para transformarlo en un kg de peso vivo) y ganancia diaria de peso; y, para el óptimo-económico se consideraron consumo de alimento, precio del alimento, peso vivo al mercado, precio de venta.

La estructura del modelo de regresión para determinar los óptimos-técnico y económico se estimó mediante el Método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), se basa en Gujarati (2007). Matemáticamente el modelo se expresa como:

$$W = \alpha + \beta_1 A_{i1} + \beta_2 A_{i2} + \beta_3 A_{i3} + \varepsilon_i \quad (1)$$

donde W representó el peso vivo del ovino para cada etapa, expresado en kg; α el intercepto de la función; β_i los parámetros a estimar para $i = 1, 2, 3$; A_{ij}^n la variable independiente representada por la cantidad total de alimento consumido, expresado en kg para i y $j = 1, 2, 3$; ε_i término del error estadístico con distribución normal estándar, varianza σ^2 y $\sigma_{ij} = 0$ para todo $i \neq j$; n indica el periodo de engorda expresado en semanas. La ecuación debe cumplir con las características de la función de producción a fin de poder derivar a partir de ésta los óptimos-técnico y económico, tal como se expresa en las siguientes expresiones matemáticas:

$$\text{Óptimo técnico} = PMg = \frac{\delta y}{\delta x} = 0 \quad (2)$$

$$\text{Óptimo económico} = \frac{\delta y}{\delta x} = \frac{P_x}{P_y} \quad (3)$$

expresados en \$/kg. Para la estimación de los modelos se utilizó el software estadístico E-views Vers 7. A través de los resultados se identificó si la alimentación que está recibiendo el rebaño cubre los requerimientos nutricionales, y si la reducción del estrés calórico por efecto de la sombra de los árboles frutales favoreció la conversión alimenticia validada por la ganancia de peso.

Análisis diferencial estructural en el sistema agrosilvopastoril

El cuadro 1 presenta un análisis diferencial estructural del modelo de economía lineal y del modelo de economía circular; se presentan los aspectos asociados al agua y alimentación, energía y combustibles, productos manufacturados, madera, pasta, metales y plástico.

Cuadro 1
Sistema agrosilvopastoril: análisis diferencial estructural

Aporte	Residuo	
	Economía lineal	Economía circular
Agua y alimentación	No se tenía captación de agua de lluvia, únicamente se contaba con un pozo de agua.	Para fines de captar agua de lluvia se construyó un estanque en el que no sólo se almacena el agua, sino que también sirve para la producción de carpa koi. El impacto positivo relacionado con la conservación del ambiente es el regreso de aves como garzas y patos, lo que embellece el paisaje
Energía y combustibles	Emisiones a la atmósfera: a través de la quema de pastizales y de la aplicación de fertilizantes químicos, así como de la implementación de un sistema agrícola de monocultivo para la producción de maíz se emitían gases derivados de la quema y de los aerosoles, lo que contaminaba el ambiente y erosionaba el suelo	Se emplean extractos naturales para control de plagas y de enfermedad, así como diferentes ecotecnologías que favorecen la fertilidad del suelo y se evita la quema, asimismo se propone la obtención de biocarbón con favorable impacto ambiental
Productos manufacturados	Desechos de herramientas y embalajes: no se reutilizaron productos manufacturados	Reutilización y reciclaje: para el riego se implementó un sistema en el que se le da reuso a garrafones de agua para beber y riego por goteo, la lombricomposta se realiza a partir de todos los frutos que alcanzan el grado de madurez, de esta actividad se obtienen lombrices las cuales proporcionalmente se destinan a la alimentación de la parvada, de las carpas koi y para la producción de composta.
Madera, pasta, metales y plásticos	Residuos sólidos: nunca se les dio uso a los árboles maderables.	Sistemas de abono y biogás; el estiércol que se obtiene de la producción ovina se destina para las actividades agrícolas. La hojarasca y ramas se quedan en el suelo para el recubrimiento, se va directamente a la pata del árbol.

Fuente: Elaborado por los autores.

Hallazgos de la tecnología agrosilvopastoril

En la figura 6 se presentan diferentes imágenes de las actividades de campo realizadas en el SASP.

Entre los principales hallazgos que se encontraron al transitar la actividad agrícola de monocultivo al policultivo y la implementación a un SASP se destacó la aportación de materia orgánica de los árboles al suelo a través de hojas, flores, frutos, ramas y raíces muertas que se desprenden y que se depositan en la superficie. Esto redujo y/o atenuó la competencia por nutrientes, agua, luz y espacio entre los componentes del sistema.

Se generó sombra para los animales, lo que disminuyó el efecto adverso de la temperatura en su comportamiento fisiológico y productivo. La carga animal no perjudicó el crecimiento y la cobertura herbácea, ni dio origen a la erosión del suelo, se favoreció la diseminación y escarificación de semillas y con ello la germinación. Dichos comportamientos coinciden con lo reportado por Ibrahim (2011).

La integración de la agricultura, la actividad forestal, la ganadería y la piscicultura, así como la introducción de tecnologías innovadoras locales como agricultura de riego, lombricomposta, ensilaje y captación de agua de lluvia, coadyuvaron a la conservación del medioambiente de la UP a la producción de materia prima natural y de productos agrícolas (frutas, hortalizas, granos), pecuarios (aves de corral y ovinos en pie, huevo) y piscícolas (carpas koi).

Desde el punto de vista económico, la transición lineal a circular de la unidad productiva favoreció la generación de empleos directos e indirectos y de ingresos por concepto de la comercialización en mercados locales de los productos que no son destinados al autoabasto y que anteriormente no se generaban en la UP. Los productos agrícolas no comercializados se destinaron a la lombricomposta o como alimento para las aves.

La producción de carpas koi permitió reutilizar el desperdicio de panadería y tortilla que se genera en la UP, se destinó al autoabasto y los restos de los peces se utilizaron para la elaboración artesanal de harina de pescado, la cual fue incluida como insumo alimenticio en la dieta de los ovinos.

Actualmente la superficie de siembra se destina para cultivo de frijol, maíz o forraje (avena y alfalfa), con un rendimiento de media t/ha en el caso de los dos primeros, estos cultivos se producen bajos sistemas productivos que se asocian con aguacate y durazno. Toda la producción que se obtiene se destina para el consumo animal, dado que a través del ensilaje se le suministra al rebaño y el abono de éste se aprovecha en el campo como abono para la producción agrícola.

Aspectos productivos

El rebaño ovino Dorper 15/16 de pureza fue engordado bajo el SASP, con una alimentación basada en forraje, ebo y avena principalmente, así como ensilaje de maíz, todos producidos en la UP. El periodo de engorda fue de tres meses, con tres etapas fisiológicas: I, crecimiento; II, desarrollo, y III, finalización. El peso inicial del rebaño fue de 20 kg y el peso final de crecimiento fue de 32.5 kg, de 46.2 en desarrollo y 49.2 kg en finalización.

Estos hallazgos técnicos y productivos permiten proponer un estudio posterior en el cual se determinen las cargas ambientales del subsistema ovino y el valor económico y ambiental de la utilización, reutilización y generación de recursos naturales propios.

Durante el periodo de engorda se encontró evidencia de que durante el crecimiento la ganancia de peso como resultado de la conversión alimenticia registró una tendencia creciente (figura 7), es decir, que el $PMg > PMe$. Esto significa que el animal fue el más eficiente en el uso y transformación de los recursos naturales utilizados. Durante la fase de desarrollo se alcanzó la eficiencia u óptimo-técnico al llegar al punto en el que el $PMe = PMg$, es decir, que los rendimientos marginales fueron constantes, dado que al adicionar un insumo variable que puede ser el alimento, el ovino incrementa su peso en la misma proporción. En la etapa de finalización durante las tres primeras semanas se registró un rendimiento relativamente creciente, sin embargo, a partir de la cuarta o última semana de esta etapa el $PMg \leq 0$, por lo tanto, al ingerir alimento el animal no incrementará su peso vivo. Como resultado de lo anterior se deduce que sí se alcanzó la eficiencia técnica dado que durante 90 días el rebaño alcanzó un peso de 49.2 kg.

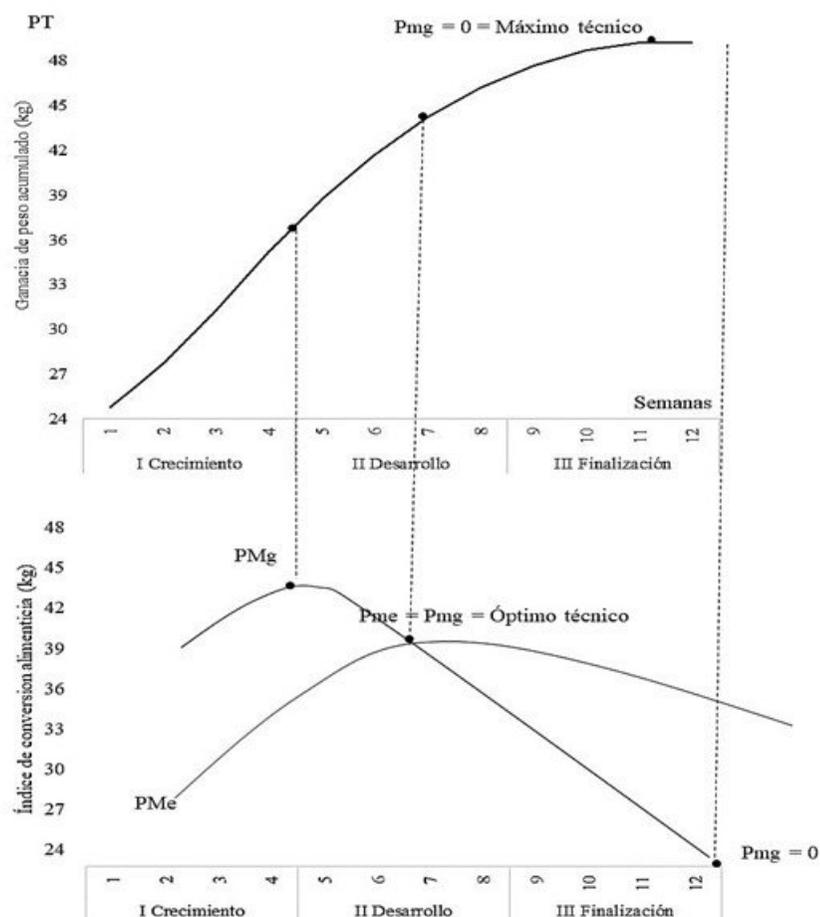
Figura 6

Sistema silvopastoril: tecnologías agrícolas, maderables, pecuarias y piscícolas



Fuente. Elaboración propia a partir de información recopilada en campo.

Figura 7
Sistema silvopastoril ovino: Producto total, producto medio y producto marginal



Fuente: Elaborada por los autores.

Reflexiones finales

Actualmente la implementación de actividades agrícolas basadas en monocultivos y de procesos productivos que se enfocan en la economía lineal generan un gran impacto medioambiental, por tal motivo, se planteó una alternativa basada en la introducción de un modelo de sistema agrosilvopastoril con enfoque de economía circular.

Las actividades agrícolas mixtas y orgánicas disminuyeron el uso y la dependencia de productos químicos.

La presencia de aves de corral funcionó además como un elemento de control biológico de insectos y ácaros en la UP.

Las actividades forestales aportaron productos para la venta en los mercados locales y produjeron sombra y bienestar a los animales.

El subsistema piscícola permitió captar agua de lluvia, utilizarla para riego y producir proteína animal de alto contenido proteínico.

Es necesario, sin embargo, evaluar el efecto económico en su conjunto y las cargas ambientales de todo el SASP, ya que el presente trabajo aportó evidencia económica del subsistema ovino como parte integral de todo el SASP.

Aspectos destacados

1. Aplicación de conocimientos para la transición de una producción de monocultivo a un sistema agrosilvopastoril a partir de un enfoque de economía circular.
2. Eliminación de la agricultura tradicional y de productos químicos e introducción de agricultura mixta orgánica.
3. Aprovechamiento de productos y subproductos piscícolas para la elaboración de harina de pescado y su uso para la alimentación del rebaño ovino.

Literatura citada

- INAFED. (2020). Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones del Estado de México, Atlautla. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15015a.html>. (Consultado 12 septiembre 2020).
- EEA. (2016). Guía de inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de EMEP / EEA. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016> (Consultado 07 enero 2021)
- EMF (Ellen MacArthur Foundation). (2017). Principios de economía circular <https://ellenmacarthurfoundation.org/> (Consultado 6 julio 2021).
- Ghisellini, P.; Cialani, C. y Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*. 114(15): 11-32.
- Gujarati, D. (2007). *Econometría*. Cuarta edición. Ed. Mc Graw Hill. México, Distrito Federal. 67 p.
- Iglesias, J.M.; Funes-Monzote, F.; Toral, O.C. y Milera, M. (2011) Diseños agrosilvopastoriles en el contexto de desarrollo de una ganadería sustentable. Apuntes para el conocimiento. *Pastos y Forrajes*. 34(3): 241-258 [citado 2020-12-14]. Disponible en <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942011000300001&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0864-0394
- Lacy, P. y Rutqvist, J. (2015). *Waste to Wealth: The Circular Economy Advantage*. Ed. Palgrave MacMillan. 264 p. ISBN-13: 978-1137530684.
- Lafranco, C.B. y Helguera, L. (2006), Óptimo técnico y económico. Diversificación, costos ocultos y los estímulos para mejorar los procesos en la ganadería nacional. *Revista INIA*. 8: 2-5.
- Luttopp C. y Lagerstedt, J. (2006). EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environment aspects into product development. *Journal of Cleaner Production*. 14(5): 1396-1408.
- Macarthur, F.E. (2013). *Hacia una economía circular: Motivos económicos para una transición acelerada*. Fundación Ellen MacArthur, 01, 21. Recuperado a partir de https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Executive_summary_SP.pdf (Consultado 14 diciembre 2020).
- Monchón F. y Beker, V.A. (2008). *Economía, principios y aplicaciones*. Ed. Mc-GrawHill Interamericana (4ª ed.). Ciudad de México, México. 619 p.
- Nicholson, W. (2007). *Teoría microeconómica. Principios básicos y aplicaciones* (9ª ed.). Editorial Thompson. Editores S.A. de C.V. 671 p.
- Sanz, F.J. (2019). Políticas europeas sobre economía circular en Economía circular-espiral: transición hacia un metabolismo económico cerrado. Compiladores Jiménez L. M. y E. Pérez. Ecobook-Editorial del Economista p.p 131-166. <https://books.google.com.mx/books?id=yALJDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false> (Consultado 6 julio 2021).
- SIAP. (2019). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Información estadística sobre la producción agrícola y ganadera en el municipio de Atlautla, Estado de México. <https://www.gob.mx/siap>. (Consultado 13 mayo 2020).
- Steffen, W.; Richardson, K.; Rockström, J.; Cornell, S.E.; Fetzer, I.; Bennett, E.M.; Biggs, R.; Carpenter, S.R.; de Vries, W.; Wit, C.A.; Folke, C.; Gerten, D.; Heinke, J.; Mace, G.M.; Persson, L.M.; Ramathanathan, V.; Reyers, B. y Sörlin, S. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*. 347:6219.
- Webster, K. (2015). *La economía circular, una riqueza de flujos*. Isla de Wight: Fundación Ellen MacArthur.
- WWF (2018). Informe Planeta Vivo - 2018: Apuntando más alto. Grooten, M. y Almond, R.E.A. Ed. WWF. Gland, Suiza. 75 p.

III. Adaptación-tecnologías silvopastoriles

III.1. Elementos para el diseño de paisajes silvopastoriles sustentables en el trópico seco

Rosa Sánchez Romero*
Carlos E. González Esquivel

Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad,
Universidad Nacional Autónoma de México.

*Autor de correspondencia: rosa.sr@cieco.unam.mx

Introducción

En las últimas décadas la demanda y producción de carne va en aumento, con la consecuente pérdida y degradación de ecosistemas. A nivel global se preveía, entre 2005 y 2050, un aumento del 70% en la demanda de productos pecuarios. Esto incentiva el crecimiento del sector ganadero y lo vuelve clave en la producción de alimentos y la seguridad alimentaria, a la vez que constituye un modo de vida para cientos de millones de pequeños productores (IPCC, 2020; Steinfeld *et al.*, 2006).

El sector ganadero es considerado como uno de los principales factores de deterioro de los ecosistemas, debido al desmonte y al mal manejo de pastizales. Éste es el caso de la ganadería bovina de carne en Latinoamérica, mediante la conversión de bosques a pastizales. La transformación de la tierra fue impulsada por políticas que consideraban a los bosques tropicales como tierras improductivas, sobre todo los del trópico seco (Halffter *et al.*, 2018; Rodríguez *et al.*, 2016; Steinfeld *et al.*, 2006). En México el cambio de uso de suelo para la producción ganadera bovina es el más extendido, y se estima que el 58% de la superficie nacional está dedicada a la ganadería (SIAP, 2017).

De las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), provenientes de la ganadería, el 44% son metano, 29% óxido nitroso y 27% dióxido de carbono. El ganado bovino es el que más contribuye y la conversión de bosques a pastizales representa aproximadamente la tercera parte de las emisiones del sector. Por otra parte, el cambio climático acrecienta los procesos de desertificación y degradación de ecosistemas por erosión y pérdida de vegetación, así como a la pérdida de seguridad alimentaria (Herrera, 2020; IPCC, 2020; Rodríguez *et al.*, 2016).

Si bien los sistemas ganaderos provocan importantes impactos a los ecosistemas y contribuyen al cambio climático, esto depende en gran medida de la forma en que se manejan, por lo que un manejo adecuado puede ser un medio para generar sistemas sustentables ante escenarios de cambio climático (Herrera, 2020; IPCC, 2020). Los sistemas silvopastoriles (SSP) se proponen como una alternativa productiva que proporciona gran cantidad de servicios ecosistémicos, así como equilibrio entre los servicios de provisión (por ejemplo, agua y alimento para el ganado) con los de regulación y/o soporte (por ejemplo, biodiversidad, fertilidad del suelo) (González-Esquivel *et al.*, 2015).

Los SSP son sistemas agroforestales integrados por plantas leñosas, herbáceas y ganado. Es una forma de uso de la tierra que existe desde la antigüedad, en la que sus componentes interactúan de forma dinámica en tiempo y espacio. Presentan una gran variabilidad en términos de estructura, manejo e impactos sobre los ecosistemas. El gradiente estructural va desde pastizales con escasas leñosas, hasta zonas boscosas de plantaciones o bosques naturales (intervenidos). Primordialmente están enfocados a la producción ganadera, pero difieren en las formas en que los productores manejan sus recursos, en sus objetivos, en la orientación productiva y en el capital financiero disponible. También son variables los beneficios productivos y el estado de conservación o degradación de los ecosistemas en los que se desarrollan (Cubbage *et al.*, 2012; Nair, 1993; Roellig *et al.*, 2018; Soler *et al.*, 2018).

Este trabajo se basa en los estudios realizados en una zona de bosque tropical seco con manejo silvopastoril tradicional en la costa centro de Jalisco, México. Es una franja paralela a la costa de aproximadamente 40 x 20 km. En la mayor parte de la región la tenencia de la tierra es ejidal. El clima se caracteriza por una marcada estacionalidad y alta variabilidad inter e intra anual (precipitación media anual de 800 mm). En la región se encuentra la Reserva de la Biosfera Chamela-Cuixmala, con bosque conservado, rodeada de áreas con actividades agropecuarias, principalmente la ganadería extensiva enfocada a la reproducción y cría de becerros para engorda (Sánchez-Romero *et al.*, 2020). El estudio se realizó entre 2016 y 2020. Incluyó un análisis socioecológico del manejo silvopastoril, por medio de entrevistas a profundidad y talleres con ganaderos y académicos. También se evaluó el potencial forrajero de 16 especies arbóreas forrajeras locales, mediante la estimación de la biomasa y de la calidad nutritiva, tanto del follaje en época de lluvias como de frutos en época de secas (Sánchez, 2020).

El presente capítulo tiene como objetivo mostrar la contribución que tiene el manejo de paisajes silvopastoriles, que integran pastizales enriquecidos con leñosas locales y bosques multifuncionales, como una alternativa agroforestal de mitigación y adaptación al cambio climático. Se plantean como sistemas sustentables que reduzcan la degradación de los ecosistemas y que mantengan la oferta de alimentos.

Pastizales enriquecidos

En esta sección se enfatiza la importancia de las especies leñosas forrajeras locales en los pastizales de zonas tropicales. El enriquecimiento de pastizales, mediante la integración, el incremento de la diversidad y la densidad de especies leñosas es una estrategia para generar sistemas ambientalmente más adecuados y, al mismo tiempo, satisfacer la creciente demanda de carne y la seguridad alimentaria, especialmente en los países en desarrollo (Fuentealba y González-Esquivel, 2015; Rodríguez *et al.*, 2016; Torres-Acosta *et al.*, 2016).

La disponibilidad de forraje de las leñosas en los trópicos secos es variable a lo largo del año. En la temporada de lluvias el ganado se alimenta del abundante follaje. En la época seca, que es la más crítica para la producción ganadera en la zona de trópico seco, es cuando hay mayor producción y abundancia de frutos, algunos de los cuales tienen altos contenidos de nutrientes. Así, las especies leñosas enriquecen y mejoran la alimentación, salud y bienestar del ganado y con ello la productividad, al mismo tiempo que reducen los

insumos externos y los costos de producción, con ello los productores pueden incrementar los beneficios económicos (González-Esquivel *et al.*, 2018; Palma, 2006; Sánchez, 2020; Torres-Acosta *et al.*, 2016). En la zona de estudio todos los ganaderos tienen árboles forrajeros en sus potreros, dispersos entre el pastizal inducido o como cercas vivas (figura 1). Sin embargo, su cantidad, diversidad y densidad es muy variable, dependiendo principalmente de las preferencias de los productores (Sánchez, 2020).

En la región existen muchas especies arbóreas locales con alto potencial forrajero, tanto en cantidad como en calidad. En términos de biomasa disponible, de las especies evaluadas, en temporada de lluvias el promedio general del follaje fue de 0.22 ± 0.4 kg/árbol. Las especies con mayor biomasa fueron *Guazuma ulmifolia*, *Caesalpinia coriaria* y *Cordia elaeagnoides* con 0.7, 0.5 y 0.3 kg/árbol. En temporada de secas la biomasa de frutos de las especies evaluadas fue de 1.8 ± 3.7 kg/árbol. Las especies con mayor biomasa fueron *G. ulmifolia*, *Caesalpinia eriostachys* y *Spondias purpurea* con 4.5, 3.9 y 3.6 kg/árbol, respectivamente. En *H. polyandra*, la biomasa promedio de hojas secas fue de 9.9 ± 15.6 kg/árbol (Sánchez-Romero *et al.*, 2021).

Figura 1
Integración de especies leñosas forrajeras locales
en tecnologías silvopastoriles
A. Cerco vivo B. Árboles dispersos en potreros



Fuente: Fotos de los autores.

En términos de calidad, las leñosas pueden mejorar la calidad de la dieta del ganado, dado que en muchas regiones ésta se basa en pastos y subproductos agrícolas con bajo contenido nutricional (Shelton, 2000). En los árboles forrajeros evaluados de la zona de estudio, la cantidad de proteína cruda en el follaje fue $>9\%$, con promedio general de $14.8 \pm 4.7\%$. Las especies que sobresalieron fueron *Lonchocarpus mutans*, *Apoplanesia paniculata* y *Leucaena lanceolata*, con 23.8, 20.7 y 17.8%, respectivamente. En los frutos la cantidad de proteína fue $>6.2\%$, con un promedio general de $11.0 \pm 5.4\%$. Las especies que sobresalieron fueron *L. lanceolata*, *Acacia macracantha* y *Senna mollissima* con 20.3, 16.8 y 12.3%, respectivamente, y en hojas secas *H. polyandra* con 10.3%. Cabe señalar que la cantidad y calidad del forraje varió ampliamente entre especies, por lo que al enriquecer los pastizales es recomendable combinarlas (Sánchez-Romero *et al.*, 2021).

Cabe mencionar que algunas especies leñosas han sido ampliamente estudiadas, como *Leucaena leucocephala* y *Gliricidia sepium*, sin embargo, existen numerosas especies locales que son muy abundantes en distintas regiones, pero es poco conocido su potencial forrajero (Shelton, 2000; Torres-Acosta *et al.*, 2016). Es el caso de *H. polyandra*, que proporciona forraje en cantidad y calidad. También puede ser una alternativa de control químico de parásitos, dado que el ganado al consumir sus hojas elimina parásitos internos y externos.

Además de forraje, las especies leñosas tienen otros usos como cercas vivas, leña, madera y medicina humana y veterinaria. La sombra que proporcionan ayuda a reducir el estrés calórico del ganado, favoreciendo su bienestar y productividad. Algunas especies son de amplia distribución en el trópico, como *G. ulmifolia* y *G. sepium*, así como distintas especies de los géneros *Acacia*, *Leucaena* y *Caesalpinia*, por lo que pueden utilizarse con mayor facilidad en sitios con características diversas. En el caso del género *Acacia*, que en la zona de estudio es vista como maleza y eliminada de los potreros por los ganaderos, en varias regiones del mundo es la base de la alimentación del ganado (Sánchez, 2020; Shelton, 2000; Torres-Acosta *et al.*, 2016).

Por otra parte, diversos estudios reportan que la presencia de árboles y arbustos en los pastizales genera importantes beneficios a los ecosistemas. Incrementan la biodiversidad y mejoran las propiedades del suelo, mediante el aumento de la fertilidad, actividad microbiana, retención de agua y prevención de erosión. Muchas leñosas leguminosas contribuyen al reciclado y fijación del nitrógeno atmosférico, lo que enriquece el suelo y a los pastos acompañantes. Utilizar especies forrajeras locales favorece su conservación, en la que el ganado puede ser un medio para la dispersión de semillas. Las cercas vivas, árboles entre el pastizal y los bordes riparios, proporcionan hábitat y alimento a la fauna silvestre y contribuyen a la conectividad entre los fragmentos de bosque (Halffter *et al.*, 2018; Jose y Dollinger, 2019; Nair, 1993; Palma, 2006; Shelton, 2000).

En términos del cambio climático, conservar o incluir leñosas en los pastizales contribuye a la mitigación, ya que se estima que pueden incrementar en más de un tercio la captura de carbono almacenado. También se observa que las emisiones de metano pueden disminuir de 15 a 25% cuando se incluyen en la dieta plantas ricas en taninos, como muchas de las leñosas tropicales. La baja digestibilidad de algunos forrajes está relacionada con mayores emisiones de metano, por el contrario, la alta digestibilidad y calidad del forraje de leñosas mejora el rendimiento de los animales, y reduce las emisiones de GEI por unidad de producto (Herrera, 2020; IPCC, 2020; Rodríguez *et al.*, 2016; Torres-Rivera *et al.*, 2011).

Pastoreo en el bosque

Conservar la cubierta forestal en los bosques tropicales secos de Latinoamérica es de suma importancia, ya que se perdió casi el 80% de su cobertura original y en la actualidad son los más amenazados (Ferrer-Paris *et al.*, 2018). La producción ganadera se puede realizar manteniendo áreas boscosas con acceso al ganado, como sucede en la zona de estudio (figura 2). Los productores conservan en sus potreros áreas de bosque de distintas edades, aunque la proporción es muy variable, oscila entre 8 y 95%, sin embargo, a

nivel regional representa casi el doble que la de pastizales inducidos. El aprovechamiento de estas áreas es primordialmente ganadero (Sánchez-Romero *et al.*, 2020).

Los bosques secundarios contribuyen a la regeneración, son depósitos de biodiversidad y ofrecen una gran cantidad de servicios ambientales (Rozendaal *et al.*, 2019). En la zona de estudio los bosques de sucesión temprana (menores de 13-14 años) cuentan con mayor disponibilidad de forraje que los bosques maduros, tanto de herbáceas como de arbóreas. Por otra parte, los bosques maduros ayudan a la rápida sucesión de los secundarios y contribuyen al incremento de la biodiversidad (son más diversos) y favorecen la conservación de especies nativas y endémicas (Rozendaal *et al.*, 2019). En la región de estudio, en la conversión de bosques a pastizales, los ganaderos prefieren desmontar los bosques secundarios, ya que se requiere menor tiempo y energía, lo que favorece la presencia de bosques maduros (Sánchez-Romero *et al.*, 2020).

Figura 2
Pastoreo de bovinos en paisajes silvopastoriles tropicales



Fuente: Fotos de los autores.

Conservar áreas de bosque contribuye a la mitigación y adaptación al cambio climático, dado que son importantes reservorios de carbono, en una proporción aproximadamente nueve veces mayor a la de los pastizales (Torres-Rivera *et al.*, 2011). También en las regiones tropicales, cuando la cubierta forestal aumenta, se produce un enfriamiento del ambiente por el aumento de la evapotranspiración (IPCC, 2020).

El manejo de la carga animal en los bosques es fundamental. Se observó que cargas de 1.0-1.4 UA/ha pueden afectar la composición y diversidad de la vegetación del bosque (Stern *et al.*, 2002). En la región de estudio, bajo cargas moderadas (0.8 animales/ha), la presencia del ganado no tiene altos impactos sobre los diferentes componentes de la vegetación y el suelo del bosque (Sánchez, 2020). También se observó que en un gradiente sucesional, la mayoría de las propiedades del suelo y la vegetación pueden ser resistentes a los efectos acumulativos tanto de la conversión forestal como del uso de pastizales (Ayala-Orozco *et al.*, 2018). Es importante mencionar que también se pueden tener altas densidades de ganado en un área, pero con tiempos de pastoreo cortos, que permitan la recuperación de la vegetación (Savory y Parsons, 1980).

Integración de paisajes silvopastoriles

El paisaje se define geográficamente como una escala espacial superior a la finca, generalmente de kilómetros, que puede estar compuesto por una matriz de vegetación con manejo agroforestal (Perfecto y Vandermeer, 2010). La tecnología agroforestal propuesta en este capítulo es un paisaje con manejo silvopastoril, integrado por pastizales enriquecidos con leñosas locales y bosques multifuncionales. Los paisajes silvopastoriles pueden proveer múltiples beneficios tanto ambientales como socioeconómicos, por lo que representan una propuesta viable de ganadería tropical sustentable, ante un escenario de cambio climático.

A nivel del paisaje no sólo es importante la cantidad de cubierta forestal, sino también su composición y configuración. Se ha propuesto que para mantener la biodiversidad y obtener bienes y servicios de manera sustentable se requiere más del 40% de cubierta forestal, de la cual al menos el 10% se encuentre en un sólo espacio y el resto en parches distribuidos uniformemente y árboles dispersos (Arroyo-Rodríguez *et al.*, 2020). También es esencial mantener zonas de bosques que no estén abiertas al pastoreo, con fines de conservación, éstas pueden ser las áreas con alta pendiente o de difícil acceso, áreas naturales protegidas y corredores riparios o ribereños (Arroyo-Rodríguez *et al.*, 2020; Perfecto y Vandermeer, 2010).

Por todo lo mencionado, se recomienda que los paisajes silvopastoriles estén integrados por bosques conservados, bosques con acceso a ganado y pastizales enriquecidos con especies leñosas locales, así como bordes riparios y cultivos anuales, que pueden ser forrajeros (figura 3).

Figura 3

Diseño de un paisaje silvopastoril, como estrategia de sustentabilidad, mitigación y adaptación al cambio climático



Fuente: Adaptado de Arroyo-Rodríguez *et al.*, 2020.

Consideraciones socioecológicas en el manejo de paisajes silvopastoriles

Dadas las dimensiones y complejidad del sector ganadero y su problemática ambiental asociada, se requiere una visión integral. En la zona de estudio, como sucede en otras regiones, la composición de los paisajes silvopastoriles depende de las condiciones socioecológicas, tanto regionales como locales. Los componentes sociales y ecológicos están acoplados, son dinámicos e interactúan en múltiples escalas de tiempo y espacio, por lo que, al considerarlos de forma integral, revelan patrones y procesos nuevos y complejos que no son evidentes por separado (Plieninger y Huntsinger, 2018; Sánchez-Romero *et al.*, 2020).

Por su parte, los pequeños productores tienen un papel relevante, dado que poseen las fracciones más amplias de la superficie terrestre. Representan dos tercios de los agricultores y producen la mayor parte de los alimentos, principalmente en sistemas productivos con manejo tradicional. Por lo tanto, son fundamentales en la seguridad alimentaria y como principales manejadores de los ecosistemas (Altieri *et al.*, 2012; Perfecto y Vandermeer, 2010; Rodríguez *et al.*, 2016). En la zona de estudio los pequeños productores familiares ejidatarios son los que poseen la mayor parte del territorio, por lo que sus decisiones de manejo tienen impactos a nivel regional (Sánchez-Romero *et al.*, 2020).

Es importante tomar en cuenta que el manejo de estos productores es adaptativo, en donde existen procesos de generación, acumulación y transmisión de conocimientos. En la zona de estudio, los ganaderos se adaptan a las condiciones socioecológicas a través de prácticas empíricas y de conocimientos externos. Los productores reconocen que las condiciones ambientales son cambiantes y responden a la incertidumbre por medio del aprendizaje social, desarrollan estrategias para adaptarse y manejar los riesgos. Así mismo, muchas de las comunidades rurales desarrollan un manejo exitoso, en términos de conservación de la biodiversidad, resiliencia, rentabilidad, productividad y mejora de las condiciones socio-económicas (Altieri *et al.*, 2012; Nahed *et al.*, 2014; Palma *et al.*, 2019; Sánchez-Romero *et al.*, 2020).

En el mismo sentido, los saberes locales del manejo silvopastoril pueden ser la base para una ganadería sustentable. En la zona de estudio los ganaderos aprendieron a integrar árboles en los pastizales y áreas de bosque al sistema ganadero. Esto les ha permitido generar un cúmulo de conocimientos sobre las leñosas forrajeras locales (aproximadamente 55 especies), así como sus atributos de manejo, como la resistencia a la sequía, calidad nutritiva, velocidad de crecimiento y épocas de producción (Sánchez, 2020). El conocimiento local de las especies leñosas forrajeras también se ha reportado en distintas regiones (González *et al.*, 2018; Nahed-Toral *et al.*, 2013; Palma, 2006). Es importante considerar que, en la dinámica de adaptación y renovación de los sistemas tradicionales, se generan nuevos modos de conocer y de aproximarse a la realidad, en donde los conocimientos científicos pueden aportar. Así mismo, en la heterogeneidad de estrategias de manejo se pueden encontrar los referentes endógenos para reorientar los sistemas productivos y hacerlos más sustentables (Altieri *et al.*, 2012; Sánchez, 2020).

Es importante promover la participación de la población rural y de los distintos actores involucrados, políticas públicas adecuadas y una gobernanza más proactiva de las

comunidades (Altieri *et al.*, 2012). Por lo tanto, con base en el conocimiento ecológico local y la participación de los diferentes actores es posible generar sinergias que favorezcan formas más sustentables de producción ganadera, que incluyan mecanismos de mitigación y adaptación al cambio climático.

Recomendaciones para una producción ganadera sustentable frente al cambio climático

Los paisajes silvopastoriles pueden ser una opción viable de ganadería tropical sustentable, que equilibre la producción de alimentos con el cuidado ambiental. Los SSP tradicionales tienen un alto valor ecológico y social, aunque en las últimas décadas disminuyó su superficie a causa de la desvalorización y baja productividad, con reducido ingreso (Cubbage *et al.*, 2012; Nahed-Toral *et al.*, 2013; Roellig *et al.*, 2018). En la zona de estudio son altamente variables las condiciones entre los productores, en términos de activos económicos, productividad e impactos sobre el ecosistema (Sánchez-Romero *et al.*, 2020). Por lo tanto, en los SSP tradicionales de esta región (como en otras) es necesario promover un manejo más activo con prácticas adecuadas, para lo cual se hacen distintas recomendaciones, que se dividieron en tres bloques por su naturaleza e implicaciones: 1) Las prácticas de manejo para mejorar los ecosistemas y la producción, 2) Las que se enfocan en el aprovechamiento de los recursos locales, y 3) Las que pertenecen al ámbito social. Es importante señalar que tanto el bloque 1 como el 2 tienen repercusiones en la productividad y rentabilidad ganadera, por lo tanto, en mejoras a la economía de los productores.

1. Las prácticas de manejo adecuadas para mejorar los ecosistemas y la producción optimizan los sistemas de ganadería extensiva, en donde se promueve la heterogeneidad y multifuncionalidad del sistema, para incrementar su resiliencia y productividad. Éste es el caso de los paisajes silvopastoriles propuestos que, como ya se mencionó, tienen numerosos beneficios, ambientales y socioeconómicos. Dado que el sobrepastoreo es uno de los principales problemas de la ganadería extensiva, es necesario un manejo adecuado. Esto incluye la rotación o movilidad del ganado, que permita la recuperación de la vegetación. Se requiere mantener una carga animal apropiada de acuerdo con las condiciones específicas de cada sitio, en términos de pendiente, calidad de suelo, disponibilidad de agua y tipo de vegetación. En las regiones con alta variabilidad climática, la cantidad y calidad del forraje varía en el tiempo, por lo que los ganaderos requieren manejar de manera flexible la carga animal. Un pastoreo adecuado tiene mejoría en el suelo y la vegetación e incrementa la retención de carbono, así también la movilidad del ganado junto con la flexibilidad de carga animal maximiza la adaptación y la resiliencia a cambios ambientales y eventos catastróficos. Es importante tener presente que existe un vínculo estrecho entre la intensidad de emisiones de GEI, la adaptabilidad y la productividad (Herrera, 2020; IPCC, 2020; Jose y Dollinger, 2019; Nahed *et al.*, 2014; Sánchez, 2020; Savory y Parsons, 1980).
2. Las recomendaciones centradas en el aprovechamiento de los recursos locales también tienen implicaciones en el mejoramiento de ecosistemas y la produc-

ción, pero están estrechamente relacionadas con la eficacia del aprovechamiento y reciclaje de los recursos del territorio. Éstas comprenden la utilización de la vegetación local, de los residuos agrícolas de la región, la conservación de forrajes (con técnicas como el ensilaje, que puede incrementar el valor nutricional y reducir los costos de alimentación del ganado) y la promoción de centros de acopio, engorda y procesamiento, cercanos a las comunidades (evita los intermediarios y aumenta las ganancias de los ganaderos). Utilizar los recursos de cada región permite optimizar el suministro de alimento para el ganado, su rendimiento y la rentabilidad productiva, mejorando la eficacia de los recursos energéticos a lo largo de las cadenas de suministro, y utilizando insumos de baja intensidad de emisiones. Dado que existe una relación estrecha entre las emisiones de GEI y el uso eficaz de los recursos en los suministros, también se generan procesos de adaptación y resiliencia del sistema productivo (Herrera, 2020; IPCC, 2020; Nahed *et al.*, 2014; Palma *et al.*, 2019; Sánchez, 2020).

- Las recomendaciones que pertenecen al ámbito social incluyen la implementación de programas de capacitación en las comunidades rurales, así como el fortalecimiento de redes sociales y asociaciones ganaderas que fomenten la comunicación, organización y apoyo entre los productores. Estas redes se pueden utilizar para sensibilizar a las poblaciones rurales en la adopción y en la extensión de mejores prácticas de manejo (IPCC, 2020; Sánchez, 2020).

Por lo tanto, las recomendaciones descritas abarcan diferentes aspectos socioeconómicos y ecológicos del manejo productivo, pueden contribuir a la sustentabilidad de la ganadería tropical, a la par que contribuyen a la mitigación y adaptación de los efectos y problemáticas del cambio de clima (cuadro 1).

Cuadro 1
Recomendaciones para una ganadería tropical sustentable y su contribución a la mitigación y adaptación al cambio climático

Recomendación	IBP	PSSP	ULF	RG	CAMyF	URAR	CF	AEPC	RSO
Mantenimiento de la cubierta vegetal y reserva de carbono	↑	↑	↑	↑	↑				
Reducción de la degradación de ecosistemas		↑	↑	↑	↑				
Reducción de uso de energía fósil		↑	↑			↑	↑	↑	↑
Reducción de emisiones de GEI		↑	↑			↑	↑	↑	↑
Mayor resiliencia del sistema productivo		↑	↑	↑	↑		↑		↑

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

Recomendación	IBP	PSSP	ULF	RG	CAMyF	URAR	CF	AEPC	RSO
Adaptación a cambios ambientales			↑	↑	↑	↑	↑		↑
Adaptación a recursos locales	↑	↑	↑	↑		↑	↑	↑	↑
Mejora de los modos de vida	↑	↑						↑	↑
Mayor seguridad alimentaria		↑	↑	↑		↑	↑	↑	↑

IBP=Integración de bosques con pastoreo, PSSP=Prácticas silvopastoriles, RG=Rotación del ganado, CAMyF=Carga animal moderada y flexible, URAR=Uso de residuos agrícolas regionales, CF=Conservación de forrajes, AEPC=Acopio, engorda y procesamiento cercano y RSO=Redes sociales y organización.

Fuente: Elaborada por los autores.

Reflexión final

La ganadería puede provocar importantes impactos a los ecosistemas y contribuir al cambio climático, dependiendo de cómo se manejen los sistemas de producción. En este capítulo, dentro de los sistemas agroforestales, los paisajes silvopastoriles que integren pastizales enriquecidos y bosques con pastoreo se presentan como una opción viable de ganadería tropical para enfrentar el cambio climático. Sin embargo, se requiere atender las distintas problemáticas socioambientales en cada región.

Es importante promover un manejo más activo de los sistemas silvopastoriles, con prácticas adecuadas, que tengan repercusiones tanto ambientales como socioeconómicas, en las que se aprovechen los recursos regionales. En el diseño de paisajes silvopastoriles se pueden encontrar las bases de una ganadería tropical sustentable que garantice el desarrollo social, económico y ambiental de las comunidades rurales, así como estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático.

Aspectos destacados

1. Los paisajes silvopastoriles tropicales, compuestos de pastizales enriquecidos y áreas boscosas con pastoreo, pueden tener un papel importante en los esfuerzos de mitigación y adaptación al cambio climático, así como contribuir a la seguridad alimentaria.
2. La gran abundancia y riqueza de especies leñosas forrajeras tropicales son un recurso valioso para la producción pecuaria. Los resultados de nuestro estudio muestran que estas especies tienen alto potencial forrajero, en cantidad (biomasa disponible) y en calidad (alta cantidad de proteína), tanto en el follaje disponible en lluvias, como en las hojas y frutos secos en secas. Éstas pueden utilizarse mediante el enriquecimiento de pastizales y el pastoreo en el bosque, con lo

- que contribuye a mejorar la calidad de la dieta del ganado y su salud, además aumentan la productividad y rentabilidad ganadera.
3. Los paisajes silvopastoriles proporcionan múltiples beneficios al ecosistema. Se propone que la matriz esté compuesta por un mosaico de vegetación, con pastizales enriquecidos y bosques (conservados y con pastoreo), así como, bordes riparios y cultivos forrajeros, con al menos el 40% de área de bosque. Esto incrementa la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. En términos del cambio climático, las leñosas en los pastizales incrementan la captura de carbono y los bosques son importantes reservorios de carbono; también, al incluir las leñosas forrajeras en la dieta del ganado, pueden reducir las emisiones de GEI por unidad de producto.
 4. En la zona de estudio los sistemas silvopastoriles son el resultado de un manejo adaptativo que ha generado diversas estrategias, con distintos impactos en el ecosistema y en la productividad, por lo que en el manejo de los paisajes silvopastoriles se recomienda fomentar prácticas de manejo adecuadas que equilibren la producción ganadera con el cuidado ambiental, así como la utilización de los recursos regionales y un manejo adaptativo que favorezca la resiliencia de los sistemas ante el cambio climático. Se debe tener presente que existe un vínculo estrecho entre la intensidad de emisiones de GEI, la adaptabilidad y la productividad.

Literatura citada

- Altieri, M.A.; Funes-Monzote, F.R. y Petersen, P. (2012). Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agronomy for Sustainable Development*. 32(1): 1–13.
- Arroyo-Rodríguez, V.; Fahrig, L.; Tabarelli, M.; Watling, J.; Tischendorf, L.; Benchimol, M.; Cazetta, E.; Faria, D.; Leal, I.; Melo, F.; Morante-Filho, J.; Santos, B.; Arasa-Gisbert, R.; Arce-Peña, N.; Cervantes-López, M.; Cudney-Valenzuela, S.; Galán-Acedo, C.; San-José, M.; Vieira, I. y Tschardtke, T. (2020). Designing optimal human-modified landscapes for forest biodiversity conservation. *Ecology Letters*. 23(9): 1404-1420.
- Ayala-Orozco, B.; Gavito, M.E.; Mora, F.; Siddique, I.; Balvanera, P.; Jaramillo, V.J.; Cotler, H.; Romero-Duque, L.P. y Martínez-Meyer, E. (2018). Resilience of soil properties to land-use change in a tropical dry forest ecosystem. *Land degradation y development*. 29(2): 315-325.
- Cubbage, F.; Balmelli, G.; Bussoni, A.; Noellemeyer, E.; Pachas, A.N.; Fassola, H. y Silva, M.L. (2012). Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agroforestry Systems*. 86(3): 303–314.
- Ferrer-Paris, J.R.; Zager, I.; Keith, D.A.; Oliveira-Miranda, M.A.; Rodríguez, J.P.; Josse, C. y Barrow, E. (2019). An ecosystem risk assessment of temperate and tropical forests of the Americas with an outlook on future conservation strategies. *Conservation Letters*. 12(2): e12623.
- Fuentealba, B.D. y González-Esquivel, C.E. (2015). Sistemas silvopastoriles tradicionales en México. En: Moreno-Calles, A.I.; Casas, A.; Toledo, V.M.; Vallejo-Ramos M. (eds.), *Etnoagroforestería en México*. UNAM. D.F. México. pp. 239-261.
- González-Esquivel, C.E.; Gavito, M.E.; Astier, M.; Cadena-Salgado, M.; Del-Val, E.; Villamil-Echeverri, L.; Merlín-Urbe, Y. y Balvanera, P. (2015). Ecosystem service trade-offs, perceived drivers, and sustainability in contrasting agroecosystems in central Mexico. *Ecology and Society*. 20(1): 38.
- González-Esquivel, C.; Sánchez-Romero, R.; Camacho-Moreno, E.; Castillo, A.A.; Mora, F. y Romo-Díaz, G. (2018). *Prácticas silvopastoriles en el trópico seco. Guía para ganaderos*. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.librosoa.unam.mx/xmlui/handle/123456789/1209>
- Halfpeter, G.; Cruz, M. y Huerta, C. (2018). *Ganadería sustentable en el Golfo de México*. Instituto de Ecología, A. C., Mexico.

- Herrera, P.M. (ed.) (2020) *Ganadería y cambio climático: un acercamiento en profundidad*. Fundación Entretantos y Plataforma por la Ganadería Extensiva y el Pastoralismo. http://www.ganaderiaextensiva.org/wp-content/uploads/2020/03/CuadernoEntretantos6_GanaderiaayCC.pdf
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2020). An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
- Jose, S. y Dollinger, J. (2019). Silvopasture: a sustainable livestock production system. *Agroforestry Systems*. 93(1): 1-9.
- Nahed-Toral, J.; Valdivieso-Pérez, A.; Aguilar-Jiménez, R.; Cámara-Cordova, J. y Grande-Cano, D. (2013). Silvopastoral systems with traditional management in southeastern Mexico: a prototype of livestock agroforestry for cleaner production. *Journal of Cleaner Production*. 57: 266–279.
- Nahed, J.; Palma, J.M., y González, E. (2014). La adaptación como atributo esencial en el fomento de sistemas agropecuarios resilientes ante las perturbaciones. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 18(3): 7-34.
- Nair, P.R. (1993). An introduction to agroforestry. Kluwer Academic Publishers. Springer Science y Business Media.
- Palma, J.M. (2006). Los sistemas silvopastoriles en el trópico seco mexicano. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*. 14(3): 95-104.
- Palma, J.M.; Zorrilla, J.M. y Nahed, J. (2019). Incorporation of tree species with agricultural and agroindustrial waste in the generation of resilient livestock systems. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 53(1): 73-90.
- Perfecto, I. y Vandermeer, J. (2010). The agroecological matrix as alternative to the land-sparing/agriculture intensification model. *Proc. Natl Acad. Sci.* 107: 5786–5791.
- Plieninger, T. y Huntsinger, L. (2018). Complex rangeland systems: Integrated social-ecological approaches to silvopastoralism. *Rangeland Ecology and Management*. 71(5): 519-525.
- Rodríguez, D.I.; Enríquez, G. y Riveros, J.L. (2016). Food security and livestock: The case of Latin America and the Caribbean. *Ciencia e investigación agraria*. 43(1): 5-15.
- Roellig, M.; Costa, A.; Garbarino, M.; Hanspach, J.; Hartel, T.; Jakobsson, S.; Jakobsson, S.; Lindborg, R.; Mayr, S.; Plieninger, T.; Sammul, M.; Varga, A. y Fischer, J. (2018). Post hoc assessment of stand structure across European Wood-pastures: Implications for land use policy. *Rangeland Ecology and Management*. 71(5): 526-535.
- Rozendaal, D.; Bongers, F.; Aide, T.; Alvarez-Dávila, E.; Ascarrunz, N.; Balvanera, P.; Becknell, J.; Bentos, T.; Brancalion, P.; Cabral, G.; Calvo-Rodríguez, S.; Chave, J.; César, R.; Chazdon, R.; Condit, R.; Dallinga, J.; Almeida-Cortez, J.; Jong, B.; Oliveira, A. y Poorter, L. (2019). Biodiversity recovery of Neotropical secondary forests. *Science advances*. 5(3). eaau3114.
- Sánchez, R.R. (2020). *Estudio socioecológico del manejo silvopastoril en el bosque tropical seco de la costa centro de Jalisco, México*. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México. TESIUNAM.
- Sánchez-Romero, R.; Balvanera, P.; Castillo, A.; Mora, F.; García-Barrios, L.E. y González-Esquivel, C.E. (2020). Management strategies, silvopastoral practices and socioecological drivers in traditional livestock systems in tropical dry forests: An integrated analysis. *Forest Ecology and Management*. 479: 118506.
- Sánchez-Romero, R.; Mora-Ardila, F.; Val-Arreola, D. y González-Esquivel, C.E. (2021). Estimation of the forage potential of trees in silvopastoral systems of a dry tropical forest in Jalisco, Mexico. *Agroforestry Systems*. 1-17. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10457-021-00704-9>
- Savory, A. y Parsons, S.D. (1980). The Savory grazing method. *Rangelands*. 2(6): 234-237.
- Shelton, H.M. (2000). Tropical forage tree legumes in agroforestry systems. UNASYLVA-FAO. 51(1): 25-32.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2017). *Producción ganadera*. Disponible en <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-pecuaria>.
- Soler, R.; Peri, P.L.; Bahamonde, H.; Gargaglione, V.; Ormaechea, S.; Herrera, A.H. y Pastur, G.M. (2018). Assessing knowledge production for agrosilvopastoral systems in South America. *Rangeland Ecology and Management*. 71(5): 637-645.
- Steinfeld, H.; Gerber, P.; Wassenaar, T.D.; Castel, V.; Rosales, M.; Rosales, M. y de Haan, C. (2006). *Livestock's long shadow: Environmental issues and options*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

- Stern, M.; Quesada, M. y Stoner, K.E. (2002). Changes in composition and structure of a tropical dry forest following intermittent cattle grazing. *Revista de biología tropical*. 50(3-4): 1021-1034.
- Torres-Acosta, J.F.; González-Pech, P.; Ortiz-Ocampo, G.; Rodríguez-Vivas, I.; Tun-Garrido, J.; Ventura-Cordero, J.; Castañeda-Ramírez, G.; Hernández-Bolío, G.; Sandoval-Castro, C.; Chan-Pérez, J. y Ortega-Pacheco, A. (2016). Revalorizando el uso de la selva baja caducifolia para la producción de rumiantes. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 19(1): 73-80.
- Torres-Rivera, J.A.; Espinoza-Domínguez, W.; Reddiar-Krishnamurthy, L. y Vázquez-Alarcón, A. (2011). Sequestro de carbono en potreros arbolados, potreros sin árboles y bosque caducifolio de Huatusco, Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 13(3): 543-549.

Agradecimientos

Agradecemos a los productores y a las comunidades que nos han compartido sus conocimientos sobre el manejo silvopastoril tradicional, así como a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindar las facilidades para llevar a cabo estudios de estos sistemas productivos.

III.2. Tecnologías agroforestales (TAF) en ganadería: estrategia de adaptación al cambio climático en territorios costeros

Alma Liz Vargas de la Mora^{1*}

Vera Camacho Valdéz²

Timothy O. Randhir³

María del Carmen Hernández Moreno⁴

Manuel Jesús Cach Pérez⁵

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-CIRPAS.

²Conacyt-El Colegio de la Frontera Sur.

³Department of Environmental Conservation, University of Massachusetts.

⁴Departamento de Estudios Sociales del Sistema Alimentario. Centro de Investigación y Desarrollo, A.C.

⁵El Colegio de la Frontera Sur.

*Autor de correspondencia: vargas.alma@inifap.gob.mx

Introducción

El reporte más reciente del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (2019) estima que 37% de la superficie del planeta es dedicado a pasturas, derivado principalmente por el cambio de uso de suelo de áreas de bosque o selva; 19% de esta superficie son pasturas extensivas (IPCC, 2019), lo que implica importantes efectos ambientales como degradación, erosión, contaminación de suelo y agua, además de deforestación (CEPAL, 2013; Malý *et al.*, 2017) que tiene un impacto tanto en la flora y fauna local como en la funcionalidad de los servicios ecosistémicos (Pohjanmies *et al.*, 2017), y en el aporte de gases de efecto invernadero (IPCC, 2019).

El establecimiento de pasturas en territorios costeros agudiza los impactos del cambio climático (CC), los que se perciben en aumento de la frecuencia e intensidad de eventos extremos, incremento de temperatura y periodos de sequía más prolongados (Barrasa, 2017; IPCC, 2019).

La búsqueda de estrategias de adaptación al cambio climático orientadas a ganadería, sugiere que los sistemas silvopastoriles (SSP) y agrosilvopastoriles (ASP) son alternativas viables que promueven la restauración ambiental, principalmente por la incorporación de árboles dentro del sistema (Battaglini *et al.*, 2014), lo que contribuye a disminuir la temperatura local, diversificar el sistema productivo, mejorar las condiciones de fertilidad y protección del suelo, incrementa la captura de carbono y la recuperación de flora y fauna silvestre (CONANP *et al.*, 2011).

Priorizar la restauración de áreas productivas no cambia el paradigma de intervención institucional en campo, donde se mantienen estructuras que condicionan a los productores a través de incentivos (Grunwald, 2018; Bopp *et al.*, 2019), devalúa el conocimiento tradicional y pretenden estandarizar modelos productivos muchas veces

inadecuados para el contexto local (Shiva, 2006). Como resultado de esto y de otros factores socio-económicos de los productores (FAO, 2018), la adopción de tecnologías SP y de ASP es baja, lo que representa un desafío para la transición de manejo ganadero extensivo hacia uno de mayor sustentabilidad (Kebebe, 2017; García-Barrios y González-Espinosa, 2017; Naah, 2018).

El marco anterior se ejemplifica en la Costa de Chiapas, México. Esta región produce el 78% de la ganadería bovina estatal (SIAP, 2017), el territorio productivo se enmarca entre dos Áreas Naturales Protegidas (ANP) afectadas por el manejo extensivo y de baja inversión económica que tiene el sistema ganadero (Vaca *et al.*, 2012; Vargas-de la Mora, 2018). Aunado a esto, anualmente recibe de 10-25 huracanes, así como lluvias torrenciales acumuladas en un periodo de seis meses, provocando severos deslaves, erosión e inundaciones (Galván y Márquez, 2006).

En 1998 y en 2005 los efectos de estos eventos extremos provocaron daños en infraestructura, pérdidas humanas y agropecuarias valuados en \$ 140 150 000 dólares estadounidenses (equivalencia: 1 dólar = 20 pesos mexicanos), afectando alrededor de 500 000 ha de producción primaria, entre ambos periodos (Escalante, 2006). En respuesta, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), organizaciones no gubernamentales y académicas impulsaron el proyecto de restauración ambiental en sistemas ganaderos conocido como “proyecto silvopastoril” (pSSP), con el objetivo de liberar zonas de pastoreo y aumentar la cobertura forestal a través de cambio de prácticas de manejo extensivo por unas de mayor sustentabilidad (García-Barrios y González-Espinosa, 2017; Vargas-de la Mora, 2018).

El objetivo de este capítulo es brindar una perspectiva crítica sobre la adopción de las tecnologías SP y ASP promovidas en la Cuenca Coapa (costa de Chiapas), así como evidenciar su contribución para la adaptación al cambio climático en los predios ganaderos.

Proceso histórico de ganaderización en la costa de Chiapas

Durante el Porfiriato, la zona costera de Chiapas (entonces compuesta por la franja municipal colindante desde el estado de Oaxaca hasta la frontera con Guatemala), fue receptor de grandes inversiones extranjeras que impulsaron el desarrollo de infraestructura carretera, de comunicación, ferroviaria y portuaria (Fletes-Ocón, 2009) con el objetivo de fomentar el comercio masivo de caña de azúcar, ganado, carbón, madera y pescado; fue un periodo de bonanza económica, problemas de organización territorial y migración (Molina-Pérez, 2016).

Durante los años treinta del siglo XX la distribución de terrenos a trabajadores liberados de las haciendas, promovió la formación de nuevos poblados (Rodríguez *et al.*, 2020). A partir de ese momento y hasta los setentas del siglo pasado, la ganadería extensiva creció exponencialmente convirtiéndose en un pilar económico regional ocupando el 68.9% de la superficie del territorio, además, la ganadería de la zona había ganado renombre y llegó a comercializar 35 000 cabezas de ganado de engorda al año (Molina-Pérez, 2016). Entre los años setentas y ochentas del siglo XX, la privatización del ferrocarril e infraestructura agropecuaria, así como el cambio de políticas de subsidio al

campo y la concentración de incentivos productivos en otros municipios, marginaron los sistemas productivos de la región (Fletes-Ocón, 2009).

En los ochentas, las políticas promovían la revolución verde fomentando en la población rural la percepción de que los terrenos arbolados eran terrenos ociosos (Marinidou *et al.*, 2019) —refiriéndose a ellos con la frase: “parece un terreno de viuda”—, en algunos casos suscitándose invasiones en terrenos que los productores dejaban como reserva de árboles, por lo que se deforestaba la mayor parte de los predios ganaderos.

Caracterización de la Cuenca Coapa

La cuenca Coapa se ubica en el municipio de Pijijiapan que pertenece a la región costa de Chiapas, donde la temperatura oscila entre 21.7 a 33.8 °C, con una precipitación promedio mensual de 198 mm. Su topografía divide una planicie que oscila de 0 a 200 msnm, mientras que la zona noroeste cuenta con elevaciones de 380 a 2 500 msnm (Carabias *et al.*, 1999; Climate-data.org, 2020). La superficie municipal es predominantemente ganadera; en 2016 se comercializaron 24 813 toneladas de ganado en pie y canal, así como 68 millones de litros de leche (SIAP, 2017). Los productores de la cuenca comercializan en su parcela con intermediarios locales (Rodríguez *et al.*, 2020) y de la cabecera municipal; esto beneficia al productor puesto que no invierten recursos económicos para traslado de los animales.

El enfoque de la ganadería es de doble propósito (mantiene actividades de ordeña y venta de animales en pie no mayores a 300 kilos) y de manejo extensivo (Vargas-de la Mora, 2018), mientras que la engorda de ganado se refiere a la compra de becerros que mantiene durante 1.5 años en promedio, para venderlos con un peso de 350-400 kg. Para algunos productores la venta de ganado es una fuente de ingresos emergente y no necesariamente se realiza venta anual. También es posible encontrar productores que no tienen ganado, pero rentan sus parcelas de pastura a otros ganaderos.

El río Coapa es considerado uno de los más importantes del municipio debido a su conectividad entre la Sierra Madre de Chiapas y los sistemas lagunares costeros que albergan la reserva más importante de manglares en la región (Gómez *et al.*, 2019). Alrededor de 32 869 ha de la cuenca se catalogan como áreas de alta prioridad para restauración (López *et al.*, 2014), sin embargo, de acuerdo a los recursos naturales con los que cuenta, el desarrollo económico, capacidades humanas, tecnológicas y de infraestructura se categoriza su capacidad de adaptación al cambio climático en un nivel medio con respecto a los sectores agropecuario y forestal (Inurreta *et al.*, 2014).

La planicie de la cuenca Coapa está compuesta por selva alta (19.77%), manglar en la zona costera (14.29%) y vegetación acuática de tular (0.01%). En la serranía, la vegetación primaria es bosque mesófilo de montaña (4.15%), en ambas zonas se distribuyen el uso de suelo agrícola (0.31%) y pasturas (59.09%), siendo este último el principal uso de suelo de la cuenca (INEGI, 2016).

A partir de la instrumentación del plan hidráulico de la costa de Chiapas (1975-1988) se realizaron obras de rectificación de ríos, eliminación de meandros, establecimiento de muros de concreto o roca y desecación de pantanos para ampliación de zonas agropecuarias; como consecuencia, hubo una disminución de cauces en los ríos que alimentaban las zonas de esteros y complejos lagunares que albergan peces y mariscos en etapas

juveniles, lo que afecta a la pesquería local (Gómez *et al.*, 2019). Al mismo tiempo, se introdujeron pastos resistentes a inundación y salinidad para alimentar al ganado, así como tilapias adaptadas a condiciones de esteros, situación que fomentó la introducción de la ganadería y pesca a zonas de manglares y lagunas costeras (Gómez *et al.*, 2019).

Los ganaderos de la cuenca reconocen que las rectificaciones de los ríos son perjudiciales también para ellos, pues los potreros de zonas bajas en la cuenca suelen inundarse anualmente a partir de estas obras. Un recordatorio permanente sobre la fragilidad de su entorno son sus memorias sobre tres eventos: el huracán *Mitch*, la tormenta tropical *Javier* (ambos en 1998) y el huracán *Stan* (2005), los cuales fueron causantes de la pérdida de ganado, erosión y deslaves en potreros de ladera, desbordamiento de los ríos que azolvieron los terrenos bajos y acabaron con la vida de parientes y conocidos, así como de sus hogares.

El proyecto silvopastoril, originado a raíz de estos sucesos, se orientó al fomento de prácticas de intensificación de producción de alimento para el ganado (bancos forrajeros, bancos de proteínas, ensilaje), promover la rotación de potreros, el uso de cercos eléctricos, sistemas de riego para pasturas y sensibilizar a los productores mediante talleres en temas de conservación de cobertura forestal en potreros, cercas vivas, pastoreo en árboles frutales y forestales (García-Barrios y González-Espinosa, 2017; Vargas-de la Mora, 2018). El proyecto tuvo una inversión estimada en \$ 653 688.00 dólares en el periodo 2005-2016.

Arreglos agroforestales en sistemas silvopastoriles

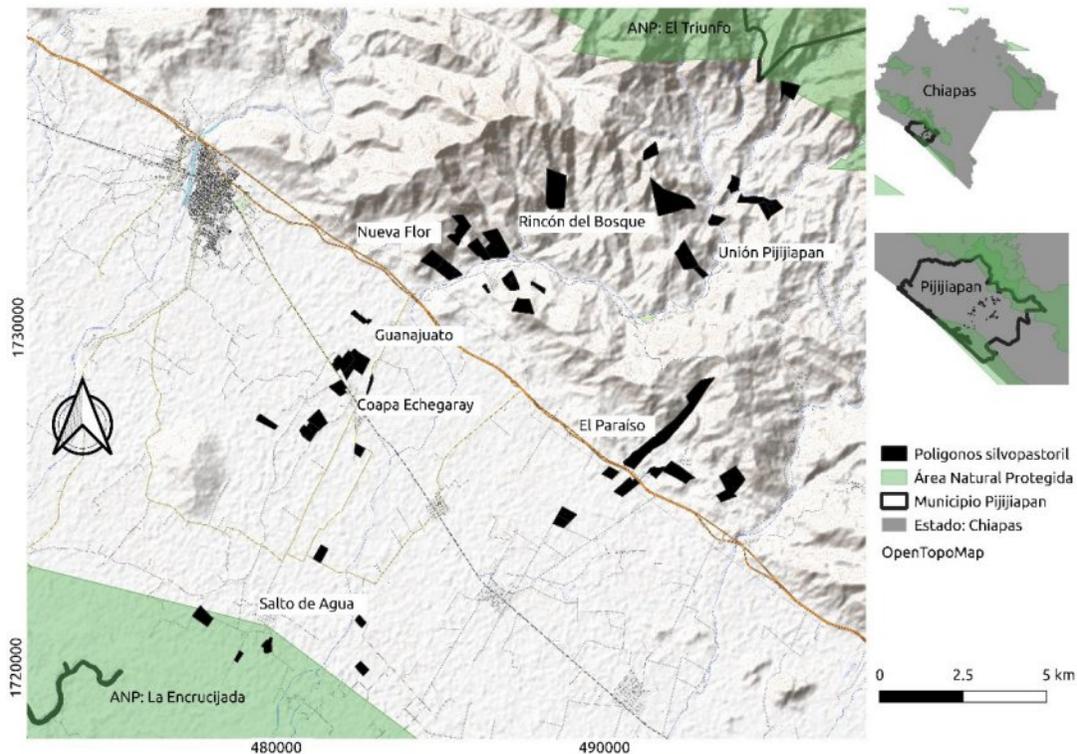
Los sistemas silvopastoriles en la costa de Chiapas se componen de una mezcla de prácticas orientadas al manejo del hato, intensificación de producción de alimentos para el ganado y arreglos espaciales que incorporan árboles en diferentes diseños. Los arreglos agroforestales que se encuentran con mayor frecuencia son los cercos vivos (Marinidou *et al.*, 2019), pastoreo bajo árboles en bosque natural o remanentes de vegetación arbórea y bancos forrajeros (Cortez-Egremy *et al.*, 2016; Pezo *et al.*, 2019); es menos frecuente encontrar árboles dispersos en potreros, además, suelen tener alta variabilidad en el número de árboles que se incorporan en el predio (Ángel *et al.*, 2017).

La incorporación de árboles y arbustos en los potreros tiene el objetivo de mejorar las condiciones de microclima y suelo, evitar erosión, pérdida de biodiversidad de flora y fauna, tener abasto de materias primas, frutos y semillas de uso humano y animal, así mismo contribuir como sumideros de carbono (López-Vigoa *et al.*, 2017). No obstante, el aporte real de estos componentes está vinculado a las especies introducidas, a la densidad de individuos y a la complejidad estructural de los diseños (Haggar *et al.*, 2015).

Consideraciones metodológicas para el análisis ganadero de la Cuenca Coapa

La investigación se dirigió en 2018 y 2019. Se utilizó una metodología cualitativa-cuantitativa. Se seleccionaron productores de siete comunidades dentro de la Cuenca Coapa (figura 1). La primera etapa consistió en entrevistar a 43 productores que participaron en el pSSP (890.26 ha totales), con un instrumento semiestructurado y una entrevista abierta a fin de indagar a profundidad los factores que limitaron la adopción de tecnologías agroforestales promovidas por el proyecto.

Figura 1
Ubicación de las comunidades de estudio



Fuente: Elaborado por los autores.

Se realizaron recorridos de campo para georreferenciar los predios y los componentes en el interior de éste. Así mismo, se actualizó la información de Pronatura Sur A.C. y la información generada por Vargas-de la Mora (2017) como base del proyecto. Con el objetivo de identificar los arreglos espaciales de los árboles en los potreros, se utilizaron imágenes satelitales del repositorio *Google earth* 2016. Se digitalizaron los componentes de cada predio en ambos periodos a escala 1:3 000 en el sistema cartográfico proyectado Universal Transversal de Mercator (UTM) y Datum WGS84 15N. La categorización de componentes se basó en los fomentados en el proyecto silvopastoril (pasto de corte, bancos forrajeros, bancos de proteínas); se complementó con los identificados por Pezo *et al.* (2019) en “árboles dispersos en potreros, árboles reserva en potrero, pastoreo bajo árboles, árboles ribereños, cercas vivas interiores y perimetrales”, y con lo observado en campo (zona agrícola, zona de libre pastoreo a cielo abierto, pasto mejorado de porte alto para libre pastoreo, plantación de árboles, cuerpos de agua [Jagüey, río, lagunas]) y otros —uso no ganadero—.

Caracterización de productores

Se considera que existen aspectos clave que determinan el grado de impacto ambiental de la actividad ganadera (Mouri y Aisaki, 2015; Xu *et al.*, 2018). En ese sentido, en el cuadro 1 se muestra la caracterización y tipología de productores derivados de un análisis en el que se define que las variables que influyen en la clasificación de los productores por cada cuenca es distinto; en la Cuenca Alta las variables que determinan la tipología de los

productores, fueron: tipo de acceso al terreno, objetivo de la ganadería, hectáreas totales del productor, hectáreas destinadas a ganadería y edad; mientras que para la Cuenca Baja, fueron: el número de animales, el grado de estudios del productor y la cantidad de animales vendidos por año, con estas variables se obtuvieron los cuatro grupos de productores por cuenca.

La caracterización muestra que los sistemas en ambas cuencas exceden el coeficiente de agostadero de los potreros (tomando como referencia 1.8 unidades animales/ha), lo que indica que los predios se encuentran con mayor cantidad de animales de la que pueden soportar. Haciendo un análisis individual de los predios se observó que 23% de los productores en Cuenca Alta y 5.9% de Cuenca Baja mantienen una carga animal menor a lo indicado en sus potreros. El impacto negativo de la sobrecarga del potrero podría ser minimizado con un adecuado manejo del hato. La información obtenida en esta investigación evidenció que los productores tienen estrategias de manejo como rotación de potreros o el uso de pastos mejorados, aunque técnicamente insuficiente como para cubrir las necesidades del sistema; los registros tampoco mostraron que posean otros potreros que puedan contribuir a liberar la presión del ganado en los predios.

En este mismo contexto, la producción obtenida de leche y carne sugiere que no es un sistema económicamente rentable. De acuerdo a las observaciones de campo, la producción mantiene una inversión económica mínima para el manejo del ganado aunque se cuenta con trabajadores (familiares principalmente) que ordeñan, alimentan y cuidan al ganado y proporcionan mantenimiento a los potreros por un periodo regular de tres a seis meses al año. Los ingresos de la ganadería pueden considerarse de subsistencia, donde la venta de leche contribuye a solventar las necesidades diarias, mientras que la venta anual de becerros y toretes complementan el ingreso. En el municipio de Pijijiapan, la ganadería tiene como característica general bajos rendimientos productivos (Rodríguez *et al.*, 2020).

Cuadro 1

Características generales de los productores por tipo y ubicación en la cuenca

Variables	Ubicación							
	Cuenca Alta (n=26 productores)				Cuenca Baja (n=17 productores)			
Tipo de productor	1	2	3	4	1	2	3	4
Porcentaje de productores (%)	74.1	7.4	3.7	14.8	68	4.5	13.6	13.6
Edad promedio (años)	55	64	42	42	52	35	50	44
Nivel máximo de estudios	Sec	Pri	Pri	Lic	Lic	Maes	Prep	Lic
Objetivo de ganadería	DP	L / DP	L / C / E	L / DP	L / DP	E	DP	DP / E
Acceso a predio (vía)	S o T	S	S	T * S	S o T	T	T	T
Cabezas de ganado promedio (número)	23	50	120	40	29	50	83	23

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

Variables	Ubicación							
	Cuenca Alta (n=26 productores)				Cuenca Baja (n=17 productores)			
Producción de leche promedio (l)	24	115	140	37	53	0	140	45
Venta de animales (número)	≤4	≤15	≤18	≤6	≤3	100*	≤7	≤18
Posesión de tierra promedio (ha)	31.1	90.5	90.0	51.5	14.0	28.0	31.0	7.0
Tierra para ganadería promedio (ha)	19	70	75	38	12	28	27	6.7

Pri=Primaria, Sec=Secundaria, Pre=Preparatoria, Lic=Licenciatura, Maes=Maestría, C=Cría, L=Leche, E=Engorda, DP=Doble Propósito, S = Sendero, T=Terracería.

*En ganadería de engorda se compran animales de media ceba para complementar la cantidad de animales para venta, por lo que no mantienen ganado en los predios por más de seis meses.

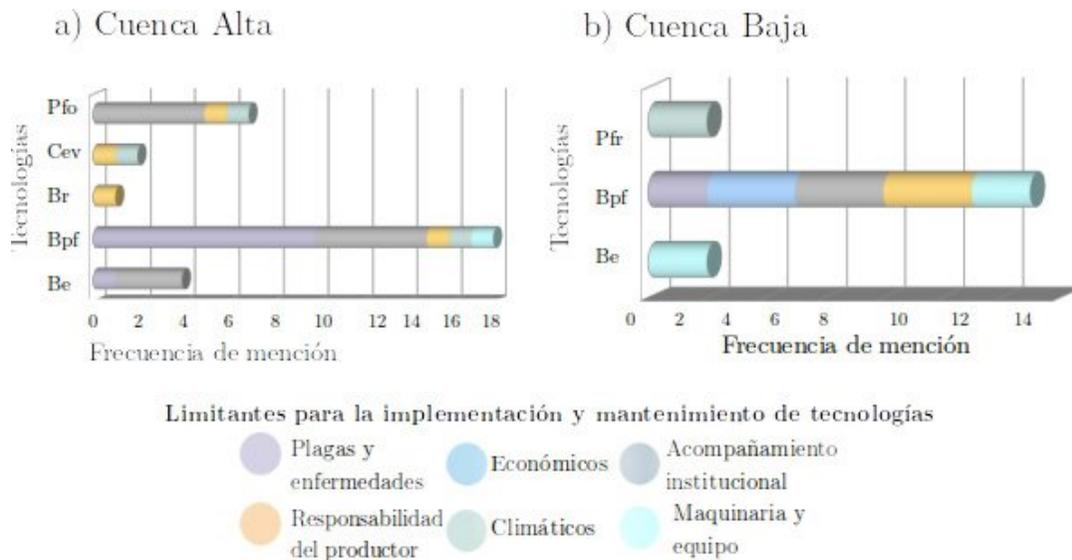
Fuente: Elaborado por los autores.

Análisis de adopción de tecnologías SP y ASP en ganadería de la Cuenca Coapa

La adopción de tecnologías es limitada por el contexto físico natural (Toledo y González, 2007). Por otro lado, la toma de decisiones de los productores también se influencia por otros factores como la falta de recursos económicos para adquirir insumos iniciales para la implementación de las innovaciones, el bajo precio de mercado de los productos obtenidos, la consideración de tiempo que le tomará el aprendizaje e implementación de la innovación y el acompañamiento institucional (Le-Gal *et al.*, 2011). A esto se suma la percepción de desvalorización del conocimiento local sobre las adaptaciones empíricas que con el tiempo los productores lograron en el sistema (Shiva, 2006; Naah, 2018), el contexto cultural de la población objetivo y la validación local de las tecnologías que se quieren masificar (Browa, 1983; Borrás *et al.*, 2015).

La figura 2 muestra las limitantes de los productores para la adopción de tecnologías de acuerdo a su ubicación, según sea la Cuenca Alta o Baja.

Figura 2
Limitaciones para la adopción de tecnologías hacia la transición de un manejo sustentable en ganadería



Be=Banco energético; Bpf=Banco de proteína y banco forrajeros; Br=Barrera rompevientos; Cev=Cercos vivos; Pfr=Pastoreo en frutales; Pfo=Pastoreo en forestales.
Fuente: Elaborado por los autores.

El uso de bancos proteicos con *Leucaena leucocephala* y de bancos forrajeros con caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y pasto cubano (*Cenchrus purpureus cv. Cuba CT-115*) así como pasto Guinea (*Megathyrsus maximus*) fueron sin duda las que presentaron mayor dificultad para la adopción debido principalmente a que tanto productores como los técnicos del proyecto no conocían el manejo de las especies; el modelo productivo silvopastoril fue implementado y promovido en Michoacán, en terrenos planos altamente fértiles, alta densidad de siembra y mecanizados, manejo que se trató de replicar sin éxito en la Cuenca Coapa. Estos resultados contrastan con lo que dice la CONANP en donde indica que tiene experiencias favorables con la introducción de árboles en los sistemas ganaderos; la germinación de la semilla de leucaena fue baja (se estableció como siembra directa), las plantas que nacieron presentaron problemas de sobrevivencia y las pocas que crecieron mantuvieron un único tallo delgado y de altura poco mayor a un metro; estos resultados coinciden con lo registrado por Moreno *et al.* (2011), donde explica que el sol, la sequía y el tiempo de almacenamiento de la semilla, condicionan la germinación, la sobrevivencia y desarrollo de la *leucaena* con registros entre 40-90% de pérdida. Después de un año, al momento del ramoneo, los arbustos de *leucaena* se arrancaban; de acuerdo a las observaciones de los productores, argumentaron que la planta tenía raíces poco profundas.

En el caso de la zona de laderas pronunciadas en la parte serrana, los derrumbes y erosión de suelo complicaron el establecimiento de estas tecnologías. Otro aspecto importante para la no adopción de esta práctica fueron las plagas; como la hormiga zompopo —género *Atta sp.*— que atacó a la *Leucaena* y la presencia de *Xanthomonas campestris* pv *campestris* enfermedad que atacó el follaje de pasturas; estos tres problemas estuvieron presentes durante todo el proceso; no fue posible controlarlos. Como parte del aprendizaje obtenido, los productores reemplazaron la *leucaena* por caulote (*Guazuma ulmifolia*), árbol de la región de atractiva gustocidad para el ganado, el cual manejaron como banco de proteína (mismo que se encontró en campo intercalado con cuajilote (*Parmentiera edulis*), especies que establecieron en arreglos como bancos de proteínas y para ramoneo, de los que se aprovecha tanto el follaje como el fruto. Por su parte, las limitaciones para la adopción de bancos energéticos, compuestos por caña de azúcar, fueron las plagas, la falta de maquinaria adecuada para picar la caña y darla como alimento al ganado, el acotado acompañamiento institucional que no especificaba control de plagas y el desconocimiento técnico del manejo de la caña de azúcar como forraje, considerado una mala planeación técnica.

En ambas ubicaciones de la cuenca, la adopción del pastoreo en frutales tanto como en forestales y los cercos vivos fueron limitados por incendios anuales, los cuales pueden ser originados por uso de fuego para renovación de pastizales, originados por colillas o cerillos tirados en las rutas de carretera, por el uso tradicional de la tierra (Rodríguez *et al.*, 2020), así como los estragos de los fenómenos meteorológicos. Los productores señalan que “sólo pega el árbol que nace solo” refiriéndose a que aun cuando sembraron en diversas ocasiones árboles maderables y frutales, las condicionantes arriba descritas no permitieron la sobrevivencia de las especies sembradas.

Los factores determinantes en la adopción de prácticas sustentables fueron el acompañamiento institucional con una frecuencia de 64%; los efectos climáticos 37.5% mientras que el 33% recayó en la responsabilidad del productor; 25% fue por maquinaria y equipo inadecuados o falta del mismo y el 16% por plagas y enfermedades. De acuerdo a los apoyos otorgados por el proyecto se encontró que el grado de implementación tuvo distinciones entre tipo de productor; en CA el tipo 1 y 2 implementaron 74 y 73%, respectivamente, mientras que los tipos 3 y 4 implementaron de 90 y 100% de los apoyos. En tanto que en CB el tipo 1 implementó 81.3% de las prácticas, el 2, el 100%, el tipo 3 alrededor de 91.7% y el 4 fue el grupo con menor implementación con 75%. En el aspecto de implementación, el proyecto presentó un impacto positivo; en contraste con la adopción de los productores fue de 45%; este resultado se obtuvo al comparar los apoyos implementados por el productor versus los componentes encontrados en campo al realizar esta investigación. Flores-González *et al.* (2018) enfatizaron que la adopción de tecnologías en sistemas pecuarios se dará si éstas son de bajo costo económico, requieran baja inversión de tiempo y que sean fáciles de aprender para el productor. Los resultados de este análisis de cuenca evidenciaron que la realidad es más compleja que la propuesta por los autores antes mencionados.

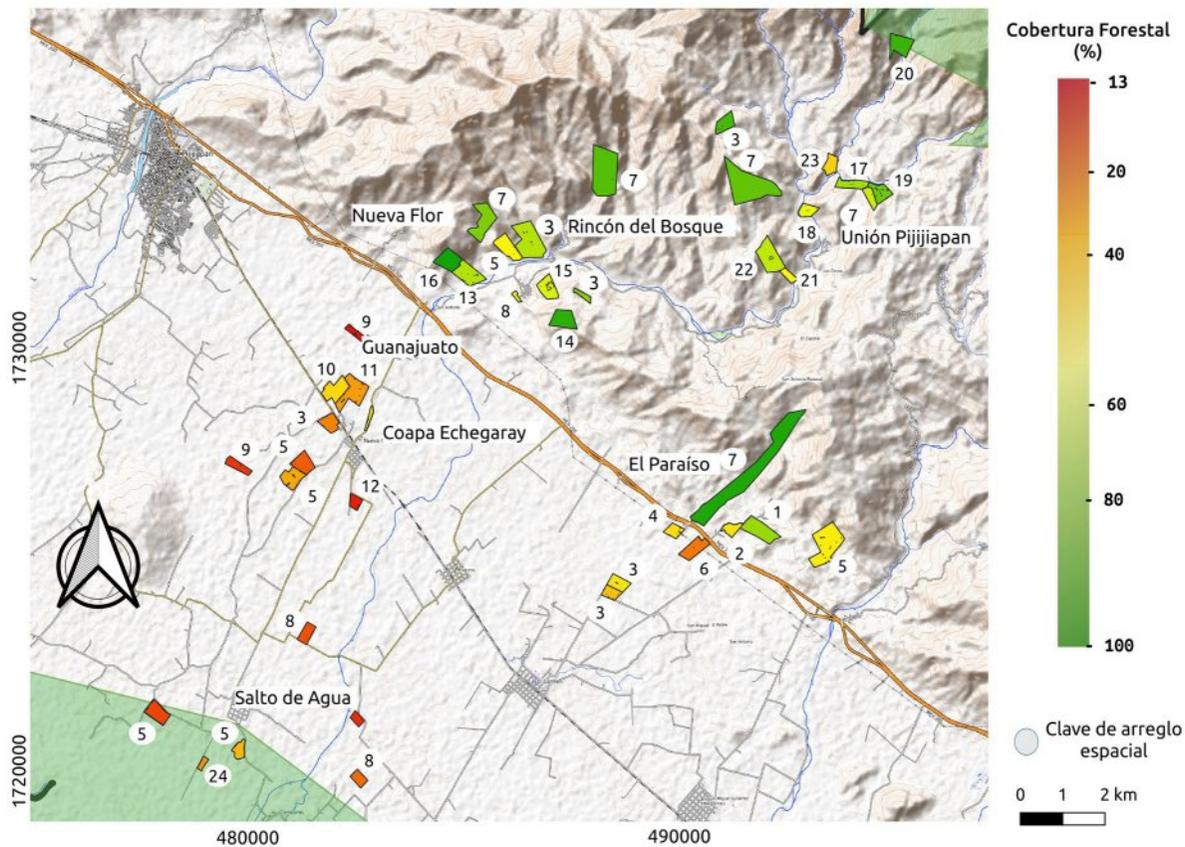
Arreglos espaciales de potreros y su influencia en la cobertura forestal del predio

El análisis de la estructura de potreros es la representación territorial de la toma de decisiones de los productores con base en sus experiencias (descritas anteriormente), que los llevó a incorporar o no en su diseño de potrero las diversas tecnologías agroforestales (TAF). Se identificaron 24 arreglos espaciales distintos (figura 3 y cuadro 2), en los que predominan tres TAF: 97.0% de los predios mantiene árboles dispersos en potreros y ocupan una superficie de 44.5 ha lo que representa el 5.0% del total de los predios estudiados; le sigue el cerco vivo perimetral con 76.7%, con 4.8% de la superficie de estudio y finalmente árboles reserva en potrero en 74.4% de los predios y representan el 44.3% de la superficie total de potreros muestreados.

En la región es frecuente encontrar predios con cercas vivas utilizadas para delimitar los potreros y árboles dispersos en potreros en pequeñas cantidades (Marinidou *et al.*, 2019), porque en ganadería extensiva los productores consideran poco rentable este tipo de distribución arbórea (Ángel-Sánchez, 2017). Cortés *et al.* (2016) y Pezo *et al.* (2019) encontraron que los productores con prácticas silvopastoriles incorporan más frecuentemente en sus predios tecnologías agroforestales como árboles dispersos en potreros, cercos vivos, barreras rompevientos, pastoreo en bosque natural lo que coincide con lo encontrado en la Cuenca. Por otra parte, los bancos forrajeros que suelen ser también un componente popular entre los ganaderos, en esta región no tuvieron buena adopción a consecuencia de las limitaciones presentadas en estos componentes. Hay que destacar que los cercos vivos perimetrales tuvieron mayor aceptación que los cercos vivos interiores.

Otro punto que resaltar es que el tipo de productor influyó en el porcentaje de cobertura forestal dentro de los potreros. Los productores de Cuenca Alta mantuvieron rangos de hasta 50% mayor cobertura forestal en comparación con los productores de Cuenca Baja principalmente el tipo 1 (cobertura forestal de 43.9-91.9% y 13.6-45% respectivamente), mientras que el grupo 2 fluctuó en CA 50.3-54.9% y CB 39%; tipo 3 coincidió en ambas cuencas con los rangos más bajos 45.2% CA y 19.7-27.6% CB y el tipo 4 registraron 38.7-100.0% de cobertura forestal en Cuenca Alta y 25.6-47.7% en Cuenca Baja.

Figura 3
Arreglos espaciales en potrero y su relación con la cobertura forestal en los predios ganaderos, año 2016



Fuente: Elaborado por los autores.

En adición, se analizó la toma de decisiones sobre el grado de cobertura forestal (cuadro 2), mediante el estadístico de análisis de componentes principales (ACP); los resultados mostraron una asociación entre las variables menor a 45% por lo que se considera una posible relación con el porcentaje de cobertura forestal pero no son determinantes para este resultado. El comportamiento de las variables también tuvo diferencias con la ubicación de los predios en la cuenca. En Cuenca Alta 50-67% de la cobertura forestal se asocia a variables como: años de trabajo en el proyecto silvopastoril, apoyos otorgados en especie por el proyecto, total de componentes implementados por el productor, inversión del proyecto por individuo, número de miembros en el grupo silvopastoril, número de miembros de la familia, tipo de acceso al predio, grado de estudios, número de animales del hato, ingreso anual total (venta de animales/leche). En Cuenca Baja no hubo distinción clara entre la asociación de cobertura arbórea y las variables, sin embargo, las variables resaltadas (mencionadas anteriormente) coinciden con el rango 13-48% de cobertura forestal, el más alto de la región. Por lo tanto, se asume que el proyecto silvopastoril influyó en la conservación y posible aumento de cobertura forestal a través del establecimiento de componentes ASP.

Cuadro 2
Características de arreglos espaciales de potreros y tipología de acuerdo a su ubicación en la cuenca

Arreglo espacial de potrero	Rango de cobertura forestal (ha)		Tipología agroforestal													
	Cuenca		TCA	Pa	Pba	Pm	Ca	Cvp	Cvi	Bf	Bp	Zp	Za	ar	arp	adp
	Alta	Baja														
1	19.30	0.00	5					x		x		x			x	x
2	4.12	1.81	4					x				x			x	x
3	3.86± 26.31	3.51± 5.93	6		x			x	x			x			x	x
4	0.00	3.86	8				x	x	x	x	x	x			x	x
5	10.43± 21.38	3.10± 5.59	5					x	x			x			x	x
6	0.00	4.54	6			x		x	x			x			x	x
7	4.74± 98.66	0.00	3									x			x	x
8	1.27	2.10± 2.61	4					x	x			x				x
9	0.00	1.15± 2.03	5					x	x			x	x			x
10	0.00	8.88	5	x			x	x				x				x
11	0.00	8.57	6					x	x	x	x	x				x
12	0.00	1.13	4				x	x				x				x
13	14.52	0.00	6				x	x				x		x	x	x
14	19.13	0.00	4		x							x			x	x
15	10.20	0.00	9	x	x	x		x	x			x	x		x	x
16	21.11	0.00	2		x										x	
17	9.23	0.00	7		x		x	x	x			x			x	x
18	5.77	0.00	6				x		x			x		x	x	x
19	11.93	0.00	6				x	x	x			x			x	x
20	18.32	0.00	4				x					x			x	x
21	3.31	0.00	5		x		x	x				x				x
22	18.69	0.00	5			x		x				x			x	x
23	4.65	0.00	7				x	x	x			x		x	x	x
24	0.00	1.06± 1.08	3					x				x				x

TCA=Total de componentes por arreglo; Pa=Plantaciones de árboles; Pba=Pastoreo bajo árboles; Pm=Pasto mejorado; Ca=Cuerpos de agua; Cvp=Cercos vivos perimetrales; Cvi=Cercos vivos interiores; Bf=Bancos forrajeros; Bp=Bancos de proteínas; Zp=Zona de pastoreo sin árboles; Za=Zona agrícola; ar=Árboles ribereños; arp=Árboles reserva en potrero; adp=Árboles dispersos en potrero.

Fuente: Elaborado por los autores.

Presencia de árboles en los componentes agroforestales como estrategias de adaptación al cambio climático

Se registraron 33 especies de árboles y arbustos distribuidos en los diversos componentes agroforestales de los potreros (figura 4); si bien en esta investigación no se censaron los árboles, la información obtenida permitió entender cómo la vegetación arbórea en los potreros es una estrategia de los productores para la adaptación ante el cambio climático. Los árboles fueron coincidentes por componente agroforestal independiente de la ubicación del potrero en la cuenca a excepción de los árboles señalados con menor uso, los cuales prevalecen en cuenca alta por ser vegetación natural remanente o en conservación dentro de los predios.

De acuerdo a la cantidad de especies arbóreas por componente agroforestal se tiene que los árboles dispersos en potreros albergan 53.3% de las especies, seguidos por cercos vivos perimetrales e interiores con 13.3% y 10.0%, respectivamente, pastoreo bajo árboles 6.7%, mientras que árboles reserva en potrero, árboles ribereños y banco de proteína registraron 5.0% cada uno, y finalmente las plantaciones de árboles que presentaron 1.7% de especies dentro del sistema. Alrededor de 27.0% de las especies encontradas son consideradas por los productores como especies introducidas, mientras que el resto son remanente de vegetación local que “nació sola” o fue conservada en el potrero por la sombra o por el valor cultural que el productor le otorga.

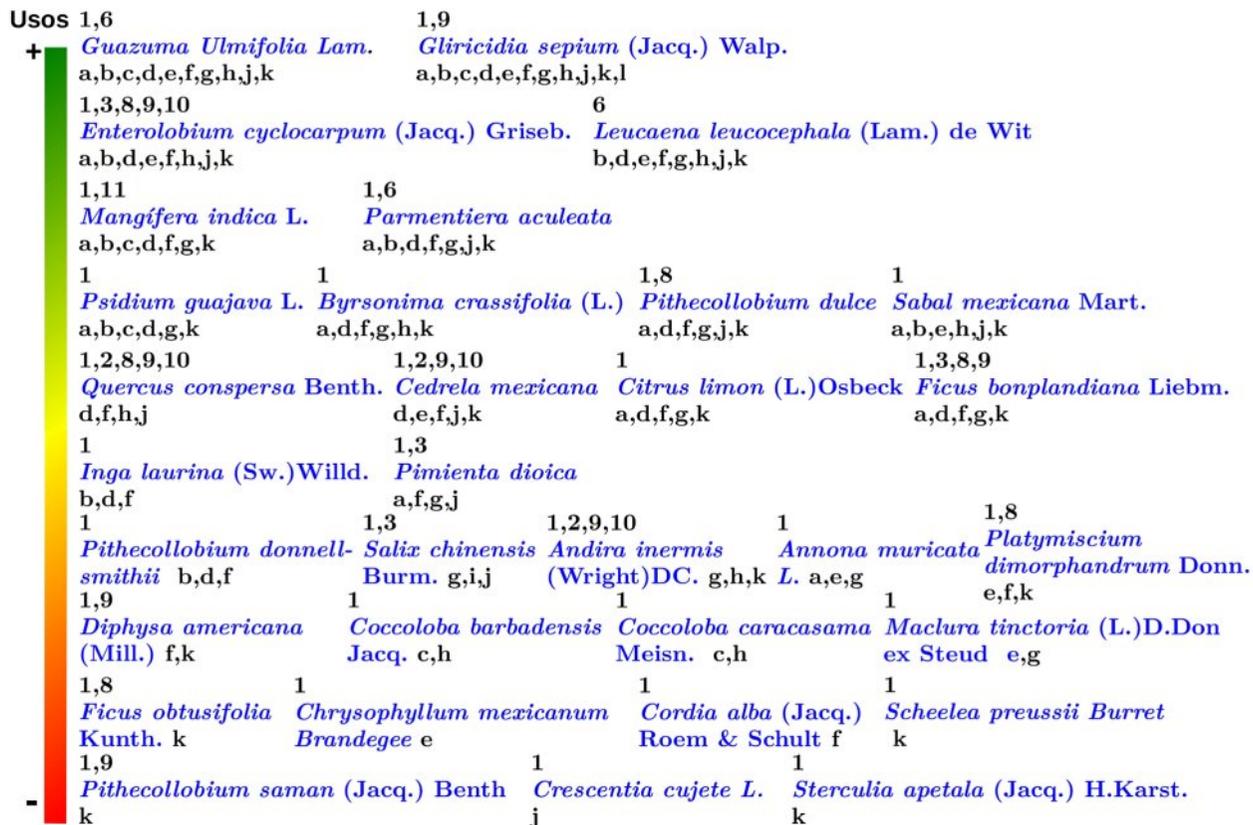
Los resultados mostraron que 79.0% de las especies que se usan en los potreros son multifuncionales. Del total de árboles y arbustos registrados en potrero, se observó que 49.6% son para uso doméstico (alimento, leña, materia prima, uso medicinal), 28.5% se conservan por los servicios ecosistémicos que proveen (sombra, protección contra fuertes vientos, inundaciones, deslaves, alimento y hábitat para animales silvestres), en tanto que únicamente el 21.9% se utilizan en labores ganaderas como alimento o materia prima. De este último, 7.3% de las especies arbóreas encontradas se establecen para proveer alimento al ganado y se asocian como parte de sistemas agroforestales pecuarios (*Enterolobium cyclocarpum*, *Gliricidia sepium*, *Pithecollobium dulce*, *Sabal mexicana*, *Parmentiera aculeata*, *Leucaena leucocephala*), de las cuales pueden consumirse el follaje, flores o frutos, son ricas en proteína cruda, vitaminas y fibra (Palma y González, 2018); otras especies como *Diphysa americana*, *Inga laurina* y *Psidium guajava* además de alimento, cumplen una función ecosistémica para rehabilitar los suelos, control de erosión, estabilizantes de cauces fluviales, reforestación y protección contra los vientos (Palma y Torres, 2020). Si bien las especies registradas en potreros pueden tener otros usos de los que no se hace referencia, en la figura 4 se muestran los usos mencionados por los productores y por estudios de la región.

La figura 4 deja de manifiesto que la toma de decisiones con respecto a conservar árboles en potrero es una estrategia de adaptación no sólo ante el cambio climático, pues se complementa con insumos de subsistencia para el productor y su familia, además de promover resiliencia del sistema ganadero, a nivel doméstico, así como para las especies silvestres. Naturalmente, estos resultados son indicativos, puesto que la cuantificación de las especies y la consideración de información técnica de los árboles (tamaño del árbol,

características de copa, entre otros datos) proporcionarán la contribución real de los árboles y de los arbustos en el sistema.

Figura 4

Uso de las especies arbóreas encontradas en los componentes agroforestales de los potreros



Ubicación: 1) árboles dispersos en potrero; 2) árboles reserva en potrero; 3) árboles ribereños; 4) zona agrícola; 5) zona de pastoreo sin árboles; 6) banco de proteínas; 7) banco forrajero; 8) cerco vivo interior; 9) cerco vivo perimetral; 10) pastoreo bajo árboles; 11) plantaciones de árboles; Uso²: a) alimento humano; b) alimento animales domésticos; c) alimento animales silvestres; d) leña; e) material para construcción/muebles; f) material para postes; g) uso medicinal; h) importante para especies silvestres; i) bioinsecticida; j) materia prima para uso no maderable; k) paisaje/sombra; l) abono verde.

Fuente: Elaborado por los autores.

Las recomendaciones internacionales para la ganadería ante el cambio climático continúan apuntando hacia la introducción y manejo de pastos mejorados, como principal fuente alimentaria para el ganado, reducción de emisiones, mejoramiento genético del hato y captura de carbono (FAO, 2018) e incentivar el proceso hacia la intensificación (Rodríguez, 2020); no obstante, en un contexto como el de la cuenca Coapa la ganadería

² Elaboración propia con base en información de campo, entrevistas y consulta de las siguientes referencias: Hernández-Xolocotzi, 1949; Tai-Wing *et al.*, 1994; Miranda, 1998; Ku-Vera *et al.*, 1999; Kent y Scatena, 2000; Kraft *et al.*, 2001; Olvera-Fonseca, 2004; Seth, 2004; Volpato y Godínez, 2004; Gómez-Castro *et al.*, 2006; Escobar-Ocampo y Ochoa-Gaona, 2007; Salgado-Mora *et al.*, 2007; Jiménez-Ferrer *et al.*, 2008a; Jiménez-Ferrer *et al.*, 2008b; Pinto-Ruiz *et al.*, 2010; González-Marín *et al.*, 2012; Suárez *et al.*, 2012; Herrero-Jáuregui *et al.*, 2013; Jiménez-Ferrer y Hernández-López, 2013; Orantes-García *et al.*, 2013; González-Valdivia *et al.*, 2014; Ríos-García *et al.*, 2015; Amigo, 2018.

extensiva, con algunas reestructuraciones del predio, puede ser una opción más viable como estrategia de adaptación al cambio climático (Pateiro *et al.*, 2020).

El CC afectará directa o indirectamente al ganado en salud y bienestar animal por efecto de inundaciones, sequías, incendios, cantidad y calidad del agua, así como la aparición o reaparición de enfermedades infecciosas o vectores de transmisión (Blanco-Penedo *et al.*, 2020). En los pastos y cultivos el CC podría alterar sus rendimientos y ciclos productivos relacionados con la sequía, así también tendrá efecto en la fertilidad del suelo; en los animales las altas temperaturas tenderán a alterar el comportamiento y la fisiología que se reflejará en la salud, en el bienestar térmico de los animales, y finalmente en el rendimiento productivo y, en casos extremos, la muerte (Blanco-Penedo *et al.*, 2020).

La incorporación de árboles en los potreros representa en sí una estrategia ante el cambio climático por varias razones; primero, tomar la decisión de conservar o incorporar árboles al potrero se basa en la experiencia o conocimiento de los productores sobre las especies de árboles así como sus beneficios directos o indirectos (Ríos-García *et al.*, 2015); otras razones, la resiliencia que dan los árboles al sistema ganadero porque proveen cantidad y calidad alimentaria para el ganado, reducen el estrés calórico de los animales debido al microclima y sombra de los árboles y arbustos, contribuyen a conservar la humedad en el sistema productivo, fomentan biodiversidad de flora y fauna a la vez que suplen necesidades de subsistencia para los productores y animales (Cisneros, 2019), suministran materia prima para diversas actividades, además de ser una protección contra el impacto de eventos extremos.

Con la incorporación de árboles y arbustos se asume que hay una modificación de conductas de los productores, como la eliminación del uso de fuego para la limpieza de potreros; con esto, también se evita la erosión causada por la pérdida de cobertura vegetal, así como la pérdida de materia orgánica derivada de este evento (del Ángel-Pérez *et al.*, 2018); se beneficia el ciclaje de nutrientes y los procesos de recuperación y de enriquecimiento de microflora y fauna que habitan en el suelo, sin dejar de lado los servicios ecosistémicos como la captura de carbono y la conectividad la cual tendrá un impacto en las especies silvestres de reptiles, aves, mamíferos y anfibios (Domingo-Liano *et al.*, 2017; del Ángel-Pérez *et al.*, 2018).

De acuerdo a los resultados analizados y tomando en consideración la diversidad de usos de los árboles registrados, así como el contexto socioeconómico y ambiental regional, se sugieren algunas estrategias SP y ASP para la Cuenca Coapa:

1. Incentivar los árboles dispersos en potrero enfatizando la introducción de árboles frutales, forrajeros y multifuncionales.
2. Establecer bancos de proteínas diversificados, intercalando principalmente especies como *Guazuma ulmifolia*, *Parmentiera aculeata*, o *Gliricidia sepium*.
3. Establecer cercos vivos perimetrales con por lo menos dos estratos incorporando árboles maderables y multifuncionales.
4. Establecer cercos vivos interiores incorporando árboles y arbustos forrajeros, multifuncionales y frutales.
5. En zonas inundables, se recomienda el uso de *Andira inermis*, *Salix chinensis*.
6. Promover el pastoreo bajo árboles para zonas de ladera y serranas, principalmente.

7. Siembra de árboles ribereños.
8. En zonas de manglar donde pastorea el ganado, se recomienda establecer barreras vivas de especies de manglares locales.

Reflexiones finales

El proyecto silvopastoril influyó en la sensibilización de los productores a conservar e incrementar diversas especies de árboles locales; se reforzaron TAF que algunos ganaderos tenían en sus potreros antes del proyecto, tales como cercas vivas perimetrales y árboles reserva en potreros. Al mismo tiempo, contribuyó a promover los árboles dispersos en potreros y cercos vivos en el interior, así como evitar la apertura de nuevas zonas de pastoreo a cielo abierto a través del corte selectivo de árboles de reserva para proporcionar mayor paso de luz y estimular el crecimiento de pasto, transformando esas áreas en pastoreo bajo árboles.

Por otra parte, existen dos criterios a resaltar: la ubicación del predio en la cuenca y el tipo de productor inciden en la diversidad de arreglos espaciales de los potreros y con el porcentaje de cobertura forestal de los predios, donde los tipos 1 de CA y 4 de ambas cuencas se relacionaron con mayor cobertura forestal; cabe señalar que éstos son los grupos de productores con menor cantidad de cabezas de ganado y de superficie de potrero.

Respecto al establecimiento de bancos proteicos se concluye que la leucaena no tuvo los resultados esperados debido a la falta de conocimiento técnico sobre el manejo de la especie utilizada (por ejemplo, pruebas piloto de ese cultivo para identificar su potencial de desarrollo en la zona); así mismo los estudios sugieren que no es viable la siembra de la semilla directamente en campo por su déficit en la germinación.

El uso de árboles en potrero como estrategia de adaptación al cambio climático contribuye a diversificar la alimentación del ganado, de los animales silvestres y de los humanos. El mayor aporte se percibe en el suministro de bienes y servicios naturales para uso doméstico y para la conservación de los servicios ecosistémicos, así como la generación de hábitat para fauna silvestre, mejorar el microclima, la retención de tierra en zonas de ladera, aminorar los impactos de las inundaciones y eventos meteorológicos; sin embargo, es necesario cuantificar el componente forestal para obtener el beneficio real en los potreros.

La ganadería de la Cuenca Coapa es una actividad productiva considerada viable por los productores locales, principalmente por las condicionantes económicas y de degradación ambiental que encarecen la posibilidad de desarrollar otras alternativas; sin embargo, la forma de producir actual contribuye a vulnerar la cuenca. Incentivar TAF con uso de árboles multifuncionales es una alternativa viable, pues representan menor costo de inversión y curva de aprendizaje para los productores, contribuyen a aumentar la cobertura forestal y a mejorar las condiciones físicas de la cuenca, en contraste con el enfoque que promueve técnicas de intensificación del manejo de sistemas pecuarios y producción de alimentos intensivos.

Se recomienda indagar a mayor profundidad sobre indicadores técnicos relacionados con los factores que aquí se exponen para implementar soluciones asertivas al momento de establecer TAF.

Aspectos destacados

1. Esta investigación contribuyó a identificar los principales arreglos espaciales de los potreros que facilita comprender la toma de decisiones de los productores (para establecerlos) de acuerdo a las condiciones de cada sitio.
2. Otro elemento relevante que se evidencia en este capítulo son los aspectos que influyeron en la adopción de las prácticas agroforestales, las cuales se vinculan principalmente con la falta de control de plagas, enfermedades y manejo técnico de los diversos componentes.
3. El cambio climático es un hecho, por lo que se enfatiza en la importancia de comprender los procesos territoriales como una estrategia para facilitar de manera empática, colaborativa y co-responsable las intervenciones institucionales en campo.

Literatura citada

- Amigo, J. (2018). Contribuciones sobre el género *Salix* (Salicaceae) en Chile. *Chloris Chilensis*. 21(2). URL :// www.chlorischile.cl
- Ángel-Sánchez, Y.K.; Pimentel-Tapia, M.E. y Suárez-Salazar, J.C. (2017). Importancia cultural de vegetación arbórea en sistemas ganaderos del municipio de San Vicente del Caguán, Colombia. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*. 20(2): 393-401.
- Barrasa, S. (2017). De montaña, milpa y cañaveral. Transformaciones percibidas de los paisajes en la costa de Chiapas. *Investigaciones Geográficas*. 93: 95-109. <https://doi.org/10.14350/ig.54775>
- Battaglini, L.; Bovolenta, S.; Gusmeroli, F.; Salvador, S. y Sturaro, E. (2014). Environmental sustainability of alpine livestock farms. *Italian Journal and Animal Science*. 13(2): 431-443.
- Blanco, P.I.; Cantalapedra, J. y Llonch, P. (2020). Impacto del cambio climático sobre el bienestar animal en los sistemas ganaderos. *ITEA-Inf. Tec. Econ. Agrar*. 116(5): 424-443. [https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/itea/revistas/2020/116-5/\(424-443\)%20ITEA%20116-5%20EXTRA.pdf](https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/itea/revistas/2020/116-5/(424-443)%20ITEA%20116-5%20EXTRA.pdf)
- Bopp, C.; Engler, A.; Poortvliet, M. y Jara-Rojas, R. (2019). The role of farmers' intrinsic motivation in the effectiveness of policy incentives to promote sustainable agricultural practices. *Journal of Environmental Management*. 244: 320-327.
- Borras, S.; Franco, J. y Monsalve-Suárez, S. (2015). Land and food sovereignty. *Journal Third World Quarterly*. *Food sovereignty: convergence and contradictions, condition and challenges*. 36(3): 600-617. <https://doi.org/10.1080/01436597.2015.1029225>
- Browa, H. (1983). The causes, conditions and patterns of appropriate technology: an attempt of explanation and description by means of system-analytical macro-approach. *Systems approach to appropriate technology transfer. Proceedings of the IFAC Symposium, Vienna, Austria (11-20)*.
- Carabias-Lillo, J.; Provencio, E.; De la Maza, J. y Jiménez-González, F. (1999). *Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera La Encrucijada*. México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología. 184 p. <http://www.paot.mx/centro/ine-semarnat/anp/AN09.pdf>
- Cisneros, S.P. (2019). Sistema silvopastoril: ganadería bovina ante el cambio climático. *Revista Vinculando*. <https://vinculando.org/productores/sistemas-silvopastoriles-estrategia-pertinente-para-la-ganaderia-bovina-ante-el-cambio-climatico.html?highlight=feed#vcite>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2013). *Perspectivas de la agricultura y el desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile. 178 p.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP)-Fondo Mexicano para la Conservación A.C.-The Nature Conservancy (2011). *Programa de Adaptación al Cambio Climático en Áreas Naturales Protegidas del complejo de Sierra y Costa de Chiapas, México*. 32 p.

- Climate-data.org (2020, Abril 6). Datos climáticos de Pijijiapan, Chiapas. <https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico/chiapas/pijijiapan-1021757/>
- Cortéz, E.J.G.; Uribe, G.M.; Cruz, L.A.; Lara, B.A. y Romo, L.J.L. (2016). Árboles nativos para el diseño de tecnologías silvopastoriles en la Sierra de Huautla, Morelos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. (16): 3371-3380
- del Ángel-Pérez, A.L.; Hernández-Estrada, C.A.; Nataren-Velázquez, J.; Villagómez-del Ángel, T.E.; Villagómez-Cortés, J.A. y Tapia-Naranjo, A.C. (2018). *Pago por servicios ecosistémicos en ganadería extensiva como instrumento de desarrollo regional*. Experiencias de desarrollo territorial y sustentable en México. Universidad Interserrana del Estado de Puebla y Plaza y Valdés editores. Pp. 83-110. ISBN: 978-607-8624-11-9.
- Domingo-Laino, L.; Musálem, K. y Laino, R. (2017). Perspectivas para un desarrollo sustentable: un estudio de caso de producción ganadera en la región del Chaco Paraguayo. *Población y Desarrollo*. 23(45): 95-106. [https://doi.org/10.18004/pdfce/2076-054x/2017.023\(45\).095-106](https://doi.org/10.18004/pdfce/2076-054x/2017.023(45).095-106)
- Escalante, S.C. (2006). Análisis del patrón de lluvias en la costa de Chiapas. *Quehacer Científico en Chiapas, UNACH*. 1(1): 39-64.
- Escobar-Ocampo, M. y Ochoa-Gaona, S. (2007). Estructura y composición florística de la vegetación del Parque Educativo Laguna Bélgica, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 78: 391-419. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmbiodiv/v78n2/v78n2a16.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2018). *Soluciones ganaderas para el cambio climático, Roma, Italia*. 8 p.
- Fletes-Ocón, H.B. (2009). La reinención de una vocación regional agroexportadora. El Corredor Costero de Chiapas. *LiminaR. Estudios sociales y humanísticos*. 7(2): 164-183.
- Flores-González, A.; Jiménez-Ferrer, G.; Castillo-Santiago, M.; Ruiz de Oña, C. y Covalada, S. (2018). Adoption of sustainable cattle production technologies in the Lacandon rainforest, Chiapas, México. *International Journal Innovations and Research*. 7(2): 2319-1473.
- Galván, F.A. y Márquez, G.A. (2006). Descripción biofísica de la cuenca del río Coapa, Chiapas. *Hidrobiología*. 16(2): 107-120. <http://www.scielo.org.mx/pdf/hbio/v16n2/v16n2a1.pdf>
- García-Barrios, L. y González-Espinosa, M. (2017). Investigación ecológica participativa como apoyo de procesos de manejo y restauración forestal, agroforestal y silvopastoril en territorios campesinos. Experiencias recientes y retos en la Sierra Madre de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 88: 129-140. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.10.022>
- Gómez, R.R.; Ramos, S.E. y Romero, B.E. (2019). Problemas asociados con la rectificación y el cambio de cauce en los sistemas lagunares de la Costa de Chiapas, México. *Ciencia Pesquera*. 27(2): 59-67.
- Gómez-Castro, H.; Nahed-Toral, J.; Tewolde, A.; Pinto-Ruiz, R. y López-Martínez, J. (2006). Áreas con potencial para el establecimiento de árboles forrajeros en el centro de Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 44(2): 219-230 <file:///home/fama/Descargas/art7.pdf>
- González-Marín, R.M.; Moreno-Cassasola, P.; Orellana, R. y Castillo A. (2012). Palm use and social values in rural communities on the coastal plains of Veracruz, México. *Environment, Development and Sustainability*. 14: 541-555. <https://doi.org/10.1007/s10668-012-9343-y>
- González-Valdivia, N.; Barba-Macías, E.; Hernández-Daumás, S. y Ochoa-Gaona, S. (2014). Avifauna en sistemas silvopastoriles en el Corredor Biológico Mesoamericano, Tabasco, México. *Revista Biol. Trop.* 62(3): 1031-1052 ISSN-0034-7744.
- Google (s. f., mayo 2). Google satelital. https://www.google.com/intl/zh-CN_cn/permissions/geoguidelines/attr-guide.html
- Grunwald, A. (2018). Diverging pathways to overcoming the environmental crisis: A critique of eco-modernism from a technology assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*. 197(2): 1854-1862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.212>
- Hernández-Xolocotzi, E. (1949). Estudio botánico de las palmas oleaginosas de México. *Botanical Sciences - Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 9: 13-19. doi.10.17129/botsci.957 <https://kopernio.com/viewerdoi=10.17129%2Fbotsci.957&token=WzlxNzE4MTgsljEwLjE3MTI5L2JvdHNjaS45NTciXQ.JBFAPiw1JCpFvilckwUUUoxf7hk>
- Herrero-Jáuregui, C.; Guariguata, M.R.; Cárdenas, D.; Vilanova, E.; Robles, M.; Licona, J.C. y Nalvarte, W. (2013). Assessing the extent of "conflict of use" in multipurpose tropical forest trees: A regional view. *Journal of Environmental Management*. 130: 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.044>

- Inurreta, A.H.; Uresti, D.D. y Uresti, G.J. (2014). Índice de capacidad de adaptación al cambio climático de los sectores agrícolas, pecuario y forestal (ICA) de ocho cuencas representativas del Sur-Sureste de México. En Piña, G. J. (ed.), *XXVI Reunión Científica Tecnológica, Forestal y Agropecuaria*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Pp. 369-377.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019). Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. 36 p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2016). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI.
- Jiménez-Ferrer, G.; Velasco-Pérez, R.; Uribe-Gómez, M. y Soto-Pinto, L. (2008a). Ganadería y conocimiento local de árboles y arbustos forrajeros de la Selva Lacandona, Chiapas, México. *Veterinaria México*. 39(2): 199-213. <https://www.medigraphic.com/pdfs/vetmex/vm-2008/vm082i.pdf>
- Jiménez-Ferrer, G.; López-Carmona, M.; Nahed-Toral, J.; Ochoa-Gaona, S. y de Jong, B. (2008b). Árboles y arbustos forrajeros de la Región Norte-Tzotzil de Chiapas, México. *Veterinaria México*. 39(2): 199-213. <https://www.medigraphic.com/pdfs/vetmex/vm-2008/vm082i.pdf>
- Jiménez-Ferrer, G. y Hernández-López, L. (2013). Diversidad de árboles en sistemas ganaderos de Chiapas. *Ecofronteras*. Pp. 17-19.
- Kebebe, E.G. (2017). Household nutrition and income impacts of using dairy technologies in mixed crop-livestock production systems. *The Australian journal of agricultural and resource economics*. 61(4): 626-644. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12223>
- Kent, R.; Odum, T. y Scatena, F.N. (2000). Eutrophic overgrowth in the self-organization of tropical wetlands illustrated with a study of swine wastes in rainforest plots. *Ecological Engineering*. 16: 255-269.
- Kraft, C.; Jenerr-Siems, K.; Siems, K.; Solis, P.; Gupta, M.P.; Bienzle, U. y Eich, E. (2001). Andinermals A-C, antiplasmodial constituents from *Andira inermis*. *Phytochemistry*. 58: 769-774.
- Ku-Vera, J.C.; Ramírez-Avilés, L.; Jiménez-Ferrer, G.; Alayón-Gamboa, J.A. y Ramírez-Cancino, L. (1999). Árboles y arbustos para la producción animal en el trópico mexicano. Capítulo de libro *Agroforestería para la producción animal en América Latina*/ M. D. Sánchez y M. Rosales Méndez, editores. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Pp. 161-180. ISBN: 92-5-304257-5.
- Le-Gal, P.Y.; Dugué, P.; Faure, G. y Novak, S. (2011). How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level? A review. *Agricultural systems*. 104: 714-728. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.07.007>
- López, M.J.; Villas, S.B.; Cama, G.R.; López, B.W.; Arellano, M.J. y Olvera, A.D. (2014). Zonificación de áreas prioritarias de intervención en cuencas de las regiones Sierra Madre y Costa del estado de Chiapas, México. En Piña, G. J. (ed.), *XXVI Reunión Científica Tecnológica, Forestal y Agropecuaria* Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Pp. 440-447.
- Malý, M.; Hálová, P.; Havliková, M. y Zaková-Kroupová, Z. (2017). Valuation of public goods: the case of emissions from livestock holdings in the Czech Republic. *Agris on-line papers in economics and informatics*. 9(2): 99-111. <http://doi.org/10.7160/aol.2017.090109>
- Marinidou, E.; Jiménez, F.G.; Soto, P.L.; Ferguson, B.G. y Saldívar, M.A. (2019). Proceso de adopción de árboles en áreas ganaderas: estudio de casos en Chiapas, México. *Sociedad y Ambiente*. (18): 201-230 ISSN: 2007-6576.
- Miranda, F. (1998). La vegetación de Chiapas. Tercera edición. Ed. Consejo Estatal para la cultura y las artes de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 596 p.
- Molina-Pérez, V. (2016). Impacto económico y social del ferrocarril panamericano en la Región de Tonalá en el siglo XX. *Revista Pueblos y Fronteras Digital*. 11(21): 67-91.
- Moreno, C.P.; Infante, M.D. y Madero, V.C. (2011). Germinación y supervivencia de dos especies de acahual de selva baja para restaurar dunas costeras. *Revista mexicana de ciencias forestales*. 2(6): 19-36. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v2n6/v2n6a4.pdf>
- Mouri, G. y Aisaki, N. (2015). Using land-use management policies to reduce the environmental impacts of livestock farming. *Ecological complexity*. 22: 169-177. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2015.03.003>
- Naah, J. (2018). Investigating criteria for valuation of forage resources by local agropastoralists in west Africa: using quantitative ethnoecological approach. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 14: 62. <https://doi.org/10.1186/s13002-018-0261-4>

- Olvera-Fonseca, S. (2004). Evaluation of the bromatological potential of seeds and fruits of *Sabal mexicana* mart. (Arecaceae). *Economic Botany*. 58(4): 536-543. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2004\)058\[0536:EOTBPO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2004)058[0536:EOTBPO]2.0.CO;2)
- Orantes-García, C.; Pérez-Farrera, M.A.; del Carpio-Penagos, C.U. y Tejeda-Cruz, C. (2013). Aprovechamiento del recurso maderable tropical nativo en la comunidad de Emilio Rabasa, Reserva de la Biósfera Selva El Ocote, Chiapas, México. *Madera y Bosques*. 19(1): 7-21. <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v19n3/v19n3a2.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2018). *Transforming the livestock sector through the sustainable development goals*. Rome, Italia. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Pp. 222.
- Palma, J.M. y González-Rebeles, C. (2018). *Recursos arbóreos y arbustivos tropicales para una ganadería bovina sustentable*. Ed. Universidad de Colima. Colima, México. http://www.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Recursos-arboreos-y-arbustivos-tropicales_462.pdf 138p
- Palma, J.M. y Torres, J. (2020). Recursos arbóreos y arbustivos tropicales II para una ganadería bovina sustentable. Ed. Universidad de Colima. Colima, México. http://www.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Recursos-arboreos-II-DIGITAL_495.pdf 131 p.
- Pateiro, M.; Munekata, P.E.S.; Domínguez, R. y Lorenzo, J.M. (2020). Ganadería extensiva frente al cambio climático en España. *ITEA-Inf. Tec. Con. Agrar.* 116(5): 444-460. [https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/itea/revistas/2020/116-5/\(444-460\)%20ITEA%20116-5%20EXTRA.pdf](https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/itea/revistas/2020/116-5/(444-460)%20ITEA%20116-5%20EXTRA.pdf)
- Pezo, D.; Ríos, N.; Ibrahim, M. y Gómez, M. (2019). Silvopastoral systems for intensifying cattle production and enhancing forest cover: the case of Costa Rica. Background paper. PROFOR Innovation and Action for Forest. 53 p.
- Pinto-Ruiz, R.; Hernández, D.; Gómez, H.; Cobos, M.A.; Quiroga, R. y Pezo, D. (2010). Árboles forrajeros de tres regiones ganaderas de Chiapas, México: usos y características nutricionales. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*. 26(1): 19-31.
- Pohjanmies, T.; Triviño, M.; Le-Tortorec, E.; Mazziotta, A.; Snäll, T. y Mönkköen, M. (2017). Impacts of forestry on boreal forests: An ecosystem services perspective. *Ambio*. 46: 743-755. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0919-5>
- Ríos-García, C.A.; Ramírez-Ramírez, J.; Molina-Meza, J.R.; Pérez-Pimentel, M.E.; López-López, M. y Orantes-García, C. (2015). Árboles y arbustos útiles en una comunidad campesina de Jiquipilas, Chiapas. *Lacandonia*. 9(2): 11-16.
- Rodríguez, O.G.; Nahed-Toral, J.; Guevara-Hernández, F.; Alayón-Gamboa, J.A. y Grande-Cano, J.D. (2020). Historia y caracterización técnica y socioeconómica de la ganadería bovina en la Costa de Chiapas, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 23(55): 1-13.
- Rodríguez, T.D.A.; Martínez, M.P.; Pulido, L.J.; Martínez, L.P.J. y Cruz, L.J. (2020). Combustibles, comportamiento del fuego, emisiones en un pastizal y una sabana artificiales en Chiapas, México. *Revista Biología Tropical*. 68(2): 641-654. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v68n2/0034-7744-rbt-68-02-641.pdf>
- Salgado-Mora, M.G.; Ibarra-Nuñez, G.; Macías-Sámamo, J.E. y López-Báez, O. (2007). Diversidad arbórea en cacaotales del soconusco, Chiapas, México. *Interciencia*. 32(11): 763-768. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33901107.pdf>
- Seth Mukesh, K. (2004). Trees and their economic importance. *The Botanical Review*, 69(4), 321-376 DOI: 10.1663/0006-8101(2004)069[0321:TATEI]2.0.CO;2
- SIAP (2017). Resumen Nacional-producción, valor, animales sacrificados y peso. Anuario estadístico de la producción ganadera. http://nube.siap.gob.mx/cierre_pecuario/
- Shiva, V. (2006). Monocultures of the mind. Chapter 16. *Creative Management and development*. Third edition. SAGE Publications Ltd. Pp. 199-217.
- Suárez, A.; Williams-Linera, G.; Trejo, C.; Valdez-Hernández, J.I.; Cetina-Alcalá, V.M. y Vibrans, H. (2012). Local knowledge helps select species for forest restoration in a tropical dry forest of central Veracruz, México. *Agroforest System*. 85: 35-55. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9437-9>
- Tai-Wing, W., Ling-Hua, Z., Jun, W. y Kwok-Pui, F. (1994). Morin: a wood pigment that protects three types of cells in the cardiovascular system against oxyradical damage. *Biochemical Pharmacology*. 47(6): 1099-1103. [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(94\)90424-3](https://doi.org/10.1016/0006-2952(94)90424-3)

- Toledo, V. y González, M. (2007). *El metabolismo social: las relaciones entre la sociedad y la naturaleza. El paradigma ecológico en las ciencias sociales*. Barcelona: Icaria Editorial. Pp. 85-112. ISBN 978-84-7426-756-3.
- Vaca, R.; Golicher, D.; Cayuela, L.; Hewson, J. y Steininger, M. (2012). Evidence of incipient forest transition in Southern Mexico. *PLoS ONE*. 7(8): 42309. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042309>
- Vargas-de la Mora, A.L. (2017). Proceso de construcción de ganadería sostenible. Reporte de trabajo. Pronatura Sur, A.C. 82 p.
- Vargas-de la Mora, A.L. (2018). Livestock production in buffering zones in Chiapas, Mexico: analysis of community capitals. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*: 15(4): 565-583. <https://doi.org/10.22231/asyd.v15i4.900>
- Volpato, G. y Godínez, D. (2004). Ethnobotany of pru, a traditional Cuban refreshment. *Economic Botany*. 58(3): 381-395. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2004\)058\[0381:EOPATC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2004)058[0381:EOPATC]2.0.CO;2)
- Xu, X.; Ma, Z.; Chen, Y.; Gu, X.; Liu, Q.; Wang, Y.; Sun, M. y Chang, D. (2018). Circular economy pattern of livestock manure management in Longyou, China. *Journal of material cycles and waste management*. 20: 1050-1062. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0667-4>

Agradecimientos

Agradecemos a los productores que participaron en este proceso de investigación y que compartieron sin inhibiciones sus experiencias y anhelos. A Pronatura Sur y a Laige de Ecosur quienes brindaron información de base para este estudio.

III.3. Hoja de *Ricinus communis* L., forraje no convencional de tipo proteico- energético para el desarrollo de tecnologías silvopastoriles

José Manuel Palma García^{1,2*}

José Manuel Zorrilla Ríos³

Alejandra del Viento Camacho¹

Cesar Lara González¹

Luis Antonio Ramírez Navarro³

Jacqueline Zamora Beltrán¹

¹Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (FCBA), Universidad de Colima.

²Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia - MIPPE, Universidad de Colima.

³CUCBA-MIPPE, Universidad de Guadalajara.

*Autor de correspondencia: palma@ucol.mx

Introducción

Los sistemas agroforestales favorecen y aprovechan la biodiversidad como alternativa a la producción convencional de monocultivo. En estos sistemas, diferentes especies nativas o naturalizadas pueden ser incorporadas a los agroecosistemas, lo que permite la generación de nuevos enfoques, estructuras y funciones, las que aportan opciones para afrontar condiciones de vulnerabilidad climática de forma cíclica natural, como sequía e inundaciones, así como aspectos de cantidad y calidad forrajera enfocadas al desarrollo de sistemas silvopastoriles o agrosilvopastoriles poco convencionales como estrategias de adaptación.

La producción de forrajes base para la alimentación de los rumiantes en los trópicos enfrenta estacionalidad climática, fenómeno cada vez más intenso y que hace frágiles los agroecosistemas tanto biológica como económicamente, con fuertes implicaciones de tipo social, en donde la agroforestería pecuaria es una opción sustentable para la ganadería en México para enfrentar los retos del cambio climático (Palma *et al.*, 2020).

En ese contexto la implementación de nuevos sistemas de manejo de recursos naturales, tanto agronómico como zootécnico que favorezcan la productividad del sistema silvopastoril o agrosilvopastoril, repercutirá en un menor uso de recursos externos a las unidades de producción al permitir incrementar la calidad de la dieta, traducándose en un mecanismo de adaptación a la estacionalidad en la producción de carne y de leche. Éstas son alternativas necesarias de explorar en la generación de sistemas resilientes que se adapten al cambio climático (Palma *et al.*, 2019), si pretendemos aportar estrategias que contribuyan a preservar el equilibrio de los agroecosistemas.

Por otro lado, a la fecha el uso de árboles y arbustivas en el desarrollo de sistemas silvopastoriles se restringe a algunas cuantas especies, con lo que se dejan de aprovechar la biodiversidad de otras que favorecen estos sistemas (Palma y González-Rebeles, 2018; Palma *et al.*, 2019; Palma y Torres, 2020).

En este contexto, una especie que tiene múltiples usos es *Ricinus communis*, planta con una legendaria aplicación de tipo medicinal (Franke *et al.*, 2019). Actualmente se emplea con un enfoque industrial, fundamentalmente la obtención del aceite extraído de las semillas para su uso como biodisel, medicamentos, cosméticos, lubricantes, barnices, entre otros (Portillo *et al.*, 2017). Inclusive, la planta se propone como materia prima en la producción de papel (Escoto-García *et al.*, 2013) y también se le considera como un insecticida botánico a partir de hojas (Flores-Macías *et al.*, 2016), asimismo de hojas y semillas mediante extractos metanólicos (Sogan *et al.*, 2018).

Recientemente se explora el uso de *R. communis* en la alimentación animal a partir de la pasta residual de la semilla destoxificada, residuo que se obtiene de la extracción del aceite destinado a la generación de biocombustible. Esta pasta se utiliza como ingrediente en la alimentación de diferentes especies animales, incluyendo la acuicultura como recientemente lo demuestra la revisión realizada por Mondal *et al.* (2019).

Sin embargo, pocos trabajos abordan el empleo del follaje (lámina foliar) probablemente por la existencia de reportes de su toxicidad para el ganado como parte de un sistema de alimentación de rumiantes (Del Viento y Palma, 2016; Lara *et al.*, 2016; Ramírez *et al.*, 2020; Zamora *et al.*, 2020) y algunos de ellos indican intoxicación del ganado con síntomas nerviosos, inclusive la muerte por el consumo de hojas (Assis *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2006; Tokarnia *et al.*, 1975), aunque la intoxicación por esta planta está determinada por el consumo de frutos (Amián *et al.*, 1996).

Existen diferentes sistemas agroforestales con el uso de esta especie (CIMMYT, 2019; Rasche *et al.*, 2015). Recientemente se propone su uso para el desarrollo de sistemas silvopastoriles a partir de diferentes experiencias y de la calidad nutricional de la lámina de hojas (Palma, 2018), lo que permite afirmar que esta especie puede aprovecharse como fuente de forraje proteico-energético a partir de sus hojas, aspecto poco común en la alimentación de rumiantes. Esta planta tiene como ventaja adicional su amplia distribución en México (Del Viento *et al.*, 2014) y en el mundo, debido a su plasticidad de adaptación a múltiples pisos altitudinales, disponibilidad de semilla en ambientes naturales y tolerancia a la sequía para enfrentar el cambio climático, lo cual favorecerá su establecimiento en este tipo de sistemas.

Cabe mencionar que la amplia dispersión de esta planta dentro de áreas productivas con animales, en particular con rumiantes, permite recuperar la experiencia de productores de Colima, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, Puebla, Veracruz y posiblemente otros estados en México, quienes indicaron que la emplean en la alimentación de ovinos, caprinos y bovinos. Esta cultura inclusive abarca evidencias de su uso en Michoacán por algunos productores que, en el siglo pasado, introducían ovinos en zonas donde abundará *Ricinus communis* para desparasitar a los animales, debido a que se generaba una diarrea mecánica, sin embargo, no existe investigación que documente estos aspectos alimenticios o sanitarios del uso de la higuera como forraje.

Por lo expuesto previamente, el presente capítulo tiene por objetivo exponer el uso de *Ricinus communis* como forraje local no convencional, como fuente de alimento proteico-energético en la alimentación de rumiantes para el desarrollo de banco de proteínas en corte y acarreo o en sistemas en callejones de alta densidad para pastoreo. Este trabajo es pionero en documentar la utilización de esta especie con fines forrajeros en sistemas de alimentación para rumiantes como herramienta para modificación de los socioecosistemas actuales al aportar su utilización como propuesta de adaptación al cambio climático.

Descripción de *Ricinus communis*

Ricinus communis pertenece a la familia *Euphorbiaceae*, la cual tiene como origen al continente africano, pero con una amplia distribución mundial. Posee al menos 700 aplicaciones conocidas. Esta planta presenta diferentes nombres dependiendo de la región, entre los más comunes se encuentran: higuierilla, ricino, *castor oil*, mammona, higuiereta, palma cristi, *castor vean*. La especie tiene un amplio reconocimiento histórico con implicaciones sociales asociadas a la salud, como lo indica Franke *et al.* (2019).

La higuierilla es una planta herbácea con crecimiento arbustivo o arborescente, la cual alcanza hasta 10 metros (m) de altura según sea su ecotipo: plantas enanas menores a 1.9 m que suelen ser de ciclos anuales, plantas medianas de entre dos a cuatro m y plantas altas mayores a cinco m que suelen ser perennes; presenta coloración verde, morado y la combinación de éstos, así como la presencia o no de cera en forma de polvillo blanquecino, su raíz principal es pivotante y puede alcanzar una profundidad de hasta tres metros (Ferreira *et al.*, 2006).

Existen plantas con hoja verdes, verde rojizo, anchas palmeadas lobuladas, con 5 a 11 lóbulos, de 30 a 60 cm de diámetro, casi orbiculares, lóbulos oblongos lineales, agudos o acuminados, margen aserrado, varían de 4 a 20 cm de largo, 2.5 a 7.5 cm de ancho, pecíolo de 10 a 20 cm de largo, cilíndrico o ligeramente aplanado distal y palmeado adherido a la hoja, sólido cuando joven, se vuelve hueco con la madurez de tipo liso.

En la República mexicana los autores observaron plantas desde el nivel del mar hasta altura de 2 800 msnm. La planta crece en temperaturas de entre 18 a 32 °C; inferiores a -4 °C, más de cuatro horas continuas congela la savia y la destruye; con más de 32 °C cierra estomas de hojas para evitar evapotranspiración. Crece con 660 hasta más de 2 500 mm de precipitación pluvial (Barbona, 2003). Inclusive, autores como Falasca *et al.* (2012) indican que esta especie tolera precipitaciones de 200 mm a los 4,290 mm año.

No es exigente en suelos, pero presenta buen desarrollo radicular en lugares con buen drenaje y materia orgánica; en suelos que se encharquen y compacten tiene problemas para emerger, prospera en un rango de pH de 5.0 a 8.0 con un óptimo de 6.5 (Portillo *et al.*, 2017), aunque existen registros de desarrollo en pH de 8.74 (Maciel-Torres *et al.*, 2017) y no tolera pH inferior a 3.5 (Barbona, 2003). Su desarrollo se ve afectado en suelos arcillosos con elevado nivel de aluminio y con limitaciones de drenaje, por la sensibilidad que tiene la planta a excesos de agua.

Uso de *Ricinus communis*

Actualmente su principal uso es la extracción de aceite de la semilla, aplicado en varios productos tales como perfumes, lubricantes, cosméticos, insecticidas, fertilizantes y bio-combustible. Las hojas, raíces y semillas también tienen usos medicinales (Franke *et al.*, 2019). El uso de la planta *R. communis* es empleado por la industria, tal es el caso de la producción de papel corrugado demostrado por Escoto-García *et al.* (2013), larvicida (Flores-Macías *et al.*, 2016; Sogan *et al.*, 2018), nematocida (Siddiqui *et al.*, 2018), inclusive en la obtención de colorantes naturales.

Adbul *et al.* (2018) señalaron la importancia de esta planta en la medicina tradicional como remedios naturales en el control de múltiples enfermedades. En el caso de las hojas, sus usos están relacionados en estimular la producción de leche a través de uso de cataplasmas dado que se consideran que tiene función galactagoga (Smith, 1850), como cataplasma en el tratamiento de llagas, furúnculos e hinchazones. En otros usos se menciona a los extractos acuosos o en polvo para el control de mosquitos, moscas, hormigas, pulgas y piojos (Kumar, 2017), inclusive Franke *et al.* (2019) en su revisión indican el uso del polvo de hoja para el control de hormigas cortadoras y de polilla, por lo que despierta el interés en la protección de cultivos.

Sistemas agroforestales asociados a *Ricinus communis*

La producción de semilla de *Ricinus communis* se desarrolla en sistemas de monocultivo, aspecto que a través de la agroforestería se propone modificar; en México, el CIMMYT (2019) propone la siembra intercalada con maíz como alternativa para ambientes marginales, como una opción de diversificación de estos sistemas. Bajo este enfoque, la higuera especialmente las hojas impiden que las gotas de lluvia impacten el suelo, disminuyen la escorrentía superficial del agua y con ello se evita la erosión, además de que sirven de acolchado natural, lo que ayuda en un enfoque de agricultura de conservación, en particular cuando se incrementa la densidad de siembra.

Rasche *et al.* (2015) propusieron, para la agricultura familiar del Paraguay, la siembra intercalada de *R. communis* con maíz, frijol o algodón, en donde obtuvo un índice equivalente de la tierra de 1.80, 1.54 y 1.31 para cada combinación respecto al monocultivo (cuadro 1). Si bien se observó una mejor utilización de la tierra en los dos años de estudio en la asociación, esto fue con rendimientos individuales menores, efecto que se compensó parcialmente al permitir la diversificación de los rubros con beneficios indirectos en una mayor cobertura, reciclaje de nutrientes, control de malezas y menor costo de producción para *R. communis*.

Existen otros ejemplos de asociación como sistemas agroforestales, entre ellos: abonos verdes como *Canavalia ensiformis* y *Stizolobium deeringianum* (Rando y Quintanilha, 1990), *Arachis hypogaea* (Távora *et al.*, 1988), *Sorghum bicolor* (Corrêa *et al.*, 2006), *Sesamum indicum* (Magalhães *et al.*, 2013), *Vigna unguiculata* (Furtado *et al.*, 2017]) y con *Urochloa ruziziensis* (Cordeiro *et al.*, 2019).

Cuadro 1
Rendimiento e índice equivalente de la tierra (IET) individual y asociado

Tratamientos	Año 1		Año 2	
	Rendimiento (kg/ha)	IET	Rendimiento (kg/ha)	IET
Maíz	2 699	1.00b	2 058	1.00b
Frijol	1 629	1.00b	1 346	1.00b
Algodón	1 061	1.00b	857	1.00b
<i>Ricinus communis</i> (Rc)	1 059	1.00b	1 056	1.00b
Rc + maíz	963 + 2 255	1.80a	898 + 1 629	1.64a
Rc + frijol	1 160 + 741	1.54ab	1 013 + 759	1.52a
Rc + algodón	1 012 + 321	1.31ab	890 + 464	1.38ab

Fuente: Rasche *et al.* (2015).

Recientemente se muestra la multiasociación que se presenta en un sistema silvopastoril en donde se sembró *R. communis* con leguminosas como *Cajanus cajan*, *Clitoria ternatea* y *Megathyrsus maximus*; además de fomentar el cerco vivo con *Gmelina arborea* y *Coulteria platyloba*, bajo un enfoque agroecológico sin la utilización de agroquímicos, se contabilizaron 13 especies adicionales. De esta vegetación *Desmodium incanum*, *Amaranthus hybridus* y *Chamaecrista sp.* tuvieron marcada presencia, además de favorecer la presencia de abejas, iguanas y aves en el área, efecto favorable al incrementar la biodiversidad en este sistema silvopastoril (Toral-Pérez *et al.*, 2019).

Sistemas agroforestales especiales con *Ricinus communis*

Un sistema especial de la agroforestería es la entomoagroforestería, sistema que combina la presencia de insectos con el uso de las especies arbóreas o arbustivas. En este caso es conocido que la hoja de *R. communis* es utilizada para la alimentación de gusano de seda Eri (*Samia cynthia ricini*) en diferentes partes del mundo para la producción de seda, alimento y biomateriales (Meth y Gogoi, 2016) en sistemas agroforestales que permiten la sericultura (Pino-Moreno *et al.*, 2019).

Otro ejemplo de entomoagroforestería es la actividad que realizan las abejas, pues cabe mencionar que es conocida su función polinizadora en el caso de *R. communis* (Mongiello, 2015) y, aunque es una planta nectarífera (figura 1), la miel obtenida es de baja calidad, con sabor fuerte y astringente (IBE, 2015).

Figura 1
Apis mellífera en flor de *Ricinus communis*



Fuente: José Manuel Palma García.

Caracterización nutrimental de las hojas como forraje

Las arbustivas y arbóreas representan una opción complementaria a las gramíneas tropicales en la oferta de forraje y así contribuyen a mejorar la productividad de los rumiantes, como es el caso de *Ricinus communis* como estrategia no convencional en la alimentación de rumiantes.

En el cuadro 2 se muestra una revisión de la composición química de la lámina de hoja de diferentes autores de México, la cual presenta variaciones importantes en donde destacan tres aspectos nutricionales relevantes; en primer lugar, el contenido de proteína cruda con rangos que oscilan entre 21.9 a 32.2%, con valor extremo mínimo 11.5% (Behl *et al.*, 1986) para hojas senescentes y máximo 41.3% (Nagy *et al.*, 1975) para hojas tiernas; estos autores no son de México, aunque Vasco-Leal *et al.* (2020) indicaron valores de proteína cruda de 39.6 a 41.7% asociado al tipo de accesiones que estudiaron. Un segundo aspecto sobresaliente es su contenido de energía metabolizable derivado a partir del total de nutrientes digestibles (TND) con rangos de 2.61 a 2.80 Mcal EM/kg MS y finalmente la digestibilidad de la materia seca *in situ* que se ubica entre 93.2 a 97.0%, asociado a su bajo contenido de fibra. En este tenor Torres *et al.* (2009) indicaron un valor de 73.0% que contrasta con los trabajos reportados por los autores de este trabajo (cuadro 2), en donde en todos los casos estudiados supera 90% de digestibilidad.

En cuanto a macrominerales, se indica que el contenido de calcio fue de 1.18 a 1.80% y de fósforo de 0.27 a 0.66% (Pino-Moreno *et al.*, 2019).

Cuadro 2
Valores nutrimentales, energía y degradabilidad *in situ* de la lámina de hoja de *R. communis*

Variable	1	2	3	4			5		6		7
MS (%)	-	25.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PC (%)	27.2	21.9	27.6	30.7	30.0	32.2	30.1	30.4	41.7	39.6	22.6
EE (%)	-	2.9	-	3.6	3.6	3.3	-	-	3.2	3.5	3.4
Ceniza (%)	-	13.2	7.2	12.0	10.3	11.4	-	-	12.5	11.8	9.49
FDN (%)	24.5	-	31.2	18.5	25.9	25.3	-	-	-	-	-
FDA (%)	20.4	-	24.9	17.0	21.9	21.2	-	-	-	-	-
TND (%)	-	74.2	-	76.3	76.6	76.2	-	-	74.1	75.8	77.3
EM*	-	2.61 ^b	4.90 ^a	2.70 ^b	2.80 ^b	2.70 ^b	2.68 ^b	2.66 ^b	2.67 ^b	2.73 ^b	2.85 ^b
D _{is} MS (%)	73.0	93.2	94.6	97.0	95.3	94.5	-	-	-		-

Fuente: ¹Torres *et al.*, 2009; ²Del Viento *et al.*, 2014; ³Lara *et al.*, 2014; ⁴Ramírez *et al.*, 2017; ⁵Pino-Moreno *et al.*, 2019; ⁶Vasco-Leal *et al.*, 2020; ⁷Zamora *et al.*, 2020.

MS= Materia seca; PC= Proteína cruda; EE= Extracto etéreo; FDN= Fibra detergente neutro; FDA= Fibra detergente ácido; *EM= Energía metabolizable Mcal/kg MS a partir de valores de energía bruta por medio de bomba calorimétrica^a. EM* Mcal/kg MS = ^bEnergía estimada por cálculo de TND (total de nutrientes digestibles) por el autor. D_{is}MS=Digestibilidad *in situ* de la materia seca.

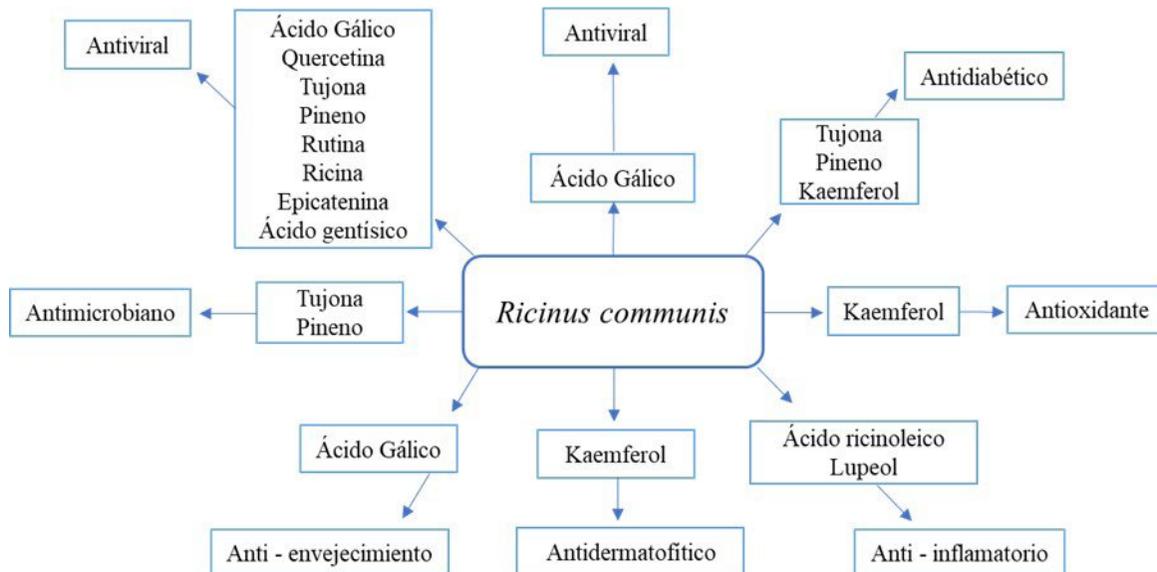
Metabolitos secundarios en hojas de *Ricinus communis*

En cuanto al comportamiento agronómico de este cultivo, en relación a la altitud asociada al clima, existe información de que ésta no afecta la producción de biomasa (Córdoba, 2012), aunque se conoce que la respuesta fisiológica de la planta está directamente relacionada con la temperatura y con la radiación solar, factores que regulan la fotosíntesis en las plantas, ello determina la tasa de incorporación y fijación de CO₂, lo cual está relacionado con la producción de biomasa (Peixoto y Peixoto, 2009). El carbono asimilado es utilizado para incrementar la biomasa vegetal, tanto en su crecimiento como en las reservas de los diferentes órganos en caso de que no se pierda por respiración (Larcher, 2010), aspecto que seguramente se verá reflejado en la concentración de metabolitos secundarios. De ahí que se considere que las plantas en ambientes tropicales y en zonas de baja altitud tendrá más concentraciones de metabolitos secundarios comparados con zonas templadas y de mayor altitud.

En el caso de las hojas existen diversos trabajos que caracterizaron los metabolitos secundarios, entre ellos la ricina, la ricinina, la catequina y el ácido ellálgico (Vasco-Leal *et al.*, 2020); además, en la revisión de Kumar (2017) se señaló que diversos autores indican que hay presencia de flavonoides, taninos, saponinas, esteroides, glucósidos, monoterpenos, sesquiterpenos y diferentes compuestos fenólicos. También se conoce que la hoja de *R. communis* contiene terpenos y flavonoides fenólicos (Mamoucha *et al.*, 2016). Recientemente, Franke *et al.* (2019) esquematizan los mayores compuestos químicos de la planta en: ácido ricinoleico (aceite), diferentes tipos de ricina (ricina D, RCA-II y RCA60),

algunas aglutininas (RCA-I y RCA 120), alérgenos como el CB-1^a, lipasas, pigmentos (hojas), nudiflorina y ricinina que es un alcaloide. En la figura 2 se esquematizan los fitoquímicos de *Ricinus communis* y sus actividades farmacológicas revisadas por Abdul *et al.* (2018).

Figura 2
Compuestos fitoquímicos de *Ricinus communis* y su actividad farmacológica



Fuente: Abdul *et al.* (2018).

Un aspecto medular es el contenido de nitrógeno relacionado con el metabolismo proteico, el cual puede influir en la concentración de ricinina en las hojas, metabolito secundario que es un alcaloide (Flóres-Macías *et al.*, 2016). Así mismo, como en la cantidad de antioxidantes que presentan las hojas de esta planta a través del metabolismo de los carbohidratos, entre ellos los fenoles, flavonoides, taninos condensados, ácido gálico, ácido clorogénico, ácido cafeínico, ácido elágico, catequinas y monosacáridos como la xilosa y manosa, así como los oligosacáridos rafinosa, staquiosa y verbascosa (Vasco-Leal *et al.*, 2020).

Toxicidad de semillas de *Ricinus communis* en rumiantes

Generalmente *R. communis* es conocido como un potente agente tóxico, particularmente por el consumo de semillas (Armién *et al.*, 1996). Sin embargo, algunos trabajos que presentan información de toxicidad no aclaran este aspecto en animales (Aslani *et al.*, 2007) y en otros se muestran semillas y hojas recuperadas del rumen (Bianchi *et al.*, 2018) cuando se habla de intoxicación espontánea por *Ricinus communis*. Inclusive algunos autores indican que la hoja no es apta para consumo animal, sin mostrar evidencia científica en su aseveración (Sánchez *et al.*, 2016).

Los casos de intoxicación en rumiantes de *Ricinus communis* están asociados al consumo de semillas que contienen un potente tóxico que envenena a personas, animales e insectos. Esta es una toxoalbúmina conocida como “ricina”, que cuando es consumida con ruptura de su testa es rápidamente absorbida en el intestino, proceso que se presen-

ta con mayor sensibilidad en rumiantes jóvenes comparado con adultos. Clínicamente transcurren con un cuadro de tipo gastroentérico, con la presencia de diarrea con heces malolientes de color marrón negruzco en la región perianal y en extremidades posteriores, vómito, apatía, deshidratación, dolor abdominal, estasis ruminal, debilidad e inclusive la muerte (Aslani *et al.*, 2007; Albuquerque *et al.*, 2014).

De la misma forma Assis *et al.* (2009) entrevistaron a productores y a médicos veterinarios en Brasil donde ocho de ellos asociaron la intoxicación de los animales al consumo de esta planta. Entre sus hallazgos indicaron que en un hato de 30 cabezas de bovinas expuestas al consumo de la planta con semilla, dos murieron, presentando apatía, timpanismo y diarrea.

Toxicidad de hojas de *Ricinus communis* en rumiantes

En el caso de posible intoxicación por la hoja, el cuadro clínico es diferente dado que las manifestaciones son de tipo nervioso, asociados con el consumo de un alcaloide conocido como ricinina, el cual es abundante en la hoja.

Aunque existe trabajo de campo con productores que documentaron la intoxicación de 15 bovinos de un total de 180, los animales presentaron síntomas nerviosos después de seis horas de haber ingerido hojas de *R. communis* con recuperación espontánea al retirarlos del lugar que tenía la planta en forma silvestre (Silva *et al.*, 2006). Asimismo, describieron experiencias con productores, quienes en la época seca ofertaban cantidades crecientes de hojas de esta planta en el comedero hasta que los animales alcanzaran consumos *ad libitum*; estos resultados sugieren un mecanismo de adaptación a los principios tóxicos de las hojas.

Por otro lado, en el trabajo experimental de Canella *et al.* (1966) se indica que el consumo de 11 hasta 20 g/kg PV de hojas frescas o el equivalente en hojas marchitas en bovinos de entre 100 a 180 kg PV con disponibilidad de pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) no tuvieron problemas de intoxicación cuando se administraron de uno a cinco días.

Lo anterior es diferente a lo señalado por Tokarnia *et al.* (1975) quienes indicaron la presencia de signos clínicos de tipo nervioso para una morbilidad de 32.9% de 79 casos e inclusive muerte del 13.9%, en bovinos. Estos estudios consideraron una dosis letal a partir de 20 g de hojas frescas/kg PV, y solamente existió una muerte en dosis de 10 g hojas frescas/Kg PV. Estos mismos autores sugirieron que la deshidratación de las hojas a la sombra por 18 semanas disminuyó la toxicidad en un 50%. En el caso de ovinos Döbereiner *et al.* (1981) indicaron dosis tóxica de 10 a 20 g materia fresca/kg PV.

Los signos de intoxicación con ricinina inducen a problemas neurológicos agudos (Brito *et al.*, 2019; Riet-Correa *et al.*, 2017) que se manifestaron de tres a seis horas post-ingestión con deshidratación, sialorrea, disnea, ataxia, movimientos de masticación, desviación lateral de cuello y cabeza, incoordinación, marcha vacilante y en algunos casos timpanismo. Estos signos pueden ser persistentes de dos a 16 horas, posterior a ellos los animales pueden recuperarse o morir, en dependencia de la cantidad ingerida de hojas (Tokarnia *et al.*, 1975; Döbereiner *et al.*, 1981; Bezerra y Brito, 1995).

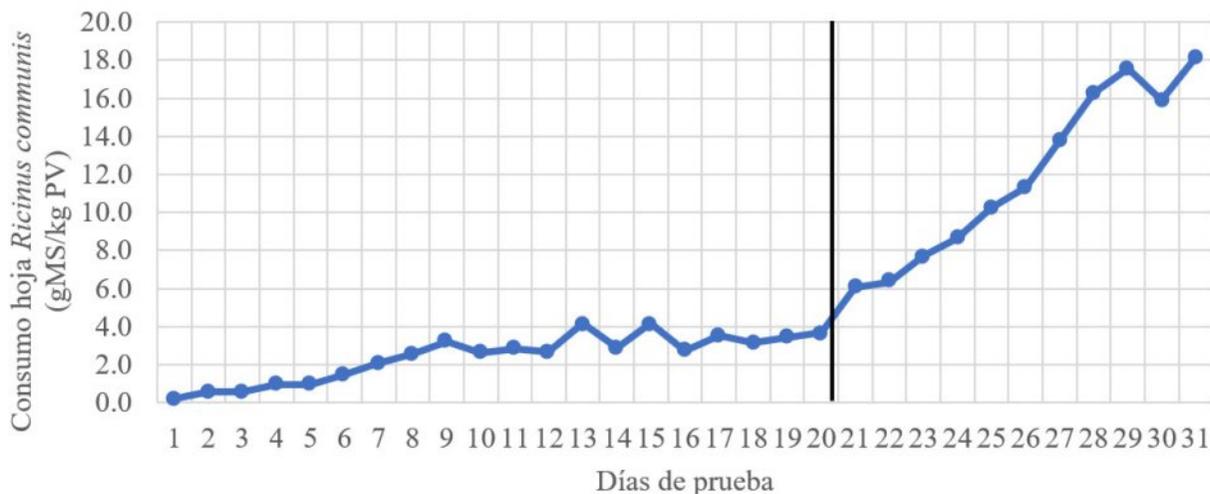
Así mismo se reportan intoxicación espontánea (Aslani *et al.*, 2007; Bianchi *et al.*, 2018) cuando los animales tuvieron acceso a podas de este material o estuvieron en áreas con la presencia de la planta, aunque a la necropsia se detectaron semillas en el

rumen. Según Brito *et al.* (2019) es poco usual este fenómeno de intoxicación, aunque indicaron problemas de toxicidad por consumo de brotes tiernos de hojas de *R. communis* que fueron cortados y dejados en el área de pastoreo por caprinos.

Entre algunas de las causas que explican el consumo de *R. communis* y que conducen a la intoxicación de los animales se reconoce la falta de forraje en la época de sequía en el en el trópico seco, en donde *R. communis* tiene capacidad de generar follaje a pesar de esta situación climática adversa. Otro factor es el pastoreo excesivo que induce al consumo de especies con baja aceptación pero que a través de una presión alta de pastoreo se obliga a los animales a su ingestión. Asimismo dietas deficientes o desbalanceadas provocan que los animales busquen su equilibrio nutricional y finalmente la presencia de casos incidentales.

Este aspecto fue demostrado por Lara *et al.* (2016) quienes además de hojas, ofertaron pecíolo, hoja+pecíolo, tallo y planta completa en forma deshidratada más una ración integral ofertada a voluntad; observaron un incremento lineal en el consumo de hoja durante 20 días que duró la prueba. La ingestión de la hoja deshidratada pasó de 0.2 a 3.7 g MS/kg PV del primer al veinteavo día y sumando el consumo de todas las partes fue de 0.5 a 4.4 g MS/kg PV en el mismo periodo; la parte preferida fue la hoja. El ensayo se continuó por 11 días más con la oferta a voluntad tanto de la hoja deshidratada como de la ración de mantenimiento que se manejó en todo el proceso experimental; se mostró nuevamente un incremento lineal pues pasó de 6.3 hasta 18.2 g MS/kg PV (figura 3). Estos resultados superan de manera sobresaliente lo señalado previamente por diferentes autores (Canella *et al.*, 1966; Tokarnia *et al.*, 1975; Döbereiner *et al.*, 1981) y coincide con los descrito por Silva *et al.* (2006) quienes mencionaron que se produjo adaptación al consumo de la hoja de *Ricinus communis* por los rumiantes.

Figura 3
Consumo de hoja de *Ricinus communis* por ovinos (gMS/kg Peso vivo)



Fuente: Modificado por los autores a partir de Lara *et al.* (2016).

Sistemas silvopastoriles basados en *Ricinus communis*

En diferentes ensayos con bovinos, ovinos y caprinos en pastoreo, nuestro grupo no registró el consumo voluntario de semillas por los animales. Tampoco se registraron problemas por el consumo de hojas, sea: intoxicación, abortos, muerte en neonatos, jóvenes ni en adultos, en bovinos (Del Viento *et al.*, 2014) o en ovinos en crecimiento (Lara *et al.*, 2016; Zamora *et al.*, 2020) o en borregas gestantes (Del Viento y Palma, 2016; Ramírez *et al.*, 2020) ni en caprinos.

En cuanto a rumiantes, la parte seleccionada por los animales en pastoreo sean bovinos, ovinos o caprinos fue la lámina foliar (figura 4), mas no así la ingestión de los frutos ni de las semillas (Del Viento *et al.*, 2014) y en estabulación en pruebas de selectividad (Lara *et al.*, 2016) la parte mayormente seleccionada fue el limbo o lámina foliar.

Figura 4

Consumo de lámina foliar de *Ricinus communis* por rumiantes en pastoreo



Fuente: José Manuel Palma García.

En este sentido Del Viento y Palma (2014) describieron un sistema silvopastoril espontáneo compuesto por *Cenchrus purpureus* CT-115 y *Ricinus communis* quienes observaron el pastoreo de bovinos Brahman en desarrollo; reportaron que los animales sólo consumieron la lámina foliar sin ingestión de pecíolo, tallos o frutos y sin problemas de intoxicación. Colateralmente los tallos mostraron alta flexibilidad, aunque existió rotura por efecto mecánico de los animales y la planta mostró capacidad de rebrote desde la base del tallo (figura 5). De estas experiencias se deduce que los animales en pastoreo no comen plantas o partes de plantas venenosas a menos de que sean forzados a hacerlo por algún aspecto inusual o por alguna condición artificial.

Figura 5

Aspecto de plantas de *Ricinus communis* después del consumo de lámina de hoja por rumiantes y rebrote desde la base del tallo



Fuente: José Manuel Palma García.

Comportamiento animal asociado al consumo de *Ricinus communis*

El nivel obtenido de consumo es variable según el tipo de animal utilizado y etapa fisiológica relacionada con el sistema de alimentación empleado (cuadro 3). El máximo nivel de consumo obtenido corresponde a ovinos machos en crecimiento con 18.2 gMS/kg PV (Lara *et al.*, 2016) y un mínimo de 0.8 gMS/kg PV (Zamora *et al.*, 2020) en donde se asume que esta especie funcionó como un aditivo. En ambos casos la selección era a voluntad asociada a una ración integral basada en forrajes; en este último caso al estar disponible la dieta, los animales no ingieren grandes cantidades de la hoja de *R. communis*.

Este comportamiento se modifica cuando se elaboran raciones totalmente integradas ya que con niveles de inclusión del 20% en sustitución de alfalfa para borregas gestantes se lograron consumos de 4.6 a 5.5 gMS/kg PV, sin problemas relacionados con su consumo (Ramírez *et al.*, 2020). Previamente Del Viento y Palma (2016) describieron un comportamiento lineal en el consumo de borregas en el último tercio de la gestación; la ingestión inicial fue de 2.6 y llegó en 31 días a 12.6 g MS/kg PV.

En el empleo de lámina de hoja de *R. communis* deshidratada se muestran dos ejemplos: un caso con ovinos en desarrollo en donde se ofertó una dieta de 12.5% PC y 2.79 Mcal EM/kg MS, basada en residuales agrícolas y agroindustriales y oferta *ad libitum* asociada a un aditivo (Pirofosfato de tiamina - PPT). El consumo de hoja fue de 16 contra 29 g MS/día en donde se ofreció el PPT, diferencia que influyó en la ganancia diaria de peso con 100 comparado con 171 g/animal, sin efecto en el consumo total, lo que se trajo en un efecto positivo en la conversión alimenticia (Zamora *et al.*, 2020).

En el otro caso, se logró sustituir la alfalfa por lámina de hoja de *R. communis* deshidratada en borregas en el último tercio de la gestación al emplear raciones totalmente mezcladas. Aunque el consumo de materia seca, proteína y energía fue menor en *R. communis* esto no afectó el peso de la camada, el peso individual del cordero ni los días de gestación, además de que no existió presencia de signos de intoxicación, abortos o muertes, sin afectar la viabilidad de los corderos (Ramírez *et al.*, 2020).

Cuadro 3

Consumo de materia seca de lámina de hoja de *Ricinus communis* por borregos

Tipo	Día	Consumo (g MS/animal/día)	Consumo (g MS/kg PV)	Autor
Machos en desarrollo	1	6	0.20	Lara <i>et al.</i> , 2016
	31	527	18.20	
Último tercio de gestación	1	105	2.60	Del Viento y Palma, 2016
	31	503	12.60	
Macho en desarrollo	1 a 27	16	0.80	Zamora <i>et al.</i> , 2020
	1 a 27	29	1.45	
Último tercio de gestación	1 a 52	243	5.20	Ramírez <i>et al.</i> , 2020
	1 a 52	262	5.50	
	1 a 52	230	4.60	
	1 a 52	233	4.60	

Fuente: Elaborado a partir de los datos originales por los autores.

Bienestar animal asociado a sistema silvopastoril de *Ricinus communis*

Un aspecto relevante de *Ricinus communis* es su alta velocidad de crecimiento, el tipo de hojas palmeadas y fácil adaptación a múltiples sitios y condiciones, por lo que el uso de ecotipos de porte alto son posibles de utilizar para la generación de sombra natural en sistemas ganaderos tropicales en siembra en callejones de alta densidad (figura 6), aspecto que, dado su rápido crecimiento, se tendría en tres a cuatro meses con altura de entre 2.5 a 3.9 m para la generación de sombra natural al ganado y se pudiera continuar la cosecha del fruto entre 5 a 6 meses (Llaven *et al.*, 2019), como una estrategia de diversificación productiva.

El aspecto de la sombra de *R. communis* fue descrito en la producción de café, en donde su siembra se valora como una sombra temporal con una duración de 2 a 3 años; mientras otras especies de tipo maderable se desarrollan (Tascón, 2008), se aprovecha su crecimiento vigoroso; su área foliar sin ser densa desarrolla un efecto sombrilla con adecuada circulación de aire, como esquema natural, con beneficios adicionales por la repelencia contra zancudos y ausencia de nematodos.

Figura 6

Desarrollo de sombra natural para mejorar el bienestar animal en el trópico



Fuente: José Manuel Palma García.

Reflexión final

El desarrollo de tecnologías agro y silvopastoriles mediante la incorporación de *Ricinus communis* es una opción poco explorada, pero con amplio potencial dadas las características de adaptabilidad y plasticidad que tiene esta especie a condiciones adversas, con un vigoroso desarrollo en su establecimiento.

Las características nutrimentales de la lámina de hoja de *Ricinus communis* permite valorar este recurso forrajero como una estrategia para la adaptación al cambio climático en agroecosistemas ganaderos con ambientes adversos asociados a sequía, sin generar problemas de toxicidad por el consumo de su hoja en el desarrollo de sistemas de alimentación en rumiantes.

La exploración de diferentes opciones de sistemas agroforestales (silvopastoriles y agrosilvopastoriles) permite nuevas oportunidades para productores que tengan condiciones adversas en la alimentación del ganado, lo que favorece esquemas de agricultura familiar.

Se debe considerar la inclusión de cuantas especies agronómicas sea posible en la integración de sistemas silvopastoriles o agrosilvopastoriles como estrategia antropogénica que mimetiza el comportamiento de la naturaleza, con lo que se colabora en su preservación e incluso en su rehabilitación en caso de haber sido sujeta a manejos de degradación por la adopción irracional de prácticas extractivas con anterioridad.

Aspectos destacados

1. La lámina de hoja de *Ricinus communis* es un forraje proteico–energético, sin problemas de intoxicación para los rumiantes.
2. La disponibilidad en diferentes condiciones climáticas y altitudinales de *Ricinus communis* provee una opción de adaptación al cambio climático.
3. Existen múltiples posibilidades de diseñar sistemas agroforestales basados en la incorporación *Ricinus communis*.
4. Seamos parte de la naturaleza, no más un enemigo de ésta.

Literatura citada

- Abdul, W.M.; Hajrah, N.H.; Sabir, JS.M.M Al-Garni, S.M.; Sabir, M.J.; Kabli, S.A.; Saini, K.S. y Bora, R.S. (2018). Therapeutic role of *Ricinus communis* L. and its bioactive compounds in disease prevention and treatment. *Asian Pacific Journal Tropical Medecine*. 11(3): 177-185.
- Albuquerque, S.C; Rocha, P.B; Albuquerque, F.R; Oliveira, S.J; Medeiros, M.T; Riet-Correa, F; Evencio-Neto, J. y Mendoca, S. F. (2014). Spontaneous poisoning by *Ricinus communis* (Euphorbiaceae) in cattle. *Pesquisa Veterinária Brasileira*. 34(9): 827-831.
- Armién, A.G.; D'Angelis, F.H. y Tokarnia, C.H. (1996). Intoxicação experimental pelas sementes de *Ricinus communis* (Euphorbiaceae) em ovinos. *Pesquisa Veterinária Brasileira*. 16(4): 99-106.
- Assis, T.S.; Medeiros, R.M.T.; Araujo, J.A.S.; Dantas, A.F.M. y Correa, F.R. (2009). Plant poisonings in ruminants and equidae in the Sertao of Paraiba, Brazil. *Pesquisa Veterinária Brasileira*. 29: 919–924.
- Aslani M.R; Maleki, M; Mohri, M; Sharifi, K. y Najjar-Nezhad, V. (2007). Castor bean (*Ricinus communis*) toxicosis in a sheep flock. *Toxicon*. 49: 400-406.
- Barbona, S. (2003). La producción de tártago - un cultivo sustentable y de renta para el norte argentino. INTA EEPA Colonia Benítez.
- Behl, C.R.; Pande, M.B.; Pande, D.P. y Radadia, M.S. (1986). Nutritive value of matured wilted castor (*Ricinus communis* L.) leaves for crossbred sheep. Short communication. *Indian Journal Animal Science*. 56(4): 473-474.
- Bezerra, M.J.G. y Brito, M.F. (1995). Intoxicação experimental pelas folhas de *Ricinus communis* (Euphorbiaceae) em ovinos e caprinos. *Pesquisa Veterinária Brasileira*. 15(1): 27-34.
- Bianchi, M.V; Vargas, T.P; Leite Filho, R.V; Barbosa, L.L.; Cardoso, L; Petinatti, S. y Driemeier, D. (2018). Intoxicação espontânea por *Ricinus communis* em ovinos. *Acta Scientiae Veterinariae*. 46(Suppl 1): 294-297.
- Brito, L; Riet-Correa, F; Almeida, V.M; Silva Filho, G.B. Chaves, H.A.S; Braga, C; Neto, J.E. y Mendonça, F.S. (2019). Spontaneous poisoning by *Ricinus communis* leaves (Euphorbiaceae) in goats. *Pesquisa Veterinária Brasileira*. 39(2): 123-128.
- Canella, C.; Tokarnia, C. y Döbereiner, J. (1966). Experimento com plantas tidas como tóxicas realizados em bovinos no nordeste do Brasil, com resultados negativos. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*. 1: 345-352.
- CIMMYT (2019). Higuierilla intercalada en la milpa, una opción sustentable y rentable. <https://www.cimmyt.org/es/noticias/higuierilla-intercalada-en-la-milpa-una-opcion-sustentable-y-rentable/> (Consultado 7 octubre 2020)
- Cordeiro, C.F. dos S.; Echer, F.R.; Pires, L.H.T. y Creste, J.E. (2019). Productivity of castor bean plants intercropped at different plant densities with *Urochloa ruziziensis*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 23(2): 109-113.
- Cordóba, O. (2012). Comportamiento ecofisiológico de variedades de higuierilla (*Ricinus communis* L.) para la producción sostenible de aceite y biodiesel en diferentes agroecosistemas colombianos. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 137 p.
- Corrêa, M.L.P.; Távora, F.J.A.F. y Pitombeira, J.B. (2006). Comportamento de cultivares de mamona em sistema de cultivo isolados e consorciados com caupi e sorgo granífero. *Revista Ciência Agronômica*. 37(2): 200-207.

- Del Viento, A.; Lara, C. y Palma, J.M. (2014). Higuierilla (*Ricinus communis*), ¿forraje alternativo para el ganado en sistemas silvopastoriles? XLI Reunión de la AMPA y VII Reunión Nacional sobre Sistemas Agro y Silvopastoriles. Mérida, Yucatán, México. 2 al 4 de julio de 2014. Pp. 398-401.
- Del Viento, A. y Palma, J.M. (2016). Evaluación del consumo y efecto de la harina de hoja y planta completa enmelazada de *Ricinus communis* L. en borregas gestantes. En VI Congreso internacional de sistemas de pastizales. Guadalajara, Jalisco, México. Pp. 40-43.
- Döbereiner, J.; Tokarnia, C.H. y Canella, C.F.C. (1981). Intoxicação experimental pelas folhas de *Ricinus communis* (Euphorbiaceae) em ovinos e caprinos. *Pesquisa Veterinária Brasileira*. 15(1): 27-34.
- Escoto-García, T.; Rodríguez-Rivas, A.; Díaz-Ramos, S.G.; Ochoa-Ruiz, H.G. y Uribe-García, A. (2013). Manejo, estudio y evaluación del *Ricinus communis* L con vista a su aprovechamiento integral en papel corrugado, pseudopapel de corteza y extractos de hojas. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*. 9(1): 115-123.
- Falasca, S.L.; Ulberich, A.C. y Ulberich, E. (2012). Developing an agro-climatic zoning model to determine potential production areas for castor bean (*Ricinus communis* L.). *Industrial Crops and Products*. 40: 185-191.
- Ferreira, B. G.; Beltrão. M.N.; Soares. S.L.; Saouza. G.T. y Barros, P.M. (2006). A Cultura da Mamona no Cerrado: Riscos e Oportunidades. Embrapa Algodão. BRASIL. 70 p.
- Flores-Macías, A.; Vela-Correa, G.; Rodríguez-Gamiño, M.L.; Akhtar, Y.; Figueroa-Brito, R.; Pérez-Moreno, V.; Rico-Rodríguez, M.A. y Ramos-López, M.A. (2016). Effect of potassium nitrate on the production of ricinine by *Ricinus communis* and its insecticidal activity against *Spodoptera frugiperda*. *Revista Fitotecnia Mexico*. 39(1): 41–47.
- Franke, H.; Scholl, R. y Aigner, A. (2019). Ricin and *Ricinus communis* in pharmacology and toxicology—from ancient use and “Papyrus Ebers” to modern perspectives and “poisonous plant of the year 2018”. *Naunyn-Schmiedeberg’s Archives of Pharmacology*. 392: 1181–1208.
- Furtado, G.F.; Souza, A.S.; Lacerda, R.R.A.; Chaves, L.H.G.; Sousa Júnior, J.R. y Sousa, J.R.M. (2017). Produção de feijão-caupi e gergelim consorciado com mamoneira no Semiárido paraibano. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*. 12(1): 1-6.
- IBE (Iniciativa Bosques y Ecosistemas) (2015). Plantas de interés para las abejas de Costa Rica. https://issuu.com/abejassilvestres2013/docs/plantas_de_inter__s_para_las_abejas (Consultado 23 noviembre 2020).
- Kumar, M. (2017). A review on phytochemical constituents and pharmacological activities of *Ricinus communis* L. plant. *International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research*. 9(4): 466-472.
- Larcher, W. (2011). Carbon Utilization and dry matter production. En *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and plant physiology of functional groups* (4ª ed.) Ed. Springer. New York, USA. Pp. 69-150.
- Lara, C.; Del Viento, A. y Palma, J.M. (2016). Preferencia y consumo de diferentes partes morfológicas de *Ricinus communis* L. (Higuierilla) por ovinos. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 20(2): 43-52.
- Llaven, G.; Borbon, A.; Ochoa, X.M.; Antuna, O.; Hernández, A. y Coyac, J.L. (2019). Productividad de higuierilla (*Ricinus communis* L.) en el norte de Sinaloa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10(5): 1011-1022.
- Maciel-Torres, S.P.; Figueroa-Viramontes, U.; Jacobo-Salcedo, M.D.R.; Pedroza-Sandoval, A.; Trejo-Calzada, R. y Encerrado-Alva, R.C. (2017). Concentración de elementos menores en plantas de higuierilla (*Ricinus communis* L.) que crecieron en suelo fertilizado con biosólidos. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*. 16(2): 13-22.
- Magalhães, I.D.; Soares, C.S.; Costa, F.E.; Almeida, A.E. da S; Oliveira, A.B. y Vale, L.S. (2013). Viabilidade do consórcio mamona-gergelim para a agricultura familiar no semiárido paraibano: Influência de diferentes épocas de plantio. *Revista Brasileira de Agroecologia*. 8(1): 57-65.
- Mamoucha, S.; Tsafantakis, N.; Fokialakis, N. y Christodoulakis, N. (2016). Structural and phytochemical investigation of the leaves of *Ricinus communis*. *Australian Journal of Botany*. 65(1): 58-66.
- Meth, T. y Gogoi, H. (2016). Rearing of Eri silkworm (*Samia cynthia ricini* Boisd.) (Lepidoptera: Saturniidae) in Arunachal Pradesh: A study in Papumpare District. *Journal of Bioresources*. 3(1): 46-52.
- Mondal, B.; Bera, M. y Das, K. (2019). Castor bean cake: a paradox of toxicity and nutrient source in farm animals and aquaculture. *Indian J. Anim. Hlth*. 58(2): 157-170.
- Mongiello, C. (2015). Ricino. *Revista Boletín Biológica*. 34(9):40-46.
- Nagy, S.; Telek, L.; Hall, N.T. y Berry, R.E. (1978). Potential food uses for protein from tropical and subtropical plant leaves. *Journal Agricultural Food Chemistry*. 26(5): 1016-1027.

- Palma, J.M. (2018). Utilización de *Ricinus communis* L. (higuerilla) en el desarrollo de sistemas silvopastoriles. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 22(Suplemento 1): 43-44.
- Palma, J.M., y González-Rebeles, C. (2018). Recursos arbóreos y arbustivos tropicales para una ganadería bovina sustentable. Ed. Universidad de Colima. Universidad de Colima-REDGATRO-CONACYT. 133 p.
- Palma, J.M., Zorrilla, J.M. y Nahed, J. (2019). Incorporation of tree species with agricultural and agroindustrial waste in the generation of resilient livestock systems. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 53(1): 73-90.
- Palma, J.M. y Torres, J.A. (2020). Recursos arbóreos y arbustivos tropicales para una ganadería bovina sustentable II. Ed. Universidad de Colima. Universidad de Colima. 127 p.
- Palma, J.M.; Torres, J.A. y Zorrilla, J.M. (2020). Agroforestería pecuaria - producción ganadera sustentable en México. *La Jornada en el Campo*. 159: 6.
- Peixoto, C.P. y Peixoto, M. de F. da S.P. (2009). Dinâmica do crescimento vegetal: Princípios básicos. En: CARVALHO L.C.A. Tópicos em Ciências Agrárias. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. Capítulo 4. Pp. 39-53.
- Pino-Moreno, J.M.; Rodríguez-Ortega, A.; Ángeles-Campos, S.C.; García-Pérez, Á. y Rodríguez-Ortega, L.T. (2019). Análisis químico proximal de las pupas del gusano Eri (*Samia cynthia ricini* Drury, 1773) (Lepidoptera: Saturniidae) y de las hojas de su hospedero la higuerilla (*Ricinus communis* L. 1753) (Familia: Euphorbiaceae). *Entomología mexicana*. 6: 536-542.
- Portillo, L.; Rodríguez, N.; Gómez, R. y Pérez, A. (2017). Manejo de higuerilla (*Ricinus communis* L.) para el Valle del Mezquital, Hidalgo. Ed. Universidad Politécnica de Francisco I. Madero. Hidalgo, México. 51 p.
- Ramírez, A.; Del Viento, A. y Palma, J.M. (2017). Evaluación de la edad de corte sobre la composición química y degradabilidad ruminal in situ de lámina de hoja de *Ricinus communis* L. *Livestock Research for Rural Development*. 29(4). <http://www.lrrd.org/lrrd29/4/rami29066.html> (Consultado 18 febrero 2019).
- Ramírez-Navarro, L.A.; Del Viento-Camacho, A.; Zorrilla-Ríos, J.M. y Palma-García, J.M. (2020). Sustitución de *Medicago sativa* L. por hoja de *Ricinus communis* L., en ovejas gestantes. *Pastos y Forrajes*. 43(2): 136-143.
- Rando, E.M. y Quintanilha, A.C. (1990). Crescimento e produção da mamona em consórcio com culturas e adubos verdes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 25(11): 1569-1575.
- Rasche, J.W.; Fatecha, D.A.; Gaoa, N.G.; Ibarra, J.F. y Rolón, G.R. (2015). Tártago asociado a cultivos anuales: una opción para la agricultura familiar. *Investigación Agraria*. 17(1): 27-35.
- Riet-Correa, F.; Medeiros, R.M.T.; Pfister, J.A. y Mendonça, F.S. (2017). Toxic plants affecting the nervous system of ruminants and horses in Brazil. *Pesquisa Veterinária Brasileira*. 37(12): 1357-1368.
- Sánchez, M.I.; Castañeda, R.D. y Castañeda, M.J. (2016). Usos y potencialidad de la higuerilla (*Ricinus communis*) en sistemas agroforestales en Colombia. *PUBVET*. 10(6): 507-512.
- Siddiqui, A.; Abbas, M.; Javed, M. y Akhtar, Z. (2018). Certain non-edible oil-seeds possess substantial nematocidal potential. *International Journal Biological Biotechnology*. 15(SI): 869-878.
- Silva, M.D.; Riet-Correa, F.; Medeiros, R. y Oliveira, O. (2006). Plantas tóxicas para ruminantes e equideos no serido occidental e oriental do Rio Grande do Norte. *Pesquisa Veterinária Brasileira*. 26(4): 223-236.
- Sogan, N.; Kapoor, N.; Singh, H.; Kata, A. y Nagpal, B.N. (2018). Larvicidal activity of *Ricinus communis* extract against mosquitoes. *Journal of Vector Borne Diseases*. 55(4): 282-290.
- Smith, T. (1850). Galactagogue and emmenagogue effects of the leaves of the *Ricinus communis*. *London Journal of Medicine*. 2(22): 951-956.
- Távora, F.J.A.F.; Melo, F.I.O.; Silva, F.P. da y Barbosa Filho, M. (1988). Consorciação da mamona com culturas anuais de ciclo curto. *Ciência Agrônômica*. 19(2): 85-94.
- Tascón, T.E. (2008). Sombrío temporal de higuerilla *Ricinus communis* L. en cafetales del norte del departamento del Valle del Cauca, Colombia. <http://agroforesteriaecologica.org/index.php?controller=photo&action=show&id=143&src=@random4763f384aeeb3> (Consultado 25 noviembre 2020)
- Tokarnia, C. H.; Dobreiner, J. y Canella, C. (1975). Intoxicación experimental en bovinos por hojas de *Ricinus communis*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 10(8): 1-7.
- Toral-Pérez, O.; Del Viento-Camacho, A.; Rodríguez, M.L. y Palma, J.M. (2019). Inducción de la biodiversidad como estrategia para evitar la deforestación. 1er Congreso Latino en Cambio Climático y 9vo.

Congreso Nacional en Investigación en Cambio Climático. 7 al 11 de octubre de 2019. Colima, Colima, México.

Torres, J.A; Sánchez, M. y Zaragoza, J.L. (2009). Calidad nutritiva de árboles y arbustos forrajeros en el oriente de la sierra de Zongolica, Veracruz. XXII Reunión Científica-Tecnológica Forestal y Agropecuaria Veracruz 2009. Veracruz, Veracruz, México. Pp. 371-379.

Vasco-Leal, J.F.; Cuellar-Núñez, M.L.; Luzardo-Ocampo, I.; Ventura-Ramos, E.; Loarca-Piña, G. y Rodríguez-García, M.E. (2020). Valorization of Mexican *Ricinus communis* L. Leaves as a source of minerals and antioxidant compounds. *Waste and biomass valorization*. DOI 10.1007/s12649-020-01164-5

Zamora, J.; Del Viento, A. y Palma, J.M. (2020). Suplementación de pirofosfato de tiamina y lámina de hoja de *Ricinus communis* L en la alimentación de ovinos en crecimiento. *Livestock Research for Rural Development*. 32(98). <http://www.lrrd.org/lrrd32/6/palma32098.html> (Consultado 2 Julio 2020). ISSN 0121-3784.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT por otorgar las becas de posgrado de tres estudiantes que contribuyeron con esta investigación a través de la Maestría Interinstitucional en Producción Pecuaria (MIPPE).

IV. Mitigación-tecnologías silvopastoriles

IV.1. Uso de vainas de fabáceas arbóreas tropicales en la mitigación de metano entérico

Diego Felipe Portela-Díaz¹
Nicolás Torres-Salado²
Marco Antonio Ayala-Monter²
Jerónimo Herrera-Pérez²
Paulino Sánchez-Santillán^{2*}

¹Ingeniería en Agroindustrias, Universidad de la Costa, Oaxaca.

²Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, No. 2, Universidad Autónoma de Guerrero.

*Autor de correspondencia: sanchezsantillanp@gmail.com

Introducción

La alimentación de rumiantes con base en forraje aumenta sus emisiones entéricas de metano (CH_4), este proceso (metanogénesis) es parte de su metabolismo y ocasiona pérdida de energía, por tanto, se requieren de estrategias para su mitigación (Galindo *et al.*, 2016; Haque, 2018; Ku-Vera *et al.*, 2020). A nivel mundial, el aumento en la concentración atmosférica de CH_4 es causa de emisiones con efecto invernadero donde los rumiantes contribuyen con 18% del CH_4 producido (Beauchemin *et al.*, 2007; Haque, 2018; Dall-Orsoletta *et al.*, 2019). La emisión entérica de CH_4 en rumiantes es parte de la actividad fermentativa de bacterias, arqueobacterias, protozoarios y hongos (Cardona-Iglesias *et al.*, 2017; Ku-Vera *et al.*, 2020). El potencial de calentamiento global de CH_4 es 28 veces mayor que el dióxido de carbono (CO_2). Así, las investigaciones que se desarrollan actualmente se enfocan en disminuir las emisiones de CH_4 por parte de los rumiantes domésticos.

Las fabáceas arbóreas tropicales son un recurso nutricional que contienen compuestos químicos (taninos, saponinas, alcaloides, aceites esenciales, etcétera) que pueden mitigar las emisiones entéricas de CH_4 en rumiantes (Sirohi *et al.*, 2014; Haque, 2018; Ku-Vera *et al.*, 2020). Las evaluaciones se limitan a unas cuantas especies de estas plantas con potencial para contribuir a la mitigación del cambio climático (Albores-Moreno *et al.*, 2017; Valencia Salazar *et al.*, 2018; Molina-Botero *et al.*, 2020). También, falta explorar la totalidad de compuestos de las vainas de fabáceas con potencial anti-metanogénico. Generalmente, se identifican metabolitos secundarios que favorecen la síntesis de propionato y afectan la metanogénesis por competencia reducida del hidrógeno; mejoran la eficiencia energética y son tóxicos para los protozoarios ciliados, hospederos de arqueobacterias metanogénicas (Benchaar *et al.*, 2007; Galindo *et al.*, 2016; Albores-Moreno *et al.*, 2017; Ku-Vera *et al.*, 2020). El uso de fabáceas arbóreas tropicales como suplemento de la alimentación de rumiantes para mitigar la producción de CH_4 resulta ideal dentro de los sistemas silvopastoriles (Ku-Vera *et al.*, 2020). Las vainas de fabáceas arbóreas, como alimento no convencional, pueden minimizar las deficiencias nutriciona-

les en el trópico, mejorar el aporte de energía fermentable, la degradación de nitrógeno y mitigar los gases de efecto invernadero (Ku-Vera *et al.*, 2020; Molina-Botero *et al.*, 2020).

El objetivo del presente estudio fue indagar los resultados de la última década, relacionados con investigaciones propias y otras publicaciones de revistas indexadas en el uso de vainas de fabáceas arbóreas como tecnología de mitigación ante el cambio climático y recurso nutricional para reducir las emisiones entéricas de CH₄ en rumiantes del trópico mexicano.

Fabáceas arbóreas tropicales productoras de vainas

Las fabáceas arbóreas se usan en el trópico para secuestro de carbono, mejora del ciclo de nutrientes y producción de combustible (Olivares-Pérez *et al.*, 2011). Los ganaderos reconocen y utilizan arbóreas de fabáceas como fuentes alternativas de alimento para rumiantes, siendo la vaina cosechada una estructura importante en la época de seca, ya que sirven como suplemento alimenticio porque minimizan las deficiencias de nitrógeno (Sosa *et al.*, 2017). Diferentes especies de plantas (cuadro 1) tienen potencial para disminuir la producción de CH₄, ya que contienen saponinas, taninos, flavonoides y alcaloides que pueden ser usadas como un recurso alimenticio de los sistemas agroforestales, no convencional para rumiantes en pastoreo (Delgado *et al.*, 2014; Albores-Moreno *et al.*, 2017; Haque, 2018; Ku-Vera *et al.*, 2020).

Cuadro 1

Fabáceas arbóreas tropicales con potencial para reducir las emisiones entéricas en rumiantes

Nombre científico	Metabolito(s) secundario(s)	Referencias
<i>Acacia farnesiana</i>	Ácidos hidroxibenzoicos, flavonas, flavonoles	Campos <i>et al.</i> (2020)
<i>Bauhinia unguolata</i>	Aceites esenciales	Silva <i>et al.</i> (2020)
<i>Caesalpinia coriaria</i>	Taninos, ácido gálico y flavonoides	Campos-Pérez <i>et al.</i> (2021)
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Saponinas	Ku-Vera <i>et al.</i> (2020)
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Taninos y fenoles	Carbajal-Márquez <i>et al.</i> (2021)
<i>Gliricidia sepium</i>	Taninos	Ku-Vera <i>et al.</i> (2020)
<i>Leucaena esculenta</i>	Mimosina	Conabio (2021)
<i>Leucaena leucocephala</i>	Taninos condensados, ácidos hidroxicinámicos	Campos <i>et al.</i> (2020); Ramírez-Avilés <i>et al.</i> (2019)
<i>Lysiloma divaricata</i>	Taninos condensados	Olivares-Pérez <i>et al.</i> (2019)
<i>Pithecellobium dulce</i>	Taninos condensados	Olivares-Pérez <i>et al.</i> (2019)
<i>Samanea saman</i>	Saponinas	Ku-Vera <i>et al.</i> (2020)
<i>Vachellia campechana</i>	Fenoles, taninos	Quiroz-Cardozo <i>et al.</i> (2015)

Fuente: Elaborado por los autores.

El follaje de las fabáceas arbóreas es principalmente usado para la alimentación de rumiantes debido a su calidad nutritiva. El cacahuananche (*G. sepium*) puede sustituir el concentrado como suplemento y es una alternativa de alimentación durante el estiaje (Ku-Vera *et al.*, 2020; Molina-Botero *et al.*, 2020). Así mismo, el huaje (*L. leucocephala*) se utiliza como una fuente de forraje para los rumiantes y en sistema silvopastoriles, con arreglos de surcos dentro de los potreros, también aporta al bienestar y productividad del animal, además reduce la producción de gases de efecto invernadero (Ramírez-Avilés *et al.*, 2019). Por otra parte, las vainas cosechadas de las fabáceas son una fuente alternativa de alimentación para el ganado. Las vainas de cubato (*Vachellia campechana*) contienen 88.5% de MS, 14.7% de proteína cruda (PC), 1.26% de grasa bruta, 55% de fibra detergente neutro (FDN) y 38.3% de fibra detergente ácido (FDA). Las vainas de guamúchil (*P. dulce*) son reconocidas por los ganaderos como una importante fuente de alimento para el ganado en la época de seca (Olivares-Pérez *et al.*, 2011; Quiroz-Cardoso *et al.*, 2015). La parota (*E. cyclocarpum*) produce vainas en forma de oreja cuyo rendimiento es de 86 kg de vainas por árbol (Molina-Botero *et al.*, 2020; Sandoval-Pelcastre *et al.*, 2020), sus vainas molidas tienen un valor de 96.13% de MS, 22.90% de PC, 1.29% de grasa, 34.58% de FDN y 31.28% de FDA (Luna-Vega *et al.*, 2017).

Hernández-Morales *et al.* (2018) reportaron valores de 16.1, 10.9 y 19.9% de PC en vainas de *Samanea saman*, *Acacia cochliacantha* y *Leucaena leucocephala*, respectivamente; así como 34.1, 57.4 y 53.1% de FDN, respectivamente. De forma general, las vainas de fabáceas arbóreas tropicales contienen taninos condensados, aceites esenciales, saponinas, almidón y nitratos, por tanto, al ser incluidas en la alimentación para ganado pueden mitigar las emisiones de CH₄ entérico (Haque, 2018; Ku-Vera *et al.*, 2020).

Metabolitos secundarios que contienen las vainas

Las fabáceas arbóreas contienen metabolitos secundarios (Canul-Solis *et al.*, 2020), compuestos orgánicos que protegen a la planta de herbívoros y patógenos (Ku-Vera *et al.*, 2020). La presencia y concentración puede cambiar dependiendo de la especie, parte de la planta (follaje, tallo, vainas), estado fenológico y factores ambientales (Jain *et al.*, 2019). Se demostró que estos compuestos son útiles para la mitigación de CH₄ ruminal por sus propiedades anti-metanogénicas (Joch *et al.*, 2018; Ku-Vera *et al.*, 2020; Sandoval-Pelcastre *et al.*, 2020), mismas que tienen una efectividad variable, dependiente de la composición química de la planta, tipo y nivel del compuesto bioactivo responsable, concentración, especie animal, pH del rumen (Joch *et al.*, 2018).

Así mismo, la presencia de estos compuestos arriba de 3% del peso vivo del rumiante reduce el consumo de las vainas de las fabáceas, ya que durante el proceso de masticar y rumiar, los metabolitos se mezclan con la saliva del rumiantes y forma complejos con las glicoproteínas salivales, éstas se precipitan y se adhieren a las membranas mucosas de la boca causando astringencia que se refleja en la reducción del consumo y gustocidad de la vaina (Carbajal-Márquez *et al.*, 2021).

Saponinas

Las saponinas que se encuentran en las plantas se dividen en esteroides y triterpenoides, estos últimos se encuentran principalmente en las fabáceas (Jayanegara *et al.*, 2020). Las

saponinas interaccionan con el colesterol presente en la membrana de los protozoarios ciliados del rumen, lo que causa su ruptura, deterioro y desintegración (Sirohi *et al.*, 2014; Galindo *et al.*, 2016). La defaunación de estos protozoarios afecta su interacción con arqueas metanogénicas, pero produce una mayor proporción de propionato como resultado de una menor oferta de H₂ para la producción de CH₄ (Liu *et al.*, 2019; Canul-Solis *et al.*, 2020).

Taninos

Los taninos son compuestos polifenólicos de alto peso molecular solubles en agua; se dividen en dos grupos: taninos hidrolizables (TH) y taninos condensados (TC) o proantocianidinas (Patra y Saxena, 2010). El efecto antimetanogénico de los taninos puede asociarse a su capacidad para reaccionar con iones de Ca de la pared celular de las arqueas metanogénicas, lo cual ocasiona un cambio en su permeabilidad y permite la penetración de estos compuestos, con lo que se inactivan enzimas como las permeasas del periplasma involucradas en el transporte de aminoácidos y carbohidratos (Fagundes *et al.*, 2020; Anuraga Jayanegara *et al.*, 2020). Los taninos pueden afectar la capacidad de degradación y fermentación de las bacterias celulolíticas; en consecuencia, se aumenta la producción de acetato y se reduce la formación de CO₂ y de H₂ necesarios para la metanogénesis (Witzig *et al.*, 2018). Los TC disminuyen la producción de CH₄ a través de una reducción en la digestión de la fibra (Jayanegara *et al.*, 2018). Por otro lado, los TH pueden inhibir las arqueas metanogénicas y microorganismos productores de hidrógenos (Bodas *et al.*, 2012).

Flavonoides

Los flavonoides son polifenoles de las plantas y se clasifican en varias subclases: 1) flavonas (luteolina, apigenina, diosmetina, crisoeriol, tangeretina, sinensetina, gardenin, vitexina y baicaleína); 2) flavonoles (kaempferol, quercetina, galangina, datiscetina, morin, robinetina, isorhamnetina, tamarixetina, quercetagetina y miricetina); 3) flavanonas (hesperetina, taxifolina, eriodictiol y naringenina); 4) flavanonoles (catequina y epicatequina); 5) antocianinas (cianidina, delphinidina, pelargonidina y peonidina); y 6) isoflavonas (genisteína, daidzeína y coumestrol [Ku-Vera *et al.*, 2020; Patra y Saxena, 2010]). Los flavonoides disminuyen la producción de CH₄, aumentan la degradabilidad de la proteína y son constituyentes de la pared celular, por tanto, mejoran la fermentación hasta 50% (Patra y Saxena, 2010). Mediante la inhibición de la síntesis de la pared celular de las arqueas y de sus ácidos nucleicos, los flavonoides afectan la metanogénesis (Lakhani *et al.*, 2019).

Aceites esenciales

Los aceites esenciales (AE) son mezclas complejas de metabolitos secundarios volátiles lipofílicos, específicos de las plantas y se clasifican en dos grupos químicos: terpenoides (monoterpenoides y sesquiterpenoides) y fenilpropanoides (Patra y Saxena, 2010). La disminución en la producción de metano generada por los AE parece estar mediada por una aparente reducción de los metanógenos y los microorganismos productores de hidrógeno (Zhou *et al.*, 2020).

Efecto de las vainas en la fermentación ruminal

La interacción entre arqueas metanogénicas y protozoarios ciliados del rumen produce un 37% de CH₄. Durante la fermentación del alimento, en los hidrogenosomas de los protozoarios, se produce gas hidrógeno usado por las arqueas metanogénicas para producir energía metabólica (ATP) para estas bacterias y generar como desecho el gas, el cual se libera durante el eructo, junto con el CO₂ (Hille *et al.*, 2016). Los hidrogenosomas están implicados en la utilización de hidrógeno y de CO₂, su absorción se asocia a la conversión de piruvato en acetil CoA, acetato quinasa y fosfato acetil transferasa, que convierte el acetil CoA.

La producción de acetato en el rumen da como resultado grandes cantidades de hidrógeno y depende de la disponibilidad de equivalentes reductores. La alta presión parcial de hidrógeno y el aumento en la proporción NADH / NAD⁺ en el rumen, debido, a la inhibición de la metanogénesis pueden resultar en una disminución en la producción de acetato. La disminución en la producción de metano usualmente incrementa la concentración de hidrógeno en rumen, el cual es utilizado en la formación de propionato. La expresión del gen *mcrA* es un indicador de la actividad metanogénica de la población de metanógenos, ya que esta enzima *mcrA* (Metil coenzima M reductasa) cataliza el paso terminal en la ruta de la metanogénesis (Denman *et al.*, 2007; Morris *et al.*, 2014). Un alto contenido de carbohidratos estructurales genera una mayor cantidad de ácido acético y de gas hidrógeno (Janssen, 2010), hecho que aumenta la cantidad de CH₄ producido por unidad de alimento digerido.

Los protozoarios ruminales que albergan las arqueas metanogénicas disminuyen con niveles de 1 mg/ml de saponina (Wina *et al.*, 2006). Estos compuestos, también denominados fitoquímicos, se encuentran de forma natural en diferentes plantas y tienen potencial como aditivos para modificar la fermentación ruminal e inhibir la metanogénesis, ya que favorecen procesos como la defaunación. Las saponinas interactúan con el colesterol presente en la membrana celular de los protozoarios y de los hongos ruminales (dominios colesterol-saponinas), lo que ocasiona su lisis y finalmente la muerte (Patra y Saxena, 2009). Las saponinas pueden limitar la fermentación del alimento en el rumen, por tanto, favorecen una ruta acetogénica que compite por el hidrógeno usado en la ruta metanogénica (Patra y Saxena, 2010; Szumacher y Cieślak, 2010). Su actividad anti-metanogénica en el rumen puede estar relacionada con la limitación de hidrógeno, el cual es reutilizado en la formación de propionato (Wina *et al.*, 2005).

El efecto de la saponina depende de su estructura química, masa molecular y concentraciones en la dieta y en el rumen están mediados por la acción microbiana. Bajas concentraciones a partir de 1.2% MS de extracto crudo de saponinas estimulan las bacterias celulolíticas (Galindo *et al.*, 2016). Dosis altas de 6 mg/mL causan defaunación y afectan la fermentación del rumen (Patra y Saxena, 2009). La población de *F. succinogenes* incrementa cuando es suplementado con las vainas de *Samanea saman* (60 g/kg [Valencia Salazar *et al.*, 2018]). En condiciones *in vitro*, la fermentación de vainas de *S. saman* y *E. cyclocarpum* mantiene constante a la población de bacterias ruminales totales (1.69 x10⁹ células/mL y 1.67 x10⁹ células/mL, respectivamente), este valor cambia con *L. leucocephala* (0.89 x10⁹ células/mL [Hernández-Morales *et al.*, 2018]).

La suplementación con harina de vainas de *S. saman* (60 g/kg) sola y con aceite de palma (20 g/kg) reduce el contenido de nitrógeno amoniacal (N-NH₃) en el rumen de va-

cas lecheras y disminuye la población de metanógenos y protozoarios (Anantasook *et al.*, 2015). Cabe destacar que tres horas después del consumo de vainas de *E. cyclocarpum* (0.15 kg MS) se reduce la población de protozoarios Entodinomorfidos ruminales (Albores-Moreno *et al.*, 2017). La presencia de taninos en la dieta disminuyen la digestión de la fibra, ya que forma complejos con la lignocelulosa y eso evita la acción enzimática de microorganismos celulolíticos y fibrolíticos (Patra y Saxena, 2009).

Los aceites esenciales reducen la metanogénesis suprimiendo la formación de hidrógeno por parte de los microorganismos (Zhou *et al.*, 2020). Su inclusión o la de sus compuestos químicos en la dieta no disminuyen la alta concentración de ácidos grasos totales producidos a partir de la digestión. La cepa DSM 1093 de *Methanobrevibacter ruminantium* expuesta a una concentración de 0.25 mg/l de flavonoides de *L. pedunculatus* disminuyen 28% su crecimiento y su producción de CH₄, pero la cepa YLM-1 de esta misma arquea no se vio afectada.

El uso creciente de vainas de *E. cyclocarpum* en suplementos proteicos para becerros en crecimiento en el trópico reduce la población de protozoarios en rumen cuando se ofrece 1% del peso vivo como suplemento. Así, cuando ofrecieron el suplemento sin vaina de *E. cyclocarpum* estimaron una población total de protozoarios de 3.32x10⁵ células/mL, la cual decreció en 111% cuando el suplemento contenía 75% de esta vaina (Carbal-Márquez *et al.*, 2021).

Evaluación *in vitro* e *in vivo* de vainas en la disminución de metano

Para estimar la producción de metano y de su efecto en la mitigación de gases de efecto invernadero en la alimentación de rumiantes, se pueden aplicar técnicas *in vitro*, en donde las condiciones químicas (temperatura, pH) y microbiológicas (población microbiana) del rumen son controladas y simuladas. También se pueden utilizar técnicas *in vivo*, en donde el animal es estabulado en cámaras especiales que controlan el ambiente y que miden las emisiones entéricas de metano de forma directa.

En la evaluación de vainas de leguminosas para mitigar las emisiones de rumiantes se pueden usar estas técnicas, con el objetivo de valorizar los recursos generados en los sistemas silvopastoriles. Es importante estimar con experimentos *in vitro* la capacidad de las vainas para producir biogás y específicamente CH₄. Bajo la versatilidad de estas técnicas, también es posible validar el potencial como ingrediente alternativo de alimento o suplementos para la alimentación de rumiantes. A la fecha, experimentos *in vivo* en rumiantes muestran una tendencia hacia la reducción de CH₄ cuando se incorporan vainas de leguminosas arbóreas o arbustivas a dietas o suplementos para la alimentación con pastos tropicales de baja calidad, ya que su contenido y composición de pared celular pueden afectar la producción de CH₄ (cuadro 2).

Cuadro 2

Efecto *in vitro* e *in vivo* de vainas de fabáceas tropicales sobre la producción de biogás y proporción de CH₄

Tratamiento	<i>In vitro</i>	<i>In vivo</i>	Resultado	Referencia
Vaina <i>Samanea saman</i> , <i>Vachellia campechana</i> , <i>Leucaena leucocephala</i> y <i>Enterolobium cyclocarpum</i>	X		La producción de CH ₄ representa 17.15% del biogás producido durante una fermentación de 72 h	Torres-Salado <i>et al.</i> (2018)
Suplementos elaborados con base en residuos de calabaza y vaina de <i>E. cyclocarpum</i>	X		Produjo en promedio 53.6 mL de CH ₄ g MS, lo que representó 31.10% del biogás	Rojas-García <i>et al.</i> (2020)
Suplementos elaborados con 0, 25. 50 y 75% de vaina de <i>E. cyclocarpum</i>	X		Del total de biogás producido 30.9% correspondió a CH ₄	Carbajal-Márquez <i>et al.</i> (2019)
Dieta con 40% de <i>E. cyclocarpum</i>	X		La dieta con vaina produjo 14.82% de CH ₄ respecto a la producción total de biogás, la que no contenía vaina, el CH ₄ representó 23.7%	López-Garrido <i>et al.</i> (2020)
Dieta con 0 y 30% de vaina de <i>Moringa oleífera</i>	X		La dieta con vaina produjo 15.8% menor cantidad de CH ₄ que la dieta testigo	Rivera-Cristóbal (2020)
Bovinos alimentados con 7.5 y 15% de vaina de <i>E. cyclocarpum</i>		X	Los bovinos alimentados con la dieta control produjeron 144.8 g CH ₄ d, 3.3 y 2.5% más que los bovinos alimentados con la dieta que incluyó 7.5 y 15% de vaina	Molina-Botero <i>et al.</i> (2019)
Bovinos alimentados con una ración que incluía 12, 24 y 36% de vaina de <i>E. cyclocarpum</i>		X	Bovinos con dieta testigo producen de 108.2 g CH ₄ d, lo que representó 10.60, 8.17 y 6.41% más CH ₄ que los bovinos alimentados con vainas	Lazos-Balbuena (2015)
Bovinos alimentados con una ración que incluyó 10, 20 y 30% de vaina de <i>Samanea saman</i>		X	Bovinos alimentados con una ración sin vaina de leguminosa producen 120.84 L CH ₄ d, lo que representó 34.80, 67.77 y 103.79% menos metano producido por los bovinos alimentados con una ración que incluyó 10, 20 y 30% de vaina de <i>Samanea saman</i>	Valencia Salazar <i>et al.</i> (2018)

Reflexión final

El uso de vainas de fabácea arbóreas requiere de más estudios que permitan identificar su valor como un recurso agroforestal con potencial para ser un ingrediente con un porcentaje de inclusión superior al 25% en la alimentación de rumiantes del trópico. También, es necesario reconocer su valor como un recurso regional para reducir las emisiones entéricas de metano del ganado, de esta forma se deben identificar los metabolitos secundarios, presentes en las vainas de fabáceas que favorezcan la manipulación metabólica.

Aspectos destacados

1. Las vainas de fabáceas son recursos regionales disponibles en la época de sequía para la alimentación de rumiantes.
2. Las vainas de fabáceas son una fuente de metabolitos secundarios.
3. Las vainas de fabáceas alteran el metabolismo ruminal con la disminución de metano y de la población de protozoarios.

Literatura citada

- Albores-Moreno, S.; Alayón-Gamboa, J.A.; Ayala-Burgos, A.J.; Solorio-Sánchez, F.J.; Aguilar-Pérez, C.F.; Olivera-Castillo, L. y Ku-Vera, J. C. (2017). Effects of feeding ground pods of *Enterolobium cyclocarpum* Jacq. Griseb on dry matter intake, rumen fermentation, and enteric methane production by Pelibuey sheep fed tropical grass. *Tropical Animal Health and Production*, 49(4): 857–866. <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1275-y>
- Anantasook, N.; Wanapat, M.; Cherdthong, A. y Gunun, P. (2015). Effect of tannins and saponins in *Samanea saman* on rumen environment, milk yield and milk composition in lactating dairy cows. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 99(2): 335–344. <https://doi.org/10.1111/jpn.12198>
- Beauchemin, K.A.; McGinn, S.M. y Petit, H.V. (2007). Methane abatement strategies for cattle: Lipid supplementation of diets. *Canadian Journal of Animal Science*. 87(3): 431–440. <https://doi.org/10.4141/CJAS07011>
- Benchaar, C.; Petit, H.V.; Berthiaume, R.; Ouellet, D.R.; Chiquette, J. y Chouinard, P.Y. (2007). Effects of essential oils on digestion, ruminal fermentation, rumen microbial populations, milk production, and milk composition in dairy cows fed alfalfa silage or corn silage. *Journal of Dairy Science*. 90(2): 886–897. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(07\)71572-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)71572-2)
- Bodas, R.; Prieto, N.; García-González, R.; Andrés, S.; Giráldez, F.J. y López, S. (2012). Manipulation of rumen fermentation and methane production with plant secondary metabolites. *Animal Feed Science and Technology*. 176(1–4): 78–93. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.07.010>
- Campos, C.C.Z.; García-Martínez, J.E.; Chavira, J.S.; Valdés, J.A.A.; Morales, M.A.M. y Mellado, M. (2020). Chemical composition and nutritional value of leaves and pods of *Leucaena leucocephala*, *Prosopis laevigata* and *Acacia farnesiana* in a xerophilous shrubland. *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 723. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2020.v32.i10.2148>
- Campos-Pérez, A.; Camacho-Díaz, L.M.; Adegbey, M.J.; Elghandour, M.M.M.Y.; Salem, A.Z.M.; Barbosa-Pliego, A.; Rojas-Hernández, S. y Cipriano-Salazar, M. (2021). Valorization of *Caesalpinia coriaria* fruit waste to enhance the ruminal mitigation of greenhouse gases production. *Waste and Biomass Valorization*. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01361-w>
- Canul-Solís, J.; Campos-Navarrete, M.; Piñeiro-Vázquez, A.; Casanova-Lugo, F.; Barros-Rodríguez, M.; Chay-Canul, A.; Cárdenas-Medina, J. y Castillo-Sánchez, L. (2020). Mitigation of rumen methane emissions with foliage and pods of tropical trees. *Animals*. 10(5): 843. <https://doi.org/10.3390/ani10050843>
- Carbajal-Márquez, U.; Sánchez-Santillán, P.; Rojas-García, A.R.; Ayala-Monter, M.A.; Mendoza-Nuñez, M.A. y Hernández-Valenzuela, D. (2021). Effect of parota (*Enterolobium cyclocarpum*) pod protein supplement on feed intake and digestibility and calf ruminal characteristics. *Tropical Animal Health and Production*. 53: 323. <https://doi.org/10.1007/s11250-021-02772-6>

- CONABIO (2021). Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad, México. *Leucaena leucocephala*. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/mimosaceae/leucaena-leucocephala/fichas/ficha.htm> (Consulta 20 marzo 2021).
- Dall-Orsoletta, A.C.; Leurent-Colette, S.; Launay, F.; Ribeiro-Filho, H.M.N. y Delaby, L. (2019). A quantitative description of the effect of breed, first calving age and feeding strategy on dairy systems enteric methane emission. *Livestock Science*. 224: 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.04.015>
- Delgado, D.C.; Hera, R.; Cairo, J. y Orta, Y. (2014). *Samanea saman*, árbol multipropósito con potencialidades como alimento alternativo para animales de interés productivo. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 48(3): 205–212.
- Denman, S.E.; Tomkins, N.W. y McSweeney, C.S. (2007). Quantitation and diversity analysis of ruminal methanogenic populations in response to the antimethanogenic compound bromochloromethane. *FEMS Microbiology Ecology*. 62(3): 313–322. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2007.00394.x>
- Fagundes, G.M.; Benetel, G.; Welter, K.C.; Melo, F.A.; Muir, J.P.; Carriero, M.M.; Souza, R.L.M.; Meo-Filho, P.; Frighetto, R.T.S.; Berndt, A. y Bueno, I.C.S. (2020). Tannin as a natural rumen modifier to control methanogenesis in beef cattle in tropical systems: Friend or foe to biogas energy production? *Research in Veterinary Science*. 132: 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2020.05.010>
- Galindo, J.; González, N.; Abdalla, A.L.; Alberto, M.; Lucas, R.C.; Dos, K.C.; Santos, M. R.; Louvandini, P.; Moreira, O. y Sarduy, L. (2016). Effect of a raw saponin extract on ruminal microbial population and *in vitro* methane production with star grass (*Cynodon nlemfuensis*) substrate. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 50(1): 13.
- Haque, M.N. (2018). Dietary manipulation: A sustainable way to mitigate methane emissions from ruminants. *Journal of Animal Science and Technology*. 60(1): 15. <https://doi.org/10.1186/s40781-018-0175-7>
- Hernández-Morales, J.; Sánchez-Santillán, P.; Torres-Salado, N.; Herrera-Pérez, J.; Rojas-García, A.R.; Reyes-Vázquez, I. y Mendoza-Núñez, M.A. (2018). Composición química y degradaciones *in vitro* de vainas y hojas de leguminosas arbóreas del trópico seco de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 9(1): 105. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v9i1.4332>
- Hille, K.T.; Hetz, S.K.; Rosendahl, J.; Braun, H.S.; Pieper, R. y Stumpff, F. (2016). Determination of Henry's constant, the dissociation constant, and the buffer capacity of the bicarbonate system in ruminal fluid. *Journal of Dairy Science*. 99(1): 369–385. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9486>
- Janssen, P.H. (2010). Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and fermentation thermodynamics. *Animal Feed Science and Technology*. 160(1–2): 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.07.002>
- Jayanegara, A.; Ridla, M.; Laconi, E.B. y Nahrowi, N. (2018). Tannin as a feed additive for mitigating enteric methane emission from livestock: Meta-analysis from RUSITEC experiments. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 434: 012108. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/434/1/012108>
- Jayanegara, A.; Yogiarto, Y.; Wina, E.; Sudarman, A.; Kondo, M.; Obitsu, T. y Kreuzer, M. (2020). Combination effects of plant extracts rich in tannins and saponins as feed additives for mitigating *in vitro* ruminal methane and ammonia formation. *Animals*. 10(9): 1531. <https://doi.org/10.3390/ani10091531>
- Joch, M.; Mrázek, J.; Skřivanová, E.; Čermák, L. y Marounek, M. (2018). Effects of pure plant secondary metabolites on methane production, rumen fermentation and rumen bacteria populations *in vitro*. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 102(4): 869–881. <https://doi.org/10.1111/jpn.12910>
- Ku-Vera, J.C., Castelán-Ortega, O. A., Galindo-Maldonado, F. A., Arango, J., Chirinda, N., Jiménez-Ocampo, R., Valencia-Salazar, S. S., Flores-Santiago, E. J., Montoya-Flores, M. D., Molina-Botero, I. C., Piñeiro-Vázquez, A. T., Arceo-Castillo, J. I., Aguilar-Pérez, C. F., Ramírez-Avilés, L. y Solorio-Sánchez, F. J. (2020). Review: Strategies for enteric methane mitigation in cattle fed tropical forages. *Animal*. 14: s453–s463. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001780>
- Ku-Vera, Juan Carlos, Jiménez-Ocampo, R., Valencia-Salazar, S. S., Montoya-Flores, M. D., Molina-Botero, I. C., Arango, J., Gómez-Bravo, C. A., Aguilar-Pérez, C. F. y Solorio-Sánchez, F. J. (2020). Role of secondary plant metabolites on enteric methane mitigation in ruminants. *Frontiers in Veterinary Science*. 7: 584. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00584>
- Liu, Y., Ma, T., Chen, D., Zhang, N., Si, B., Deng, K., Tu, Y. y Diao, Q. (2019). Effects of tea saponin supplementation on nutrient digestibility, methanogenesis, and ruminal microbial flora in dorper crossbred ewe. *Animals*. 9(1): 29. <https://doi.org/10.3390/ani9010029>

- Luna-Vega, D.; Luisa, M.; Rodríguez-Guzmán, E.; Pimienta-Barrios, E. y Escalante-Martínez, R. (2017). Potencial alimenticio animal con harina del fruto de parota (*Enterolobium cyclocarpum*, Jacq.) y capomo (*Brosimum alicastrum*, Sw). 9.
- Molina-Botero, I.C.; Arroyave-Jaramillo, J.; Valencia-Salazar, S.; Barahona-Rosales, R.; Aguilar-Pérez, C.F.; Ayala Burgos, A.; Arango, J. y Ku-Vera, J.C. (2019). Effects of tannins and saponins contained in foliage of *Gliricidia sepium* and pods of *Enterolobium cyclocarpum* on fermentation, methane emissions and rumen microbial population in crossbred heifers. *Animal Feed Science and Technology*. 251: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.01.011>
- Molina-Botero, I.C.; Mazabel, J.; Arceo-Castillo, J.; Urrea-Benítez, J.L.; Olivera-Castillo, L.; Barahona-Rosales, R.; Chirinda, N.; Ku-Vera, J. y Arango, J. (2020). Effect of the addition of *Enterolobium cyclocarpum* pods and *Gliricidia sepium* forage to *Brachiaria brizantha* on dry matter degradation, volatile fatty acid concentration, and *in vitro* methane production. *Tropical Animal Health and Production*. 52(6): 2787–2798. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02324-4>
- Morris, R.; Schauer-Gimenez, A.; Bhattad, U.; Kearney, C.; Struble, C.A.; Zitomer, D. y Maki, J.S. (2014). Methyl coenzyme M reductase (mcrA) gene abundance correlates with activity measurements of methanogenic H₂/CO₂-enriched anaerobic biomass. *Microbial Biotechnology*. 7(1): 77–84. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12094>
- Olivares-Pérez, J.; Avilés-Nova, F.; Albarrán-Portillo, B. y Rojas-Hernández, S. (2011). Identificación, usos y medición de leguminosas arbóreas forrajeras en ranchos ganaderos del sur del estado de México. 10 p.
- Olivares-Pérez, J.; Rojas-Hernandez, S.; Camacho-Diaz, L.M.; Cipriano-Salazar, M. y Salem, A. Z. M. (2019). Fruits chemical composition and potential ruminal digestion of nine tree species in dry tropic region of Mexico. *Agroforestry Systems*. 93(2): 665–674. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0161-y>
- Patra, A.K. y Saxena, J. (2009). The effect and mode of action of saponins on the microbial populations and fermentation in the rumen and ruminant production. *Nutrition Research Reviews*. 22(2): 204–219. <https://doi.org/10.1017/S0954422409990163>
- Patra, A.K. y Saxena, J. (2010). A new perspective on the use of plant secondary metabolites to inhibit methanogenesis in the rumen. *Phytochemistry*. 71(11–12): 1198–1222. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2010.05.010>
- Quiroz-Cardoso, F.; Rojas-Hernández, S.; Olivares-Pérez, J.; Hernández-Castro, E.; Jiménez-Guillén, R.; Córdova-Izquierdo, A.; Villa-Mancera, A. y Abdel-Fattah, S. (2015). Composición nutricional, consumo e índices de palatabilidad relativa de los frutos de tres acacias en la alimentación de ovejas y cabras. *Archivos de medicina veterinaria*. 47(1): 33–38. <https://doi.org/10.4067/S0301-732X2015000100007>
- Ramírez-Avilés, L.; Solorio-Sánchez, F.J.; Aguilar-Pérez, C.F.; Ayala-Burgos, A.J. y Ku-Vera, J.C. (2019). *Leucaena leucocephala* feeding systems for cattle production in Mexico. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*. 7(4): 375–380. [https://doi.org/10.17138/tgft\(7\)375-380](https://doi.org/10.17138/tgft(7)375-380)
- Rojas-García, A.R.; Orocio-Martínez, R.K.; Sanchez Santillan, P.; Ayala-Monter, M.A.; Maldonado-Peralta, M.A. y Valenzuela-Lagarda, J.L. (2020). Características bromatológicas y fermentativas *in vitro* de complementos con *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb y cáscara de *Cucurbita argyrosperma* Huber. *Agro Productividad*. 13(7). <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1677>
- Sandoval-Pelcastre, A.A.; Ramírez-Mella, M.; Rodríguez-Ávila, N.L. y Candelaria-Martínez, B. (2020). *Árboles y arbustos tropicales con potencial para disminuir la producción de metano en rumiantes*. 16 p.
- Silva, A.M.A.; da Silva, H.C.; Monteiro, A.O.; Lemos, T.L.G.; de Souza, S.M.; Militão, G. C.G.; Santos, H.V.; Alves, P.B.; Romero, N.R. y Santiago, G.M.P. (2020). Chemical composition, larvicidal and cytotoxic activities of the leaf essential oil of *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud. *South African Journal of Botany*. 131: 369–373. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.03.011>
- Sirohi, S.K.; Goel, N. y Singh, N. (2014). Utilization of saponins, a plant secondary metabolite in enteric methane mitigation and rumen modulation. *Annual Research y Review in Biology*. 1–19. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2014/5323>
- Szumacher-Strabel, M. y Cieślak, A. (2010). Potential of phytofactors to mitigate rumen ammonia and methane production. *Journal of Animal and Feed Sciences*. 19(3): 319–337. <https://doi.org/10.22358/jafs/66296/2010>

- Torres-Salado, N.; Sánchez-Santillán, P.; Rojas-García, A.R.; Herrera-Pérez, J. y Hernández-Morales, J. (2018). Producción de gases efecto invernadero *in vitro* de leguminosas arbóreas del trópico seco mexicano. *Archivos de Zootecnia*. 67(257): 55–59. <https://doi.org/10.21071/az.v67i257.3491>
- Valencia Salazar, S.S.; Piñeiro Vázquez, A.T.; Molina Botero, I.C.; Lazos Balbuena, F.J.; Uuh Narváez, J.J.; Segura Campos, M.R.; Ramírez Avilés, L.; Solorio Sánchez, F.J. y Ku Vera, J.C. (2018). Potential of *Samanea saman* pod meal for enteric methane mitigation in crossbred heifers fed low-quality tropical grass. *Agricultural and Forest Meteorology*. 258: 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.agrfor-met.2017.12.262>
- Wina, E.; Muetzel, S.; Hoffmann, E.; Makkar, H.P.S. y Becker, K. (2005). Saponins containing methanol extract of *Sapindus rarak* affect microbial fermentation, microbial activity and microbial community structure *in vitro*. *Animal Feed Science and Technology*. 121(1–2): 159–174. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.02.016>
- Wina, E.; Muetzel, S. y Becker, K. (2006). Effects of Daily and Interval Feeding of *Sapindus rarak* Saponins on protozoa, rumen fermentation parameters and digestibility in sheep. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 19(11): 1580–1587. <https://doi.org/10.5713/ajas.2006.1580>
- Witzig, M.; Zeder, M. y Rodehutschord, M. (2018). Effect of the ionophore monensin and tannin extracts supplemented to grass silage on populations of ruminal cellulolytics and methanogens *in vitro*. *Anaerobe*. 50: 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2018.01.012>
- Zhou, R.; Wu, J.; Lang, X.; Liu, L.; Casper, D.P.; Wang, C.; Zhang, L. y Wei, S. (2020). Effects of oregano essential oil on *in vitro* ruminal fermentation, methane production, and ruminal microbial community. *Journal of Dairy Science*. 103(3): 2303–2314. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16611>

IV.2. Beneficios de la *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit en sistemas silvopastoriles utilizados por ganado vacuno y su efecto en la emisión del óxido nitroso

Francisca Avilés Nova^{1*}
Tania Guadalupe Osorio Montor¹
Octavio A. Castelán Ortega²
Francisco Salazar Sperberg³

¹ Centro Universitario UAEM-Temascaltepec. Universidad Autónoma del Estado de México.
² Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Autónoma del Estado de México.
³ Instituto Nacional de Investigación Agrícola. Remehue Chile.
*Autor de correspondencia: franavilesnova@yahoo.com.mx

Introducción

La emisión de gases efecto invernadero (GEI) y el consecuente cambio climático son, en la actualidad, un tema de amplio interés mundial. En particular, los países agrícolas y ganaderos presentan la problemática de emisiones de GEI como consecuencia de esa actividad productiva. Las emisiones por ganadería son provocadas por la fermentación entérica, los desechos de animales y el cambio en el uso de la tierra (FAO, 2018). Los principales GEI emitidos por las actividades antropogénicas a nivel mundial son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) (IPCC, 2013). El N₂O y el CH₄ poseen un poder de calentamiento 298 y 28 veces, respectivamente, mayor en comparación con el CO₂ en un escenario proyectado a 100 años (IPCC, 2013). De acuerdo a la FAO (2019) las cadenas de producción ganadera en el año 2010 emitieron globalmente un total de 8 100 gigatoneladas de CO₂eq, donde el ganado vacuno es el mayor emisor de GEI con alrededor de 5 000 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), que representan el 62% del total de emisiones del sector ganadero.

La adaptación de los sistemas de producción agrícola y pecuaria a los cambios ambientales y la mitigación de las emisiones de GEI son acciones urgentes para confrontar el proceso climático y las limitaciones del clima. Los sistemas silvopastoriles (SSP) son una alternativa para convertir a la ganadería en una práctica sostenible, mejorar la productividad y rentabilidad, al promover mejor uso de los recursos naturales y aportar alternativas de adaptación al cambio climático (Sotelo *et al.*, 2017a). Los SSP combinan gramíneas, leguminosas, leñosas arbóreas y ganado, brindan diferentes beneficios como disminución de la aplicación de insumos externos, fijación de nitrógeno a nivel edáfico, bienestar animal, ciclos productivos cortos y dietas con mejor calidad (Sotelo *et al.*, 2017b).

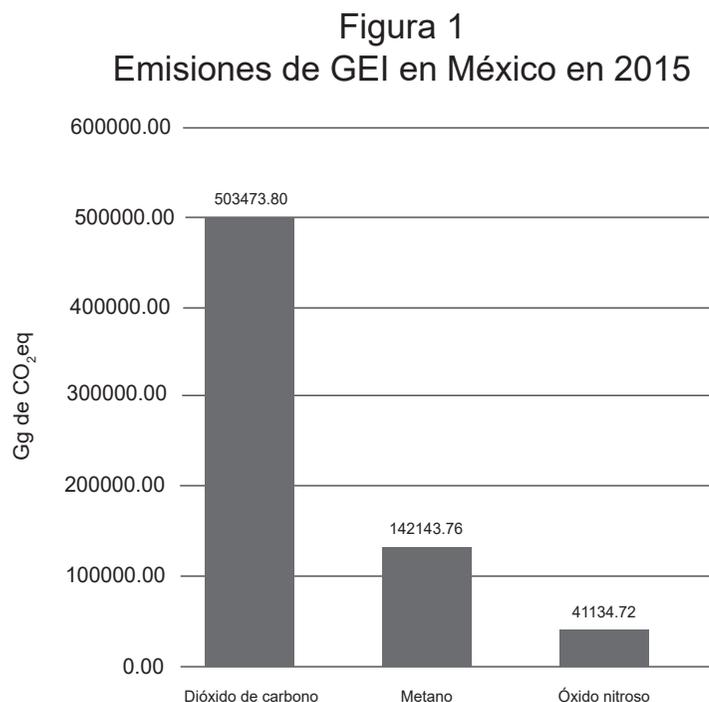
Rochette y Janzen (2005) mencionaron que es importante considerar que la inclusión de especies leguminosas en los SSP, como estrategias de mitigación de GEI, puede

ser cuestionado, argumentando que los procesos de nitrificación/desnitrificación del N excretado en heces y en orina y por el N del suelo mediante fijación biológica, incrementan la entrada de N₂ en el suelo produciendo incremento en las emisiones de N₂O a la atmósfera y, en consecuencia, un aumento de las emisiones de GEI totales. Sin embargo, aun hoy es escasa la bibliografía científica disponible sobre el efecto real que tiene la utilización de las plantas leguminosas en las emisiones finales de N₂O.

El objetivo del capítulo es revisar los beneficios de la *Leucaena* en los sistemas silvopastoriles utilizados por ganado vacuno, así como los mecanismos de formación y las fuentes de emisión de N₂O en los SSP. Lo anterior a través de la consulta de artículos científicos, capítulos y enciclopedias, en bases de datos como *Scielo*, *Science Direct*, *ResearchGate* y *Google Académico*, publicados durante los años 1985-2020.

El gas efecto invernadero, óxido nitroso

El N₂O es uno de los GEI más importantes con potencial de calentamiento global de 298 CO₂eq para un horizonte temporal de cien años. La concentración de N₂O en la atmósfera aumentó a una tasa de 0.73 ±0.03 ppb/año durante las últimas tres décadas, principalmente debido a reacciones de nitrificación y desnitrificación del nitrógeno reactivo en los suelos y en el océano (Barbera *et al.*, 2018). Las emisiones de GEI reportadas en el territorio mexicano en el 2015, originadas por las actividades antropogénicas corresponden a 700 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente de gases efecto invernadero (GEI), que incluye las emisiones de dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, y hexafluoruro de azufre. El análisis de la tendencia a lo largo del tiempo muestra que entre 1993 y 2015, México incrementó sus emisiones en un 57% (INECC, 2018). La emisión por gas en México en 2015, según el Protocolo de Kioto, se presentan en la figura 1.



Fuente: INECC (2018).

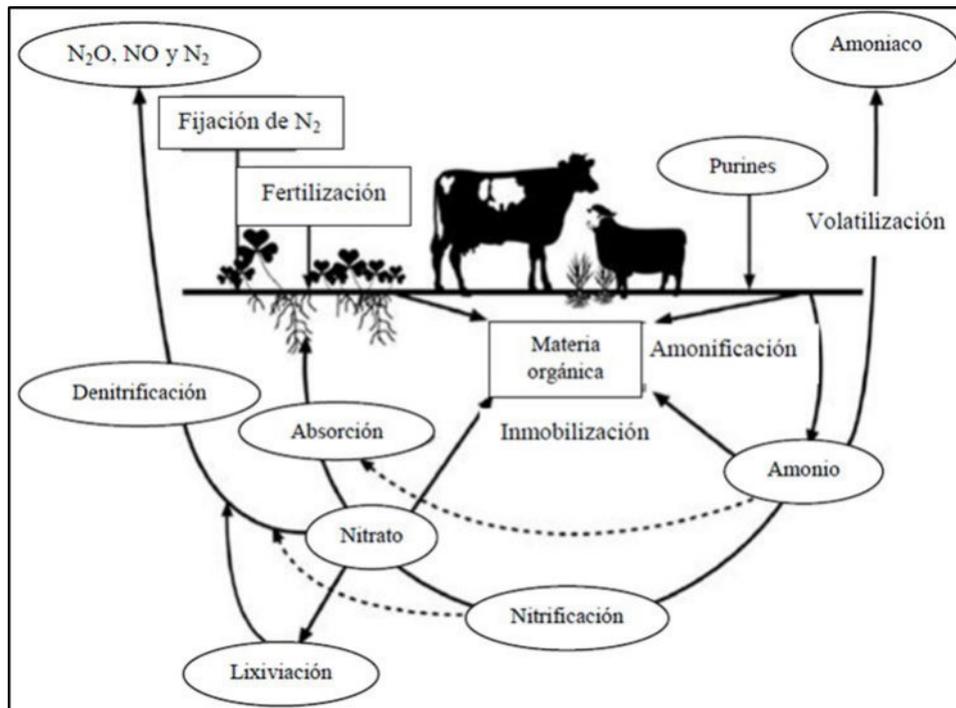
El sector ganadero en México emite 66 131.52 Gg de CO₂eq de CH₄, 4 436.08 Gg de CO₂eq de N₂O y 70 567.60 Gg de CO₂eq netas. Dentro de este sector, el ganado bovino emite 50 121.38 Gg de CO₂eq de CH₄, sin aplicar para los demás gases (INECC, 2018).

Mecanismos de formación del óxido nitroso (N₂O)

Ciclo de emisión del óxido nitroso

La emisión del N₂O en los SSP puede ingresar en el suelo desde la atmósfera mediante la deposición seca y húmeda, por fijación y por fertilizantes orgánicos y sintéticos (Verhulst *et al.*, 2015). El ciclo del N, a nivel de suelo, implica una serie de procesos como la fijación, mineralización, nitrificación, desnitrificación y volatilización (figura 2). La producción de N₂O ocurre como resultado de la actividad microbiana, durante los procesos de nitrificación como de desnitrificación.

Figura 2
Ciclo del N en pasturas



Fuente: Adaptado de Sagar *et al.* (2013).

Proceso de nitrificación

La nitrificación consiste en la oxidación del amonio (NH₄⁺) a nitrito (NO₂⁻) vía NH₂OH, y luego a nitrato (NO₃⁻). Es un proceso aeróbico que produce N₂O como subproducto. Este proceso es generado por una amplia variedad de bacterias autotróficas capaces de obtener energía a partir de estas reacciones.

Proceso de desnitrificación

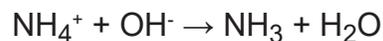
La formación de N₂O por desnitrificación es el proceso por el cual el nitrato (NO₃⁻) y el nitrito (NO₂⁻) son reducidos para dar óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N₂O) y dinitrógeno (N₂).

En este caso el proceso es anaeróbico, requiere carbono reducido como suplemento de energía y NO₃⁻ como sustrato. Esta transformación se realiza por microorganismos anaeróbicos facultativos que, al momento de no haber oxígeno disponible, utiliza al NO₃⁻ como aceptor terminal de electrones. El pH óptimo para este proceso es de 7.0-8.0 (Hayatsu *et al.*, 2008).

Mineralización, volatilización y lixiviación

La descomposición de la materia orgánica convierte parte del N orgánico en N mineral, de allí el término mineralización, denominación que se aplica a los iones amonio, NH₄⁺, nitrito NO₂⁻ y nitrato NO₃⁻. El N mineral, principalmente amonio y nitrato, es absorbido por las plantas o asimilado por los microorganismos y convertido a N orgánico.

El proceso de volatilización es la pérdida de gas amoníaco desde el suelo bajo condiciones alcalinas, los iones amonio son convertidos a moléculas de amoníaco (NH₃) en solución las cuales después pueden ser liberadas a la atmósfera del suelo:



Este proceso es estrictamente químico y no hay intervención de microorganismos. La lixiviación del nitrato es el proceso por el cual el nitrato se pierde desde el suelo por flujo de masa a las aguas de drenaje. El nitrato no es adsorbido por las partículas del suelo a menos de que ellas generen cargas positivas (ejemplo, suelos ácidos de origen volcánico, y húmedos del trópico) (Portalfrutícola, 2017).

Estos procesos ocasionan la salida del N del sistema: la lixiviación de nitratos, la nitrificación y la desnitrificación, vía emisiones gaseosas de N₂O, NO y N₂, y la volatilización de NH₃ (Hayatsu *et al.*, 2008; Verhuls *et al.*, 2015).

Factores que determinan las emisiones de N₂O en el sistema silvopastoril

Dentro del SSP la mayor fuente de N₂O es debido a las excreciones de estiércol y de orina por parte de los animales a través de los cuales se eliminan entre el 75 y el 90% del N consumido por los animales en pastoreo (Li *et al.*, 2015). La nitrificación y desnitrificación están influenciados por factores climáticos: temperatura y precipitación y del suelo (características físicas y químicas).

La producción de N₂O por parte del suelo dependerá de la disponibilidad de los sustratos para ambos procesos: NH₄⁺ para el caso de nitrificación, y NO₃⁻ para la desnitrificación. Los reguladores en ambos procesos son: presión parcial del oxígeno, temperatura, pH, humedad del suelo, salinidad y manejo del suelo. En lo que se refiere a la humedad del suelo, cuando el porcentaje del espacio poroso lleno con agua se mantiene por debajo del 40%, el proceso dominante es la nitrificación. Por encima del 60-70%, se limita la difusión de oxígeno, dando lugar a la desnitrificación. La emisión de N₂O aumenta con la temperatura (Saggar *et al.*, 2004). Todos estos factores están regulados por el clima, la vegetación, y por las propiedades físicas y condiciones químicas del suelo (Matthews *et al.*, 2010).

El factor hidrológico es el que mayor control ejerce sobre la emisión de N₂O. Los picos de emisión generalmente coinciden con mayor precipitación (Brumme *et al.*, 1999). El contenido de agua del suelo está influenciado por las condiciones de difusión de oxígeno disponible, lo cual controla la cantidad de N₂O producido (Robertson y Tiedje, 1987).

Beneficios de la *Leucaena* en los sistemas silvopastoriles

De acuerdo a Peri *et al.* (2016) los SSP con *Leucaena* pueden ser más productivos, rentables y sostenibles que el cultivo forestal especializado o la producción animal basada sólo en pastoreo de pastos debido a que ofrecen los siguientes beneficios: interacciones ecológicas positivas a través del incremento en la producción por unidad de área, mejor eficiencia en el uso de recursos, provisión de servicios ambientales (captura de carbono, fijación de nitrógeno, reciclaje de nutrientes, conservación del suelo, provisión de refugio para el ganado y mejora del bienestar animal) y producción de madera. Los sistemas silvopastoriles al integrar árboles, forrajes y ganado se consideran una práctica de manejo agroforestal que mejora la fertilidad del suelo y que recupera pastos degradados (Apolinario *et al.*, 2016; Vandermeulen *et al.*, 2018). Estos sistemas debido a que intercalan árboles o arbustos con pastos, aumentan la biomasa, lo que permite el almacenamiento de carbono e intensifica el ciclo de nutrientes, y esta práctica de manejo promueve la conservación de la biodiversidad al proporcionar hábitats para diferentes organismos y especies (López-Santiago *et al.*, 2019; Sá *et al.*, 2017).

Lok *et al.* (2006) evaluaron durante dos años el comportamiento de indicadores de la estabilidad del suelo en un sistema silvopastoril con novillas lecheras basado en *Cynodon nlemfuensis* y una mezcla de especies arbóreas: *Lysiloma bahamensis*, *Leucaena leucocephala*, *Albizia falcataria*, *Gmelina arborea*, *Azadirachta indica* y *Erythrina misonensis* y reportaron que mejoraron la estabilidad estructural del suelo, las condiciones de retención de humedad y el estado de agregación de sus partículas, así como la diversidad biológica.

Báez *et al.* (2021) destacan la importancia de la valoración económica ambiental de los sistemas silvopastoriles, como instrumento para lograr el manejo sostenible e integral de todos los componentes que conforman el ecosistema ganadero, de modo que sea posible lograr su resiliencia. Identificaron seis funciones ambientales que se agruparon de acuerdo con la teoría del valor económico total (VET) en: valor de uso directo: producción de leche, valor de uso indirecto: retención de carbono, fijación de nitrógeno, fertilidad del suelo y calidad del suelo, valor opcional: energía renovable y biodiversidad.

Producción animal

López-Vigoa *et al.* (2017) mencionan que los SSP con *Leucaena* en ambientes tropicales de América Latina y el Caribe pueden sostener cargas de 2 a 5 UA/ha, este intervalo es una mejoría con respecto a praderas de gramíneas tropicales. El consumo de follaje de *Leucaena* entre 1.5 y 2.3 kg de MS animal/día promueven la productividad de bovinos sin riesgo de efectos negativos (López *et al.*, 2015). Otros estudios señalan que con el uso de la *Leucaena*, en un SSP, se registraron producciones de 14 a 17 kg de leche vaca/día y 3 360 a 4 080 kg de leche/lactancia e intervalo entre partos no mayor a 14 meses (Sierra *et al.*, 2017; Sierra-Montoya *et al.*, 2017); y en un SSP banco de proteína con *Leucaena*,

con acceso de 3 h por día, novillos mostraron GDP mayor en 377 g/novillo a la registrada en los novillos pastando una pradera de *Megathyrus maximus* (guinea). En sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi) gramíneas, leguminosas herbáceas y arbóreas con alta densidad (15 000 plantas/ha), la dieta ofrecida a bovinos, es de mejor calidad nutricional, al presentar mayor componente de leguminosas que de gramíneas, y se amplía la carga a 2.5 UA/ha y se reduce la oferta de forraje de 25-30 kg de MS/vaca/día (Hernández *et al.*, 2011). En Colombia bajo un SSPi con *Leucaena*, pasto estrella y árboles maderables, la cantidad de carne producida incrementó de 74 kg (peso vivo) ha/año a 1 060 kg/ha/año (Mahecha *et al.*, 2011). En México existen reportes de producción de carne de 456 kg/ha/año en pasturas mejoradas a 1 971 kg ha/año en un SSP con *L. leucocephala* (Sorlorio-Sánchez *et al.*, 2011).

Secuestro de carbono

Los SSP acumulan en el suelo carbono orgánico y recuperan el suelo. Contreras-Santos *et al.* (2020) evaluaron el potencial para incorporar carbono al suelo de cuatro sistemas silvopastoriles de diferente grado de complejidad estructural, frente a una pastura sin árboles (cuadro 1), en un sistema ganadero con carga animal de 4 animales/ha y densidad de 39 árboles/ha. Los resultados mostraron que en promedio los arreglos silvopastoriles presentaron una acumulación de carbono en el suelo que varía del 58.2 y 69.9% en comparación con el sistema tradicional. Esto demuestra los efectos benéficos de los SSP en el secuestro del carbono y representan una alternativa viable para mitigar los GEI, debido a su capacidad para capturar carbono atmosférico e inmovilizarlo en el suelo.

Lok *et al.* (2015) estudiaron el comportamiento del carbono almacenado en el suelo en tres tiempos y a diferente profundidad (0-15 cm, 15-30 cm, y 30-45 cm) de tres sistemas de pastizales: a) silvopastoril basado en *Megathyrus maximus* y *Leucaena leucocephala*; b) monocultivo de *Megathyrus maximus* y c) asociación de gramíneas con una mezcla de leguminosas rastreras. Además, reportan que a medida que se incrementó la profundidad de muestreo, en los tres sistemas, hubo tendencia a poseer valores menores de este indicador. Esto se relacionó con los contenidos de materia orgánica del suelo que disminuyen de manera natural con el incremento de la profundidad. Así mismo reportan que, con el aumento del tiempo de explotación, el sistema silvopastoril y el de mezcla de leguminosas incrementaron el carbono almacenado en el suelo (CAS) en la profundidad de 0 a 45 cm. En el primero de ellos fue de 54.4 a 65.3 t/ha, mientras que en el segundo varió de 50.6 a 60.4 t/ha. El sistema de monocultivo disminuyó el CAS, de 60.4 a 43.7 t/ha.

La utilización de *Leucaena leucocephala* en los SSP se maneja con éxito por el aporte nutricional, capacidad de fijación de nitrógeno, rápido crecimiento y adaptación al ramoneo; además, tiene efecto directo en la mitigación de las emisiones de N₂O del suelo (Murgueitio *et al.*, 2015). Sin embargo, existe escasa información que muestre que los sistemas silvopastoriles mitigan las emisiones de N₂O. En México no existen reportes de estudios realizados sobre la medición de la emisión de N₂O en sistemas silvopastoriles. Las emisiones de N₂O en los sistemas silvopastoriles pueden tener diferente origen siendo necesario conocer cuáles son las fuentes de emisión del N₂O en el sistema silvopastoril.

Cuadro 1
Carbono orgánico acumulado en el suelo (COS) en cuatro sistemas silvopastoriles en comparación con una pastura sin árboles

Sistema	t/ha de C
(Ps) Pastura sin árboles	38.30
(SSP1) Pastura + arbusto forrajero	65.10
(SSP2) Pastura + árboles forrajeros	60.60
(SSP3) Pastura + arbusto forrajero + árboles forrajeros	81.80
(SSP4) Pastura + arbusto forrajero + árboles forrajeros + árboles maderables	62.93

SSP1: Pasto establecido en los SSP; guinea (*Megathyrus maximus*) cv Mombasa; especies arbustivas: *leucaena* (*Leucaena leucocephala*) y totumo (*Crescentia cujete*); SSP2: especies arbóreas forrajeras: guácimo (*Guazuma ulmifolia*), cañafistula (*Cassia fistula*) y samán (*Albizia saman*); SSP3: SSP1 + SSP2; SSP4: árboles maderables: ceiba tolúa (*Pachira quinata*) y caoba (*Swietenia macrophylla*).

Fuente: Contreras Santos *et al.* (2020).

Fuentes de emisión del N₂O en el sistema silvopastoril

Las fuentes principales de emisión del N₂O en un sistema silvopastoril a continuación se analizan.

Microfauna del suelo

Los estudios sobre los beneficios ambientales de los sistemas silvopastoriles demostraron que las existencias de C y N del suelo y la calidad química del suelo mejoran (Shibu y Dollinger, 2019; Lira *et al.*, 2020), pero estudios sobre la influencia de estos sistemas sobre la estructura del suelo y la diversidad microbiana son escasos. La síntesis de amoníaco monooxigenasa se lleva a cabo por bacterias oxidantes de amoníaco (BOA) y en arqueas (AOA).

Se demostró que AOA y BOA coexisten en la mayoría de los suelos agrícolas, aunque la población BOA parece ser responsable de la emisión de N₂O de la nitrificación bajo altos suministros de nitrógeno (Di *et al.*, 2010; Duan *et al.*, 2017). La disminución en las reservas de C y nutrientes, y la calidad y cantidad de materia orgánica del suelo MOS posterior a los eventos de cosecha de biomasa pueden tener efectos adversos en la estructura, tamaño y función de las comunidades microbianas (Colombo *et al.*, 2016; Foote *et al.*, 2015). Las comunidades microbianas son consideradas reguladoras de los ciclos de nutrientes por su intervención en el proceso de descomposición y porque controlan la disponibilidad de éstos para la vegetación, mediante la inmovilización o mineralización (Falkowski *et al.*, 2008). Sin embargo, la elevación del N causa efectos directos sobre la fisiología microbiana y sobre la actividad enzimática, que potencialmente explicarían la disminución en la mineralización (Noormets *et al.*, 2014). Entre los microorganismos del suelo destacan las bacterias basadas en el ciclo del N relacionado con la fijación biológica del N (BNF) y la nitrificación, donde el nitrógeno atmosférico (N₂) es convertido en

amonio (NH_4) por microorganismos diazotróficos (Ashworth *et al.*, 2015) y nitrificantes que oxidan secuencialmente el NH_4 a NO_3^- (Canfield *et al.*, 2010).

Se sabe que la cobertura vegetal y el manejo y las características fisicoquímicas son los principales factores responsables de las variaciones en la comunidad microbiana del suelo (Paz-Ferreiro y Fu, 2016; Qu *et al.*, 2016). Cubillos *et al.* (2016) observaron diferencias significativas en las estructuras de la comunidad bacteriana total de suelo y de bacterias oxidantes de amoníaco entre el manejo silvopastoril con una leguminosa (*Prosopis juliflora*) y un pastizal monocultivo en Colombia. Barros *et al.* (2018) observaron que la introducción de las leguminosas *Gliricidia sepium* y *Mimosa caesalpinifolia* en un sistema silvopastoril con *Brachiaria decumbens* cambió la estructura de la comunidad bacteriana total del suelo y bacteriana oxidante de amoníaco y se produjo mayor abundancia de diazótrofos.

Macrofauna del suelo

El deterioro de la calidad del suelo es uno de los problemas más graves que experimentan los sistemas de producción agropecuaria en los últimos años, debido fundamentalmente a prácticas agrícolas inapropiadas. Los problemas más significativos en la conservación del suelo a escala global, según la FAO (2016), son la erosión, la pérdida del carbono orgánico y el desequilibrio de los nutrientes. La ganadería tradicional se caracteriza por utilizar aquellos suelos de menor valor productivo y, por tanto, en ellos las características citadas se incrementan (Lok, 2016). En este sentido, Veresoglu *et al.* (2015) plantearon que la biodiversidad del suelo también debe ser considerada como guardián de la seguridad alimentaria y de los servicios de los ecosistemas frente al cambio climático, debido a que propicia una estructura más compleja y mucho más resistente.

Entender las funciones de la macrofauna edáfica permite determinar su aporte a la sostenibilidad, lo que la convierte en un indicador importante a nivel de sistema. La biota edáfica desempeña un papel importante en los procesos biogeoquímicos del suelo en los sistemas silvopastoriles, y sus funciones incluyen: la descomposición de la hojarasca, el reciclaje de nutrientes, la síntesis y la mineralización de la materia orgánica y la modificación de la estructura del suelo, entre otras; ello influye en la integridad y en la productividad del sistema (Sánchez *et al.*, 2011).

Chávez-Suárez *et al.* (2016) destacan la importancia de algunas clases y órdenes en la transformación del suelo (*Annelida: Oligochaeta*), en la formación de poros (*Insecta: Hymenoptera, e Isopoda*) y en la trituración de restos vegetales (*Coleoptera, Diplopoda, Isopoda, Gastropoda*). Gutiérrez-Bermúdez *et al.* (2020) caracterizaron la composición trófica de la macrofauna del suelo en dos sistemas ganaderos convencionales y en dos sistemas silvopastoriles como banco de proteína (cuadro 2) y la diferencia entre sistemas estuvo marcada por el número de individuos encontrados en las familias *Formicidae* y *Termitidae* (4 150 y 2 126 individuos/m², respectivamente), las que representaron 54% del total de individuos presentes en el sistema silvopastoril. La composición de familias estuvo asociada a una funcionalidad relativa a cambios en la estructura del suelo, determinada por familias del grupo de ingenieros del suelo (*Formicidae, Termitidae, y Lumbricidae*). Le siguieron las que forman parte del gremio de depredadores (*Scolopendridae, Theraphosidae, Salticidae*, entre otras), lo que sugiere una presencia importante

de controladores biológicos en los SSP. La diferencia en la composición de las familias, en número como en la importancia de grupos funcionales entre sistemas, sugiere distintos niveles de activación biológica del suelo, con ventaja para el silvopastoril (Gutiérrez-Bermúdez *et al.*, 2020).

Cuadro 2

Clasificación taxonómica y rol trófico de la macrofauna edáfica de dos sistemas ganaderos: sistema ganadero convencional con gramíneas (SGC) y sistema silvopastoril (SSP) banco de proteína

Clase	Orden	Familia	Número de individuos		Rol trófico
			SGC	SSP	
<i>Clitellata</i>	<i>Haplotaxida</i>	<i>Lumbricidae</i>	144	768	Ingenieros
<i>Arachnida</i>	<i>Araneae</i>	<i>Salticidae</i>	75	227	Depredadores
		<i>Theraphosidae</i>	80	423	Depredadores
<i>Diplopoda</i>	<i>Scolopendromorpha</i>	<i>Scolopendridae</i>	102	522	depredadores
<i>Insecta</i>	<i>Blattodea</i>	<i>Blatellidae</i>	48	32	Ingenieros

Especies *Leucaena*, *Cratylia*, *Gliricidia*, *Guazuma* y *Moringa*.

Fuente: Gutiérrez-Bermúdez *et al.* (2020).

La fijación de nitrógeno

La fijación biológica del N, en el suelo, hace referencia a la reducción de nitrógeno a amonio, la cual es efectuada por la alianza simbiótica de bacterias de vida libre de los géneros *Bradyrhizobium*, *Rhizobium*, *Sinorhizobium*, *Mesorhizobium* y *Azorhizobium* con leguminosas (Fernández *et al.*, 2002). La presencia de leguminosas en los potreros tiene un efecto directo en la mitigación de las emisiones de N₂O del suelo al disminuir la disponibilidad de nitrato para la desnitrificación (Gallego-Castro *et al.*, 2014).

La leguminosa *Leucaena* puede fijar de 75 a 200 kilos de nitrógeno/ha/año permitiéndole buena adaptación aun en sitios con limitantes de nutrición y de humedad; es considerada como mejoradora de la fertilidad del suelo (González, 2018). Bueno y Camargo (2015) mencionan que los contenidos de N amoniacal y total en el suelo incrementan hasta 249.31 kg/ha/año de N en SSP de *Leucaena leucocephala* con densidad de 10 000 plantas/ha, donde la cantidad inicial de N total en el suelo antes de establecer *Leucaena* era de 88.86 kg/ha y en la semana 28, después de la siembra, los promedios de N en el suelo eran de 175 kg/ha y 162 kg/ha a 25 y 50 cm de profundidad, respectivamente, en el suelo, lo cual muestra que el sistema silvopastoril basado en leguminosas arbóreas aumenta el contenido de nitrógeno (N) del suelo por fijación biológica (Apolinario *et al.*, 2015); por lo tanto, es una actividad de conservación y de recuperación ambiental efectiva.

Las características fisicoquímicas (pH, humedad y temperatura) del suelo

La producción de N_2O en los suelos es un proceso complejo controlado directa e indirectamente por parámetros edafoclimáticos como el pH del suelo, la temperatura y el contenido de agua, la textura y estructura de los agregados del suelo (Liu *et al.*, 2015; Shi *et al.*, 2016). Las bajas temperaturas aumentan la acumulación de materia orgánica en el suelo, mientras que las altas ($25\text{ }^\circ\text{C}$) favorecen el crecimiento y el metabolismo microbiano de bacterias (desnitrificantes y nitrificantes), así como la mineralización de la materia orgánica (Braker *et al.*, 2010). Además, la compactación del suelo puede ocasionar también reducción de la biomasa de raíces y menor absorción de N, lo cual aumenta el potencial de pérdidas de N del ecosistema, a través de la lixiviación y desnitrificación.

Asimismo, las labores culturales de los suelos afectan algunos mecanismos de estabilización física de nutrientes en los agregados, porque dejan expuesta la materia orgánica del suelo (MOS) ocluida al ataque microbiano e incrementan la pérdida de nutrientes provocada por los procesos de descomposición y de mineralización (Jia *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2017).

El ganado: carga animal y excretas

En la ganadería de pastoreo existen grandes ingresos de nitrógeno al suelo en forma de excretas (heces y orina), debido al bajo aprovechamiento de las proteínas en el sistema digestivo de rumiantes (McSweeney *et al.*, 2001). La deposición de éstos en puntos de alta concentración de N en el suelo permite procesos de nitrificación y desnitrificación, lo que fácilmente se podría traducir en la pérdida de N como N_2O , principalmente el nitrógeno (N) procedente de la orina debido a su alta susceptibilidad a la degradación (Luo *et al.*, 2010).

Según el IPCC (2006), el total de N excretado por unidad animal (U.A), en Sudamérica, se estima en 162 g de N/día. Las emisiones directas de N_2O de las excreciones bovinas (heces y orina) equivalen al 2% del N presente en las excretas. Como emisiones directas, por cada kilo de N en forma de excreta depositada en el suelo, 20% se volatiliza y 30% se lixivía. Del 20% que se volatiliza, el 1% es emitido como N_2O y del 30% lixiviado, un 75% es emitido como N_2O (IPCC, 2006). Así, una UA/ha produce 59.13 kg N/ha/año como excretas; es decir, en forma directa se emiten 0.59 kg de N- N_2O o 0.93 kg N_2O /ha/año e indirectamente se emiten 0.25 kg de N- N_2O o 0.39 kg N_2O /ha/año. La emisión de N_2O por parte de los parches de orina se da gracias al aumento de nitrito, y puede ser explicada por la desnitrificación química, una reacción que ocurre entre compuestos menores de la orina (aminoácidos) y los constituyentes del suelo.

Las pérdidas de N como N_2O y otras formas como NO_3^- por lixiviación o NH_3 por volatilización, lo convierten en un nutriente limitante en los suelos agrícolas, además es probable que el N se encuentre en formas no disponibles para las plantas o que simplemente no se encuentre en el suelo, limitando el potencial productivo de los sistemas agropecuarios (Follet, 2001; Van Groenigen *et al.*, 2015).

Según Naranjo *et al.* (2012), conforme se aumenta la carga animal (UA/ha) de sistemas extensivos de praderas degradadas a sistemas silvopastoriles intensivos SPPI, los flujos de emisiones de N_2O debidas a heces y a orinas también aumentan pasando de 355.2 a 1 230 kg CO_2eq ha/año. Según Parra-Silva (2015), los flujos de las emisiones to-

tales en sistemas ganaderos de una zona Andina de Nariño, se vieron influenciados por la carga animal por hectárea.

La Leucaena leucocephala en los SSP

Naranjo *et al.* (2012) evaluaron, en Colombia, las emisiones de óxido nitroso en SSPi intensivos con *Leucaena*, donde tomaron tres escenarios de referencia (cuadro 3). El sistema silvopastoril intensivo con *Leucaena* de más de 10 000 plantas/ha y el sistema silvopastoril intensivo + maderable (500 árboles/ha de *Eucalyptus*) presentaron mayores emisiones de N₂O (1 230.0 CO₂eq ha/año) relacionado con heces y orina excretada por animales en pastoreo.

Para construir una base de datos global de flujos de emisiones de N₂O se necesitan mediciones extensas y confiables de las emisiones de N₂O en las condiciones diferentes de suelos, así como el manejo de cultivos. Ésta es esencial para probar y desarrollar modelos de emisión. Esta información también ayudará a mejorar los inventarios y a desarrollar estrategias de mitigación con el objetivo de reducir la liberación N₂O a la atmósfera (Longoria-Ramírez *et al.*, 2003).

Cuadro 3

Emisiones de N₂O en los diferentes escenarios de pastoreo de referencia

Fuente	Escenario de pastoreo de referencia							
	PD	%	PM	%	SSPi	%	SSPi + Maderable	%
Fertilización con N sintético (200 kg N/ha/año)	0	0	876.9	13.3	0	0	0	0
Fijación biológica de N	0	0	0	0	876.9	11.0	876.9	11.0
Heces y orina	355.2	17.0	961.1	14.9	1 230.0	15.0	1 230.0	15.0

PD=Pasturas degradadas (pasturas nativas, productividad de biomasa de 7.0 t/MS/ha/año y carga animal/ha de 0.85 UA [UA=450 kg peso]); PM= pasturas mejoradas (productividad vegetal máxima de 19.2 t MS/ha/año y fertilización anual de 200 kg N/ha/año y 2.3 UGG/ha); SSPi=Sistema silvopastoril intensivo (densidad de más de 10 000 plantas /ha con *Leucaena*, asociada con pastos mejorados de alta producción de biomasa (20 t MS/ha/año) bajo pastoreo rotacional intensivo); SSPi + maderable= (igual que el SSPi, con 500 árboles maderables/ha de *Eucalyptus tereticornis*).

Fuente: Naranjo *et al.* (2012).

Métodos de medición del GEI óxido nitroso en suelos agrícolas

La precisión de las mediciones de GEI es crucial para actualizar y para mejorar los actuales inventarios de gases de efecto invernadero que cada país necesita para desarrollar su plan de mitigación y reducción de emisiones. La metodología para la medición de GEI *in situ* se divide en dos técnicas, que son las más usadas: técnicas basadas en cámaras dinámicas que integran un analizador de gases y sofisticado sistema automatizado que minimiza los errores de muestreo, sin embargo, los costos de operación las hacen menos accesibles; y cámaras estáticas cerradas, que poseen un diseño de bajo costo, sencillo y

práctico para trabajo en campo y las técnicas basadas en herramientas micro meteorológicas o Eddy Covarianza y como complemento de modelación ambiental (Alfaro y Muñoz, 2012; Jones *et al.*, 2011).

El uso de cámaras estáticas de medición de GEI puede emplearse para estimar el efecto en las emisiones del uso de distintas alternativas de fertilización orgánica e inorgánica o de sistemas de pastoreo tradicionales o como el SSPi. Estas cámaras se insertan en el suelo, y a través de un sistema de cierre hermético y jeringas colectoras permiten tomar muestras de aire en periodos de tiempo determinados, evaluando así la acumulación de los GEI (figura 3 [Alfaro y Muñoz, 2012]).

Procesos que mitigan o inhiben la producción de N₂O

Durango *et al.* (2017) mencionan que la mitigación de la producción de los gases de efecto invernadero representa un reto para la actividad agrícola en todo el mundo, para lo cual se depositan los mayores esfuerzos en la búsqueda de estrategias para reducir dichas emisiones que van encaminadas directamente hacia un manejo adecuado de las praderas hacia el mejoramiento de la calidad de los pastos, así como diseñar prácticas que mejoren las condiciones físico-químicas del suelo, ya que éstos son factores claves para la sostenibilidad dentro de los sistemas agropecuarios. Existen varias opciones de manejo que posibilitan la mitigación de la emisión de N₂O por parte de las pasturas destinadas al pastoreo, como el uso de inhibidores de los procesos de producción de N₂O, uso de fertilizantes de lenta liberación y manejo del pastoreo (Singurindy *et al.*, 2009).

Figura 3

Cámaras estáticas empleadas para la determinación de las emisiones de GEI en praderas:

A) cámara abierta.

B) cámara cerrada durante el muestreo



Fuente: Alfaro y Muñoz (2012).

Reflexión final

Entre los beneficios de la *Leucena leucocephala* en los suelos de los sistemas silvopastoriles destacan la mayor acumulación de carbono orgánico en el suelo y la mayor activación biológica debido al rol trófico de la macrofauna edáfica. En los animales es claro que mejoran la producción de carne y de leche, al ofrecer una dieta diversa y rica en nutrientes, principalmente proteína. Así, es importante señalar la necesidad de desarrollar investigaciones futuras bajo un enfoque transdisciplinario e integral para abordar la problemática de la emisión de GEI, y del óxido nitroso en los sistemas ganaderos.

Sin embargo, también es importante considerar que en los sistemas silvopastoriles con *Leucaena* bajo pastoreo de ganado vacuno existen fuentes de emisión de N_2O , debido a los grandes ingresos de nitrógeno al suelo en forma de excretas (heces y orina), ocasionado por el bajo aprovechamiento de las proteínas en el sistema digestivo de rumiantes. La deposición de estos puntos (mancha de orina) de alta concentración de N en el suelo permite procesos de nitrificación y desnitrificación, lo que se traduce en la pérdida de N como de N_2O . En esta revisión se documentó que, al aumentar la carga animal en los SSPi, los flujos de emisión de N_2O , debido a heces y a orina, incrementan. Así mismo los SSPi con más de 10 000 plantas/ha utilizados con animales en pastoreo presentan mayor emisión de N_2O relacionado con heces y orina. Existen varias opciones de manejo de los sistemas silvopastoriles que posibilitan la mitigación de la emisión de N_2O por parte de las pasturas destinadas al pastoreo.

Estas estrategias se enfocan en los diferentes procesos del sistema silvopastoril: nutrición animal, sistema de pastoreo: rotacional y disminución de horas de pastoreo en arreglos en bancos de proteína. Control de las horas de consumo animal en pradera de alta densidad de plantas leguminosas (>10 000 árboles leguminosos/ha) y el uso de inhibidores de los procesos de producción de N_2O .

Pero es necesario realizar mediciones extensas y confiables de las emisiones de N_2O para construir una base de datos de los flujos de emisión de los sistemas silvopastoriles con *Leucaena leucocephala* y crear inventarios regionales, bajo condiciones diferentes de suelos, de clima, densidades de árboles, arreglos de árboles en el sistema, así como del manejo. Esta información también ayudará a mejorar los inventarios y a desarrollar estrategias de mitigación con el objetivo de reducir la liberación N_2O a la atmósfera.

Aspectos destacados

1. Se analizan los mecanismos de formación del GEI N_2O en el suelo de los sistemas silvopastoriles pastoreados por bovinos.
2. Se revisan los factores que determinan las emisiones de N_2O en el sistema silvopastoril y las fuentes de emisión.
3. Se nombran las técnicas de medición del GEI N_2O , para obtener referentes y/o factores de emisión en estos sistemas.

Literatura citada

- Alfaro, M. y Muñoz, C. (2012). Ganadería y gases de efecto invernadero. Informativo. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. INIA Remehue. http://puntoganadero.cl/imagenes/upload/_5cc08150d1724.pdf
- Apolinário, V.X.O.; Dubeux, J.C.B.; Lira, M.A.; Ferreira, R.L.C.; Mello, A.C.L.; Coelho, D.L.; Muir, J.P. y Sampaio, E.V.S.B. (2016). Decomposition of arboreal legume fractions in a silvopastoral system. *Crop Science*. 56: 1356–1363. DOI: 10.2135/cropsci2015.09.0588
- Apolinário, V.X.O.; Dubeux, J.C.B.; Lira, M.A.; Ferreira, R.L.C.; Mello, A.C.L.; Santos, M. V.F.; Sampaio, E.V.S.B. y Muir, J.P. (2015). Tree legumes provide marketable wood and add nitrogen in warm-climate silvopasture systems. *Agronomy Journal*. 107: 1915–1921. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0624>
- Ashworth, A.J.; West, C.P.; Allen, F.L.; Keyser, P.D.; Weiss, S.A.; Tyler, D.D.; Taylor, A. M.; Warwick, K.L. y Beamer, K.P. (2015). Biologically fixed nitrogen in legume intercropped systems: comparison of nitrogen-difference and nitrogen-15 enrichment techniques. *Agronomy Journal*. 107: 2419–2430. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0639>
- Báez, N.; Lok, S. & Gómez C. (2021). Determinación del valor económico ambiental de una lechería típica tropical de Mayabeque, Cuba. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 55 (2). <http://www.cjascience.com/index.php/CJAS/article/view/1012>
- Barbera, A.C.; Vymazal, J. y Maucieri, C. (2018). Greenhouse Gases Formation and Emission. Encyclopedia of Ecology (Second Edition). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10895-4>
- Barros, F.M. do R.; Fracetto, G.G.M.; Fracetto, F.J.C.; Mendes, J.J.P.; Araújo, V.L.V.P. De. y Lira, J.M.A. (2018). Silvopastoral systems drive the nitrogen-cycling bacterial community in soil. *Cienc. Agrotec.* 42(3): 281–290. <https://doi.org/10.1590/1413-70542018423031117>
- Braker, G.; Schwarz, J. y Conrad, R. (2010). Influence of temperature on the composition and activity of denitrifying soil communities. *Federation of European Microbiological Societies*. 73(1): 134–148. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00884.x>
- Brumme, R.; Borcken, W. y Finke, S. (1999). Hierarchical control on nitrous oxide emission in forest ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*. 13(4): 1137–1148. <https://doi.org/10.1029/1999GB900017>
- Bueno, L.L. y Camargo, G.J. (2015). Nitrógeno edáfico y modulación de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit en sistemas silvopastoriles. *Acta Agronómica*. 64(4): 349–354. <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n4.45362>
- Canfield, D.E.; Glazer, A.N. y Falkowski, P.G. (2010). The evolution and future of earth's nitrogen cycle. *Science*. 330: 192–196. <https://doi.org/10.1126/science.1186120>
- Chávez-Suárez, L.; Labrada, H.Y. y Álvarez, F.A. (2016). Macrofauna del suelo en ecosistemas ganaderos de montaña en Guisa, Granma, Cuba. *Pastos y Forrajes*. 39(3): 111–115. <https://www.redalyc.org/pdf/2691/269148030005.pdf>
- Colombo, F.; Macdonald, C.A.; Jeffries, T.C.; Powell, J.R. y Singh, B.K. (2016). Impact of forest management practices on soil bacterial diversity and consequences for soil processes. *Soil Biology and Biochemistry*. 94: 200–210. doi: 10.1016/j.soilbio.2015.11.029
- Contreras-Santos, J.L.; Martínez-Atencia, J.; Cadena-Torres, J. y Falla-Guzmán, C.K. (2020). Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del caribe colombiano. *Agronomía Costarricense*. 44(1): 29–41. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/39999/40540>
- Cubillos, A.M.; Vallejo, V.E.; Arbeli, Z.; Terán, W.; Dick, R.P.; Molina, C.H.; Molina, E. y Roldan, F. (2016). Effect of the conversion of conventional pasture to intensive silvopastoral systems on edaphic bacterial and ammonia oxidizer communities in Colombia. *European Journal of Soil Biology*. 72: 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.12.003>
- Di, H.J.; Cameron, K.C.; Sherlock, R.R.; Shen, J.P.; He, J.Z. y Winefield, C.S. (2010). Nitrous oxide emissions from grazed grassland as affected by a nitrification inhibitor, dicyandiamide, and relationships with ammonia-oxidizing bacteria and archaea. *Journal of Soils and Sediments*. 10: 943–954 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11368-009-0174-x>
- Duan, Y.F.; Kong, X.W.; Schramm, A.; Labouriau, R.; Eriksen, J. y Petersen, S.O. (2017). Microbial N transformations and N₂O emission after simulated grassland cultivation: effects of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP). *Appl. Environ. Microbiol.* 83(1): doi: 10.1128/AEM.02019-16

- Durango, S.; Gaviria, X.; Gonzalez, R.; Sotelo, M.; Gutierrez, J.; Chirinda, N.; Arango, J. y Barahona, R. (2017). Iniciativas de mitigación al cambio climático en sistemas de producción de carne bovina en países tropicales. CCAFS Info Note. Copenhagen, Denmark: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).
- Falkowski, P.G.; Fenchel, T. y Delong, E.F. (2008). The microbial engines that drive earth's biogeochemical cycles. *Science*. 320(5879): 1034 –1039. doi: 10.1126/science.1153213
- FAO (2016). Estado mundial del recurso suelo. Resumen Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- FAO (2018). Soluciones ganaderas para el cambio climático. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/I8098ES/i8098es.pdf>
- FAO (2019). GLEAM 2.0 - Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y su potencial de mitigación. Modelo de Evaluación Ambiental de la Ganadería Mundial (GLEAM). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/gleam/results/es/>
- Fernández, P.M.; Nuria de, M. y de Felipe, M. R. (2002). Fijación biológica del nitrógeno: factores limitantes. Ciencia y Medio Ambiente - Segundas jornadas científicas sobre medio ambiente del CCMA- CSIC.
- Follet, R.F. y Hatfield J.L. (2001). Nitrogen in the Environment: Sources, Problems, and Management. In Optimizing Nitrogen Management in Food and Energy Production and Environmental Protection: Proceedings of the 2nd International Nitrogen Conference on Science and Policy. *TheScientificWorld*, 1: 920-926. DOI 10.1100/tsw.2001.269
- Foote, J.A.; Boutton, T.W. y Scott, D.A. (2015). Soil C and N storage and microbial biomass in US southern pine forests: Influence of forest management. *Forest Ecology and Management*. 355: 48–57. doi: 10.1016/j.foreco.2015.03.036
- Gallego-Castro, L.A.; Mahecha-Ledesma, L. y Angulo-Arizala, J. (2014). Potencial forrajero de *Tithonia diversifolia* Hemsl. A Gray en la producción de vacas lecheras. *Agronomía Mesoamericana*. 25(2): 393-403. DOI 10.15517/am.v25i2.15454
- González, M. (2018). Leguminosas arbóreas para optimizar la producción de leche y carne. Zootecnia y Veterinaria es mi Pasión. <https://zoovetespasion.com/pastos-y-forrajes/leguminosas-arboreas-para-optimizar-la-produccion-de-leche-y-carne/> (Consultado 8 diciembre 2018).
- Gutiérrez-Bermúdez, C.C.; Mendieta-Araica, B.G. y Noguera-Talavera, Á. (2020). Composición trófica de la macrofauna edáfica en sistemas ganaderos en el corredor seco de Nicaragua. *Pastos y Forrajes*. 43(1): 32-40. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S086403942020000100032&lng=en.
- Hayatsu, M.; Tago, K. y Saito, M. (2008). Various players in the nitrogen cycle: Diversity and functions of the microorganisms involved in nitrification and denitrification. *Soil Science and Plant Nutrition*. 54(1): 33-45. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00195.x>
- Hernández, D.; Carballo, M. y Reyes, F. (2011). *Manejo racional de una multisociación árboles-pastos*. En: Milagros Milera, ed. André Voisin. Experiencia y aplicación de su obra en Cuba. Matanzas, Cuba: EEPF Indio Hatuey. Pp. 513-535.
- INECC (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015. Resumen Informativo. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Ciudad de México, México.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2006). Agriculture, Forestry and Other Land Use. En H.S. Eggleston, L. Buendía, L.K. Miwa, T. Ngara y K. Tanabe (eds). Hayama, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japón: The Intergovernmental Panel on Climate Change. Institute for Global Environmental Strategies (Iges). 595p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2013). Cambio climático 2013 - La base de las ciencias físicas: Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: 10.1017 / CBO9781107415324
- Jia, J.; Yu, D.; Zhou, W.; Zhou, L.; Bao, Y.; Meng, Y. y Dai, L. (2015). Variations of soil aggregates and soil organic carbon mineralization across forest types on the northern slope of Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*. 35(2): 1–7. doi: 10.1016/j.chnaes.2014.03.008
- Jones, S.K.; Famulari, D.; Di Marco, C.F.; Nemitz, E.; Skiba, U.M.; Rees, R.M. y Sutton, M.A. (2011). Nitrous oxide emissions from managed grassland: a comparison of eddy covariance and static chamber

- measurements. *Atmos. Meas. Tech.* 4(10): 2179-2194. <https://doi.org/10.5194/amt-4-2179-2011>, 2011
- Li, J.; Luo, J.; Shi, Y.; Houlbrooke, D.; Wang, L.; Lindsey, S. y Li, Y. (2015). Nitrogen gaseous emissions from farm effluent application to pastures and mitigation measures to reduce the emissions: a review. *New Zealand Journal of Agricultural Research.* 58(3): 339–353. <http://dx.doi.org/10.1080/00288233.2015.1028651>
- Lira, M.A.; Nascimento, L.R. y Fracetto, G.G. (2015). Legume-rhizobia signal exchange: promiscuity and environmental effects. *Front. Microbiol.* 6: 945. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00945>.
- Liu, R.; Hayden, H.; Suter, H.; He, J. y Chen, D. (2015). The effect of nitrification inhibitors in reducing nitrification and the ammonia oxidizer population in three contrasting soils. *J. Soils Sediments.* 15: 1113–1118. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1086-6>
- Lok, S.; Crespo, G.; Frometa, E. y Fraga, S. (2006) Estudio de indicadores de estabilidad del pasto y el suelo en un sistema silvopastoril con novillas lecheras. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola.* 40(2): 229-239. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193017714014>
- Lok, M.S. (2016). Soils dedicated to cattle rearing in Cuba: Characteristics, management, opportunities and challenges. En *Cuban Journal of Agricultural Science.* 50(2): 279-290. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttextypid=S207934802016000200013yIngl=esyIngl=en
- Lok, S.; Díaz, J.; Crespo, G. & Torres, V. (2015). “Servicios ambientales generados por la aplicación de tecnologías ganaderas en sistemas agropecuarios tropicales”. In: VIII Congreso de la Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo, La Habana, Cuba: Instituto de Suelos, Ministerio de la Agricultura y Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo, ISBN: 978-959-296-039-8.
- Longoria-Ramírez, R.; Carbajal-Benítez, G.; Mar-Morales, B.E. y Ruíz-Suárez, G. (2003). Nitrous oxide flux in maize and wheat cropped soils in the central region of Mexico during “El Niño” year 1998. *Atmósfera.* 16(4): 231-244. <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8515/7985>
- López, O.; Lamela, L.; Montejo, L.L. y Sánchez, T. (2015). Influencia de la suplementación con concentrado en la producción de leche de vacas Holstein x Cebú en silvopastoreo. *Pastos y Forrajes.* 38(1): 46-54. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269138824005>
- López-Santiago, J.G.; Casanova-Lugo, F.; Villanueva-López, G.; Díaz-Echeverría, V.F.; Solorio-Sánchez, F.J.; Martínez-Zurimendi, P.; Aryal, D.R. y Chay-Canul, A.J. (2019). Carbon storage in a silvopastoral system compared to that in a deciduous dry forest in Michoacán, Mexico. *Agroforest. Syst.* 93: 199–211. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0259-x>
- Lopez-Vigoa, O.; Sánchez-Santana, T.; Iglesias-Gómez, J.M.; Lamela-López, L.; Soca-Pérez, M.; Arece-García, J. y Milera-Rodríguez, M. de la C. (2017). Los sistemas silvopastoriles como alternativa para la producción animal sostenible en el contexto actual de la ganadería tropical. *Pastos y Forrajes.* 40(2): 83-95. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttextypid=S0864-03942017000200001yIngl=esyIngl=iso
- Luo, J.; de Klein, C.A.M.; Ledgard, S.F. y Saggar, S. (2010). Management options to reduce nitrous oxide emissions from intensively grazed pastures: a review. *Agriculture Ecosystems y Environment.* 136(3-4): 282-291. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.12.003>
- Mahecha, L.; Murgueitio, M.; Angulo, J.; Olivera, M.; Zapata, A.; Cuartas, C.A.; Naranjo, J.F., y Murgueitio, E. (2011). Desempeño animal y características de la canal de dos grupos raciales de bovinos doble propósito pastoreando en sistemas silvopastoriles intensivos. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias.* 24: 470.
- Matthews R.A.; Chadwick, D.R.; Retter A.I.; Blackwell, M.S.A. y Yamulki, B. (2010). Nitrous oxide emissions from small scale farmland features of UK livestock farming systems. *Agriculture, Ecosystems y Environment.* 136: 192-198. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.11.011>
- McSweeney, C.S.; Palmer, B.; McNeill, D.M. y Krause, D.O. (2001). Microbial interactions with tannins: nutritional consequences for ruminants. *Animal Feed Science and Technology.* 91(2): 83-93. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00232-2](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00232-2)
- Murgueitio, E.; Flores, M.; Calle, Z.; Chará, J.; Barahona, R.; Molina, C. y Uribe, F. (2015). Productividad en sistemas silvopastoriles intensivos en América Latina. Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H. y Eibl, B. (eds.), *Sistemas Agroforestales. Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales. Serie Técnica.* Informe Técnico 402. Editorial CIPAV. Cali, Colombia. Pp. 59-101.

- Naranjo, J.F.; Cuartas, C.A.; Murgueitio, E.; Chará, J. y Barahona, R. (2012). Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* en Colombia. *Livestock Research for Rural Development*. 24(8).
- Noormets, A.; Epron, D.; Domec, J.C.; McNulty, S.G.; Fox, T.; Sun, G. y King, J.S. (2014). Effects of forest management on productivity and carbon sequestration: A review and hypothesis. *Forest Ecology and Management*. 355: 124–140. doi: 10.1016/j.foreco.2015.05.019
- Parra-Silva, A. (2015). Greenhousegas balance in the conversion from extensive pasture to other agricultural systems in Andean region of Colombia. *Environment Development and Sustainability*. 21(4): 1-14. DOI: 10.1007/s10668-017-0034-6
- Paz-Ferreiro, J. y Fu, S. (2016). Biological indices for soil quality evaluation: perspectives and limitations. *Land Degradation y Development*. 27(1): 14–25. <https://doi.org/10.1002/ldr.2262>
- Peri, P.L.; Dube, F. y Varella, A. (2016). Silvopastoral systems in the subtropical and temperate zones of South America: An overview. En: Peri, P.L., Dube, F. y Varella, A. (eds.), *Silvopastoral Systems in Southern South America*. Chapter 1, Advances in Agroforestry. Springer International Publishing, Switzerland. Pp 1–8.
- Portalfruticola (2017). El ciclo del nitrógeno en el suelo y su importancia en la fertilización vegetal. <https://www.portalfruticola.com/noticias/2017/10/23/el-ciclo-del-nitrogeno-en-el-suelo-y-su-importancia-en-la-fertilizacion-vegetal/> (Consultado 15 febrero 2021).
- Qu, T.; Du, W.; Yuan, X.; Yang, Z.; Liu, D.; Wang, D. y Yu, L. (2016). Impacts of grazing intensity and plant community composition on soil bacterial community diversity in a steppe grassland. *PLoS One*. 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159680>
- Robertson, G.P. y Tiedje, J.M. (1987). Nitrous oxide sources in aerobic soils: nitrification, denitrification and other biological processes. *Soil Biology and Biochemistry*. 19(2): 187-193. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90080-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90080-0)
- Rochette, P. y Janzen, H.H. (2005). Towards a Revised Coefficient for Estimating N₂O Emissions from Legumes. En *Nutr Cycl Agroecosyst*. 73: 171–179. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-0357-9>
- Sá, J.C. de M.; Lal, R.; Cerri, C.C.; Lorenz, K.; Hungria, M. y de Faccio Carvalho, P.C. (2017). Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environ. Int*. 98: 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.020>
- Saggar, S.; Andrew, R.; Tate, K.; Hedley, C.; Rodda, N. y Townsend, A. (2004). Modelling nitrous oxide emissions from New Zealand dairy grazed pastures. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 68(3): 243-255. <https://doi.org/10.1023/B:FRES.0000019463.92440.a3>
- Saggar, S.; Jha, N.; Deslippe, J.; Bolan, N.S.; Luo, J.; Giltrap, D.L. y Tillman, R.W. (2013). Denitrification and N₂O: N₂ production in temperate grasslands: Processes, measurements, modelling and mitigating negative impacts. *Science of the Total Environment*. 465(1): 173-195. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.11.050
- Sánchez, S.; Milera, M.; Hernández, M.; Crespo, G. y Simón, L. (2011). La macrofauna y su importancia en los sistemas de producción ganaderos. En Milagros Milera, André Voisin (ed.), *Experiencia y aplicación de su obra en Cuba*. Matanzas, Cuba: EEPF Indio Hatuey. Pp. 316-348.
- Shi, X.; Hu, H.; He, J.; Chen, D. y Suter, H. (2016). Effects of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on nitrification and the abundance and community composition of soil ammonia oxidizers in three land uses. *Biol Fertil Soils*. 52: 927–939. <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1131-7>
- Shibu, J. y Dollinger, J. (2019). Silvopasture: a sustainable livestock production system. *Agroforestry Systems*. 93: 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00366-8>
- Sierra, M.E.; Chará, J.D. y Barahona-Rosales, R. (2017). The nutritional balance of early lactation dairy cows grazing in intensive silvopastoral systems. *Ciência Animal Brasileira*. 18: 1-12. <http://dx.doi.org/10.1590/1089-6891v18e-40419>
- Sierra-Montoya, E.; Barahona-Rosales, R. y Ruiz-Cortés, Z.T. (2017). Reproductive behavior of crossbred dairy cows grazing an intensive silvopastoral system under tropical dry forest conditions. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*. 69(1): 1-9. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4162-8712>
- Singurindy, O.; Molodovskaya, M.; Richards, B.K. y Steenhuis, T.S. (2009). Nitrous oxide emission at low temperatures from manure-amended soils under corn (*Zea Mays* L.). *Agriculture Ecosystems y Environment*. 132(1): 74-81. DOI: 10.1016/j.agee.2009.03.001
- Solorio-Sánchez, F.J.; Bacab-Pérez, H.M. y Ramírez-Avilés, L. (2011). Sistemas silvopastoriles intensivos: Investigación en el Valle de Tepalcatepec, Michoacán. En Xóchitl-Flores, M., Solorio-Sánchez, B.

- (eds.), *Establecimiento de sistemas silvopastoriles intensivos para la producción de leche y carne en el trópico de México*. Primera etapa del proyecto estratégico de prioridad nacional. SAGARPA, Fundación Produce Michoacán, COFUPRO, UADY, Morelia, México, 15 p.
- Sotelo, M.; Gutiérrez, J.F.; Hincapié, B. y Arango, J. (2017a). La base de la ganadería sostenible. Los sistemas silvopastoriles son una de las estrategias para frenar la expansión de la frontera agropecuaria y disminuir la tasa de deforestación en los bosques a nivel mundial. *Revista Productor Agropecuario*. 72: 60–62.
- Sotelo, M.; Suárez, S.J.; Álvarez, C.F.; Castro N.A.; Calderón, S.V. y Arango, J. (2017b). Sistemas sostenibles de producción ganadera en el contexto amazónico - Sistemas silvopastoriles: ¿una opción viable? Publicación CIAT No. 448. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. <http://hdl.handle.net/10568/89088>
- Van Groenigen, J.W.; Huygens, D.; Boeckx, P.; Kuyper, T.W.; Lubbers, I.M.; Rütting, T. y Groffman, P.M. (2015). The soil N cycle: new insights and key challenges. *Soil*. 1: 235-256. doi:10.5194/soil-1-235-2015
- Vandermeulen, S.; Ramírez-Restrepo, C.A.; Beckers, Y.; Claessens, H. y Bindelle, J. (2018). Agroforestry for ruminants: a review of trees and shrubs as fodder in silvopastoral temperate and tropical production systems. *Anim. Prod. Sci.* 58: 767–777. <https://doi.org/10.1071/AN16434>
- Veresoglou, S.D.; Halley, J.M. y Rillig, M.C. (2015). Extinction risk of soil biota. *Nature Communications*. 6(1). doi:10.1038/ncomms9862
- Verhulst, N.; Grahmann, K.; Cox, R. y Govaerts, B. (2015). Eficiencia del uso de nitrógeno y optimización de la fertilización nitrogenada en la agricultura de conservación. CIMMYT; MasAgro. <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/4411/56988.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Wu, X.; Wei, Y.; Wang, J.; Wang, D.; She, L.; Wang, J. y Cai, C. (2017). Effects of soil physicochemical properties on aggregate stability along a weathering gradient. *CATENA*. 156: 205–215. doi: 10.1016/j.catena.2017.04.017

V. Adaptación y mitigación-tecnologías agrosilvopastoriles

V.1. Tecnología agrosilvopastoril basada en *Cocos nucifera* L + *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit + *Cenchrus purpureus* Cuba 115 en pastoreo con bovinos

José Manuel Palma García^{1*}
José María Anguiano Cárdenas²
Wilberth Chan Cupul¹

¹Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias - Universidad de Colima, México.

²AGROTESO - Colima, México.

*Autor de correspondencia: palma@uacol.mx

Introducción

El cultivo de cocotero (*Cocos nucifera* L.) tiene amplio reconocimiento a nivel mundial, dada su rentabilidad y debido a la demanda de sus productos, así como a la posibilidad de su utilización no sólo como alimentos, sino con diferentes opciones en la industria, en la agricultura y en la ganadería.

Los principales productores de cocotero en el mundo, basados en el ranking de 2018, son: Indonesia 18.30 millones tm, Filipinas 15.35 millones tm, India 11.93 millones tm, le siguen Brasil, Sri Lanka, Vietnam, Papúa Nueva Guinea, México, Tailandia y Malasia. En el caso de México, nuestro país ocupa la octava posición con 1.06 millones tm, lo que significa que tienen de 11 a 18 veces menos producción que los países asiáticos, respecto a México, ello, en diferentes momentos, impacta negativamente en la producción y economía local (STATISTA, 2019).

El cocotero, en México, mayoritariamente se destina al mercado nacional, aunque con un creciente mercado de exportación y con un área cultivada que se redujo de manera importante al pasar en la última década de 200 000 ha a 80 000 ha en 12 estados del país, aunque con incremento en su rendimiento, a pesar de que es posible llegar a tener en producción 300 000 ha, en donde los estados con mayor producción son Guerrero, Colima, Michoacán y Oaxaca (SAGARPA, 2017).

El sistema dominante es el monocultivo que sufre embates de precios por competencia internacional y por la presencia de diferentes enfermedades (SAGARPA 2017), como el amarillamiento letal del cocotero, de plagas que amenazan este cultivo como el *Rhynchophorus palmarum* L. (Coleoptera: Curculionidae) que se alimentan de la palma con efectos letales y con la transmisión del nematodo *Rhadinaphelenchus* (*Bursaphelenchus cocophilus* Cobb. [Tylenchida: Aphelenchoididae]) causante del anillo rojo que también provoca su muerte, y que en particular afecta a los cocotereros jóvenes (Pinho *et al.*, 2016), además de la presencia del escarabajo rinoceronte *Oryctes rhinoceros* L. (Coleoptera: Scarabaeidae) (Jiménez *et al.*, 2017). En el aspecto productivo, en la ac-

tualidad existen condiciones de oportunidad de exportación y condiciones excelentes de precio, todo ello en un contexto social dominado por productores de pequeña escala con entre 4 a 10 ha y en donde más del 50% rebasan los 50 años de edad.

El esquema de plantación es variable según el ecotipo; de esta forma, el tipo enano de 7 m entre árboles (235 plantas/ha), el híbrido de 8 m entre árboles (180 plantas/ha) y el alto de 8.5 m entre árboles (160 plantas/ha), permiten espacios que pueden ser aprovechados para el desarrollo de sistemas agroforestales en donde, en dependencia del arreglo en tiempo y en espacio, se presentan múltiples combinaciones con cultivos agrícolas como maíz, frijol, sorgo, con otros frutales (papaya, mango, banano, limón, entre otros), y con ganado. En muchos casos estos esquemas son iniciativas desarrolladas por los productores.

Por ello, el presente capítulo tiene por objetivo evidenciar las ventajas logradas en mitigación al cambio climático mediante la implementación de la tecnología agrosilvopastoril basada en *Cocos nucifera* + *Leucaena leucocephala* + *Cenchrus purpureus* Cuba cv. CT-115 con bovinos en sistema de doble propósito en pastoreo rotacional.

Adaptación y mitigación al cambio climático

El cambio climático es definido como cualquier cambio en el 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 durante periodos de tiempo comparables, es tangible y es un reto de la humanidad, con efectos adversos de tipo aleatorio, irregulares y, a veces, sorprendidos, que responden a una dinámica de corto y de mediano plazo, que se incrementarán y que, en dependencia de su naturaleza, las afectaciones serán en diferente escala organizativa, desde la función biológica de un individuo hasta las estructuras socioeconómicas (IPCC, 2014).

Dada la presión del crecimiento humano que acentúa el cambio climático, es impostergable sumar esfuerzos en todos los sectores para mantener el calentamiento global por debajo de 2 °C, en una tierra que se está cultivando para alimentar a la población pero que de manera simultánea permita velar por la conservación y por la restauración de los ecosistemas y de la biodiversidad, aunque existe mayor presión en zonas y en países vulnerables, entre ellas las zonas áridas y tropicales, así como en países de África, de Asia, y de América Latina y el Caribe (IPCC, 2019).

Ante este escenario la agroforestería se plantea como una opción importante para enfrentar el cambio climático. Considera la presencia de árboles o de plantas similares en las tierras utilizadas con cultivos agrícolas y/o con ganadería. Es una ciencia, cultura y arte, en donde existen conocimientos científicos y tecnológicos, teóricos y prácticos, modernos y ancestrales, con enormes ventajas dada la biodiversidad de nuestro país para el fomento de especies nativas o naturalizadas, ello lleva a un replanteamiento del enfoque productivo en México y en el mundo (Palma *et al.*, 2020).

De ella se deriva la agroforestería pecuaria que considera a los sistemas silvopastoriles (árboles + ganadería) y agrosilvopastoriles (árboles + agricultura + ganadería) como propuestas clave en la recuperación de los recursos agua, suelo y cobertura vegetal, lo que repercute en la salud ambiental y que apuntan al propósito de lograr una soberanía alimentaria. Son sistemas económicamente rentables que minimizan la de-

pendencia de insumos externos y que mejoran los indicadores productivos; manejados adecuadamente contribuyen a la regeneración de los recursos naturales dañados por prácticas agrícolas y forestales convencionales, embellecen el paisaje, y socialmente sirven para dar empleo y viabilidad en zonas marginales.

El cambio climático se aborda en dos dimensiones, adaptación y mitigación. Respecto a la mitigación se ocupa de las causas del cambio climático, entre ellas: reducción por deforestación, degradación, incremento de sumideros de carbono, disminución de gases efecto invernadero, disminución de la huella de carbono (reducción, captura, almacenamiento).

En ese contexto, los sistemas agrosilvopastoriles son estrategias del uso de la tierra que se plantean como alternativas de mitigación en los socioecosistemas que favorecen los bienes y los servicios ambientales (madera, biomasa, sumideros de carbono, biodiversidad, suelos, valores estéticos, paisaje) como tecnologías medulares en los contextos productivos.

Lo anterior, dado que las especies arbóreas tienen la capacidad para funcionar como sumideros de carbono pues exploran capas más profundas. El suelo representa el 80% del carbono almacenado en los ecosistemas terrestres, dado que el aumento de la productividad de la tierra se favorece con el incremento del carbono en el suelo (Mosquera-Lozada *et al.*, 2017).

Sistemas agroforestales pecuarios

La agroforestería pecuaria plantea la transformación del paisaje tradicional ganadero a través de dar respuestas a los diferentes problemas ambientales, económicos o sociales del sector con la integración de los árboles, arbustos, bambúes, palmeras y hierbas gigantes. Por sus componentes, arreglos espaciales, temporalidad y manejo del ganado, se clasifican, como: cercas vivas, cinturones de protección, plantaciones en linderos, pasturas en callejones con árboles en baja y en alta densidad, árboles en potreros, bancos de proteína, pastoreo de vegetación secundaria, pastoreo en huertos frutales y pastoreo en plantaciones forestales, es un enfoque ambientalmente amigable, que favorece procesos de adaptación y mitigación, o ambos, al cambio climático (Palma *et al.*, 2020). En la figura 1 se muestran algunas tecnologías agroforestales asociados con palma de coco.

Figura 1

Diferentes sistemas agroforestales asociados con palma de coco
De izquierda a derecha: Con limón (*Citrus aurantifolia*). Con ganadería. Con maíz



Fuente: José Manuel Palma García.

Sistemas agroforestales basados en cocotero

La necesidad de los productores de optimizar el uso de su tierra en particular en donde tiene baja tenencia, y sobre todo en los primeros años del establecimiento del cultivo, induce a la producción asociada con el objetivo de incrementar sus ingresos y de mejorar su calidad de vida.

De esta forma se conocen tecnologías con cultivos anuales como maíz, frijol, cacahuate y hortalizas, así como con cultivos perennes, entre ellos cítricos, café, cacao, plátano, piña, mango (Balderas y González, 2013; Montiel-Aguirre *et al.*, 2006) e inclusive ganado como borregos (Gómez, 2016) o bovinos (Palma y Anguiano, 2015). Todos ellos con favorables resultados tanto productivos como ambientales, que deberían conocerse en mayor medida entre los productores.

Sobresale el trabajo de Montiel-Aguirre *et al.* (2006) en sistemas agroforestales basados en cocotero, quienes demostraron a través de la relación del uso equivalente de la tierra las ventajas de tecnologías agroforestales respecto al monocultivo; esta metodología cuantifica la eficiencia de rendimiento de los componentes en asociación, en donde se determina el valor como menor, igual o mayor que uno, comparado con el monocultivo; cuando es mayor a uno implica una mayor eficiencia del empleo de la tierra, además de la relación beneficio-costos de los sistemas agroforestales. El sistema agrosilvopastoril mediante la tecnología de cocotero, más ganado en este ejemplo, muestra la mayor rentabilidad de las tecnologías descritas, aunque la mejor relación en el uso equivalente de la tierra lo obtiene la asociación coco más limón (cuadro 1).

Cuadro 1

Productividad de los sistemas agroforestales en asociación de palma de coco con base en la relación de uso equivalente de la tierra (UET) y su relación beneficio costo (B/C)

Sistema	SAF Monocultivo (t/ha)		UET	Relación B/C
Coco	0.95	0.86	1.10	
Plátano	24.30	31.85	0.76	
Coco + plátano			1.87	1.32
Coco	1.00	0.86	1.16	
Mango	10.50	8.00	1.31	
Coco + mango			2.48	1.72
Coco	1.58	0.86	1.84	
Limón	13.50	13.39	1.01	
Coco + limón			2.85	1.82
Coco	1.37	0.86	1.59	
Maíz	30.00	28.11	1.07	
Coco + maíz			2.66	2.89
Coco	1.03	0.86	1.20	
Ganado	1.14	1.29	0.88	
Coco + ganado			2.08	6.91

Fuente: Montiel-Aguirre *et al.* (2006).

Tecnologías agroforestales basadas en cocotero con bovinos como estrategia de mitigación al cambio climático

La ganadería se considera de alto impacto climático asociado a bajos indicadores productivos en ambiente tropical; la optimización de los recursos permitirá enfoques socioambientales y económicos favorables en este sistema, debido a su fuerte relación social con el entorno.

En la costa de Colima, la producción de frutales y en particular de cocotero (*Cocos nucifera*) es un sistema predominante con relevancia social, económica y ambiental, el cual puede optimizarse mediante el empleo de sistemas agrosilvopastoriles (Montiel-Aguirre *et al.*, 2006; Palma y Anguiano, 2015; Miranda *et al.*, 2016), los cuales representan una importante alternativa para la obtención de alta producción de biomasa forrajera asociada al frutal y a la maximización del fenómeno de la fotosíntesis, con un impacto favorable en la producción de leche y de carne en condiciones tropicales.

El sistema agroforestal es una estrategia complementaria respecto al monocultivo, el cual enfrenta variaciones cíclicas de precios y posee una presión directa y constante de

plagas y de enfermedades; en este tenor, la plaga de mayor impacto biológico y económico es el picudo americano de las palmas, *Rhynchophorus palmarum*, conocido por los productores locales como el picudo negro del cocotero. Los problemas causados por *R. palmarum* no son recientes, sin embargo, en las condiciones actuales y en un escenario de cambio climático *R. palmarum* incrementa su habilidad para ocasionar daños en plantaciones de coco por incremento de su población como consecuencia de la reducción de su ciclo de vida en función del aumento de la temperatura global, con la mejora o la ampliación de sus hábitats climáticamente adecuados para la proliferación de los insectos (Ge *et al.*, 2015).

En los apartados posteriores se evidenciarán los efectos en adaptación y en mitigación al cambio climático, producto de la interacción de los diferentes componentes estudiados en esta propuesta tecnológica.

Diseño espacial de la alta densidad de *Leucaena leucocephala* en cocotero

En la figura 2 se plantean tecnologías agrosilvopastoriles con frutales en donde los componentes son *Cocos nucifera*, *Leucaena leucocephala* y *Cenchrus purpureus* CT-115, los cuales al modificar la densidad de la leguminosa arbórea permiten el diseño espacial de cuatro tecnologías diferentes. Se propuso utilizar un marco de 3.6 m de área útil para sembrar tanto la *Leucaena leucocephala* como el *Cenchrus purpureus* CT-115. En la figura 2a se muestra la combinación de cocotero más *Cenchrus purpureus* CT-115; en la figura 2b resultan dos surcos de *Leucaena leucocephala* para 40 mil plantas/ha con tres de *Cenchrus purpureus* CT-115; en la figura 2c dos surcos de *Leucaena leucocephala* para 60 mil plantas/ha con dos de *Cenchrus purpureus* CT-115 y finalmente en la figura 2d tres surcos de *Leucaena leucocephala* para 80 mil plantas/ha con dos de *Cenchrus purpureus* CT-115, intercalados con el objetivo de cuidar el desarrollo radicular del cocotero.

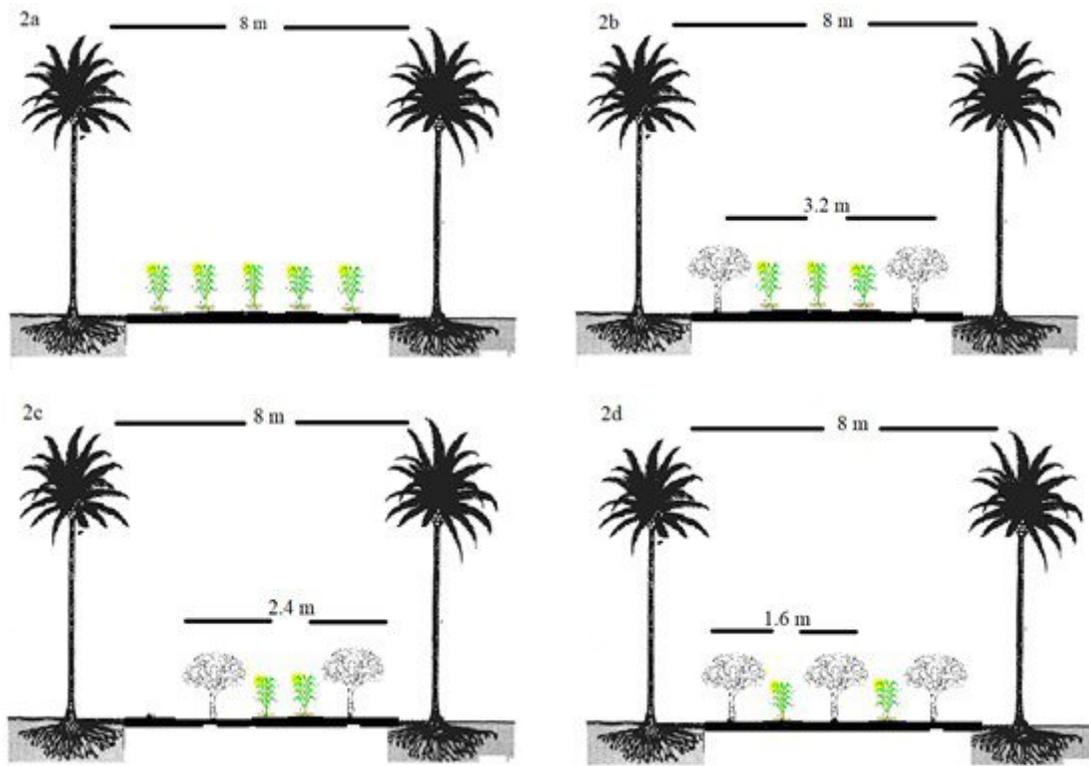
Para el establecimiento de la leucaena se escarificó con agua a 80 °C por dos minutos y después, en agua fría por cinco minutos, fueron depositadas de 15 a 20 semillas/m lineal sembradas a chorrillo y cuando tenía 60 cm de altura se estableció el pasto con material vegetativo en el fondo del surco en forma yuxtapuesta.

El forraje se estableció cuando la leguminosa alcanzó una altura de 60-70 cm, aproximadamente. Se realizó el diseño de plantación a una hilera con distancia entre surcos a 1.6 m, 2.40 m y 3.20 m (para las densidades de 80, 60 y 40 mil plantas/ha, respectivamente) y entre plantas de 15 a 20 semillas/m lineal sembradas a chorrillo para asegurar las poblaciones requeridas, con una profundidad de siembra de 2-3 cm.

La incorporación de árboles leguminosos forrajeros en cocotero permite el aumento de la biodiversidad y de la implementación de tecnologías agrosilvopastoriles con efectos benéficos en las zonas costeras, como en el caso de *Leucaena leucocephala* establecida en alta densidad con estabilidad en el tiempo (Anguiano *et al.*, 2012).

Figura 2

Densidad de siembra de la *Leucaena leucocephala* (a. 0, b. 40, c. 60 y d. 80 mil plantas/ha) asociada a *Cenchrus purpureus* Cuba CT-115 en plantación de cocotero



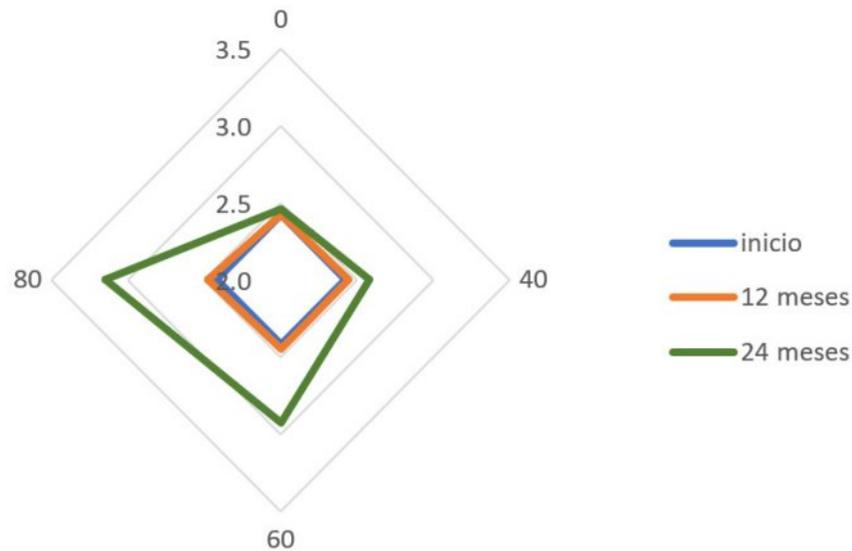
Fuente : Elaborada por los autores.

Contenido de materia orgánica en el sistema agrosilvopastoril con frutales basado en cocotero

Uno de los aspectos medulares en los sistemas productivos es la pérdida de fertilidad, en particular en los suelos de clima tropical, por lo cual, el contenido de materia orgánica es un indicador de la calidad, dado que su mayor contenido mejora la acidez y la eficiencia del uso del nitrógeno, con lo cual existe un marcado efecto en la producción de biomasa. En particular el efecto benéfico de los sistemas agrosilvopastoriles, sobre la fertilidad del suelo, se asocia con la actividad biológica de la macrofauna y con la microbiota edáfica, lo que produce mayor mineralización, movilización y disponibilidad de algunos nutrientes en el suelo, como el P y el K (Crespo, 2020).

Por ello, un resultado sobresaliente en la incorporación de altas densidades de siembra de la leguminosa arbórea fue el incremento en materia orgánica que se presentó desde el inicio del ensayo y 24 meses después, este aspecto se logró con aquellas áreas en donde se tuvieron densidades de 60 y de 80 plantas de leucanea/ha (figura 3).

Figura 3
Dinámica de materia orgánica (%) de un sistema agrosilvopastoril
cocotero-leucaena-pasto Cuba CT-115 en pastoreo



Fuente: Elaborada por los autores.

Fijación de carbono del sistema agrosilvopastoril basado en cocotero

El secuestro de carbono, la restauración del suelo, y la conservación de la biodiversidad, son algunos importantes servicios ambientales que se consideran en varios programas en América Latina y por supuesto en México. La cantidad de C^+ fijado en sistemas agrosilvopastoriles depende de las interacciones entre los componentes árbol, pasto, suelo y animal (Shibu, 2009). Así, el monitoreo del secuestro de carbono es una herramienta fundamental en los proyectos de mitigación, lo cual se logra al realizar el balance de biomasa con los recursos disponibles.

En ese sentido Anguiano *et al.* (2013) mostraron la importancia de un cultivo como el cocotero que almacena carbono por un periodo de hasta 20 años tiempo promedio de vida útil del cultivo, que asociado a alta densidad de la leguminosa arbórea *Leucaena leucocephala* tiene un favorable almacenamiento al incorporar a esta especie en alta densidad comparado con sólo la presencia de un forraje de alta producción de biomasa (cuadro 2). Este efecto se ve favorecido desde 8.4 hasta 27.1% más de carbono aéreo por la alta densidad de siembra de la leguminosa arbórea. El componente arbóreo en las diferentes estrategias aportó del 85 hasta el 98% del C^+ aéreo fijado.

Cuadro 2

Captura de carbono aéreo del sistema agrosilvopastoril cocotero-leucaena-pasto
Cuba CT-115 en pastoreo (t ha/año)

Leucaena (miles de plantas/ha)	Captura de C+ aéreo (t/ha/año)			
	<i>Cenchrus purpureus</i> CT-115	<i>Leucaena leucocephala</i>	<i>Cocos nucifera</i>	Total SASP
0	15.46a	0.00d	85.73d	101.19d
40	9.14b	13.42c	87.17c	109.73c
60	5.83c	27.04b	89.13b	122.00b
80	2.63d	35.72a	90.21a	128.62a
Error estándar media	0.006	0.323	0.004	0.324
P	0.001	0.001	0.001	0.001

a,b,c,d, distinta literal en columna representa diferencia estadística (Tukey, ≤ 0.05).

Fuente: Anguiano *et al.* (2013).

Biodiversidad edáfica

La deforestación, la erosión y la degradación de pasturas en las áreas ganaderas tropicales, no sólo influyen sobre la calidad del suelo sino también en su biodiversidad, aspectos que son posibles de modificar mediante la implementación de sistemas silvo o agrosilvopastoriles, dado que la presencia de la biota del suelo depende de la fertilidad y de estabilidad edáfica, debido a que fragmentan los residuos orgánicos, degradan los compuestos orgánicos a moléculas sencillas, actúa sobre la porosidad del suelo, facilita la agregación de sus partículas a través de las excreciones e intervienen en la humificación de la materia orgánica por la disponibilidad de biomasa a través de la hojarasca y del estiércol de los animales en el pastoreo; todo ello favorece el reciclaje de nutrientes en una relación simbiótica suelo-planta-animal.

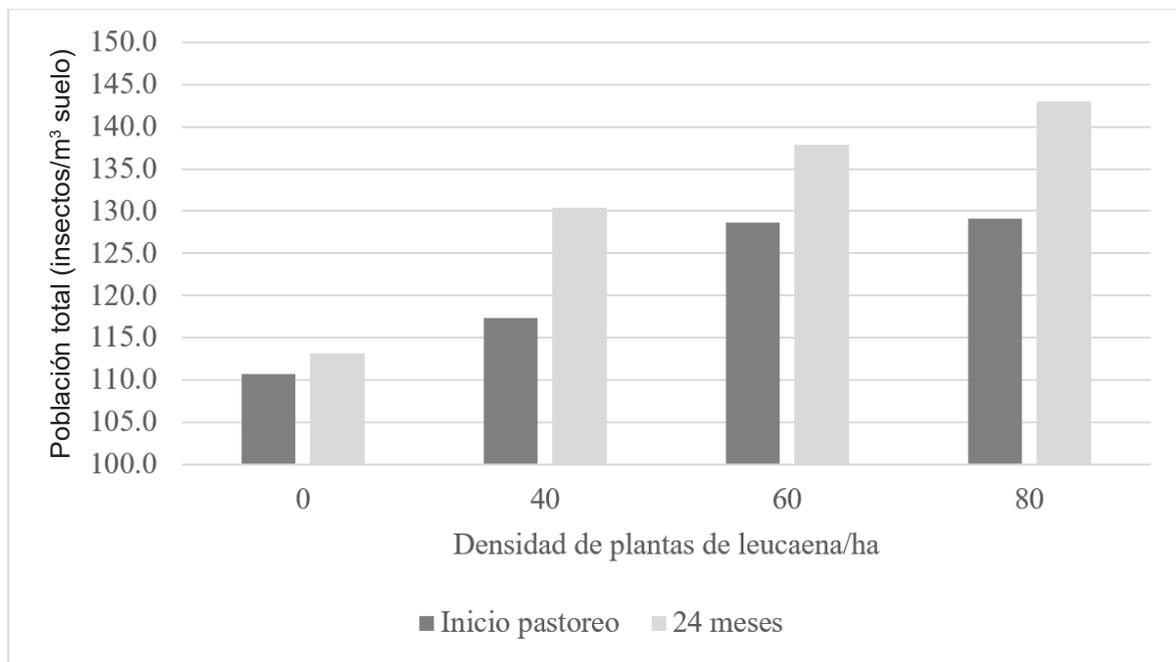
El incremento en materia orgánica en el suelo mejora las condiciones biológicas del mismo, puesto que la disponibilidad de nutrientes favorece el desarrollo de los micro y de los macro organismos; en este caso la macrofauna del suelo se favoreció por procesos como aireación e infiltración del agua a través de las redes de galerías, así como a la formación de macroagregados, que modifican la estructura física del terreno (Lavelle, 2000; Mäder *et al.*, 2002).

Los resultados sobre la macrofauna del suelo en el sistema agrosilvopastoril de *C. nucifera* + *L. leucocephala* + *Cenchrus purpureus* CT-115, al comparar diferentes densidades de inclusión de *L. leucocephala*, al momento de iniciar el pastoreo y 24 meses después se muestran en la figura 4. La presencia de la leucaena tiene un efecto favorable en cualquiera de las inclusiones con respecto a la asociación de cocotero + forraje, tanto al inicio del pastoreo como al final del estudio dos años después, se observó un incremento en forma lineal de la población total de la macrofauna en la medida que se incrementó la densidad de siembra de la leucaena, con un máximo obtenido en la densidad de 80 mil plantas de leucaena/ha.

Por otra parte, en relación a la frecuencia relativa de miriápodos, coleópteros, isópteras, formicidas y de oligochetas (figura 5), se observaron mayores valores relativos para los oligochetas en el sistema con leucaena tanto al inicio del pastoreo como a los 24 meses de evaluación, aspecto señalado previamente por Palma y Anguiano (2015); en ese contexto diferente comportamiento tuvo en donde no se estableció la leucaena puesto que el género dominante fueron los coleópteros seguido de isópteras y en tercer lugar de oligochetas, este fenómeno se modificó 24 meses después, pues estos géneros tuvieron similar frecuencia relativa.

Figura 4

Población total de macrofauna en un sistema agrosilvopastoril de *Cocos nucifera* + *Cenchrus purpureus* CT-115 con diferentes densidades de *L. leucocephala* (plantas de leucaena/ha)



Fuente: Palma y Anguiano, 2015.

La abundancia de oligochetas en general, con respecto a otros géneros de insectos en el sistema agrosilvopastoril estudiado, muestra que en particular las lombrices funcionan como un bioindicador favorable asociado al clima, a la alimentación, a la humedad y a la textura, así como a las condiciones químicas edáficas, dado que éstas prevalecen en ambientes edáficos no compactados, con alta presencia de materia orgánica y de humedad, como en el presente caso.

Es conocido que las oligochetas actúan como ingenieros del ecosistema en la formación de poros, en la infiltración de agua, en la humificación y en la mineralización de la materia orgánica (Cabrera, 2012), esto explica el incremento de materia orgánica con la mayor densidad de siembra de la leucaena.

El sistema agrosilvopastoril con la mayor densidad de la leguminosa arbórea favorece la mayor posibilidad de reciclaje de nutrientes por los macroinvertebrados, además

de la sombra generada en el sistema. Es importante señalar que el trabajo de la macrofauna edáfica no consideró el estado inicial de monocultivo de cocotero, sino hasta que se utilizó el sistema en pastoreo, lo cual difiere con lo obtenido por Vega *et al.* (2014), quienes determinaron cambios en la composición de macroinvertebrados del suelo desde su estado inicial de monocultivo de pasto hasta el establecimiento y la estabilización del sistema silvopastoril.

La macrofauna descrita es una expresión del desarrollo de los agroecosistemas asociados a su diseño espacial y temporal, así como a la presencia de los animales a través del pastoreo que promueven interacciones positivas con la biodiversidad edáfica.

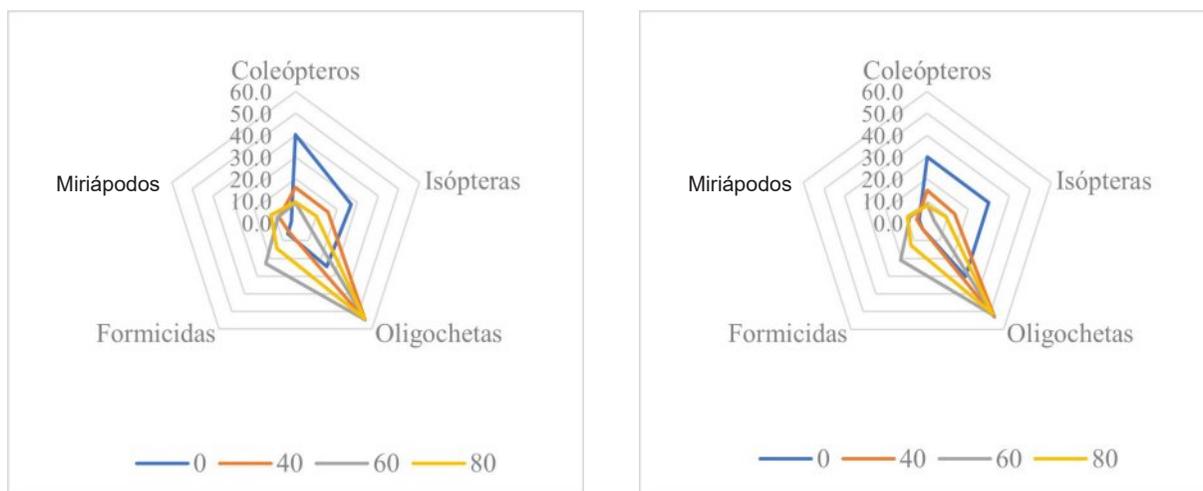
La macrofauna a través de diferentes funciones permite ser utilizada como un componente de sustentabilidad en los sistemas agrosilvopastoriles, ya que participa en la descomposición de la hojarasca, en la mineralización de la materia orgánica y en los cambios estructurales del suelo, fenómeno que favorece los resultados en la productividad de biomasa forrajera; con este incremento en forraje se favorece la alimentación de ganado vacuno.

Figura 5

Frecuencia relativa de macrofauna edáfica en un sistema agrosilvopastoril de *Cocos nucifera* + *Cenchrus purpureus* CT-115 con diferentes densidades de *L. leucocephala* (plantas de leucaena/ha)

A. Inicio.

B. 24 meses



Fuente: Elaborada por los autores.

Biodiversidad vegetal-vegetación acompañante en la tecnología agrosilvopastoril basada en cocotero

El sistema agrosilvopastoril propuesto implica la preparación del terreno para el establecimiento de la leguminosa arbórea y para el forraje *Cenchrus purpureus* CT-115, en el proceso surge de manera espontánea la vegetación acompañante que de no eliminarse forma parte del sistema y varias de esas plantas también son alimento para el ganado y contribuyen al sistema; en ese sentido se evaluaron, antes de iniciar el pastoreo, a las especies que se establecieron de forma espontánea en el sistema.

En un análisis de muestreo de frecuencia relativa de especies acompañantes, se evidenció la presencia de 17 especies (cuadro 3), una de las cuales no se identificó, del resto sobresale la malva (*Malva parviflora*) en las cuatro densidades de leucaena estudiadas con un rango de 21.9 a 27.8%, la guinea (*Megathyrsus maximus*) de 8.0 a 13.5%, brizantha (*Urochloa brizantha*) con un rango de 7.8 a 22.1% y pepinillo (*Mormordica charantia*) con 9.0 a 15.5%. La presencia de otros pastos es producto de siembras anteriores y de la oportunidad de emergencia y de desarrollo cuando se tiene posibilidad ante nuevos escenarios, de ahí que especies como Bermuda de costa (*Cynodon dactylon*), pasto Estrella (*Cynodon nlemfuensis*), guinea (*Megathyrsus máximus*) y brizantha (*Urochloa brizantha*) tengan posibilidad de establecerse ante especies de porte erecto como la leucaena y el CT-115 que permiten una mayor diversidad de especies que pueden ser consumidas por los animales, de esa forma se encontró que 10 de las 16 especies identificadas son también consumidas por el ganado, cinco de ellas leguminosas, cuatro gramíneas y una malvácea, que componen este menú forrajero, que además ayuda a evitar erosión al mantener cubierto el suelo; este enfoque es semejante a lo señalado por Toral-Pérez *et al.* (2019), quienes indicaron un efecto favorable al incrementar la biodiversidad vegetal en un sistema silvopastoril.

Cuadro 3
 Biodiversidad vegetal asociada a un sistema agrosilvopastoril
 de cocotero + *Cenchrus purpureus* CT-115 con diferentes densidades de *L. leucocephala* (plantas de leucaena/ha)

Especie	Densidad en miles de plantas de leucaena/ha			
	0	40	60	80
	%	%	%	%
Acacia (<i>Acacia farnesiana</i>)	6.0	0.0	0.9	0.0
Arachis (<i>Arachis pintoi</i>)	0.5	0.9	0.9	0.7
Bermuda de costa (<i>Cynodon dactylon</i>)	2.5	5.0	6.1	9.6
Bonetillo	0.0	0.9	0.0	0.0
Calabacín	0.0	0.0	0.9	0.0
Calopo (<i>Calopogonium</i> sp)	0.0	0.0	0.4	0.0
Centro (<i>Centrocema</i> sp)	5.0	10.0	4.3	4.4
Coral (<i>Couteria platyloba</i>)	0.0	0.0	0.0	0.7
Desconocida	10.0	6.4	10.9	6.6
Dormidera (<i>Mimosa pudica</i>)	11.0	14.2	12.6	10.3
Esponja	0.0	0.0	0.4	0.0
Guinea (<i>Megathyrsus maximus</i>)	13.5	11.9	8.3	12.5
Hüinar (<i>Sida</i> sp)	1.5	1.4	1.7	2.2

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

Especie	Densidad en miles de plantas de leucaena/ha			
	0	40	60	80
	%	%	%	%
Malva (<i>Malva</i> sp)	24.0	21.9	27.8	25.0
Pasto insurgente (<i>Urochloa brizantha</i>)	16.0	11.9	7.8	22.1
Pata de vaca (<i>Bauhinia</i> sp.)	0.5	0.0	0.0	0.0
Pepinillo (<i>Momordica charantia</i>)	9.0	15.5	14.8	5.9
Zona desnuda	0.5	0.0	2.2	0.0

Fuente: Elaborada por los autores.

Tecnología agrosilvopastoril basada en cocotero + leucaena + CT-115 con ganadería bovina en un sistema de doble propósito

La ganadería bovina en México es una actividad practicada por más de un millón de ganaderos conformado por ejidatarios y por pequeños propietarios que tienen menos de 35 cabezas de ganado por familia, con bajos indicadores productivos, basado en monocultivo de pastos, expuestos a una estacionalidad climática errática enfrentada a través de la compra de alimentos y de otros insumos, con baja rentabilidad y quienes cargan con los mayores riesgos de la cadena productiva. Estos productores están ligados a un sólido sector ganadero agroindustrial de producción de carne que inclusive exporta, cuestionado por sus prácticas intensivas y contaminantes, pero con un dinámico crecimiento económico en los últimos años (Palma *et al.*, 2020).

La ganadería bovina de doble propósito, en México, se realiza en las áreas tropicales, tanto en ambientes secos o en húmedos, en donde la producción de leche se asocia con el manejo del becerro, predomina la ordeña manual, son sistemas dependientes de insumos, con pobres indicadores productivos, que deben ser revertidos dado la base social existente en este sistema (Díaz-Rivera *et al.*, 2011; Palma, 2014).

Asimismo, esta producción bovina se desarrolla con un doble enfoque; por un lado, la producción de leche asociada a la presencia del becerro en el momento de la ordeña y la producción de carne generada con el becerro. El volumen de ambos productos es variable y está en dependencia de múltiples factores, tanto de tipo biológico, como social y económico.

En ese sentido, en las planicies costeras del estado de Colima es común encontrar la producción integrada de bovinos y de ovinos en plantaciones de coco (*Cocos nucifera*), en donde el ganado pastorea en pastos nativos o naturalizados como guinea (*Megathyrus maximus*), estrella (*Cynodon plectostachyus*), pará (*Urochloa mutica*), insurgentes (*Urochloa brizantha*) y en otros que crecen debajo de las palmas, además de leguminosas herbáceas nativas como *Rinchosia minima*, *Desmodium* sp., *Centrosema* sp.; como resultado, se produce leche/carne de bovino en sistemas de doble propósito, además de ovinos de pelo, fruta o madera a partir del cocotero (Palma, 2006).

En el cuadro 4 se muestran valores de un pastoreo simulado con seis vacas/ha para una carga animal de 2.36 a 3.12 UA/ha con un porcentaje de utilización de 58 hasta 72% y producción de leche entre 8.1 a 8.5 l/vaca, con ese nivel productivo sería posible obtener 8 737, 6 990, 7 162 y 10 438 l/ha en un sistema agrosilvopastoril de cocotero + *Cenchrus purpureus* CT-115 con densidades de *L. leucocephala* de 0, 40, 60 y 80 mil plantas de leucaena/ha, respectivamente. En general estos sistemas estudiados tienen resultados para el trópico de forma sobresaliente determinado también por el genotipo utilizado, en este caso se utilizaron cruces de Cebú con Pardo suizo y sanidad animal, en donde con la mayor densidad se logró una mejora en carga animal y producción de leche individual, que en particular se ve reflejada en la proyección anual de producción de leche (figura 6).

Los sistemas agrosilvopastoriles forman parte de la agroforestería pecuaria, con ello se plantea la transformación del paisaje tradicional ganadero que permita proponer soluciones a las diferentes problemáticas actuales en los aspectos ambientales, económicos o sociales, a través de la interacción de sus componentes, de diferentes arreglos espaciales, de temporalidad y de manejo del ganado, como lo es la práctica del pastoreo en huertos frutales, como en el caso del cocotero para la producción de leche (Nahed *et al.*, 2014; Palma y Anguiano, 2015).

Cuadro 4
Producción de leche en pastoreo simulado en un sistema agrosilvopastoril de cocotero + *Cenchrus purpureus* CT-115 con diferentes densidades de *L. leucocephala* (plantas de leucaena/ha)

Indicadores	Densidad en miles de plantas de leucaena/ha			
	0	40	60	80
Vacas (número)	6	6	6	6
Peso vivo (kg)	433	433	433	433
Equivalente en unidad animal (kg)	450	450	450	450
Ocupación (días)	5	4	4	6
Recuperación (días)	32	33	33	33
Utilización (%)	72	64	58	62
Carga animal (UA/ha)	2.96	2.36	2.36	3.36
Producción de leche (vaca/día)	8.1	8.1	8.1	8.5
Potencial de producción (litros/ha/año)	8 737	6 990	7 162	10 438

Fuente: Elaborada por los autores.

El pastoreo realizado permitió el reciclaje de nutrientes y diferentes beneficios ambientales, como fue descrito previamente, pues la deposición de heces con la carga animal utilizada favoreció el incremento de la materia orgánica, que a su vez influyó en la biodiversidad relacionada con la macrofauna edáfica.

La ganadería juega un papel importante en el sistema combinado con cocotero desde el punto de vista económico (Montiel-Aguirre *et al.*, 2006) y ambiental (Gómez, 2016), dado que su integración además de diversificar el ingreso permite reducciones significativas en los costos, pues el ganado sustituye el control de plantas herbáceas respecto al uso de herbicidas, de maquinaria y de combustible asociados, asimismo se evita la erosión del suelo por aire y por agua por la limpieza mecánica del predio.

Figura 6

Sistema agrosilvopastoril *Cocos nucifera* + *Leucaena leucocephala* + *Cenchrus purpureus* CT-115



Figura 7

Sistema agrosilvopastoril *Cocos nucifera* + *Leucaena leucocephala* + *Cenchrus purpureus* CT-115 + bovinos



Fuente: José Manuel Palma García.

Sistema agrosilvopastoril (*Cocos nucifera*) ante plagas, un reto actual

En particular la presencia del picudo negro (*Rhynchophorus palmarum*) en cocotero actualmente tiene una exacerbada presencia; con ello, el uso desmedido de insecticidas químicos no selectivos (carbaril®, carbofuran®, imidacloprid®, fenilpirazol®, entre otros) que además de costos, no logran el control de esta plaga y al no ser selectivos originan daños a otros insectos polinizadores y controladores biológicos, con efectos detrimentales en la microbiología y en la macrofauna edáfica pues tienden a acumularse dada su baja tasa de biodegradabilidad.

En la generación de alternativas al control químico se recurre al uso de trampas con feromonas de agregación (Rodríguez-Currea *et al.*, 2017) y control biológico con *Metarhizium anisopliae* y *Bauveria bassiana* con resultados favorables a nivel de laboratorio de forma promisorio (León-Martínez *et al.*, 2019), pero con necesidad de validación a nivel de campo. Asimismo, el control mecánico juega un papel importante en el manejo de *R. palmarum*; el uso de trampas para la captura masiva es una adecuada estrategia a seguir para minimizar la población de insectos adultos. En diversas regiones productoras de coco se evalúan diferentes tipos de trampas para este fin. Algunos resultados promisorios sugieren que las trampas tipo galón y tipo bote resultan ser económicas y eficientes para la captura de adultos. Estas trampas deben contener un cebo alimenticio como trozos de caña, de piña o de plátano, asimismo, la captura se puede intensificar con el uso de

Rhynchophorol® como feromona de agregación. Este tipo de trampeo debe ser generalizado en las zonas de mayor influencia de adultos y con la mayor cantidad de productores posibles, ya que el uso de muy pocas trampas podría no tener el efecto deseado (López-Mora *et al.*, 2019).

Una estrategia diferente a las antes señaladas se basa en un enfoque agroecológico que permita modificar el ambiente de la relación cultivo - plaga, para ello se presenta un estudio de caso, en donde se propuso la incorporación de cuatro leguminosas: canavalia (*Canavalia ensiformis*), crotalaria (*Crotalaria juncea*), gandul (*Cajanus cajan*) y chícharo (*Vigna unguiculata*) para sembrar en las calles de la asociación de cocotero + limón.

Sin embargo, sólo se logró la asociación canavalia + cocotero, para ello se recomendó la siembra de *Canavalia ensiformis* (dos semillas por golpe en los cuatro puntos cardinales a 20 cm de la planta del cocotero); esta experiencia se desarrolla en el predio del Sr. Cecilio Gutiérrez Silva en el ejido Cuyutlán, municipio de Armería, estado de Colima, México.

Esta leguminosa tiene hábito trepador, la cual está funcionando como barrera natural contra el picudo negro, además el productor dejó de utilizar las trampas con feromonas e indica que no observa la presencia del insecto plaga (figura 8), sin efecto negativo en el crecimiento del cocotero, pues son plantas de tres años en adelante. Además de los beneficios sobre la fijación biológica que se conoce de esta leguminosa, y la protección como barrera natural en el cocotero, también es conocido su valor como forraje para el ganado. Sin embargo, la incorporación del ganado en plantaciones jóvenes tiene que desarrollarse mediante pastoreo con cerco eléctrico que evite el daño por consumo de hojas del cocotero, sobre todo en sus primeros años de vida del cultivo (figura 9).

Este estudio de caso abre la posibilidad de que se genere una tecnología de bajo costo, de fácil aplicación, replicable, sustentable y que proviene de la demanda de los productores con un enfoque de tecnología social como recientemente lo plantean (Palma y Zorrilla, 2021).

Figura 8

Sistema agrosilvopastoril cocotero + pasto nativo + limón + leguminosa + bovinos. Asociación cocotero+*Canavalia ensiformis*



Figura 9

Sistema agrosilvopastoril cocotero + pasto nativo + limón + leguminosa + bovinos. Daño en cocotero por consumo de bovinos



Fotos: José Manuel Palma García.

Reflexión final

La tecnología agrosilvopastoril basada en la asociación de cocotero + *Cenchrus purpureus* Cuba CT-115 con diferentes densidades de *L. leucocephala* en la obtención de becerros y de leche con bovinos es una estrategia de mitigación al cambio climático que fomenta la incorporación de alta densidad de la leguminosa arbórea *L. leucocephala*; ello implica una reforestación productiva asociado al cocotero que favorece al agroecosistema como sumidero de carbono, así mismo la valoración de la biodiversidad vegetal como componente favorable que eviten la degradación de pasturas y suelo, con el fomento de la macrofauna del suelo que favorece el incremento de la materia orgánica en el sistema y a la vez con un potencial productivo de leche importante para el trópico en sistemas bovinos de doble propósito.

El valor de uso equivalente de la tierra de cocotero en asociación de ganadería resulta en una opción sustentable dado el favorable impacto ambiental, social y económico que implica este tipo de propuestas.

Además, la incorporación de *Canavalia ensiformis*, como estrategia agroecológica, plantea una alternativa para el control del insecto *R. palmarum* con leguminosas herbá-

ceas, propuesta que debe seguir explorándose, con la oportunidad de generar nuevas tecnologías sociales.

Aspectos destacados

1. Se logró una tecnología agrosilvopastoril que permite la asociación de cocotero + *Cenchrus purpureus* Cuba CT-115 y diferentes densidades de *L. leucocephala*.
2. Los resultados en fertilidad de suelo, macrofauna y finación de carbono aéreo son aspectos sobresalientes de esta tecnología agrosilvopastoril.
3. Aunque incipiente se abre una propuesta tecnológica que limite los daños generados por la plaga del picudo negro del cocotero *R. palmarum* cuando se asoció la leguminosa herbácea *Canavalia ensiformis*.

Literatura citada

- Anguiano, J.M.; Aguirre, J. y Palma, J.M. (2012). Establecimiento de *Leucaena leucocephala* con alta densidad de siembra bajo cocotero (*Cocos nucifera*). *Revista Cubana de Ciencias Agrícolas*. 46(1):103-107.
- Balderas, F.G. y González, I.J. (2013). Cocotero híbrido intercalado con cultivos anuales y perennes, tecnología sustentable. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 4(20): 58-71.
- Cabrera, G. (2012). La macrofauna edáfica como indicador biológico del estado de conservación/perturbación del suelo. Resultados obtenidos en Cuba. *Pastos y Forrajes*. 35(4): 349-363.
- Crespo, G. (2020). Factores que influyen en el manejo integrado de nutrientes para la producción agrícola. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 24(3): 19-39.
- Díaz-Rivera, P.; Oros-Noyola, V.; Vilaboa-Arroniz, J.; Martínez-Dávila, J.P. y Torres-Hernández, G. (2011). Dinámica del desarrollo de la ganadería doble propósito en las Choapas, Veracruz, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14: 191-199.
- Ge, X.; He, S.; Wang, T.; Yan, W. y Zhong, S. (2015). Potential distribution predicted for *Rhynchophorus ferrugineus* in China under different climatic warming scenarios. Plos One DOI:10.1371/journal.pone.0141111
- Gómez, J. (2016). Palma de coco-ovinos, experiencia de una producción sustentable. *Colima Produce*. 16(66): 5-7.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014, Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/> (Consultado 10 octubre 2017).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2019). Comunicado de Prensa. La tierra es un recurso decisivo, según un informe del IPCC se encuentra sujeta a la presión del ser humano y del cambio climático, pero es parte de la solución. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/2019-PRESS-IPCC-50th-IPCC-Session_es.pdf (Consultado 24 julio 2020).
- Jiménez, E.; Martínez, O.; Trejo, O.; González, G.; Guerrero, M.E. y Chávez, O. (2017). Primera intercepción del escarabajo rinoceronte asiático del cocotero *Oryctes rhinoceros* (Linnaeus, 1758) en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 8(39): 99-105.
- Lavelle, P. (2000). Ecological challenges for soil science. *Soil Sci*. 165:73.
- León-Martínez, G.A.; Campos-Pinzón, J.C. y Arguelles-Cárdenas, J.H. (2019). Patogenicidad y autodiseminación de cepas promisorias de hongos entomopatógenos sobre *Rhynchophorus palmarum* L. (Coleoptera: Dryophthoridae). *Agronomía Mesoamericana*. 30(3): 631-646, doi:10.15517/am.v30i3.36184
- Liaquat, A. y Ehsanullah. (2007). Water use efficiency of different planting methods in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Journal Agricultural Research*. 45(4):299-304.
- López-Mora, I.; Chan-Cupul, W.; De La Mora-Castañeda, G.; Lezama-Gutiérrez, R. y Rebolledo-Domínguez, O. (2019). Evaluación y costos de trampas para captura de *Rhynchophorus palmarum* L. (Coleoptera: Curculionidae) en *Cocos nucifera* L. (Arecales: Arecaceae) en Armería, Colima. Semi-

- nario de Investigación, Ingeniería en Agronomía, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Colima, 19 p.
- Mäder, P.; Flebach, A.; Duboiss, D.; Gunst, L.; Fried, P y Niggli, U. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*. 296: 1694-1697. DOI:10.1126/science.1071148.
- Miranda, M.L.; Mora, A y González, G. (2016). Sistemas agroforestales con especies de importancia maderable y no maderable en el trópico seco de México. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 20(2): 53-72.
- Montiel-Aguirre, G.; Krishnamurthy, L.; Vázquez-Alarcón, A., y Uribe-Gómez, M. (2006) Opciones agroforestales para productores de palma de coco en el estado de Michoacán, México. *Terra Latinoamericana*. 24(4): 557-564.
- Mosquera-Losada, M.R.; Borek, R.; Balaguer, F.; Mezzarila, G. y Ramos-Font, M.E. (2017). Agroforestry as a mitigation and adaptation tool. EIP-AGRI Focus Group Agroforestry European Commission. 9 p.
- Nahed, J.; Palma, J.M. y González, E. (2014). La adaptación como atributo esencial en el fomento de sistemas agropecuarios resilientes ante las perturbaciones. *Revista Avances en Investigación Agropecuaria*. 18(3): 7-34.
- Palma, J.M. (2014). Escenarios de sistemas de producción de carne de bovino en México. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 18 (Suplemento I): 53-62.
- Palma, J.M. y Anguiano, J.M. (2015). Sistemas silvopastoriles en el mejoramiento de los sistemas de producción bovina en ganadería de doble propósito en México. En la ganadería en América Latina y el Caribe - alternativas para la producción competitiva e incluyente de alimentos de origen animal. Editores Rafel Núñez Domínguez, Rodolfo Ramírez Valverde, Salvador Fernández Rivera, Salvador Fernández Rivera, Omar Araujo Febres, Miguel García Winder y Tito Efraín Díaz Muñoz. Colegio de Posgraduados. Jalisco, México. Pp. 375-390.
- Palma, J.M.; Torres, J.A. y Zorrilla, J.M. (2020). Agroforestería pecuaria - producción ganadera sustentable en México. Suplemento La Jornada en el Campo. 159: 6.
- Palma, J.M. y Zorrilla, J.M. (2021). Las tecnologías sociales racionales en el contexto productivo pecuario. En "Tecnologías Sociales en la Producción Pecuaria de América Latina y el Caribe". Editores Palma, J.M y Cruz, F. En imprenta.
- Pinho, R.C.; Silva, F.P.R.; Vilar, R.K.C.; Salles, T.R.; Ferreira, S.A.V., y Pinheiro, M.R.T. (2016). Distribuição espacial de *Rynchophorus palmarum* em palma de ólea no Estado do Pará, Amazônica. *Revista de Ciências Agrárias*. 51: 22-31.
- Rebolledo-Martínez, L.; Megchún-García, J.V.; Rebolledo-Martínez, A., y Prozco-Corona, D.M. (2019). Asociación de frutales de limón persa (*Citrus latifolia*) y palma de coco (*Cocos nucifera* L.) con el aporte de materia seca por cultivos anuales. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*. 5(9): 1248-1266.
- Rodríguez-Currea, H.J.; Marulanda-López, J.F y Amaya, C. (2017). Metodología de manejo de *Rynchophorus palmarum* L. 1758 (Coleóptera: Curculionidae) a base de caíromonas, feromonas y semioquímicos en plantaciones de chontaduro (*Bactris gasipaes* [Arecaceae]) en Riosucio, Caldas. *Boletín Científico de Museo Historia Natural*. 21(1): 59-67.
- SAGARPA (2017). Palma de coco mexicana. En Plan Nacional Agrícola 2017-2030. SAGARPA. 11 p.
- STATISTA (2019). Ranking de los principales países de coco a nivel mundial en 2019. <https://es.statista.com/estadisticas/613440/principales-paises-productores-de-coco-en-el-mundo/> (Consultado 20 enero 2021).
- Toral-Pérez, O.; Del Viento-Camacho, A.; Rodríguez, M.L. y Palma, J. (2019). Inducción de la biodiversidad como estrategia para evitar la deforestación. 1er Congreso Latino en Cambio Climático y 9vo. Congreso Nacional en Investigación en Cambio Climático. 7 al 11 de octubre 2019. Colima, Colima, México.

Agradecimientos

Al MVZ Javier Rodríguez Gaytan por las facilidades y por los apoyos prestados para el estudio de este sistema agrosilvopastoril y al Sr. Cecilio Gutiérrez Silva por la posibilidad de realizar el trabajo de leguminosas herbáceas en su predio.

VI. Adaptación y mitigación-tecnologías silvopastoriles

VI.1. Una visión holística del sistema agroforestal cítricos-ovinos: posibilidades de adaptación y mitigación frente al cambio climático

José Antonio Torres Rivera^{1*}
Juan Guillermo Cruz Castillo¹
Sergio Alberto Curti Díaz²

¹Centro Regional Universitario Oriente (CRUO)-Universidad Autónoma Chapingo. México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). México.

*Autor de correspondencia: jtorresr@chapingo.mx

Introducción

Las frutas cítricas son de las más importantes en el mundo tanto por la superficie dedicada a su cultivo como por el valor de la producción y por ser de las más consumidas por la población (Sanfer, 2014). Pero mantener la productividad y la competitividad de la citricultura, ante un escenario de crisis financiera global, en el que se prevé disminución en el consumo de fruta y en consecuencia daños a la salud humana (Angelino *et al.*, 2019), y menores ingresos económicos para los productores, se vuelve un reto mundial; más aún si se considera que la problemática tradicional como actividad agrícola (rendimientos bajos por aplicación incipiente de la tecnología existente y diversos factores bióticos y abióticos adversos al cultivo, que están presentes en la mayoría de los países citrícolas, por décadas o siglos) se agrava con enfermedades que prácticamente ya se distribuyeron en el mundo, y que afectan fuertemente la producción o la calidad de la fruta producida; entre ellas, el Huanglongbing, virus de la tristeza y leprosis (Dala-Paula *et al.*, 2019). Además de otras con menor distribución, como es la clorosis variegada, muerte súbita, entre otras. Por otro lado, cada vez es más creciente la demanda de los consumidores a disponer de frutos inocuos y producidos agroecológicamente.

A todo lo anterior, se suman los efectos adversos derivados al cambio climático (CC) el cual, si bien siempre existe, últimamente se acrecentó de manera importante la problemática en toda actividad agropecuaria. Pero todo reto se puede convertir en oportunidad para mejorar y para mantener la productividad y así proporcionar alimentos sanos a los consumidores. Ello implica buscar alternativas de producción amigables con el ambiente, diversificar cultivos y hacer un uso más eficiente del tiempo y del espacio, donde se producen los cítricos. En ese sentido, las tecnologías agrosilvopastoriles resultan una buena opción de adaptación para hacer frente de manera sostenible a los problemas señalados.

Por otra parte, la producción de carne, lana, pieles y queso de ovinos no alcanza para satisfacer la demanda que hay en el país, por lo que se importa en promedio el 50% del consumo nacional. Razón por la cual los precios de dichos productos son los más altos en el mercado en comparación con otras especies pecuarias, lo que motiva desde hace ya va-

rias décadas un constante pero lento desarrollo de la ovinocultura. Aunque es en las zonas tropicales donde la ovinocultura más está creciendo, el potencial de hacerlo bajo sistemas integrados con árboles frutales es grande. La superficie destinada al cultivo de cítricos, que es de más de 530 mil hectáreas, es susceptible de ser manejada agroforestalmente con ovinos, con el beneficio no sólo de reducir los costos de producción en ambas actividades y de aprovechar las grandes oportunidades para los productos ovinos en el mercado nacional e incluso con los EUA donde viene disminuyendo el inventario ovino y hasta en el Viejo Mundo donde está creciendo la demanda de productos libres de agroquímicos llamados “orgánicos” o “naturales”, sino también de contribuir a los servicios ambientales que se logran cuando cítricos y ovinos comparten el mismo espacio (De Lucas-Tron, 2019; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, s.f.).

El cambio climático es uno de los nueve procesos ambientales que en conjunto regulan el funcionamiento y la estabilidad del planeta, otros son: agotamiento de ozono estratosférico, pérdida de biodiversidad, contaminación química, acidificación oceánica, uso del agua dulce, cambio en el sistema de tierras, ciclo de nutrientes, y carga de aerosoles. De todos ellos, el cambio climático es valorado como el principal riesgo al que se enfrenta la humanidad. Se considera que la causa más relevante del CC es la agricultura, especialmente la industrial y el uso intensivo de recursos en sus diversas formas, ya que se trata del principal impulsor de los cambios en el uso del suelo y de la cubierta terrestre, de la liberación de nitrógeno y fósforo a los suelos y cuerpos de agua, y de la pérdida de la biodiversidad (Campbell *et al.*, 2017; Borge *et al.*, 2020).

Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es la medida principal propuesta para mitigar el cambio climático junto con la eliminación de CO₂ de la atmósfera, por medios como la forestación o la conversión de sistemas agropecuarios sin árboles a sistemas agroforestales (Smith *et al.*, 2014). Al ser un problema complejo e interrelacionado, conlleva la necesidad de adoptar un enfoque holístico para entender mejor su dinámica y para ofrecer propuestas integrales a los problemas.

Se aplica un enfoque de sistemas basados en la teoría general de sistemas para facilitar el análisis de los componentes que se conjugan para formar el sistema agroforestal cítricos con ovinos en sentido amplio y complejo.

Por lo antes expuesto, el objetivo del presente capítulo es analizar de manera holística el funcionamiento del sistema agroforestal cítricos-ovinos a escala de parcela y de rebaño en sus dimensiones técnico-productivas y agroecológicas, en donde se enfatiza en las posibilidades de adaptación y mitigación frente al cambio climático.

Definición del sistema

El pastoreo en cítricos es un sistema y una tecnología silvopastoril porque combina, en la misma unidad de tierra, la producción simultánea de árboles frutales con la cría de animales. Aplicando los principios de la agroforestería, tiene como propósito diversificar la producción de alimentos de manera sustentable mediante la intensificación apropiada del uso de los recursos disponibles. Además, busca disminuir los riesgos del productor para aumentar la productividad vegetal y animal; mitigar los efectos perjudiciales del sol, del viento y de la lluvia sobre los suelos y, con ello, conservar o restaurar sus propiedades físicoquímicas y biológicas. Su finalidad es ofrecer productos y subproductos sanos para

el consumo humano y para los demás componentes vivos del agroecosistema. Adicionalmente, contribuir a reducir las transgresiones antropogénicas al cambio climático y demás límites ambientales del planeta (figura 1).

Figura 1
Diagrama del sistema agroforestal cítricos + ovinos



Fuente: Elaborada por los autores.

Organicidad y propiedades del sistema

Para transitar de un sistema convencional a uno silvopastoril se requiere la incorporación de cualquier especie pecuaria, pero los ovinos son los animales ideales para el pastoreo en huertas cítricas, ello debido a su talla relativamente pequeña y a su temperamento dócil; cualidades que facilitan las labores de manejo sin poner en riesgo la integridad física de las personas (incluyendo a niños y a ancianos) en comparación con otro ganado (por ejemplo: bovinos, equinos, cerdos). Las ovejas comen muchas más malezas y otras plantas que no son aceptadas por el ganado bovino, su horizonte de pastoreo está por abajo de los 40 cm, por lo que cumplen mejor el papel de “chapeadores”; como son animales altamente sociables, casi todas las actividades las realizan en grupo compacto y de manera coordinada, lo que facilita su manejo. El costo de cada animal es relativamente bajo, por lo que casi cualquier persona puede comprarlo y empezar a formar un rebaño, asimismo, la inversión en terreno, en construcciones, en equipos y en mano de obra requerida para el manejo es baja y menor que la necesaria para manejar otra especie de ganado. Así también, existe una gran demanda de animales para abasto y como reproductores, en muchas regiones de México es la carne más cara y apreciada; y debido a que su ciclo productivo es relativamente corto, el movimiento del capital invertido es mucho más rápido que con bovinos o con plantaciones de árboles frutales.

Sinergia y homeostasis

Para la agricultura convencional, la combinación intencionada de prácticas agrícolas y pecuarias en la misma unidad de tierra podría ser entendida como una simple *diversificación productiva*, es decir un proceso en el cual una empresa pasa a ofertar nuevos productos (cítricos + ovinos) para entrar directamente en nuevos negocios. Esa diversificación que implica también mayor biodiversidad en el terreno es una vía propuesta por el *enfoque tradicional productivista* para hacer que la agricultura de monocultivo pase a ser sustentable; asume que mientras más diverso (en cantidad) es un sistema resulta más sustentable, lo cual es relativamente cierto. Pero la finalidad de la agroforestería no es solamente el *multiuso* del terreno, que en el mismo espacio coincidan dos o más usos. También es *multi propósito y multifuncionalidad*, ya que el mismo sistema puede estar enfocado a proporcionar otros bienes privados y públicos además de los productivos, entre ellos: empleo, ahorro, seguridad, autonomía, estabilidad y resiliencia al cambio climático.

Efecto del cambio climático en los componentes del sistema

El aumento de la temperatura de la atmósfera tiene efectos adversos en todos los componentes subsidiarios del agroecosistema, que para fines de simplificar su análisis serán considerados como subsistemas: suelo, cobertura herbácea, árboles y ganado.

Suelo

El aumento de la temperatura del aire provoca mayor evaporación directa de agua en la superficie del suelo, creando en lugares con climas subhúmedos déficit para los cítricos y para los demás seres vivos del agroecosistema; para compensar la falta de agua, las plantas aumentan su tasa de extracción del subsuelo. Pero la temperatura y la humedad son factores que regulan muchos más procesos biogeoquímicos de los ecosistemas terrestres, como la tasa de descomposición de hojarasca, la mineralización de nitrógeno y la captación de nutrientes por las plantas.

La disminución de las precipitaciones y de la humedad del suelo que provocan sequías pueden disminuir la capacidad natural de absorción de CO₂ de las plantas, afectando su potencial de captura y de secuestro de carbono; sin embargo, durante la temporada de lluvias de verano el calentamiento probablemente provocará mayor actividad microbiana que aunado a la adición de fertilizantes nitrogenados probablemente conducirá al aumento en la liberación de mayores cantidades de CO₂, CH₄ y N₂O (Schaphoff *et al.*, 2013; Aguilera, 2016).

Aunque los agricultores conocen empíricamente que la cobertura herbácea es benéfica para mantener la humedad del suelo, a la mayoría se les convenció de lo contrario, es decir que deben mantener el suelo “limpio”, libre de malezas. Algunos citricultores utilizan instrumentos manuales como machete y azadón para deshierbar, lo que además de resequedad provoca erosión del suelo. En plantaciones tecnificadas el uso de herbicidas impacta de manera negativa en el contenido de materia orgánica del suelo, haciendo menos efectivo a los agroquímicos, por lo que se debe aumentar la dosis y la frecuencia de aplicación con los consecuentes daños a la fauna benéfica y a la salud de las personas.

El aumento de la temperatura provoca que se incremente la reproducción de la fauna edáfica, incluyendo a la benéfica como a la dañina. Pero un marcado aumento de la temperatura del aire con bajo contenido de humedad del suelo conducirá a la extinción de algunas especies, por ejemplo: colémbolos, lombrices, escarabajos estercoleros (Kardol *et al.*, 2011). En condiciones de clima cálido subhúmedo de Veracruz se encuentra hasta más de 20 °C de diferencia en la temperatura superficial del suelo bajo la sombra de árboles respecto a suelo desnudo del mismo sitio, lo cual sin duda repercute en la sobrevivencia de la fauna edáfica.

Cobertura herbácea

El aumento de la temperatura del aire representa en principio un crecimiento más vigoroso de la vegetación herbácea en las plantaciones citrícolas, lo cual por lógica aumenta los costos de mantenimiento de las huertas. Se estima que por el CC el número de deshierbes pudiera incrementarse al doble en terrenos de ladera donde normalmente se realizan uno o dos al año con machete o azadón, debiendo considerarse la desventaja de mayor pérdida de suelo debido a la pendiente y a las altas precipitaciones que prevalecen en tales regiones. En terrenos planos donde la citricultura está más tecnificada, el pronóstico es que se realicen uno o dos deshierbes adicionales a los tres a cinco actuales; el uso más frecuente de herbicidas y chapeadoras mecánicas ocasionará mayor impacto a la salud del suelo y a la de los árboles.

Es posible que algunas especies sensibles desaparezcan por el aumento de la temperatura y por disminución de la humedad disponible, siendo más probable que las malezas invasoras se incrementen, es decir que la perturbación sea ventajosa para las malezas colonizadoras. La invasión de especies exóticas está aumentando debido a la mayor amplitud de nichos de tales especies (Seebens *et al.*, 2018).

Se desarrollan diversas investigaciones dirigidas a determinar la diversidad de plantas herbáceas y sus índices ecológicos como abundancia, densidad, frecuencia, riqueza e importancia de especies presentes en huertas de cítricos.

Poco se conoce de los tipos de fotosíntesis que presentan las malezas en huertas citrícolas; esto es importante porque se sabe que las plantas C_4 son más eficientes en el uso del agua que las C_3 . El análisis de la flora herbácea, presente en huertas de Veracruz, pronostica predominio de familias con ruta fotosintética C_4 , tales como: *Amaranthaceae* (por ejemplo: *Amaranthus spinosus*), *Asteraceae* (por ejemplo: *Flaveria trinervia*), *Capparidaceae* (por ejemplo: *Cleome spp*), *Caryophyllaceae* (por ejemplo: *Drymaria cordata*), *Cyperaceae* (por ejemplo: *Cyperus rotundus*), *Euphorbiaceae* (por ejemplo: *Euphorbia hirta*), *Molluginaceae* (por ejemplo: *Mollugo verticillata*), *Poaceae* (=pastos, por ejemplo: *Cynodon dactylon*) y *Portulacaceae* (por ejemplo: *Portulaca spp*) que tienen alta eficiencia en el uso del agua, bajo punto de compensación de CO_2 y alta velocidad de crecimiento. Por el contrario, el cambio climático afectará negativamente a las familias C_3 , entre las que destacan: *Commelinaceae* (por ejemplo: *Commelina diffusa*) y *Fabaceae* (=leguminosas), consideradas "malezas nobles" por ser las que compiten menos con los cítricos, que protegen al suelo del impacto de las gotas de lluvia que generan erosión, que protegen de la exposición directa a los rayos del sol y que proporcionan materiales para mantener la fertilidad del suelo (Rowan *et al.*, 2012; Korres *et al.*, 2016).

Cítricos

El cambio climático, visto únicamente en el factor temperatura, deriva en dos escenarios para la citricultura: el primero es que, al aumentar la temperatura, la probabilidad de que ocurran heladas es menor, favoreciendo el desarrollo de los cítricos establecidos donde dicho fenómeno ocurre eventual o anualmente, pero también sugiere que puede haber nuevas áreas factibles para su cultivo, ahí donde antes las heladas eran una limitante fuerte para que los cítricos se desarrollaran. El segundo escenario se relaciona con el hecho de que los cítricos requieren temperaturas frescas para que ocurra la inducción floral, que generalmente ocurre en el rango de 15 a 20 °C (Tomoko *et al.*, 2018); en Florida la floración ocurre con un rango amplio de horas inductivas acumuladas, que van desde 712 a 1 474 horas debajo de 20 °C (Valiente y Albrigo, 2004), mientras que Albrigo (2008, comunicación personal) indica que se requieren 900 horas debajo de 19 °C para lograr una floración aceptable. Esto sugiere que, en el subtrópico, donde la floración se da principalmente por bajas temperaturas, el aumento de temperatura por el cambio climático será cada vez más, un factor limitante para lograr una floración aceptable.

En cambio, en las regiones tropicales, los árboles cítricos difícilmente podrán florecer a causa de una acumulación de horas frescas, pero sí por periodos de sequía; generalmente de tres a seis semanas de estrés hídrico favorecen una floración intensa en el árbol. Pero sequías prolongadas tienen efectos adversos en varios procesos de la fisiología de los árboles, como son: amarre y crecimiento de los frutos, abscisión de hojas y de frutos pequeños y en etapa de precosecha, consistencia del fruto. La calidad física y química de los frutos es otra consecuencia del CC, ya que éstos requieren temperaturas frescas para alcanzar el color y el sabor que prefieren los consumidores.

Con el aumento de la temperatura del aire se crean condiciones favorables para las plagas y para las enfermedades de los cítricos, algunas de las cuales son de alto impacto como el Huanglongbing (HLB), que repercuten elevando los costos de control fitosanitario y en pérdida de rendimiento de fruta, afectando más en sistemas de producción convencionales que en agroecológicos. La abundancia de microorganismos en las hojas se reduce con el manejo convencional de la producción de cítricos. La relación de microorganismos benéficos con el cítrico huésped puede elevar la productividad de frutos reduciendo enfermedades en el huerto (Carvahlo *et al.*, 2020).

Ganado

Los animales que sufren estrés por calor son afectados en su comportamiento ingestivo, productivo, reproductivo y salud. Cuando la temperatura ambiente sobrepasa el límite de tolerancia del ganado que se encuentran en sistemas de pastoreo, éste dedica menos tiempo a la búsqueda de alimento y por lo tanto come menos, y sus requerimientos de agua aumentan. El calor afecta negativamente la eficiencia de conversión alimenticia, reduce la ganancia de peso, la producción de leche y el rendimiento de lana de las ovejas. Los animales jóvenes tardan más tiempo en llegar a la pubertad, las hembras en edad reproductiva sufren irregularidad en su ciclo estral y pérdidas embrionarias, en los machos disminuye la libido y la calidad del semen, con lo cual la tasa de concepción del rebaño es más baja. El estrés por calor aumenta la tasa de mortalidad de animales jóvenes, por: dis-

minución de la condición corporal y menor producción de leche de las madres, dificultad al parto y menor peso al nacimiento; disminuye la respuesta inmunológica a enfermedades y se acorta la vida reproductiva útil.

Aunque por efecto de la sombra la temperatura bajo la copa de los árboles es menor comparativamente con una pradera sin árboles, en lugares con humedad elevada, como sucede en regiones cálido-húmedas, la evaporación es lenta y por consiguiente la pérdida de calor, lo que puede alterar el equilibrio térmico de los animales.

Propuestas tecnológicas de adaptación y mitigación frente al cambio climático

Manejo del suelo

En huertas de naranjo con suelo regosol eútrico, y con clima cálido húmedo de Veracruz, el pastoreo con ovinos durante cuatro años (carga constante de seis ovinos pelibuey/ha de 35 a 40 kg PV) logró beneficios edáficos, entre ellos que se redujera ($p \leq 0.01$) la compactación expresada como densidad aparente, que aumentara el contenido de P y K y que se incrementara la población de lombrices de tierra. No se encontraron efectos negativos en CE, pH, MO, N, Ca y Mg. La mayor precipitación en verano aumentó la humedad en el suelo y con ello disminuyeron los valores de CE, pH, N, K y Ca (cuadro 1).

Cuadro 1

Cambios en las propiedades del suelo en huertas cítricas según la época del año y el pastoreo con ovinos en Veracruz, México

Variable	Primavera		Verano	
	Sin pastoreo	Con pastoreo	Sin pastoreo	Con pastoreo
Densidad aparente (g/cm ³)	-	-	1.456 a	0.978 b
Humedad (%)	8.70 a	6.70 b	22.00 a	15.80 b
CE (mmhos/cm)	0.04 a	0.04 a	0.03 a	0.02 a
pH	5.10 a	5.25 a	4.10 a	4.50 a
M.O. (%)	3.15 a	2.75 a	2.85 a	2.50 a
N (%)	0.14 a	0.15 a	0.14 a	0.13 a
P (mg/kg)	18.95 b	24.70 a	20.35 a	20.02 a
K (mg/kg)	147.53 b	215.63 a	84.28 b	106.28 a
Ca (mg/kg)	497.00 a	424.17 a	266.50 a	291.00 a
Mg (mg/kg)	287.00 a	307.50 a	287.00 a	287.00 a
Lombrices (m ³)	-	-	85.25 b	236.82 a

Medias con distintas letras en la misma fila y para la misma época del año son diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Fuente: Torres *et al.*, 1999.

Manejo de la cobertura herbácea

Con el pastoreo se reduce la altura de la hierba, tanto por el consumo directo que hacen los animales como por cambios en la composición botánica ya que especies de hábito erecto tienden a desaparecer dejando su lugar a las de hábito rastrero y/o decumbente, con lo cual se reducen los costos por deshierbe y se da mayor protección a la superficie del suelo.

El pastoreo contribuye a reducir la frecuencia de especies indeseables hemiepífitas de los cítricos que son difíciles de controlar por métodos manuales o químicos, como las de los géneros *Anthurium*, *Monstera*, *Philodendron* y *Zyngonium* que, aunque el ganado normalmente no las consume por causar irritación en la boca, sí contribuye a reducir su presencia hasta en un 80% en el terreno.

Es importante considerar que el sobrepastoreo como el subpastoreo repercuten negativamente en la composición botánica y en la calidad de la cobertura herbácea, por lo que es conveniente mantener una asignación adecuada de forraje/animal.

El subpastoreo afecta más que el sobrepastoreo a la calidad químico-nutricional de la hierba, ya que el ganado consume primero las plantas más apetitosas, dejando para después o rechazando las menos palatables, tendiendo las primeras a desaparecer y las segundas a ocupar cada vez más superficie.

El pastoreo con ovinos es una alternativa de manejo de la maleza para las personas que no están dispuestas a establecer cultivos de cobertura en sus huertas. Citricultores entrevistados en Veracruz consideran que la cobertura interfiere con el cultivo de los cítricos, sobre todo por el alto requerimiento de mano de obra para su establecimiento, porque requiere un manejo cuidadoso para prevenir la competencia con el cultivo principal y porque pueden ser causa de accidentes. Sin embargo, donde estas y otras limitaciones puedan ser solucionadas, el uso de coberteras con leguminosas para control de malezas indeseables, para uso como abono verde y para enriquecimiento de la pastura es una posibilidad de adaptación al CC recomendable.

El uso de coberteras en huertas de cítricos puede reducir la pérdida de suelo ocasionada por lluvia abundante, además evitan pérdidas de P y de N, y la contaminación de fertilizantes químicos a otras huertas cultivadas en terrenos con pendientes (Zhang *et al.*, 2020).

Manejo de los cítricos

En un escenario de desarrollo epidemiológico exacerbado por el cambio climático, el pastoreo con ovinos se considera una práctica sustentable en el manejo integrado de plagas y de enfermedades de los cítricos.

La renovación de plantaciones con variedades resistentes a enfermedades como la tristeza de los cítricos o el HLB implica un periodo de tres años en los que no hay cosecha de frutos. En esta clase de terrenos se puede implementar el pastoreo para control de malezas.

Manejo del ganado

Diferentes opciones de integración de la citricultura y ovinocultura son propuestas; entre ellas el libre pastoreo (figura 2), el pastoreo rotacional (figura 3) durante el día con encie-

rro nocturno, el pastoreo por unas 2-3 horas en la mañana y tarde con encierro el resto del tiempo, y el confinamiento continuo con suplementación de subproductos de la huerta.

Para sistemas de pastoreo se recomiendan ciclos de ocupación cada cinco a seis semanas, procurando mantener una asignación de forraje de 7-9 kg MS/100 kg PV. Con ciclos más largos disminuye la calidad del forraje, con asignaciones menores la hierba se mantiene a baja altura pero los animales tienen menores ganancias de peso porque se obtiene menos alimento por bocado y por el gasto de energía al caminar más para satisfacer sus requerimientos de consumo; asignaciones menores de 5 kg MS/100 kg PV llegan a inducir en los animales el hábito de ramoneo; y asignaciones tan altas como 14 kg MS/100 kg PV no tienen efectos positivos en la ganancia de peso y por el contrario tienden a degradar la pastura.

En lugares donde la temperatura máxima del día sea superior a 25 °C se recomienda el sistema de pastoreo por la mañana y por la tarde, ya que en esas condiciones el consumo de forraje se reduce considerablemente durante el día. Cuando los animales tienen la posibilidad del pastoreo nocturno, éste puede llegar a ser del 70% del tiempo total que dedican a pastorear.

Cuando la lluvia es fuerte y está acompañada de viento, los bovinos y ovinos cesan su pastoreo, sin embargo, los animales hambrientos buscarán comer. En esas condiciones las hierbas más suculentas serán mayormente afectadas por el pisoteo que las que tienen tejidos más fibrosos.

Cuando se realice la desparasitación de los animales ésta deberá hacerse fuera de la huerta para evitar que los huevos o que las larvas de los parásitos queden en el terreno pues la sombra de los árboles es una barrera que limita el efecto desinfectante del sol. También porque cuando se utilizan productos como la ivermectina dicha sustancia permanece por un tiempo en el suelo matando a la micro y meso fauna benéfica.

Figura 2
Ovinos en naranjal (*Citrus sinensis*)
de la región cálido-subhúmeda
de Veracruz, en libre pastoreo



Figura 3
Ovinos en naranjal (*Citrus sinensis*)
de la región cálido-húmeda
de Veracruz, en pastoreo rotacional
con cerco eléctrico



Foto: José Antonio Torres Rivera.

El follaje y los frutos de los cítricos como recurso forrajero

En las condiciones de México los cítricos reciben diferentes tipos de podas, siendo la de renovación, en la que se corta todo el follaje quedando únicamente el tronco y las ramas principales, la que arroja mayor cantidad de hojas y de ramas tiernas con uso potencial en la alimentación de rumiantes, se realiza cada 12 a 15 años y mediante la cual se obtiene un volumen estimado de 3 a 4 t MS/ha. Otras son las podas de formación y de desarrollo que se limitan a cortar las puntas de las ramas a unos 10 cm y los brotes que se originan en el tronco, se realiza anual o bianualmente y se obtiene un volumen estimado de 1 a 2 t MS/ha. La poda de limpieza que se realiza en árboles adultos después de la cosecha de fruta proporciona una cantidad poco significativa de forraje para los animales pues está enfocada a eliminar ramas secas y rotas.

El análisis químico-nutricional de las hojas de naranja “Valencia” indica que contienen alrededor de 90% de materia seca (MS) de la cual un 25% es fibra neutro detergente (FND), lo que quiere decir que tienen mayor cantidad de nutrientes y que son más digeribles que las hierbas de la misma huerta. Entre 12 y 21% de la MS es proteína cruda (PC), la variación depende del sitio, de la especie patrón, de la eficiencia del portainjerto para absorber nutrientes y del manejo agronómico específico, por lo que se considera que es un forraje de buena calidad al superar el contenido de PC de las hierbas y porque cubre los requerimientos de mantenimiento tanto de corderos en crecimiento como de ovejas en lactación.

Se dice que gracias a los lípidos que recubren las hojas del limonero, en cabras lecheras se reduce la producción de metano en un 17.58% comparado con raciones que tienen heno de alfalfa como forraje base (Pérez-Baena *et al.*, 2017).

La composición química de los frutos es muy variable, depende principalmente del tipo de fruto, del grado de maduración, de las condiciones de cultivo y del proceso agroindustrial. La materia seca tiene bajo contenido de PC (5-11%), se valora más como fuente de energía con elevado potencial de degradación en el rumen, por lo que suele utilizarse como sustituto de cereales en las dietas.

Manejo del ramoneo indeseable

La principal preocupación para transitar de la citricultura convencional a la silvopastoril es el posible daño del ganado a los árboles por consumo del follaje o de la corteza, lo cual puede suceder cuando el manejo del agroecosistema es deficiente.

Las causas del ramoneo indeseable son múltiples, depende de factores propios del animal como son la dieta previa, raza, edad, sexo y salud; factores propios de las plantas como el sabor, estado fisiológico, abundancia y altura; factores ambientales como clima y suelo; y manejo impuesto como el sobrepastoreo, suplementación mineral y estrés.

Para evitar inducir el ramoneo indeseable en los animales, además de mantener una asignación adecuada de forraje, se debe proporcionar sales minerales a libre acceso sobre todo en la época de lluvias que es cuando aumenta el contenido acuoso de la hierba y como resultado el animal obtiene menor porcentaje de minerales pudiendo sufrir algún tipo de carencia.

Así también evitar coincidir el pastoreo con labores en los cítricos como son las podas y la cosecha, e impedir que personas extrañas alteren la conducta normal de los animales pues el estrés es un factor que induce al “apetito depravado”.

Otras medidas para proteger a los árboles del daño potencial por animales en pastoreo, son: la vigilancia constante por un pastor, quien se encargará de persuadir a los animales; retirar a los animales “problema” y cuando se haya detectado un porcentaje significativo de daños; el uso de barreras físicas, tales como cerco de alambre o malla electrificados; eliminar los factores que ocasionan que los animales desarrollen el hábito de rascarse, tales como parásitos externos y déficit vitamínico; el uso de repelentes, como son las aspersiones con heces frescas disueltas en agua aplicadas al follaje de plántulas y de árboles jóvenes o al tronco de árboles adultos; y la administración oral o por vía ruminal de eméticos (por ejemplo: LiCl, jarabe de ipecacuana), que inducen aversión al sabor del cítrico que se quiere proteger.

Efectos del pastoreo en las estructuras de los cítricos

Sistema radical

En huertas de la región cálido-húmeda de Veracruz, con árboles de 8 y de 16 años de establecidos, manejadas con pastoreo durante los últimos cuatro años, se observó una disminución en la cantidad total de raíces fibrosas respecto a huertas convencionales sin pastoreo, sin embargo con una mejor distribución vertical y horizontal en la rizosfera de un suelo regosol éutrico, que no se reflejó negativamente en las estructuras aéreas ($P \leq 0.05$).

En huertas convencionales sin pastoreo, próximas y con el mismo tipo de suelo, el 95% de las raíces fibrosas se concentraron en los primeros 40 cm de profundidad, mientras que en las huertas silvopastoriles el mismo porcentaje se distribuyó hasta los 70 cm de profundidad.

Las mejores propiedades fisicoquímicas y biológicas que induce el pastoreo al suelo explican que el árbol gaste menos energía en producir raíces y en penetrar para acceder a los nutrientes que necesita para sus otras funciones. Es posible también que la menor altura de la hierba por el consumo que hacen los animales contribuya a aumentar la temperatura edáfica bajo la copa de los árboles favoreciendo la actividad de absorción. En cuanto a la distribución horizontal, en huertas silvopastoriles las raíces llegan a explorar hasta más allá de la zona de goteo, mientras que en huertas convencionales la intoxicación del suelo por las aplicaciones de agroquímicos foliares y que escurren en la zona de goteo marcan el límite de exploración.

Tronco

En sistemas silvopastoriles la circunferencia del tronco es ligeramente mayor, así mismo el grosor de la corteza respecto a sus coetáneos sin pastoreo (cuadro 2).

Copa y follaje

Con el pastoreo la altura total del árbol disminuye, el diámetro de la copa aumenta ligeramente, la altura inferior de la copa aumenta considerablemente y con todo ello se tiene menor volumen de copa (cuadro 2).

Se encontraron diferencias en el tamaño de las hojas debido al pastoreo, no así entre épocas del año. En las huertas con pastoreo tienden a ser ligeramente más cortas en todas sus dimensiones, lo cual puede ser atribuido a múltiples factores, entre ellos: al menor contenido de agua y de carbono en el suelo necesarios para la fotosíntesis, y a un efecto antagónico del potasio sobre el magnesio causado por las heces del ganado que son ricas en dicho elemento.

El análisis foliar muestra que algunos elementos nutrimentales cuyo contenido es bajo en el análisis de suelo, como el N y el P están en cantidades altas en las hojas de huertas con pastoreo, no así en el caso del magnesio que estuvo ausente o en cantidades inapreciables. En estas circunstancias de suelos arenosos, con pH bajo y con altos niveles de potasio, es recomendable el encalado para mejorar su fertilidad y con ello favorecer el crecimiento del sistema radical y el desarrollo vegetativo de las estructuras aéreas de los árboles.

Frutos

En el estudio de caso referido no se encontraron diferencias significativas en el tamaño y en la forma de los frutos provenientes de huertas con y sin pastoreo, tampoco en el porcentaje de jugo (cuadro 2). El análisis físico-químico del jugo muestra que con el pastoreo éste tiene un contenido ligeramente menor de acidez titulable y de sólidos solubles totales, con una relación brix/ácido mejor respecto a frutos provenientes de huertas convencionales sin pastoreo según normas internacionales (Codex Alimentarius Commission, s.f).

Se recomienda el encalado para mejorar la calidad de los frutos. En Costa Rica la aplicación de 3 t/ha de $\text{CaCO}_3 + \text{MgO}$ en suelo con $\text{pH}=4.7$, tuvo un efecto significativo en el rendimiento de fruta y sólidos solubles totales (Molina y Rojas, 2005).

Cuadro 2

Arquitectura aérea, dimensiones y contenido de nutrientes en hojas, dimensiones del fruto, y características del jugo en naranjos según la época del año y el pastoreo con ovinos en Veracruz, México

Variable	Primavera		Verano	
	Sin pastoreo	Con pastoreo	Sin pastoreo	Con pastoreo
Circunferencia del tronco (cm)	-	-	58.30 b	60.10 a
Grosor de la corteza (mm)	-	-	2.78 b	3.02 a
Altura total del árbol (m)	-	-	5.10 a	4.71 b
Altura inferior de la copa (m)	-	-	0.68 b	1.14 a
Diámetro de la copa (m)	-	-	4.87 a	5.01 a
Volumen de copa (m^3)	-	-	61.82 a	54.47 b
Largo de lámina de hoja (cm)	71.00 a	67.70 b	71.40 a	68.65 a
Ancho de lámina de hoja (cm)	41.65 a	38.70 b	41.10 a	40.95 a
Área de lámina de hoja (cm^2)	1 598 a	1 415 b	1 551 a	1 442 a
N foliar (%)	1.94 a	1.95 a	1.94 b	2.03 a
P foliar (ppm)	1 820 a	1 426 b	1 637 a	1 677 a
K foliar (ppm)	20 907 b	27 032 a	20 907 b	26 907 a
Ca foliar (%)	2.00 b	2.19 a	2.47 b	2.57 a
Mg foliar (%)	0.07 a	0.07 a	0.16 a	0.00 b
Peso del fruto (g)	222.65 a	207.50 b	195.95 a	205.90 a
Volumen del fruto (dm^3)	23.95 a	20.40 b	18.95 a	19.05 a
Porcentaje de jugo del fruto (%)	46.5 a	47.7 a	49.4 a	49.5 a
Porcentaje de bagazo del fruto (%)	53.5 a	52.4 a	50.6 a	50.5 a
Sólidos solubles totales del jugo ($^{\circ}\text{brix}$)	9.4 b	9.8 a	9.9 a	9.3 b
Acidez titulable del jugo (%)	0.73 a	0.80 a	1.62 a	1.01 b
Relación sólidos/acidez del jugo	12.89 a	12.32 a	6.21 b	9.66 a

Medias con distintas letras en la misma fila y para la misma época del año son diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). Fuente: Torres *et al.*, 1999.

Costos de la propuesta

Análisis financiero

Adoptar el pastoreo en plantaciones de cítricos implica una serie de gastos que en un sistema de producción convencional no sería necesario realizar. Uno de ellos es el cercado perimetral con malla borreguera para evitar que los animales salgan o que depredadores entren a la propiedad. El uso de tecnologías agroforestales como cercas vivas, setos, o barreras de protección pueden cumplir dicha función con la ventaja de que al paso del tiempo se incrementa su valor, lo que no ocurre con las cercas que utilizan postes de concreto o de madera muerta que se van depreciando.

El corral para el confinamiento nocturno de los animales es el mayor de los costos fijos que se debe realizar. El otro gasto es la compra de animales como pie de cría, pero éstos representan una inversión que rinde utilidades.

Los análisis financieros arrojan que en épocas de crisis, en la citricultura, por ejemplo, cuando se desploman los precios de la fruta o cuando por problemas fitosanitarios aumentan los costos de producción y bajan las utilidades, los ovinos pueden absorber las pérdidas que tienen los citricultores y aun así dar utilidades sobre los costos totales.

Aun en momentos de no crisis el sistema cítricos-ovinos arroja mejores indicadores financieros que el monocultivo de cítricos, con tasas internas de retorno (TIR) superiores en promedio de 25% y con relación beneficio/costo mayor al 50%.

Esto se explica por ahorros en los costos de deshierbe que en algunos lugares y sistemas de producción pueden llegar a representar del 30 al 50% de los costos totales de producción.

Reflexiones finales

La interacción de ambos componentes básicos, cítricos y ovinos, confieren homeostasis al sistema completo, y lo hacen menos vulnerable al cambio climático. Los productos de uno son entradas para el otro, y es ese intercambio lo que permite que el sistema permanezca a pesar del desorden que provocan las presiones externas.

Pero es importante cuidar que las operaciones funcionen correctamente, maximizando las interacciones positivas y minimizando las negativas.

Aspectos destacados

1. Se analiza de manera holística el funcionamiento del sistema agroforestal cítricos-ovinos a escala de parcela y de rebaño en sus dimensiones técnico-productiva, agroecológica y socioeconómica.
2. Se enfatiza en las posibilidades que tienen los productores de cítricos y de ovinos de adaptación y mitigación frente al cambio climático.
3. Proporciona los principios que rigen a los sistemas agroforestales con frutales y ganado, por lo que puede servir como guía para otros productores con otras especies de árboles y con otros tipos de ganado.

Literatura citada

- Aguilera, E.M. (2016). The influence of management practices on the greenhouse gas balance of mediterranean cropping systems. Identifying the climate change mitigation potential through quantitative review and life cycle assessment. Doctoral thesis. Universidad Pablo de Olavide. Sevilla, Spain. 416 p.
- Angelino, D.; Godos, J.; Ghelfi, F.; Tieri, M.; Titta, L.; Lafranconi, A.; Marventano, S.; Alonzo, E.; Gambera, A.; Sciacca, S.; Buscemi, S.; Ray, S.; Galvano, F.; Del Rio, D y Grosso, G. (2019) Fruit and vegetable consumption and health outcomes: an umbrella review of observational studies. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. 70(6): 652-667, DOI: 10.1080/09637486.2019.1571021
- Borge, R.; Dunlop, K.; Gerten, D.; Herzog, H.J.; Juanes, R.; St-Claire, A.L.; Linares, P.; Losada, I.J.; Lumberras, J. y Moreno, J.M. (2020). Cambio climático Bases científicas y cuestiones a debate. 2ª Edición. Universidad Politécnica de Madrid / Fundación Naturgy. España. 96 p.
- Campbell, B.M.; Beare, D.J.; Bennett, E.M.; Hall-Spencer, J.M.; Ingram, S.I.; Jaramillo, F.; Ortiz, R.; Ramankutty, N.; Sayer, J.A. y Shindell, D. (2017). Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society* 22(4): 8. <https://www.ecologyandsociety.org/vol22/iss4/art8/>
- Carvalho, C.R.; Dias, A.C.F.; Homma, S.K.; Cardoso, E.J.B.N. (2020). Phyllosphere bacterial assembly in citrus crop under conventional and ecological management. *PeerJ*. 8: e9152 <https://doi.org/10.7717/peerj.9152>
- Codex Alimentarius Commission (s/f). Norma General del CODEX para zumos (jugos) y néctares de frutas. (CODEX STAN 247-2005). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y Organización Mundial de la Salud (OMS). Roma, Italia. 21 p. <http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/es/> (Consultado 12 agosto 2021).
- Dala-Paula, B.M.; Plotto, A.; Bai, J.; Manthey, J.A.; Baldwin, E.A.; Ferrarezi, R.S. y Gloria, M.B.A. (2019). Effect of Huanglongbing or Greening Disease on Orange Juice Quality, a Review. *Frontiers in Plant Science*. 9: 1-19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01976>
- De Lucas-Tron, J. (2019). Producción ovina en México y sus perspectivas. *Revista Borrego y Cabra Internacional*. 1(1): 6-10.
- Hernández A.D.R.; Mateus C.D. y Orduz-Rodríguez, J.O. (2014). Características climáticas y balance hídrico de la lima ácida Tahití (*Citrus latifolia* Tanaka) en cinco localidades productoras de Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 8(2): 217-229.
- Kardol, P.; Reynolds, W.N.; Norby, R.J. y Classen, A.T. (2011). Climate change effects on soil microarthropod abundance and community structure. *Appl. Soil. Ecol.* 47: 37-44.
- Korres, N.E.; Norsworthy, J.K.; Tehranchian, P.; Gitsopoulos, T.K.; Loka, D.A.; Oosterhuis, D.M.; Gealy, D.R.; Moss, S.R.; Burgos, N.R.; Miller, M.R. y Palhano, M. (2016). Cultivars to face climate change effects on crops and weeds: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 36(12): 1-22.
- Molina, E. y Rojas, A. (2005). Efecto del enclado en el cultivo de naranja valencia en la zona norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 29(3): 81-95.
- Pérez-Baena, I.; Martí-Vicent, J.V.; Palomares-Carrasco, J.L.; Fernández-Martínez, J.C.; Segarra, J.V. y Jorro-Ripoll, F. (2017). Valoración nutritiva de la hoja de limonero y su influencia sobre el rendimiento lechero en ganado caprino. *Nutrinsights*. 10: 20-27.
- Rowan, F.S.; Tammy, L.S. and Ferit, K. (2012). Photorespiration and the evolution of C₄ photosynthesis. *Annu. Rev. Plant Biol.* 63:19-47.
- Sanofer, A.A. (2014). Role of Citrus fruits in health. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 6(2): 121-123.
- Seebens, H.; Blackburn, M.; Dyer, E.; Genovesi, P.; Hulme, E.; Jeschke, M.; Pagad, S.; Pyšek, P.; Van Kleeunen, M.; Winter, M.; Ansong, M.; Arianoutsou, M.; Bacher, S.; Blasius, B.; Bocklerhoff, E.; Brundu, G.; Capinha, C.; Causton, E.; Celesti-Grapow, L.; Dawson, W.; Dullinger, S.; Economo, E.; Fuentes, N.; Guénard, B.; Jäger, H.; Kartesz, J.; Kenis, M.; Kühn, I.; Lenzner, B.; Liebhold, A.; Mosena, A.; Moser, D.; Nentwig, W.; Nishino, M.; Pearman, D.; Pergl, J.; Rabitsch, W.; Rojas-Sandoval, J.; Roques, A.; Rorke, S.; Rossinelli, S.; Roy, H.; Scalera, R.; Schindler, S.; Štajerová, K.; Tokarska-Guzik, B.; Walker, K.; Ward, D.; Yamanaka, T. y Essl, F. (2018). Global rise in emerging alien species results from increased accessibility of new source pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 115(10): 12741-12745. <https://www.pnas.org/content/115/10/E2264>

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (s.f.). Anuario Estadístico de la Producción Ganadera. https://nube.siap.gob.mx/cierre_pecuario/ (Consultado 28 noviembre 2020).
- Smith, P.; Bustamante, M.; Ahammad, H.; Clark, H.; Dong, H.; Elsiddig, E.A.; Haberl, H.; Harper, R.; House, J.; Jafari, M.; Masera, O.; Mbow, C.; Ravindranath, N.H.; Rice, C.W.; Robledo Abad, C.; Romanovskaya, A.; Sperling, F. y Tubiello, F. (2014). *Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)*. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. (Consultado 22 febrero 2021). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter11.pdf
- Torres-Rivera, J.A. (1996). Caracterización del agroecosistema naranjo-ovino en Tlapacoyan, Veracruz (Estudio de caso). Tesis de Maestría en Ciencias en Agroecosistemas Tropicales. Colegio de Postgraduado en Ciencias Agrícolas - Instituto de Recursos Naturales Campus Veracruz, Veracruz. México. 150 p.
- Torres-Rivera, J.A.; Ortega-Jiménez, E.; Pacheco-Velasco, J.E.; Ruiz-Rosado, O., y Castillo-Gallegos, E. (1999). Cambios en propiedades del suelo de un agroecosistema cítrícola inducidos por la época del año, edad de árboles y pastoreo de ovinos. *Agrociencia* 33(2): 149-158.
- Tomoko E.; Takehiko, S.; Yumi, N.; Hiroshi, F.; Hikaru, M.; Naoko, N.; Yoshinori, I. and Mitsuo, O. (2018). Abscisic acid affects expression of citrus FT homologs upon floral induction by low temperature in Satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.). *Tree Physiology* 38: 755–771 doi:10.1093/treephys/tpx145
- Valiente, J.I. y Albrigo, L.G. (2004). Flower bud induction of sweet orange trees (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck): Effect of low temperatures, crop load, and bud age. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 129(2): 158-164.
- Zhang, N.; Zhang, Q.; Li, Y.; Zeng, M.; Li, W.; Chang, C.; Xu, Y. y Huang, Ch. (2020). Effect of groundcovers on reducing soil erosion and non-point source pollution in citrus orchards on red soil under frequent heavy rainfall. *Sustainability* 12: 1146. doi:10.3390/su12031146

VI.2. Experiencias del uso de tecnologías agroforestales en sistemas ganaderos de Chiapas, México, como estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático

Deb Raj Aryal
René Pinto Ruiz*
Francisco Guevara Hernández
Adalberto Hernández López
Francisco J. Medina Jonapá
Mariela B. Reyes Sosa
José A. Venegas Venegas
Luz María Macías Morales

Cuerpo Académico Consolidado en Agroforestería Pecuaria. Facultad de Ciencias Agronómicas.
Universidad Autónoma de Chiapas.

*Autor de correspondencia: rene.pinto@unach.mx

Introducción

El cambio climático está transformando a los ecosistemas de la tierra; mucho se trata en diversos medios de cómo la ganadería provoca o estimula uno de los factores que lo produce: el efecto invernadero; sin embargo, también es importante discutir lo contrario: cómo el cambio climático afecta a los sistemas ganaderos. El cambio climático constituye una espiral de retroalimentación en donde la producción pecuaria contribuye al problema, sufre las consecuencias, pero también puede contribuir a mejorarlo.

Por un lado, en comparación con las cantidades de carbono procedentes de los cambios en el uso de la tierra y la degradación de la tierra, las emisiones de la cadena alimentaria son reducidas. Por tanto, para el CO₂ las acciones de mitigación deben focalizarse en la problemática de los cambios en el uso de la tierra y la degradación de la misma. En este ámbito, el sector agropecuario tiene un gran potencial para la retención de carbono. Afortunadamente existen múltiples y efectivas opciones para su mitigación (Steinfeld *et al.*, 2006; Gerber *et al.*, 2013), ejemplos de ellas son el reducir la deforestación, así como la retención de carbono a través de prácticas agrícolas.

Asimismo, el cambio climático pone en riesgo el bienestar de los animales al poner en riesgo su salud, el acceso a los alimentos y al agua, estrés térmico entre muchos más, de tal forma que también se requiere el desarrollo de estrategias que apoyen la adaptación de la ganadería a los efectos que dicho cambio produce en ella, ejemplo de ellas es la mejora de los sistemas de manejo de los animales con el fin de mejorar el bienestar de los mismos.

Ambas estrategias pueden lograrse con la implementación de tecnologías agroforestales, las cuales comprenden un conjunto de especificaciones para los roles, arreglos y manejo de árboles y componentes asociados, reportando muchos beneficios (Pinto *et al.*, 2014a), incluyendo el almacenamiento o captura de CO₂ en la planta y suministrándose indirectamente al suelo así como promoviendo un mejor comportamiento animal debido a la sombra, la cual minimiza el efecto del calor ambiental en los animales.

Por lo anterior, el objetivo del presente capítulo es divulgar experiencias obtenidas sobre el uso de tecnologías agroforestales como estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático en sistemas ganaderos del trópico del sur de México.

Experiencia del uso de árboles dispersos y cercas vivas en áreas ganaderas como estrategia para mitigar el cambio climático

Se reconoce que la demanda de proteína animal aumenta con el crecimiento de la población humana y con los cambios en los hábitos alimentarios de la misma (Erb *et al.*, 2016). La mayor demanda de productos de origen animal, especialmente de carne y de leche, llevó a incrementar la extensión y la intensidad de la producción pecuaria a nivel mundial (Steinfeld *et al.*, 2006), para lo cual la conversión de los ecosistemas forestales a praderas en monocultivo y, consecuente, el incremento de emisiones de carbono incrementó enormemente la huella ambiental del sector (Gerber *et al.*, 2013). México es uno de los países en América Latina con alta tasa de conversión de tierras forestales a tierras ganaderas (Palma-García, 2014; Mendoza-Ponce *et al.*, 2018). Dentro de México, la región sur-sureste ha sufrido una mayor tasa de conversión de vegetación nativa a tierras ganaderas y, como consecuencia, contribuye con una mayor emisión de carbono por el cambio de uso de suelo (De Jong *et al.*, 2010).

Una de las alternativas para la mitigación de emisiones de carbono es la incorporación de árboles o de arbustos en los sistemas ganaderos extensivos cuyo objetivo es, entre otros, aumentar la capacidad de fijación y de almacenamiento de carbono atmosférico, mitigando así el efecto invernadero.

Tecnologías agroforestales

Para evidenciar lo anterior, en este capítulo se presentan la experiencia y los resultados de la evaluación de dos tecnologías agroforestales.

Árboles dispersos en el potrero

Potrero en donde las especies leñosas se siembran de manera dispersa sin ningún arreglo lineal. En muchos casos, se dejan crecer los árboles o arbustos nativos que no se talaron durante el proceso de conversión de una tierra forestal a una tierra ganadera. La inclusión en estos potreros de múltiples especies de leñosas con diferentes alturas y cobertura del dosel crea una estructura de vegetación de dos o tres estratos (figura 1). Es una de las tecnologías que los productores de la región implementan desde hace mucho tiempo por características tales, como: uso de la regeneración natural, arreglos sencillos sin orden específico de plantación y poco o nulo cuidado de las leñosas. Algunas especies utilizadas en estos sistemas en el estado de Chiapas, son: *Tabebuia rosea*, *Diphysa americana*, *Guazuma ulmifolia*, *Cordia alliodora*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Byrsonima*

crassifolia, entre otras. De acuerdo al trabajo de Aryal *et al.* (2019), la densidad de árboles en esta modalidad en áreas ganaderas de Chiapas puede variar de 118 a 282 árboles/ha.

Figura 1

Árboles dispersos en potrero con apacentamiento de ganado bovino en la Depresión Central de Chiapas

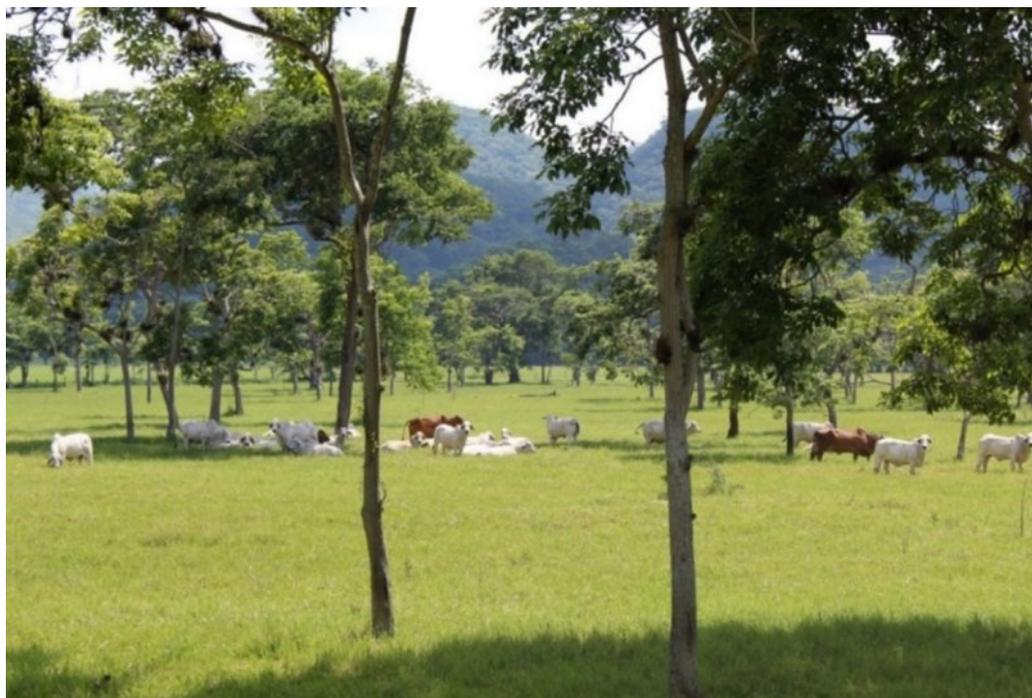


Foto: Beatriz Peña Álvarez.

Cerca viva

Plantación lineal de árboles o de arbustos utilizados para dividir potreros, en los cuales se llevan a cabo el pastoreo rotacional o para separar diferentes usos de la tierra dentro de los ranchos ganaderos (figura 2). Esta tecnología agroforestal es implementada por los productores de la región utilizando diferentes especies arbóreas nativas o exóticas. Cabe mencionar que los productores de la región prefieren las especies de rápido crecimiento o las que se pueden reproducir vegetativamente, por ejemplo: *Bursera simaruba*, *Gliricidia sepium*, *Jatropha curcas*, *Guazuma ulmifolia*, *Faramia occidentalis*, entre otras. La combinación de especies maderables y de especies forrajeras o de especies de otros propósitos, como leña, hace que las cercas vivas tengan múltiples estratos arbóreos. La poda es una práctica común en cercas vivas, especialmente para proveer forrajes en temporada seca y para mantener la cerca a cierta altura. Además de captura de carbono y mitigación de estrés térmico de los animales, las cercas vivas interconectan los parches de bosque con los agroecosistemas como corredores biológicos que contribuyen en la conservación de biodiversidad.

Figura 2
Cerca viva en potrero con apacentamiento de ganado bovino en la región
Frailesca, Chiapas, México



Foto: Deb Raj Aryal.

Acumulación de carbono en biomasa leñosa

La acumulación de carbono en biomasa arbórea es una función clave que distingue los sistemas silvopastoriles con los sistemas convencionales de pastos en monocultivos (figura 3). Por la presencia de árboles y de arbustos leñosos, el tiempo de retención del carbono fijado de la atmosfera es más largo en los primeros comparado con las praderas convencionales (Chapman *et al.*, 2020) pues, aunque las plantas herbáceas, en estos sistemas, también fijan carbono en su biomasa, el tiempo de retención de carbono es corto debido al consumo continuo por los animales en pastoreo y por el crecimiento cíclico de las herbáceas

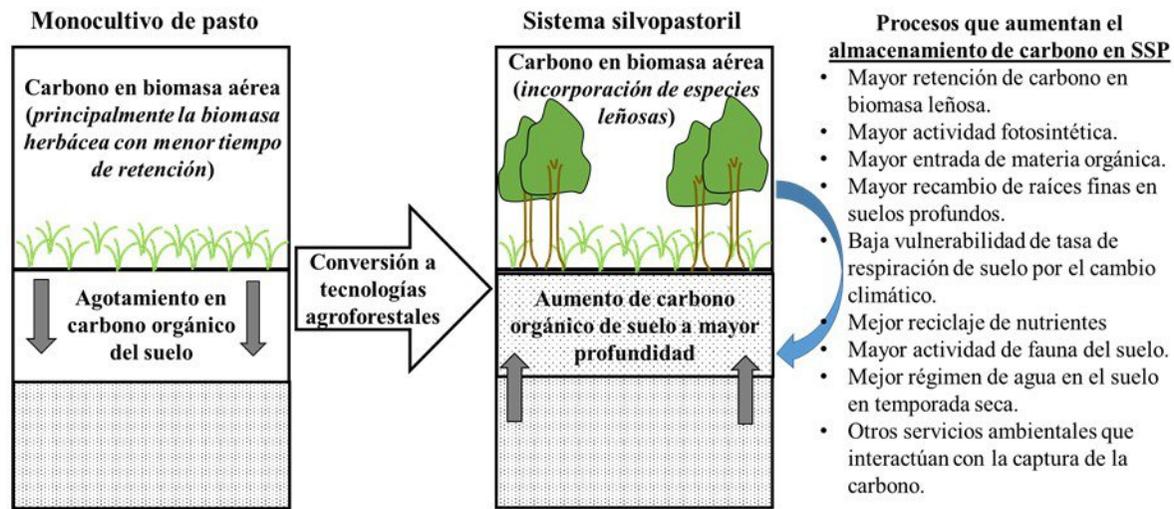
Es necesario destacar que la acumulación y la tasa de fijación de carbono puede modificarse por varios factores, entre ellos: tipo de vegetación, composición de especies, clima, suelo, topografía, la edad, la historia de uso de la tierra, manejo, el grado de perturbación, carga animal y manejo de la rotación (Fernández *et al.*, 2020).

Sobre el tema, los resultados derivados, en Chiapas, indican que un sistema silvopastoril de árboles dispersos en potrero con diversas especies arbóreas nativas de la región y con pastos mejorados puede llegar a almacenar de 5.3 hasta 16.5 t C/ha en su biomasa aérea. Por otro lado, en el mismo Estado, un sistema silvopastoril de cerca viva con múltiples especies llega a almacenar hasta 4.7 t C/ha en su biomasa aérea (Morales-Ruiz *et al.*, 2021). Si se comparan las cantidades de carbono que se almacenan en sistemas silvopastoriles, los valores podrían parecer bajos en comparación a los sistemas forestales primarios de la región ya que éstos llegan a almacenar hasta alrededor de 63 a 107 t C/ha en su biomasa aérea (Aryal *et al.*, 2018a; Aryal y Ruiz-Corzo, 2020). Sin embar-

go, se resalta que las cantidades de carbono que se encuentran en la biomasa leñosa en los sistemas silvopastoriles, están ausentes en sistemas de pastos en monocultivo (cuadro 1).

Figura 3

Representación conceptual de los procesos que influyen en la fijación, recambio y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles comparado con un sistema de pasto en monocultivo



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 1

Cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea en diferentes sistemas silvopastoriles de Chiapas, México

Área de estudio	Sistema	Biomasa aérea (t C/ha)	Referencia
Región Costa, Chiapas	Árboles dispersos en potrero	5.3 – 8.2	Lara-Nucamendi (2018)
Región Costa, Chiapas	Cercas vivas	1.7 – 4.2	Lara-Nucamendi (2018)
Depresión central, Chiapas	Arboles dispersos en potrero	11.5 – 14.6	Aryal <i>et al.</i> (2019)
Depresión central, Chiapas	Cercas vivas	4.7	Morales-Ruiz <i>et al.</i> (2021)
Depresión central, Chiapas	Árboles dispersos en potrero	16.5	Morales-Ruiz <i>et al.</i> (2021)
Depresión central, Chiapas	Pasto en monocultivo	2.9	Morales-Ruiz <i>et al.</i> (2021)

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

Área de estudio	Sistema	Biomasa aérea (t C/ha)	Referencia
Fraillesca, Chiapas	Bosque de Pino	74.3 – 107.3	Aryal y Ruiz-Corzo (2020)
Fraillesca, Chiapas	Bosque tropical sub-caducifolia	63.5	Aryal <i>et al.</i> (2018a)

Fuente: Elaborado por los autores.

La tasa anual de fijación de carbono varía por diferentes factores. En un estudio en Chiapas, los árboles dispersos en potrero y las cercas vivas presentaron una tasa de acumulación de 0.2 - 2.2 t C/ha/año, indicando que los sistemas silvopastoriles actúan como un sumidero de carbono (Morales-Ruiz *et al.*, 2021), entendiendo que un sumidero es un sistema que captura más carbono de lo que emite.

En este sentido, aunque el suelo del sistema de pasto en monocultivo tenga una cantidad de carbono equivalente al encontrado en sistemas silvopastoriles, la presencia de biomasa leñosa aérea hace que el sistema silvopastoril posea un alto potencial en la fijación y en la retención de carbono. Además de la implementación de sistemas silvopastoriles, la conservación de los remanentes forestales dentro de la unidad de producción ganadera puede contribuir positivamente en la mitigación de gases de efecto invernadero (Aryal *et al.*, 2018a).

Carbono orgánico en suelo

El suelo contiene casi el triple de carbono que toda la biomasa de la vegetación mundial. En la actualidad, este reservorio es el que almacena más carbono de la atmósfera (Lorenz y Lal, 2014). En México, el cambio de uso de suelo de vegetación nativa a potreros abiertos ha causado un agotamiento de carbono orgánico de suelo (COS) hasta en un 30% (Aryal *et al.*, 2018b). En este sentido, conservar o aumentar el carbono orgánico en el suelo en tierras ganaderas es de vital importancia. Una de las estrategias prometedoras para aumentar el COS en tierras ganaderas es implementar los sistemas silvopastoriles. Al respecto, se conoce que la transferencia de carbono a los horizontes más profundos de suelo a través del crecimiento de raíces es otra característica fundamental de un sistema silvopastoril, pues la cobertura vertical de raíces en sistemas de herbáceas es más somera y limita la incorporación de materia orgánica en perfiles profundos de suelo. Esta diferencia, en la distribución de biomasa de raíces, afecta la acumulación de carbono orgánico en el suelo entre un sistema silvopastoril y uno de pasto en monocultivo (Bossio *et al.*, 2020).

Los estudios sobre carbono en suelo en Chiapas demostraron que los sistemas silvopastoriles almacenan hasta 20-30% más COS que un sistema de pasto en monocultivo (Casanova-Lugo *et al.*, 2018; Aryal *et al.*, 2019). Al respecto, las cercas vivas y los árboles dispersos en potreros en Chiapas presentaron entre un 2.1 y 3.1% de COS en el suelo a una profundidad de 0 a 30 cm (Morales-Ruiz *et al.*, 2021). Cabe destacar que la presencia de árboles en sistemas silvopastoriles propicia la acumulación de más carbono

recalcitrante (menos lábil) que se caracteriza por el tiempo prolongado de retención, aumentando así el carbono orgánico total en el suelo. Además, hay que considerar que la pérdida de carbono por erosión de suelo es más alta en potreros abiertos que en potreros con árboles.

Se consideran los resultados positivos arriba descritos; se recomienda que los sistemas ganaderos consideren los siguientes principios fundamentales, ello con el fin de aumentar la captura de carbono en el suelo:

- La acumulación de carbono orgánico del suelo es un balance entre la entrada y la salida de carbono en el sistema.
- Se debe aumentar la tasa de entrada de materia orgánica y reducir su tasa de pérdida con medidas biológicas y con un manejo adecuado del sistema.
- Aumentar la tasa de estabilización de la materia orgánica por medidas físico-químicas y complejos órgano-mineral.
- Aumentar la profundidad o volumen total de suelo que retenga carbono orgánico (explotación de la capacidad de subsuelo).

Al respecto, implementar sistemas silvopastoriles en áreas ganaderas aumenta el carbono orgánico del suelo debido a la producción y descomposición de las raíces finas a diferentes profundidades de suelo. La asociación entre los árboles y pastos en estos sistemas genera un ambiente favorable pues se mejora el régimen de agua y de temperatura, lo cual contribuye a un crecimiento adecuado de raíces finas, especialmente en la temporada seca. Un estudio en Chiapas demostró que la producción de raíces finas se correlaciona positivamente con la acumulación de carbono orgánico en el suelo, pues se encontró que en un sistema de árboles dispersos se produce en promedio 45.4 g m²/año de raíces finas comparado con los 9.4 g m²/año reportados para pastos en monocultivo (Morales-Ruiz *et al.*, 2021). La concentración de carbono orgánico de suelo, en el mismo estudio, fue del 3.1% en el sistema de árboles dispersos comparado con el 1.6% en praderas en monocultivo. Se reconoce que la presencia de árboles, preferentemente leguminosos, mejora la fertilidad de suelo y la penetración de raíces finas en horizontes más profundos del suelo (Montejo-Martínez *et al.*, 2020).

La respiración de suelo es otra variable que puede afectar el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo. Un estudio en el trópico húmedo de Tabasco demostró que las cercas vivas de *G. sepium* tienen un mayor potencial para reducir la variabilidad de las emisiones de CO₂ del suelo en comparación a los sistemas ganaderos con praderas en monocultivo (Villanueva-López *et al.*, 2016). En el mismo estudio, el flujo de carbono por la respiración del suelo varió, dependiendo de la especie de pasto, en la temporada seca y en la lluviosa del año (Adame-Castro *et al.*, 2020). Aunque el flujo de CO₂ del suelo a la atmósfera podría aumentar con el aumento de la concentración de CO₂, la pérdida relativa de carbono por respiración heterotrófica de suelo a escala de paisaje será más alta en sistemas de pastos en monocultivo que en sistemas silvopastoriles o en sistemas forestales (Villanueva-López *et al.*, 2016; Aryal *et al.*, 2017).

Experiencia del uso de pasturas en callejones como estrategia de adaptación al cambio climático en ovinos

En los próximos años, los pronósticos mundiales indican aumentos en la temperatura global del planeta. Se conoce que las temperaturas altas, las cuales podrían estar por arriba de 27 °C (Sejian *et al.*, 2017), afectan al animal; así, cuando la zona termoneutral de un animal es excedida, ocurre una respuesta fisiológica en un intento de mantener el bienestar del animal, produciéndose cambios en el consumo de alimento, el cual tiende a disminuir como mecanismo de protección para reducir la producción de calor metabólico, aumenta el consumo de agua, normalmente se eleva la temperatura corporal y se incrementa el ritmo respiratorio (Pérez *et al.*, 2020). Aunado a lo anterior, también se esperan cambios en la disponibilidad del agua para el ganado, en la cantidad de agua utilizada por animal y en la manera de satisfacer tal necesidad y que variará de acuerdo a la región. El desconocimiento del grado en que el calor afecta a la biología de los animales y a la aparición de nuevas enfermedades es todavía mayor.

Se cree probable que algunos de los efectos más notables del cambio climático se dejen notar en los sistemas principalmente de pastoreo, sin embargo, existen diversas maneras de incrementar la capacidad de adaptación de este tipo de sistemas. Una de ellas es la intervención en los sistemas de manejo del ganado, con el fin de permitir el desarrollo de prácticas de adaptación eficientes y asequibles, sistemas que deberían proporcionar zonas de sombra y de agua para reducir el estrés del calor generado por el aumento de la temperatura. Para tal efecto, se considera que la reforestación, a través de prácticas silvopastoriles, sea una de las más viables, tanto por su facilidad para ponerla en práctica como por su rentabilidad.

Se reconoce que los sistemas silvopastoriles son un sistema complejo y, según el diseño y el manejo, tienen potencial para la mitigación y adaptación al cambio climático, debido principalmente a que ofrecen múltiples beneficios en la productividad del sistema ganadero, al mejorar el acceso a alimento tanto en cantidad como de calidad (Urbina *et al.*, 2019) así como a sombra, la cual contribuye a regular la temperatura ambiental y a proteger al animal de la insolación directa (Ibrahim *et al.*, 2006).

Tecnología agroforestal

Para explorar lo anterior, se realizó la evaluación de la tecnología agroforestal, en este caso, la llamada pastura en callejones, en el predio La Trinidad, propiedad de un productor cooperante dedicado a la producción y a la comercialización de ganado ovino. El rancho se localiza en el municipio de Villaflores, al oeste del estado de Chiapas, México. Se sitúa entre los 16°13'15" de latitud norte y 93°16'07" longitud oeste, a una altitud de 610 m sobre el nivel del mar; el clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano; una temperatura media anual de 24.3 °C y presenta una precipitación pluvial media anual de 1 209 mm, distribuidas principalmente en verano (García, 1989).

La pradera silvopastoril consistió en una asociación de los pastos *Cynodon plecostachyus* e *Hyparrhenia ruffa*, asociados con *Leucaena leucocephala* y con *Guazuma ulmifolia* bajo la modalidad silvopastoril conocida como pastura en callejones. Los árboles se encuentran sembrados en hileras sencillas y alternadas, orientados de oriente a

poniente a una distancia entre hileras de tres metros y a un metro entre árboles. La altura de poda de los árboles fue a los 0.90 m, con la finalidad de que el material forrajero estuviera a disposición del animal para su ramoneo. Esta pradera tiene una edad de tres años de establecida y una superficie de tres hectáreas (figura 4). La pradera de gramíneas en monocultivo consistió en un potrero establecido con el pasto *Cynodon plectostachyus*, contaba con cinco años de establecida y una superficie de cuatro hectáreas.

La evaluación para la época seca fue realizada en los meses de marzo y d abril de 2019, mientras que la evaluación para la época lluviosa fue en los meses de agosto a septiembre del mismo año. Los animales entraban a pastorear en cada parcela durante tres días ajustando la carga animal a la disponibilidad de forraje ofrecido.

Figura 4
Ovinos en una pastura en callejones de *Cynodon plectostachyus* asociada con *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* en la región Frailesca, Chiapas, México



Fuente: René Pinto Ruiz.

Su efecto sobre la conducta del pastoreo

Esta variable es de suma importancia ya que un incremento en la temperatura ambiental provocado por el cambio climático podría modificar el consumo de alimento por el animal (Tarazona *et al.*, 2012), aspecto directamente ligado con la producción.

Los resultados obtenidos del trabajo arrojaron que la actividad de pastoreo fue similar ($P > 0.05$) en ambos tipos de praderas dentro de cada época (8.78^a y 9.08^a hr para la época seca y 6.62^a y 6.75^a hr para la época lluviosa tanto en la pradera silvopastoril como en la pradera en monocultivo, respectivamente), lo que indica que el nivel de cobertura arbórea en la pradera asociada no intervino en el tiempo de pastoreo, puesto que algunos trabajos reportan un mayor tiempo de apacentamiento en praderas con coberturas arbóreas.

reas (Parra *et al.*, 2017) pues discuten que, bajo estas condiciones, los animales varían su estrategia de pastoreo en respuesta al nivel de cobertura existente así como a cambios en la fenología y en la disponibilidad del pasto presente en las áreas de pastoreo bajo dosel.

Sin embargo, hay que considerar el tiempo que los animales dedican al ramoneo en la pradera asociada (2.40 vs. 1.85 hr, para la época seca y lluviosa, respectivamente), lo cual suma un mayor tiempo de actividades dedicadas al consumo por parte de los ovinos. Los valores de ramoneo representaron el 10.0 y 7.7% del total de tiempo diario de actividades del ovino para la época seca y para la lluviosa, respectivamente. Los animales destinaron una parte de su tiempo, equivalente al 27% del tiempo invertido en pastoreo, al ramoneo de las arbóreas presentes. Lo anterior indica que un sistema arbolado podría fomentar mayor tiempo al consumo de alimento al sumar a las actividades del pastoreo, el ramoneo, lo que podría apoyar la posibilidad de disminuir las afectaciones en el consumo animal bajo temperaturas críticas.

Por otro lado, el análisis de la conducta diurna de los ovinos pastoreando la pradera silvopastoril a lo largo de 12 horas, considerando que éstas se realizaron bajo sol o sombra en la época seca reveló que tanto el pastoreo como el ramoneo se realizó indistintamente bajo sol o bajo sombra. Sin embargo, para el tiempo dedicado al descanso y rumia, los ovinos dedicaron mayor tiempo a realizar ambas actividades bajo sombra. Por otro lado, en la época lluviosa, los animales invirtieron mayor tiempo en pastorear, en descansar y en rumiar bajo sombra. En esta misma época, el ramoneo fue realizado por los animales bajo el sol.

Se conoce que el dosel de los árboles crean un microclima con efectos positivos en el animal, explicados por el cambio en el comportamiento de los animales, ejemplo de ello son los mayores valores encontrados para las horas dedicadas al descanso y rumia bajo sombra en los ovinos pastoreando la pradera asociada en ambas épocas del año, lo cual podría explicarse debido a que estas actividades son buscadas a realizarse por los animales en las mejores condiciones de tranquilidad y ambientales (Parra *et al.*, 2017).

Los porcentajes del tiempo diurno que los ovinos pastorearon bajo sol (28%) y bajo sombra (28.9%), descansaron y rumiaron bajo sol (3.6%) y bajo sombra (26.0%), fueron muy similares a los reportados en ovinos pastando *P. saman* y *G. ulmifolia* durante la época seca (Zambrano *et al.*, 2010). Por otro lado, el tiempo diurno invertido en realizar actividades a la sombra en los ovinos fue de 7.51 hr, superando a ovinos en praderas sin cobertura vegetal (5.3 hr) durante el verano, lo cual confirma la importancia del dosel arbóreo como aportador de sombra para los animales. Los beneficios anteriores son muy importantes ante posibilidades de incrementos en la temperatura ambiental.

Su efecto sobre las actividades asociadas al pastoreo

En cuanto a la influencia del tipo de pradera sobre conductas asociadas al clima tales como el número de veces que orina al día (NVO), número de veces que el animal accede al agua al día (NVA) y consumo de agua (CA); los mayores valores se encontraron en los animales pastando la pradera en monocultivo en la época seca. También, se encontraron diferencias en los valores de NVA en los animales que se encontraban en la pradera en monocultivo durante la época de lluvias.

Para la época seca, los ovinos que pastaron la pradera en monocultivo orinaron más veces (33.8), comportamiento que podría estar relacionado a un mayor número de veces que accedieron a la fuente de agua (8.6) y por tanto al mayor consumo de agua obtenido (5.8 L), mientras que, en los ovinos de la pradera silvopastoril, los valores de estas variables fueron menores. La posible explicación para lo ocurrido en esta época podría estar asociada a los beneficios de bienestar que los árboles de la pradera asociada ofrecen. La presencia de árboles pudo haber contribuido a que la pérdida de líquidos provocada por la radiación solar en los ovinos fuera menor, contribuyendo a disminuir los requerimientos de agua de los animales y por tanto que tomaran menos agua, ya que se reporta que la cantidad de agua consumida es mayor durante el tiempo caluroso por pérdida de líquidos, que en los periodos fríos y en los húmedos.

Para la época de lluvia, se encontró que los animales de la pradera en monocultivo accedieron más a las fuentes de agua, pero, a pesar de ello, en cada toma ingirieron poca agua, ya que el consumo total de agua fue similar entre praderas. Por tanto, podría inferirse que la presencia de árboles minimiza el consumo de agua en la pradera asociada y maximiza las principales actividades de los ovinos. Las veces que orinaron hizo que consumieran más agua por el desgaste hídrico, la cantidad de agua consumida fue mayor en la época seca en los animales en la pradera en monocultivo, pudiendo estar asociado este comportamiento a las condiciones de bienestar ambiental que provocan las praderas con arbóreas.

Su efecto sobre temperatura corporal del animal

Se reportó que, para la época seca, la temperatura rectal promedio de los animales en ambos tipos de praderas fue similar, mientras que, para la época lluviosa, los mayores valores se encontraron en los ovinos pastando la pradera en monocultivo.

Los valores encontrados y cuyo rango oscilaba de 38.4 a 39.6 °C se encuentran dentro de los límites fisiológicos reportados como adecuados (38.0-39.5 °C), aunque el valor para la pradera en monocultivo en la época lluviosa supera ligeramente este rango.

Por otro lado, en la época lluviosa, se presentaron diferencias lo cual pudo estar asociado a la mayor humedad ambiental presentada en la época (79.9% para la época lluviosa vs. 63.5% para la época seca), pues para no crear situaciones de estrés en los animales se considera como aceptable 70.0% de humedad ambiental, siempre y cuando la temperatura ambiental esté dentro de la zona termoneutral, la cual es considerada de 10.0 a 27.0 °C (Sejian *et al.*, 2017). Se sabe que la relación entre la temperatura y entre la humedad ambiental son importantes en el balance calórico del animal. En este trabajo, la temperatura ambiental en las praderas fue 26.3 °C en la época lluviosa y 26.0 °C en la seca.

En esta época, los ovinos presentaron menor temperatura rectal en la pradera asociada (39.2 °C), la posible explicación podría estar relacionada a que la cobertura arbórea de la pradera asociada pudo haber disminuido la temperatura rectal en los animales debido a la creación de un microclima que aminoró el efecto adverso sobre todo de la humedad ambiental y de la radiación solar (Jhonson, 1987).

Lo anterior es de importancia ya que animales con estrés calórico pueden padecer, consecuentemente, una disminución del consumo de pasto, más aún en el caso de haber

una disminución del tiempo de pastoreo (Pinto *et al.*, 2014b), lo cual no sucedió en el trabajo mencionado. Sin embargo, cabe señalar que el comportamiento de la variable en los animales pastando la pradera silvopastoril tuvo una tendencia a presentar valores menores en ambas épocas en comparación a los animales de la pradera en monocultivo, esto podría explicarse por el hecho de que los árboles en las praderas tienen un alto potencial para disminuir el estrés calórico en los animales ya que, a través de su sombra, contrarrestan la intensidad de los factores climáticos, pues interfieren parcialmente el paso de las radiaciones solares hacia la superficie corporal del animal, disminuyen el estrés térmico y crean condiciones de bienestar.

Reflexiones finales

El uso de tecnologías agroforestales, tales como la implementación de árboles dispersos en el potrero y en la cerca viva, contribuyen de manera importante en la retención de CO₂ en la planta y en el suelo en áreas ganaderas, así también, su uso en callejones en praderas mejoradas favorecen el manejo animal ante cambios ambientales, brindan oportunidades claras de mitigación y adaptación al cambio climático en los sistemas ganaderos, sin embargo, las estrategias de manejo del socioecosistema deberán basarse en un conocimiento profundo de los procesos naturales y en reconocer aquellas externalidades y otras limitantes que aún impiden el escalamiento de dichas tecnologías.

Aspectos destacados

1. Los árboles dispersos en el potrero pueden contribuir con una captura de 5.3 hasta 16.5 t C/ha.
2. El uso de cercas vivas llega a almacenar hasta 4.7 t C/ha en su biomasa aérea.
3. Los árboles en callejones en praderas proporcionan bienestar al animal ante cambios ambientales.

Literatura citada

- Adame-Castro, D.E.; Aryal, D.R.; Villanueva-López, G.; López-Martínez, J.O.; Chay-Canul, A.J. y Casanova-Lugo, F. (2020). Diurnal and seasonal variations on soil CO₂ fluxes in tropical silvopastoral systems. *Soil Use and Management*. 36(4): 671-681. <https://doi.org/10.1111/sum.12644>
- Aryal, D.R. y Ruiz-Corzo, R. (2020). Carbon accumulations by stock change approach in tropical highland forests of Chiapas, Mexico. *Journal of Forestry Research*. 31: 2479–2493.
- Aryal, D.R.; De Jong, B.H.J.; Mendoza-Vega, J.; Ochoa-Gaona, S. y Esparza-Olguín, L. (2017). Soil Organic Carbon Stocks and Soil Respiration in Tropical Secondary Forests in Southern Mexico. *Progress in Soil Science*. Pp. 153-165. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43394-3_14
- Aryal, D.R.; Gómez Castro, H.; Del Carmen García, N.; José Ruiz, O.J., Molina Paniagua, L.F.; Jiménez Trujillo, J.A.; Venegas Venegas, J.A.; Pinto Ruiz, R.; Ley de Coss, A. y Guevara Hernández, F. (2018a). Potencial de almacenamiento de carbono en áreas forestales en un sistema ganadero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 9(48): 150-180. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.184>
- Aryal, D.; Morales Ruiz, D.; Tondopó Marroquín, C.; Pinto Ruiz, R.; Guevara Hernández, F.; Venegas Venegas, J.; Ponce Mendoza, A.; Villanueva López, G.; Casanova Lugo, F.; Rodríguez Larramendi, L.; Ley de Coss, A.; Hernández López, A.; Medina Jonapá, F.; Velázquez Sanabria, C.; Alcudia Aguilar, A. y Euán Chi, I. (2018b). Soil Organic Carbon Depletion from Forests to Grasslands Conversion in Mexico: A Review. *Agriculture*. 8(11): 181. <https://doi.org/10.3390/agriculture8110181>
- Aryal, D.R.; Gómez-González, R.R.; Hernández-Nuriasmú, R. y Morales-Ruiz, D.E. (2019). Carbon stocks and tree diversity in scattered tree silvopastoral systems in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*. 93(1): 213-227. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0310-y>

- Bossio, D.A.; Cook-Patton, S.C.; Ellis, P.W.; Fargione, J.; Sanderman, J.; Smith, P.; Wood, S.; Zomer, R.J.; von Unger, M.; Emmer, I.M. y Griscom, B.W. (2020b). The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability*. 3(5): 391-398. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>
- Casanova-Lugo, F.; Petit-Aldana, J.; Solorio-Sánchez, F.; Ramírez-Avilés, L.; Ward, S.E.; Villanueva-López, G. y Aryal, D.R. (2018). Carbon stocks in biomass and soils of woody species fodder banks in the dry tropics of Mexico. *Soil Use and Management*. 34(4): 500-509. <https://doi.org/10.1111/sum.12456>
- Chapman, M.; Walker, W.S.; Cook-Patton, S.C.; Ellis, P.W.; Farina, M.; Griscom, B.W. y Baccini, A. (2020). Large climate mitigation potential from adding trees to agricultural lands. *Global Change Biology*. 26(8): 4357-4365. <https://doi.org/10.1111/gcb.15121>
- De Jong, B.; Anaya, C.; Maser, O.; Olguín, M.; Paz, F.; Etchevers, J.; Martínez R.D.; Guerrero D. y Balbontín, C. (2010). Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecology and Management*. 260(10): 1689-1701.
- Erb, K. H.; Lauk, C.; Kastner, T.; Mayer, A.; Theurl, M.C. y Haberl, H. (2016). Exploring the biophysical option space for feeding the world without deforestation. *Nature communications*. 7: 11382.
- Fernández, P.D.; de Waroux, Y.P.; Jobbágy, E.G.; Loto, D.E. y Gasparri, N.I. (2020). A hard-to-keep promise: Vegetation use and aboveground carbon storage in silvopastures of the Dry Chaco. *Agriculture, Ecosystems y Environment*. 303: 107117. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107117>
- García, E. (1989). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Kopen (3ª ed.). Universidad Nacional Autónoma de México. D.F. México. 252 p.
- Gerber, P.J.; Steinfeld, H.; Henderson, B.; Mottet, A.; Opio, C.; Dijkman, J.; Falcucci, A. y Tempio, G. (2013). *Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 115 p.
- Gerber, P.J.; Steinfeld, H.; Henderson, B.; Mottet, A.; Opio, C.; Dijkman, J.; Falcucci, A. y Tempio, G. (2013). *Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 115 p.
- Ibrahim, M.; Villanueva, C.; Casasola, F. y Rojas, J. (2006). Sistemas silvopastoriles como una herramienta para el mejoramiento de la productividad y restauración de la integridad ecológica de paisajes ganaderos. *Pastos y Forrajes*. 29(4): 383-419.
- Lara-Nucamendi A. (2019). Almacenamiento de carbono en biomasa arbórea y suelo de prácticas silvopastoriles en la Reserva de la Biosfera La Sepultura, Chiapas. Tesis de Maestría en Ciencias. *Universidad Autónoma de Chiapas*. Chiapas, México. 69 p.
- López, A.; Pinto. R.; Guevara. F.; Medina, F.; Hernández, D. y Ortega, L. (2017). La microhistología y su aplicación en la agroforestería pecuaria. Editorial Fontamara. D.F. México. 127 p.
- Lorenz, K. y Lal, R. (2014). Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 34(2): 443-454. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0212-y>
- Mendoza-Ponce, A.; Corona-Núñez, R.; Kraxner, F.; Leduc, S. y Patrizio, P. (2018). Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico. *Global Environmental Change*. 53: 12-23.
- Montejo-Martínez, D.; Díaz-Echeverría, V.F.; Villanueva-López, G.; Aryal, D.R.; Casanova-Lugo, F.; Canul-Solís, J.R. y Escobedo-Mex, J.G. (2019). Fine root density and vertical distribution of *Leucaena leucocephala* and grasses in silvopastoral systems under two harvest intervals. *Agroforestry Systems*. 94(3): 843-855. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00457-6>
- Morales-Ruiz, D.E.; Aryal, D.R.; Pinto Ruiz, R.; Guevara Hernández, F.; Casanova Lugo, F. y Villanueva López, G. (2021). Carbon contents and fine root production in tropical silvopastoral systems. *Land Degradation y Development*. 32(2): 738-756. <https://doi.org/10.1002/ldr.3761>
- Morales-Ruiz, D.E.; Aryal, D.R.; Pinto Ruiz, R.; Guevara Hernández, F.; Casanova Lugo, F. y Villanueva López, G. (2021). Carbon contents and fine root production in tropical silvopastoral systems. *Land Degradation y Development*. 32(2): 738-756. <https://doi.org/10.1002/ldr.3761>
- Palma-García, J.M. (2014). Escenarios de sistemas de producción de carne de bovino en México. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 18(1): 53-62.
- Parra Herrera, J.P y Estrada Cely, G.E.; Parra Floriano, D.A. y Montealegre Vallejo, N.M. (2017). Efecto de diferentes sistemas enriquecidos sobre el comportamiento de bovinos doble propósito en producción lechera en la amazonia Colombiana. REDVET. *Revista Electrónica de Veterinaria*. 18(12): 1-22. ISSN: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=636/63654640037>

- Pérez, R.; Macías, U; Avendaño, L.; Correa-Calderón, A.; López, M. y Lara, A. (2020). Impacto del estrés por calor en la producción de ovinos de pelo. Revisión. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*. 11(1):205-222. (Consultado 11 de noviembre de 2020). <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4923>
- Pinto-Ruiz, R.; Hernández, D.; Gómez, H.; Cobos, M.A.; Quiroga, R. y Pezo, D. (2010). Árboles forrajeros de tres regiones ganaderas de Chiapas, México: Usos y características nutricionales. *Universidad y Ciencia*. 26(1): 19-31. (Consultado 29 noviembre 2020). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792010000100002&lng=es&tying=es.
- Pinto-Ruiz, R.; Gómez-Castro, H.; Guevara-Hernández, F.; Hernández-Sánchez, D. y Ruiz-Sesma, B. (2014a). Preferencia y conducta ingestiva de ovinos alimentados con frutos arbóreos tropicales. *Revista Científica*, 24(2): 158-163. (Consultado 29 noviembre 2020). ISSN: 0798-2259. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=959/95930636008>
- Pinto-Ruiz, R.; Ortega-Reyes, L.; Gómez-Castro, H.; Guevara-Hernández, F. y Hernández-Sánchez, D. (2014b). Comportamiento animal y características de la dieta de bovinos pastoreando estrella africana sola y asociada con árboles. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 5(3): 365. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v5i3.3982>
- Sejian, V.; Bhatta, R.; Gaughan, J.; Malik, P.; Naqvi, S. and Lal, R. (2017). Adapting sheep production to climate change. In: *Sheep production adapting to climate change*. Ed. Springer Singapore. Singapore. 441 p.
- Steinfeld, H.; Gerber, P.; Wassenaar, T.D. *et al.* (2006) *Livestock's long shadow: environmental issues and options*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 390 p.
- Tarazona, A.M.; Ceballos, M.C.; Naranjo, J.F., y Cuartas, C.A. (2012). Factores que afectan el comportamiento de consumo y selectividad de forrajes en rumiantes. *Rev Colomb Cienc Pecu*. 25: 473-487.
- Urbina-Cruz, F.M.; Pinto-Ruiz, R.; Ramírez-Díaz, R.; Guevara-Hernández, F.J.; Hernández-López, A.; Medina-Jonapá, F.J.; Aryal, D.R. y Venegas-Venegas, J.A. (2019). Composición botánica y calidad de la dieta de bovinos en un sistema silvopastoril intensivo. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 22(1): 71-72. (Consultado 29 noviembre 2020). ISSN: 0188-7890. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=837/83757427032>
- Villanueva-López, G.; Martínez-Zurimendi, P.; Ramírez-Avilés, L.; Aryal, D.R. y Casanova-Lugo, F. (2016). Live fences reduce the diurnal and seasonal fluctuations of soil CO₂ emissions in livestock systems. *Agronomy for Sustainable Development*. 36(1): 1-8. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0358-x>
- Villanueva-López, G.; Martínez-Zurimendi, P.; Ramírez-Avilés, L.; Aryal, D.R. y Casanova-Lugo, F. (2016). Live fences reduce the diurnal and seasonal fluctuations of soil CO₂ emissions in livestock systems. *Agronomy for Sustainable Development*. 36(1): 1-8. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0358-x>
- Zambrano, C.; Altuve, E.; Zambrano, L. y Parraga, C. (2010). Conducta de ovinos a pastoreo en sistema silvopastoril tradicional con predominio de Saman (*Phitecellobium saman*) y Guácimo (*Guazuma ulmifolia*). *Rev. Unell. Cienc. Tec.* 29-34.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del estado de Chiapas (ICTI) y al Programa para el Desarrollo Profesional Docente, para el tipo Superior (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública (SEP) de México.

VI.3. Escarabajos estercoleros: adaptación y mitigación al cambio climático en sistemas agroforestales pecuarios

Lucrecia Arellano^{1*}
David Douterlungne²
José Antonio Torres Rivera³
Alfredo Ramírez Hernández²
Felipe Barragán Torres²

¹Instituto de Ecología, A. C., Red de Ecoetología.

²Catedrático CONACyT/Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.,
División de Ciencias Ambientales.

³Centro Regional Universitario Oriente. Universidad Autónoma Chapingo.

*Autor de correspondencia: lucrecia.arellano@inecol.mx

El impacto de la ganadería en la emisión de gases de efectos invernadero

El aumento en los gases de efecto invernadero (GEI) es una preocupación mundial, pues afecta la dinámica de los ecosistemas y desajusta la regulación climática. Las emisiones de GEI por cambios en el uso del suelo se deben, en parte, a la transformación de ecosistemas arbolados en pastizales, contribuyendo así al calentamiento global (Post *et al.*, 2017). En contraste, pequeños cambios en las prácticas ganaderas podrían aumentar el secuestro de carbono (C) en el suelo y en la vegetación, reduciendo las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y de metano (CH₄) a la atmósfera, que son los GEI más importantes que causan el efecto invernadero.

Los suelos y la vegetación de sistemas productivos con árboles son sumideros de C (Orjuela, 2018). Su capacidad de absorción y de almacenamiento se relaciona con el tamaño y con el crecimiento de los árboles, con la estructura de la vegetación, el potencial productivo del sitio y con el uso de los insumos, entre otros. Aproximadamente, un tercio de las emisiones netas de C podrían ser evitadas si se detiene la deforestación y si se promueve la reforestación (Argotty *et al.*, 2017).

La ganadería es una de las principales actividades productivas, siendo el sustento de 1 300 millones de personas en situación de pobreza en el mundo (Texeira *et al.*, 2018) pero ésta contribuye con un 18% de los GEI antropogénicos, de los cuales el 65% provienen del óxido nitroso (N₂O) y cerca del 50% del CH₄ (FAO, 2018). Bajo los modelos de producción convencionales esta actividad representa un alto costo ambiental por la pérdida de biodiversidad y por el desequilibrio de los ecosistemas que se generan por la expansión de las zonas abiertas.

El CH₄ es un GEI con potencial de calentamiento global 20 veces mayor que el CO₂. Es un subproducto natural de la digestión de los herbívoros, pues las bacterias me-

tanogénicas presentes en el estómago de los rumiantes (y en el ciego de los no rumiantes) digieren los carbohidratos del forraje para producir energía para ellas y luego para su hospedero, generando metano, dióxido de carbono e hidrógeno que, en parte, son utilizados en otras cadenas metabólicas. El exceso de CH₄ es eliminado a través de los eructos y de las flatulencias, también por la volatilización de la materia fecal excretada que contribuye así al calentamiento global.

Por consiguiente, urge entender y aplicar manejos y tecnologías que reduzcan la emisión de GEI en sistemas ganaderos y que además sean diseñados con una visión integral, que permita mejorar el funcionamiento de los ecosistemas y de sus procesos, aumentar o mantener la biodiversidad y que puedan ayudar a la restauración de ambientes de pastoreo y de suelos degradados que conduzcan a beneficios económicos, sociales y ambientales.

La ampliación de la frontera agrícola mediante la deforestación y la implementación de monocultivos para cubrir la creciente demanda de alimentos de las sociedades rurales y de las urbanas, promovido por la revolución verde, representa no solo pérdida de la masa arbolada sino también de biodiversidad, alterando los ciclos del agua y del C, necesarios para la homeostasis del planeta.

El uso intensivo del terreno para obtener las mayores ganancias y en el menor tiempo posible, paradigma de la agricultura y de la ganadería modernas, lleva a la degradación, a la erosión o a la pérdida irreparable de los recursos para la producción. El mantenimiento del ciclo de nutrientes en el suelo es clave para la rentabilidad de las actividades productivas como la ganadería. Es necesario buscar métodos para conservar la fertilidad del suelo, la diversidad biológica y los servicios ecosistémicos existentes en la parcela. Uno de ellos es el manejo biológico del suelo.

El objetivo del presente capítulo es resaltar la importancia de los sistemas agroforestales pecuarios en la conservación de la fauna edáfica, y presentar los beneficios que ésta proporciona a los suelos y a las plantas que se usan para alimentación del ganado. Se enfatizan los beneficios que los escarabajos estercoleros proporcionan a los demás componentes bióticos y abióticos del sistema ganadero, resaltando el papel que éstos desempeñan para la mitigación y adaptación al cambio climático.

Manejo biológico del suelo

El suelo es un ecosistema vivo y complejo compuesto por agua, aire, minerales e infinidad de seres vivos que interactúan activamente. Es más que el sustrato físico que da soporte a la mayoría de las actividades humanas, y la ganadería no es la excepción.

El manejo inadecuado del suelo afecta sus propiedades a un grado que va desde imperceptible hasta la degradación permanente. Por ejemplo, en algunos sistemas ganaderos, el pisoteo continuo por el ganado produce compactación, con reducción de espacios porosos para la aireación, el flujo y la retención de agua, sobre la abundancia y la actividad microbiana. Como consecuencia, menos nutrientes están disponibles en el suelo y, a su vez, las raíces de las plantas tienen mayor dificultad para acceder a los nutrientes. En tales condiciones, se reduce la producción de pasto para el ganado con pérdidas económicas importantes.

Una de las prácticas más frecuentes para mejorar la producción de las pasturas en suelos pobres es la fertilización química, pero las plantas solo son capaces de absorber entre 30 y 50% de esos minerales, el resto se pierde en el suelo o se evapora. A corto o a largo plazo el uso frecuente de esos fertilizantes provoca eutrofización, toxicidad y contaminación del agua; variación del pH y deterioro de la estructura del suelo; así como desequilibrios biológicos y reducción de la biodiversidad en los ecosistemas. Como alternativa, los abonos orgánicos y la actividad de la fauna edáfica proveen nutrientes o los ponen disponibles para las plantas, mejorando a su vez la estructura del suelo, la infiltración del agua, el ciclaje de nutrientes, el crecimiento radical y además contribuyen al control de la erosión.

De poco sirve añadir materiales orgánicos al suelo si no se cambian los factores que determinaron el desequilibrio en el ciclo de nutrientes y que generaron su deficiencia. Para un modelo de ganadería amigable ambientalmente, es necesario buscar la aplicación de prácticas que mejoren la calidad del suelo y que mantengan su biota, donde el desarrollo y la calidad de los forrajes sea favorecida. Para ello, es importante evaluar el manejo productivo relacionado con esas prácticas, lo que permitirá una planificación más eficiente para la conservación de suelos con el fin de mejorar sus funciones a largo plazo (Farías y Arellano, 2016).

La macrofauna del suelo

El suelo es probablemente uno de los ecosistemas terrestres más diversos, pues mantiene aproximadamente el 25% de las especies de nuestro planeta (Gardi *et al.*, 2014). La mayoría de los procesos biogeoquímicos para convertir la materia orgánica (MO) en el suelo a su forma utilizable por las plantas sería imposible sin esta fauna que vive en el suelo.

Existen diferentes maneras de clasificar a los organismos del suelo: por taxonomía, por tamaño o por la función que cumplen en el suelo. La microfauna, constituida por microorganismos (menores a 1 mm) descomponedores de MO, es responsable del ciclaje de nutrientes por su capacidad enzimática. Algunos viven libremente en el suelo, otros en los exudados de las raíces de las plantas o en simbiosis con las raíces, como los hongos micorrízicos y las bacterias fijadoras de nitrógeno. Entre ellos se encuentran los protozoos, los nemátodos y los rotíferos.

La mesofauna incluye a organismos desde 0.2 hasta 2.0 mm (ácaros, colémbolos, dipluros, tisanópteros y psocópteros, entre otros) que facilitan la diseminación de esporas, de hongos y de otros microorganismos, por lo que son conocidos como catalizadores de la actividad microbiana. Sin estos organismos, las plantas son incapaces de absorber nutrientes importantes como nitrógeno o fósforo (Hernández-Vigoa *et al.*, 2018).

La macrofauna está formada por organismos entre 2 mm y 20 cm, como los ciempiés y los milpiés, las cochinillas y los caracoles, que transforman los restos vegetales al triturarlos para aumentar la superficie de acceso a los microorganismos descomponedores; las arañas, los opiliones y los pseudoescorpiones funcionan como depredadores. También forman parte de la macrofauna las lombrices de tierra, las termitas, las hormigas, las gallinas ciegas y los escarabajos estercoleros que participan en los procesos de humificación y de mineralización de la materia orgánica. Estos organismos tienen un impacto

tan grande en su hábitat que son vistos como ingenieros del ecosistema, ya que son importantes en la transformación de las propiedades del suelo y favorecen la formación de agregados y la estructura, el movimiento y la retención del agua, así como el intercambio gaseoso (Velásquez y Lavelle, 2019).

Las interacciones a múltiples niveles entre los organismos del suelo pueden ser interrumpidas o fortalecidas por las actividades del ser humano. La eliminación de dichos ingenieros implica generalmente una alteración drástica en el funcionamiento del ecosistema o incluso su colapso. En un metro cuadrado de suelo puede haber, aproximadamente, 1 200 animales del grupo de la macrofauna y más de 10 000 de la mesofauna. En una cucharadita de suelo, puede haber por encima de 10 000 y hasta 50 000 especies diferentes de bacterias y de hongos (Barois *et al.*, 2018).

Escarabajos del estiércol (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae): características generales

Los escarabajos estercoleros son insectos que forman parte de la macrofauna del suelo. En su estado adulto, y durante su desarrollo, usan para su alimentación y para su reproducción la materia orgánica (MO) en descomposición de hongos, de frutos, de cadáveres y, principalmente, de excrementos de animales tanto silvestres como domésticos (Halffter y Matthews, 1999).

Por la manera como usan la MO se reconocen tres diferentes grupos de escarabajos: 1) residentes o endocópridos, que se alimentan y nidifican en el estiércol; 2) cavadores o paracópridos, que hacen galerías y túneles subterráneos y entierran parte del estiércol por debajo del sitio en donde éste fue depositado, excavando cámaras de nidificación donde las crías se alimentan del estiércol y de esta manera quedan protegidas de depredadores; y 3) cavadores o telecópridos, éstos relocalizan el alimento de modo horizontal formando una bola de estiércol a partir de la fuente de alimento y la ruedan para posteriormente enterrarla, pudiendo transformarla en una bola-nido (Hanski y Cambefort, 1991).

Los escarabajos estercoleros pueden ser utilizados para monitorear alteraciones en la diversidad biológica (por ejemplo: riqueza, diversidad, biomasa) de un sitio, para calificar el impacto que tiene el cambio de la vegetación original a otros usos del suelo, entre ellos la calidad del ambiente edáfico. Tales cambios pueden ser usados como apoyo para la toma de decisiones, como las prácticas del uso de la tierra que deben ser evitadas o conservadas.

Los escarabajos son importantes para el mejor funcionamiento de los sistemas ganaderos. Los que entierran y remueven materiales en proceso de descomposición, regulan la presencia de parásitos asociados al estiércol que ocasionan cuantiosas pérdidas económicas a los ganaderos, como la mosca del cuerno (*Haematobia irritans*), la mosca doméstica (*Musca domestica*); o parásitos gastrointestinales, como el gusano barra de peluquero (*Haemonchus contortus*). Si las heces contaminadas son enterradas por los escarabajos antes de que los parásitos alcancen el estado infectivo, el parasitismo potencial de cada mojón se reduce; interrumpiendo los ciclos biológicos y limitando el acceso del ganado a los estadios infectivos de estos parásitos (Soca *et al.*, 2002). Los escarabajos estercoleros también juegan un papel importante en la regeneración vegetal, ya que con la remoción de estiércol contribuyen a la dispersión secundaria de semillas de plantas úti-

les, inmersas en el estiércol y al ser desplazadas pueden llegar a mejores micrositios para germinar y quedar protegidas de depredadores. Aunque, también, entre estas semillas se pueden dispersar algunas arvenses.

Los sistemas agroforestales pecuarios y su relación con la diversidad de especies de escarabajos estercoleros

Una manera de contribuir a mitigar los efectos del cambio climático (CC) es reduciendo las emisiones de GEI. Ello se puede lograr con sistemas de pastoreo eficientes de manejo del ganado y de los recursos naturales y al mismo tiempo respetuosos con el ambiente, como el Pastoreo Racional Voisin o el Silvopastoreo Racional Voisin (Pinheiro, 2018) o mediante los sistemas silvopastoriles (SSP), una modalidad de sistema agroforestal (SAF), que es la asociación de árboles (o especies arboriformes como arbustos, palmeras o hierbas gigantes) con cultivos (agrícolas o forrajeros) y/o cría de animales en la misma unidad de tierra. Los SSP ofrecen múltiples beneficios ecológicos (por ejemplo: secuestro de C en la vegetación y en el suelo, protección y mejoramiento de los componentes bióticos y abióticos del suelo, bienestar a la fauna edáfica), al mejorar sus funciones pero también los beneficios económicos y sociales (Palma y Torres, 2021).

Hoy se entiende que, para manejar adecuadamente los suelos, se debe conservar y proteger también a la vegetación, ya que éstos son dos componentes interdependientes. Añadir o remover árboles en áreas de pastoreo afecta las condiciones ambientales para la fauna que habita el suelo. Por ejemplo, en paisajes de selva mediana en Hidalgo la diversidad de escarabajos disminuyó en los potreros, pero aun así éstos albergan cerca del 70% de las especies de la vegetación primaria (21 especies en conservado por 14 en potreros). Por otra parte, en ecosistemas más templados, en matorrales xerófilos y en bosques de pino-encino de Hidalgo, la diversidad de escarabajos es mayor en potreros (10 especies en potrero y 6 especies en ecosistemas arbolados), mientras que en bosques mesófilos de montaña la diversidad se mantiene en proporciones similares de 20 especies aproximadamente en ambas condiciones (Barragán *et al.*, 2014).

Para mantener la diversidad y la persistencia de escarabajos estercoleros no sólo es importante la vegetación local, sino también la del paisaje: paisajes más heterogéneos y con una configuración variada tienen mayor diversidad de especies, lo que se logra al implementar los SSP.

La calidad de la matriz también es importante para los escarabajos (Sánchez-de-Jesús *et al.*, 2016); en potreros rodeados de bosque, o con cercos vivos adyacentes, la diversidad de escarabajos es mayor que en potreros adyacentes a otros potreros o colindantes a establos, donde además las especies exóticas de escarabajos son más abundantes y usan las zonas abiertas para colonizar el paisaje (Arellano *et al.*, 2008a). La presencia de cercos vivos permite además que los escarabajos se desplacen entre diferentes sitios de un paisaje tropical para buscar parejas o alimento (Arellano *et al.*, 2008b).

En América Central y en Sudamérica existen trabajos que analizan los cambios en la diversidad de escarabajos estercoleros en ambientes de pastoreo distintos a las praderas cultivadas con una sola especie, la mayor parte de ellos son recientes y realizados principalmente en Argentina (Giménez-Gómez *et al.*, 2018; Gómez-Cifuentes *et al.*, 2019;

2020), en Brasil (Lopes *et al.*, 2020) y en Colombia (Giraldo *et al.*, 2009; Giraldo *et al.*, 2018; Mejía-Kergelén *et al.*, 2019; Mendivil-Nieto *et al.*, 2020).

La tendencia general encontrada en los trabajos anteriores es de una mayor riqueza y abundancia de escarabajos estercoleros en SSP que en potreros con manejo convencional sin árboles. En cuanto a su composición, los usos de la tierra con ganadería sostenible (árboles dispersos en potrero, sistemas silvopastoriles intensivos y bancos mixtos de forraje) incluyen tanto especies propias de ecosistemas naturales, exigentes en calidad del hábitat, como especies adaptadas a zonas abiertas, lo cual contribuye a la recuperación de las funciones ecológicas asociadas a los escarabajos estercoleros en las áreas productivas (Montoya-Molina *et al.*, 2016; Giraldo *et al.*, 2018).

En Colombia, se observó que las especies cavadoras grandes, entre ellas las de los géneros *Diabroctis* y *Dichotomius*, tienen la capacidad de establecerse exitosamente en áreas ganaderas cuando la cobertura vegetal supera el 50% y no se registran en coberturas arbóreas menores a 70% (Mendivil-Nieto *et al.*, 2020). Las especies cavadoras grandes son claves, debido a su capacidad para remover grandes cantidades de estiércol y para descompactar el suelo (Giraldo *et al.*, 2018).

En contraste, las especies cavadoras pequeñas, entre ellas las de los géneros *Digitonthophagus*, *Onthophagus* y *Uroxys*, tienen la capacidad de colonizar de manera rápida y efectiva el estiércol bovino y de sobrevivir en usos de la tierra de ganadería convencional con mínima cobertura vegetal (Giraldo *et al.*, 2018). También se señaló que los escarabajos rodadores (*Canthon*, *Deltochilum*) no están presentes en sitios con cobertura arbórea menor al 70% (Mendivil-Nieto *et al.*, 2020).

En México son escasos los estudios con escarabajos en SSP (Arellano *et al.*, 2008a; Arellano y León-Cortés, 2011; Arellano *et al.*, 2013; Farías *et al.*, 2015; Guzmán-Miranda, 2018; Santos-Chablé *et al.*, 2019) y aún no hay datos disponibles sobre escarabajos en sistemas con pastoreo racional.

Aunque la relación del manejo y el tipo de vegetación con comunidades de escarabajos estercoleros está aún subestudiada y poco entendida, los datos registrados en el cuadro 1 demuestran una tendencia general, similar a la encontrada en los trabajos en Centro y en Sudamérica, o sea, una reducción de riqueza y abundancia conforme a la intensidad del uso de suelo aumenta y la cobertura arbórea disminuye (figura 1), favoreciendo hábitats más cercanos a la vegetación natural que representan el reservorio de especies para la repoblación de otros sitios cercanos. Sin embargo, también existen especies que prefieren paisajes con algún grado moderado de perturbación, por lo cual paisajes diversos que contienen vegetación natural en diferentes estados de conservación, así como SSP podrían albergar la máxima riqueza y abundancia de escarabajos estercoleros.

Cuadro 1

Síntesis de estudios recientes realizados en México que relacionan comunidades de escarabajos estercoleros con usos de suelo e intensidad de manejo

Lugar del estudio	Tendencia	Observación adicional	Referencia
Veracruz, Chiapas, San Luis Potosí y Quintana Roo	Mayor riqueza y abundancia en vegetación primaria	Remanentes de vegetación primaria sirven como sistema fuente-sumidero hacia los sitios adyacentes	2, 3, 4, 7
	Menor riqueza y abundancia en potreros sin árboles	Condiciones soleadas sin cobertura arbórea y con menor humedad no son adecuadas para las especies afines a espacios arbolados y los mojones se secan más rápido	
Chiapas y Veracruz	Sistemas agroforestales albergan el 70% de la riqueza encontrada en vegetación con poca intervención	SAF pecuarios más ricos en especies son chiapanecos: SSP maduros de <i>Vachellia pennatula</i> (quebracho) + <i>Megathyrsus maximus/Brachiaria brizantha</i> (15-16 especies). Aunque en general (SSP jóvenes de <i>V. pennatula</i> (quebracho), <i>Leucaena leucocephala</i> (guaje), SSP de <i>Guazuma ulmifolia</i> (guácimo), <i>V. pennatula</i> , <i>Cratylia argentea</i> , vegetación secundaria de BTS en pastoreo, entre otros) incluyen entre 10 y 13 especies.	1, 2, 5, 6
Veracruz, Chiapas, y Quintana Roo	Entre más tiempo de uso ganadero, mayor abundancia	Se muestrearon terrenos con historial de pastoreo de una a tres generaciones	1, 2, 3, 5, 6, 7
Chiapas	En general, entre mayor cantidad de árboles dispersos, mayor abundancia y riqueza	Esto ratifica la importancia de los árboles para el mantenimiento de la diversidad de los escarabajos estercoleros en pastizales	1, 2

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

Lugar del estudio	Tendencia	Observación adicional	Referencia
Veracruz	SSP con mayor densidad de árboles albergan más abundancia y riqueza	Terrenos con 1 500 a 4 000 guácimos/ha + pasto privilegio (<i>Megathyrus maximus</i>), jaragua (<i>Hyparrhenia rufa</i>), pangola (<i>Digitaria eriantha</i> y zacate cubano (<i>Cenchrus purpureus</i>), terrenos con vegetación secundaria de BTS en pastoreo	3
Quintana Roo	Abundancia y riqueza disminuyen en el siguiente orden: selva mediana - potreros con árboles - potreros sin árboles, SSP		7
San Luis Potosí	La riqueza disminuye de la selva- SSP-sistema intensivo. Abundancia es mayor en sistemas intensivos-selva-SSP		4
Veracruz	El mayor uso de agroquímicos y quemas inadecuadas reduce la diversidad y abundancia de escarabajos	Los agroquímicos son particularmente dañinos para la biodiversidad local cuando son de amplio espectro y acción residual, destruyendo una gran cantidad de organismos, incluso benéficos y pueden permanecer en el terreno por meses, e incluso años (Giraldo <i>et al.</i> , 2018)	3
Veracruz y Chiapas	Zonas sin árboles albergan únicamente escarabajos cavadores pequeños	Rodadores, cavadores grandes y chicos tanto en zonas boscosas como en potreros. En potreros sin árboles predominan especies cavadoras pequeñas	1, 3

Fuentes: 1) Arellano y León-Cortés (2011); 2) Arellano *et al.* (2013); 3) Farías *et al.* (2015); 4) Guzmán-Miranda (2018); 5) Juárez-Carballo (2019); 6) Godoy (2019); 7) Santos-Chablé *et al.* (2019).

Figura 1

Esquema que ilustra la disminución de la riqueza de especies de escarabajos desde vegetación secundaria de bosque tropical seco en pastoreo, sistemas silvopastoriles y potreros sin árboles



Fotografía SSP: Silvia López Ortiz.
Esquema basado en Farías *et al.* (2015).

El uso de productos veterinarios utilizados para la desparasitación del ganado es un problema para las poblaciones de escarabajos, pues tienen acción residual. Estudios realizados en Veracruz y en Jalisco presentaron cambios significativos en la abundancia relacionados con la aplicación de desparasitantes internos en general (Demeza, 2014; Farías *et al.*, 2015). Los insectos que ingieren ivermectina, incluso en dosis bajas, son alterados en sus capacidades locomotora y sensorial, lo que podría explicar la disminución de sus poblaciones (Verdú *et al.*, 2015).

Para llegar a un punto intermedio donde no se afecte la economía del ganadero ni la biodiversidad, se puede establecer en el programa sanitario que el medicamento se aplique en el corral de manejo, para no dispersar a los parásitos resistentes en las áreas de pastoreo, y en el momento del año en que se dañe menos la actividad de los escarabajos. Una ganadería más ecológica en la que se incluya como parte de la dieta de los animales el follaje de los árboles, permitiría la desparasitación natural, pues se sabe que los taninos contenidos en las hojas y tallos actúan inhibiendo la actividad de los principales parásitos internos de los rumiantes (Rodríguez, 2016; Torres, 2020).

Escarabajos del estiércol y su actividad de remoción

El manejo del ganado bovino u otros herbívoros en pastoreo resulta en la acumulación de heces en los pastos. Por ejemplo, una vaca adulta defeca unos 4 kg de heces por deposición o mojón. Esos mojones ocupan una superficie aproximada de 0.3-0.4 m². Si una vaca

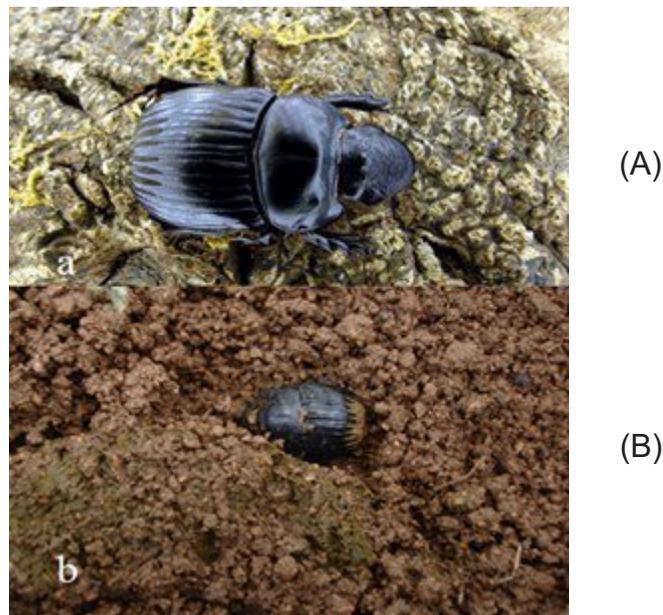
defeca unas 12 veces al día, puede depositar en el suelo casi 50 kg de heces, que pueden llegar a ocupar una superficie de 7 m². Dicha acumulación, aunque sea temporal, reduce la superficie para pastoreo, ya que el pasto no crece en sitios cubiertos de estiércol hasta que se degrade. La pérdida de superficie de pastoreo es proporcional a la densidad de animales por unidad de superficie.

En adición, si las excretas no son removidas en poco tiempo, por ausencia de fauna benéfica, se tiende a favorecer problemas de tipo sanitario con repercusiones económicas (por ejemplo: aumento en las moscas domésticas y del ganado, causando estrés y disminución en la productividad de vacas lecheras y pérdida de superficie de pastoreo, lo que reduce las ganancias de peso en ganado de carne).

Los escarabajos estercoleros son los encargados de remover los mojoneros de las áreas de pastoreo, evitando los inconvenientes de su acumulación en la superficie. La cantidad de estiércol removido varía de un sitio a otro y depende de múltiples factores, entre ellos: las especies de escarabajos (cuadros 2 y 3), su tamaño, su abundancia, su comportamiento (alimentación, reproducción) y de diversos factores ambientales como la humedad, la temperatura o las características del suelo (Arellano *et al.*, 2014); así como del tipo de manejo que se les da a los potreros que, en muchos casos, determina algunas de las variables antes mencionadas. Algunas especies son más eficientes, como *Dichotomius colonicus* (figura 2), una especie generalista, grande, con una distribución amplia (cuadro 2).

Figura 2

A) Imagen de *D. colonicus*. B) Actividad de remoción de esa especie



A) Fotografía de Alfonso Díaz Rojas. B) Fotografía de Teresa Lorenzo López.

Al evaluar la cantidad de estiércol removido por especies de escarabajos, en particular en temporada de lluvias, en sitios con bosque y con diferentes manejos en el pastoreo, usando la técnica de Arellano (2016), se observó que la cantidad de estiércol removido se relaciona, de manera importante, con las preferencias de hábitat de las es-

pecies (cuadro 2). La mayor actividad de eliminación de estiércol por los escarabajos se presenta con más frecuencia después de 24 hr de exposición, aunque este pico de actividad puede ocurrir hasta después de 96 hr.

Las especies cavadoras de mayor tamaño entierran la mayor cantidad de estiércol durante la temporada de lluvias cuando salen para alimentarse, para madurar sexualmente y para reproducirse. En Durango, *D. colonicus* entierra en campo entre 5 y 135 g de estiércol por individuo o pareja, *Copris sierrensis*, alrededor de 30 g de estiércol por pareja y *Phanaeus quadridens* entierra unos 15 g por pareja (Huerta *et al.*, 2010). En condiciones de laboratorio, individuos de *P. quadridens* remueven un promedio de 8.55 g de excretas y *Phanaeus adonis* remueve 15.81 g en 24 a 48 hr (Ramírez-Espinosa *et al.*, 2020).

Cuadro 2

Características de escarabajos, cantidad promedio y máxima de estiércol removido en 24 h por especies de cavadores grandes, en diferentes ecosistemas naturales y en pastoreo por ganado bovino en Veracruz y en Chiapas, México

Taxa	Especie de escarabajo	<i>Dichotomius colonicus</i>	<i>Dichotomius amplicollis</i>	<i>Phanaeus scutifer</i>	<i>Phanaeus obliquans</i>	<i>Phanaeus tridens</i>
Características de la especie	RE	C	C	C	C	C
	T (mm)	19 a 28	18 a 25	15 a 20	10 a 21	10 a 17
Bosque tropical seco (BTS)	Media (g)	90.3±44.2 ^{1,2}	83.8±46.2 ^{1,2}	ND	88.6±60.5 ^{1,2}	ND
	Max. (g)	120 ^{1,2}	250 ^{1,2}	ND	220 ^{1,2}	ND
Vegetación secundaria de BTS en pastoreo	Media (g)	51.5±44.6 ³	80.2±50.8 ³	45.0±32.7 ³	ND	49.6±40.0 ³
	Max. (g)	903	1 503	ND	ND	903
SSP <i>Guazuma ulmifolia</i>	Media (g)	96.7±55.6 ³	30.0±15.2 ³	27.2±18.0 ³	ND	36±21.6 ³
	Max. (g)	2 203	803	353	ND	723
SSP <i>Leucaena leucocephala</i>	Media (g)	45.5±33.0 ⁴	26.3±11.7 ⁴	21.8±10.0 ⁴	ND	30.4±16.1 ⁴
	Max. (g)	854	704	324	ND	654
Potrerros con árboles aislados (30-400 msnm)	Media (g)	76.8±30.0 ^{1,2}	47.6±24.6 ³	43.5±30.0 ³	66.3±32.7 ^{1,2}	33.5±6.3 ³
	Max. (g)	130 ^{1,2}	1003	1003	93 ^{1,2}	423
Bosque de niebla (1 400-1 600 msnm)	Media (g)	78.4±16.3 ⁴	ND	ND	ND	ND
	Max. (g)	105	ND	ND	ND	ND

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

Taxa	Especie de escarabajo	<i>Dichotomius colonicus</i>	<i>Dichotomius amplicollis</i>	<i>Phanaeus scutifer</i>	<i>Phanaeus obliquans</i>	<i>Phanaeus tridens</i>
Potreros con árboles aislados (900-1 680 msnm)	Media (g)	71±120.0 ⁵	ND	ND	ND	ND
	Max. (g)	3 355	ND	ND	ND	ND

Prom= promedio, Max= máximo. RE= relocalización, C= cavador, R= rodador. T= tamaño. SSP= sistema silvopastoril. Los superíndices indican la fuente de literatura. Fuentes: 1) Arellano y Demeza (2013), 2) Demeza (2014), 3) Farías y Arellano, datos inéditos, 4) Arellano, datos inéditos, 5) Huerta *et al.* (2018). ND= no disponible. msnm= metros sobre el nivel del mar.

Las especies rodadoras elaboran bolas de estiércol con un peso casi constante en campo, según la especie (cuadro 3). En la figura 3 se puede observar a *Canthon indigaceus*, una especie rodadora nativa, elaborando sus bolas en estiércol de vaca.

Cuadro 3

Características de escarabajos, cantidad promedio y máxima de estiércol removido en 24 h por especies de cavadores pequeños y por rodadores, en diferentes ecosistemas naturales y en pastoreo por ganado bovino en Veracruz y en Chiapas, México

Taxa	Especie de escarabajo	<i>Digitonthophagus gazella</i>	<i>Onthophagus incensus</i>	<i>Deltochilum scabriusculum</i>	<i>Canthon indigaceus</i>
Características de la especie	RE	C	C	C	R
	T (mm)	10.5 a 12.0	6.0 a 10.0	28.0 a 30.0	8.0 a 12.0
Bosque tropical seco (BTS)	Media (g)	ND	ND	35.0±16.0 ^{1,2}	ND
	Max. (g) (rango)	ND	ND	35 (1-7 bolitas de 3 a 5 g) ^{1,2}	ND
Vegetación secundaria de BTS en pastoreo	Media (g)	15.1±12.2 ³	ND	16.0±9.0 ³	ND
	Max. (g) (rango)	ND	ND	25 (1-5 bolitas de 3 a 5 g) ³	ND
SSP <i>Guazuma ulmifolia</i>	Media (g)	16.7±14.9 ³	ND	14.3±10.0 ³	entre 3 y 5 bolitas de 1.3± 0.5 ³
	Max. (g) (rango)	ND	ND	18 (1-4 bolitas de 3 a 5 g) ³	ND

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

Taxa	Especie de escarabajo	<i>Digitonthophagus gazella</i>	<i>Onthophagus incensus</i>	<i>Deltochilum scabriusculum</i>	<i>Canthon indigaceus</i>
Potreros con árboles aislados (30-400 msnm)	Media (g)	17.0±16.0 ^{1,2}	ND	12.0±3.0 ³	entre 5 y 10 bolitas de 1.3±0.6 ³
	Max. (g) (rango)	30 ^{1,2}	ND	20 (1-3 bolitas de 3 a 5 g) ³	ND
Bosque de niebla (1,400-1,600 msnm)	Media (g)	ND	9±3	ND	ND
	Max. (g)	ND	12	ND	ND
Potreros con árboles aislados (900-1,680 msnm)	Media (g)	ND	19.1±2.2 ⁵	ND	ND
	Max. (g)	ND	235	ND	ND

Max= máximo. RE= relocalización, C= cavador, R= rodador. T= tamaño. SSP= sistema silvopastoril. Los superíndices indican la fuente de literatura. Fuentes: 1) Arellano y Demeza (2013), 2) Demeza (2014), 3) Farías y Arellano, datos inéditos, 4) Arellano, datos inéditos, 5) Huerta *et al.* (2018). ND= no disponible. msnm= metros sobre el nivel del mar.

Figura 3

Canthon indigaceus en plena actividad en campo



Foto: Jorge Armín Escalante Pasos (Naturalista, CONABIO).

En Jacala, Hidalgo, *Canthon humectus hidalgoensis* (figura 4), un rodador que puede medir entre 7.8 y 16.1 mm, construye bolas de estiércol que pueden medir 13 mm de diámetro. Si la densidad de esa especie en el área es de 689.7 individuos/ha en pastos, y si todos esos escarabajos encontraran pareja, juntos harían bolas con peso promedio de 1.60 g, y estarían enterrando 551.74 g de estiércol al día por ha de pasto (Ortega-Martínez *et al.*, 2014).

Asimismo, a través de un experimento bajo condiciones controladas, y suelo proveniente de diferentes condiciones de manejo de las parcelas ganaderas de zonas áridas y semiáridas de San Luis Potosí, se observó que *C. h. hidalgoensis* es capaz de remover arriba del 51% del estiércol disponible en suelo proveniente de sitios con árboles y arbustos nativos de la región, mientras que suelos de parcelas donde sólo hay potreros monófitos la remoción llega a ser del 45% (Barragán *et al.*, 2022).

Figura 4
Imagen de *Canthon humectus hidalgoensis* en campo

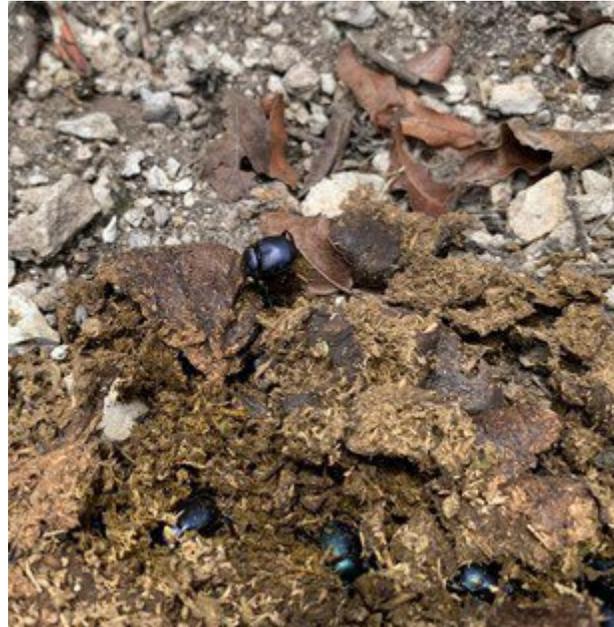


Foto: Alfredo Ramírez Hernández.

Para solucionar problemas sanitarios y de acumulación de estiércol en sus potreros, en Estados Unidos se introdujeron especies indo-africanas (entre ellas *Euoniticellus intermedius* y *Digitonthophagus gazella* (figura 5). A partir de su introducción en Texas y en otras partes de América, esas especies colonizaron los potreros de México, y actualmente son muy numerosas y en muchos casos dominantes, en los mojones de estiércol.

Figura 5
Imagen del macho y de la hembra de *D. gazella*



Foto: Alfonso Díaz.

En estudios realizados en la costa de Jalisco y en la región central de Veracruz (Demeza y Arellano, 2013; Soto, 2019) se observó que no todo el estiércol disponible es colonizado y trabajado por escarabajos estercoleros, sino sólo entre 30 y 40% de los mojonos que se acumulan en los potreros. Recientemente, en un trabajo publicado por López-Collado *et al.* (2017), mediante un modelo matemático se estimó que sólo se puede eliminar como máximo entre el 65 y el 69% del estiércol disponible por la actividad de remoción y enterramiento de escarabajos estercoleros.

Por otra parte, una limitante en la remoción de estiércol puede ocurrir en suelos jóvenes o en suelos naturalmente pedregosos, como los de los denominados malpaíses (término usado en geomorfología), que son accidentes de relieve formados a partir de flujos de lava (suelos no consolidados, poco profundos e inútiles para el aprovechamiento agrícola). En esas condiciones la presencia de especies cavadoras de escarabajos es casi nula, aunque los grandes rodadores (*Deltochilum lobipes*, *D. scabriusculum*, entre otros) se adaptan a esas condiciones (Arellano y Halffter, 2003). En suelos inundables, los escarabajos suelen moverse a otros lugares durante el tiempo en que el agua satura el suelo, disminuyendo sus funciones temporalmente en esas zonas.

Efecto de la actividad de escarabajos sobre la productividad vegetal

El carbono orgánico del suelo (COS) es un componente importante del ciclo de C ya que ocupa el 69.8% del C orgánico de la biósfera; funciona como reservorio de carbono y afecta a la mayoría de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo vinculadas con la calidad, con la sustentabilidad y la con la capacidad productiva (Lal *et al.*, 2018).

En los potreros el estiércol es una fuente de COS con altas concentraciones de nutrientes, tan sólo 1 t de estiércol de vaca, con un contenido aproximado de 50% de humedad, contiene alrededor de 42 kg de nitrógeno, 18 de fósforo y 26 de potasio, además de gran cantidad de bacterias, de hongos microscópicos y de semillas de pastos o de otras plantas consumidas por el ganado (Arellano *et al.*, 2014). Sin embargo, muchos

de esos nutrientes se pierden por volatilización o por lixiviación. No obstante, cuando el estiércol es removido y enterrado por los escarabajos, se aumenta considerablemente la cantidad de nutrientes disponibles para las plantas. La eficiencia de la incorporación y el uso de estos nutrientes por las plantas tiene implicaciones para la productividad del suelo y para la producción de alimentos, tanto para el ganado como para las personas.

Los escarabajos estercoleros son reconocidos como ingenieros del ecosistema y su contribución al crecimiento vegetal puede incluso superar la de los fertilizantes químicos. Miranda *et al.* (2000, citado por Nichols *et al.*, 2008), observaron que la actividad de los escarabajos estercoleros superó a la aplicación de fertilizantes químicos (100 kg/ha de N, 100 kg/ha de P₂O₅ y 100 kg/ha de K₂O) en el aumento de la altura de la planta y en la producción de hojas. Por su parte, Johnson *et al.* (2016) reconocieron el rol crítico de *Bubas bison* para mitigar el estrés por sequía de las plantas, mejorando la movilización de nutrientes del suelo y ayudando en su desarrollo.

Asimismo, las características fisicoquímicas del suelo procedente de vegetación secundaria de bosque tropical seco con uso ganadero, mejoraron después de una semana de actividad de escarabajos de *Ph. tridens* (dos individuos en 0.016 m³). En los primeros 10 cm del suelo la humedad, el pH, la concentración de K y de P se incrementaron. El porcentaje de MO aumentó también, ya que la concentración de N aumentó al doble. La concentración de Mg disminuyó y las concentraciones de Ca fueron variables. Esto se traduce en un mayor crecimiento del pasto privilegio (*Megathyrus maximus*) y de plantas con mayor área basal y con raíces más largas (Mares, 2018).

Similarmente, en un estudio de invernadero con suelos de pastizales de San Luis Potosí, el crecimiento de maíz fue acelerado cuando se añadieron 10 individuos de *Canthon humectus* y estiércol, debido a una mayor concentración de compuestos nitrogenados disponibles para las plantas (Barragán *et al.*, 2022). También el estado nutricional de las plantas puede beneficiarse por la actividad de escarabajos estercoleros. En plántulas de *Brosimum lactescens* (Moraceae), se encontró mayor cantidad de nitrógeno foliar y de fósforo, cuando crecieron en sustratos con actividad de escarabajos estercoleros (Santos-Heredia *et al.*, 2016).

Además de representar una fertilización natural, la actividad de los escarabajos estercoleros también mejora la estructura y la capacidad de retención de aire y de agua en el suelo, mediante la elaboración de galerías por especies cavadoras para el establecimiento de sus nidos. Esas galerías además pueden ser refugio o morada para otros invertebrados y ser caminos preferenciales para el crecimiento de las raíces.

En el municipio de La Huerta, Jalisco, en potreros con árboles aislados *D. colonicus* puede elaborar diariamente de tres a seis galerías a 13.73± 5.00 cm de profundidad con un diámetro de 1.5-2.1 cm, debajo de un mojón de estiércol bovino fresco. En contraste, en las mismas condiciones *D. gazella* puede elaborar de tres a cuatro galerías a 6.88± 3.12 cm de profundidad con un diámetro de 0.7-1.1 cm. En potreros con árboles aislados situados en Veracruz, *O. incensus* puede elaborar de tres a seis galerías del diámetro del tamaño del cuerpo del individuo, a 6.2± 2.3 cm de profundidad en 24 hr (Demeza y Arellano, 2013).

La dispersión secundaria de semillas por escarabajos estercoleros puede aumentar su probabilidad de supervivencia. Sin embargo, en potreros con árboles aislados, en

La Huerta, Jalisco, sólo el 11% de las semillas fue removido por cuatro especies de escarabajos entre las cuales la especie exótica *D. gazella*, fue la especie más importante (Morales, 2019).

Cómo afectan los escarabajos estercoleros a la generación de los GEI en los potreros

La volatilización de amoníaco del estiércol contribuye con el 35-50% del total de emisiones de amoníaco hacia la atmósfera (Penttilä *et al.*, 2013). La volatilización de los GEI (particularmente metano) durante la descomposición del estiércol acumulado en los pastizales se reduce en un 5-15% ante la presencia de los escarabajos (Johnson *et al.*, 2016). Los mecanismos subyacentes son diversos y aún poco estudiados.

En primer lugar, los escarabajos modifican la humedad e introducen aire en los mojones a través de la fragmentación, de la remoción y de la excavación de túneles. Al crear condiciones más oxigenadas, se reduce la volatilización de metano y de compuestos nitrogenados y se estimula a la micro-biota (principalmente bacterias de los géneros *Alcaligenes*, *Paracoccus*, *Pseudomonas*, *Thiobacillus*, *Rhizobium* y *Thiosphaera*) que transforma el amonio del estiércol a nitritos y a nitratos mediante su actividad enzimática. Los nitratos son solubles en agua y directamente disponibles para su absorción por las raíces. De esta manera, se reduce la volatilización de nitrógeno en un 10 a 15% (Johnson *et al.*, 2016). Sin embargo, el nitrato se puede desnitrificar convirtiéndose en óxido nitroso (N_2O) que se volatiliza fácilmente. Debido a este proceso, los mojones colonizados por escarabajos estercoleros emiten menos metano, pero más óxido nitroso que también es un GEI (Yokoyama, 1991). El efecto total y neto de la actividad de escarabajos estercoleros sobre la evaporación de los GEI del estiércol es aún poco entendido.

Por otra parte, las larvas de escarabajos estercoleros (*Onitis alexis*, *Onthophagus gazella* y *Euoniticellus intermedius*) albergan dentro de sus intestinos microbiota metanogénica. Se reportan altas concentraciones de aminoácidos, que son productos secundarios de la fijación de nitrógeno gaseoso por las bacterias de sus intestinos (Rougon *et al.*, 1990). De esta manera los escarabajos no solamente fomentan la actividad enzimática por parte de bacterias que habitan en el suelo y en el estiércol, creando mejores condiciones micro-ambientales, sino que también introducen bacterias propias, influyendo así sobre la emisión de los GEI.

Es importante tener en consideración varios factores, pues se vio que diferentes especies de escarabajos difieren en la rapidez con que degradan el estiércol y la reducción de los GEI también se puede acelerar si existen especies muy abundantes en los ecosistemas (Evans *et al.*, 2020; Fowler *et al.*, 2020). El único trabajo realizado en México sobre emisiones de GEI y de escarabajos es el de Hernández *et al.* (2016), quienes investigaron las emisiones de CH_4 por dos géneros de escarabajos coprófagos (*Dichotomius* y *Onthophagus*) durante la descomposición de excretas bovinas bajo condiciones ambientales controladas.

En el trabajo antes mencionado, se observaron las mayores emisiones de CH_4 en el tratamiento de suelo con estiércol (sin presencia de escarabajos) y las emisiones más bajas (de hecho, hubo consumo de metano) en el suelo sin estiércol. Las emisiones acumuladas de metano en los tratamientos con *D. colonicus* fueron 40% menores que en los

tratamientos sin escarabajos. Sin embargo, fue necesaria una abundancia de 20 individuos del género *Onthophagus* (más pequeños), para disminuir en un 40% las emisiones.

Por otra parte, la función de los escarabajos estercoleros se puede ver alterada debido al uso desmedido de antiparasitarios administrados en el ganado; en este sentido, se pone de manifiesto que estos medicamentos alteran la composición de bacterias en el tracto digestivo del ganado reestructurando la microbiota de los escarabajos; por lo tanto, se contribuye de manera indirecta con la emisión de GEI, lo cual supondría consecuencias negativas para el ambiente (Martínez *et al.*, 2017).

Reflexión final

El proceso natural de regeneración ecológica en las regiones tropicales, junto con prácticas adecuadas de manejo del ganado, crean ambientes de pastoreo con alta diversidad florística y complejidad estructural. La vegetación que se desarrolla después de un disturbio natural o humano, llamada secundaria, generalmente incluye una gran cantidad de especies forrajeras de bajo rendimiento de materia seca y con pobre capacidad de carga animal. Sin embargo, la implementación de un pastoreo adecuado en ellas ofrece la posibilidad de mejorar gradualmente la productividad de esos espacios para una ganadería más sustentable (Espinosa-Palomeque *et al.*, 2020).

Los bosques secundarios de bosque tropical seco en pastoreo de Chiapas y en Veracruz son los ambientes más diversos tanto en flora como en escarabajos estercoleros, según las tendencias generales registradas en este capítulo. Con un manejo adecuado de esos espacios (desrame tradicional / selección de especies forrajeras, punto óptimo de reposo) se promueven la diversidad y la persistencia de escarabajos estercoleros y además se mantienen otros servicios ecosistémicos. Los usos de tierra con ganadería regenerativa no sólo favorecen la diversidad y el funcionamiento de la fauna edáfica en paisajes ganaderos, sino que atraen a muchos otros organismos y conservan condiciones que permiten una producción ganadera sustentable.

Sin embargo, las tecnologías mencionadas anteriormente, aplicadas en bosques secundarios, son muy poco conocidas y usadas aún, por lo que otras tecnologías agroforestales pecuarias más conocidas, que conservan los servicios ecosistémicos y que favorecen la presencia de escarabajos estercoleros, son: los sistemas silvopastoriles que usan especies leñosas de copa ancha como los SSP chiapanecos de *Vachellia pennatula*/*V. farnesiana* (quebrachos), y *Megathyrsus maximum*/*Urochloa brizantha* con más de 3 000 plantas/ha con prácticas agroecológicas (desrame, no uso de quema, sin fertilizantes artificiales ni agroquímicos), así como los sistemas silvopastoriles veracruzanos de *Guazuma ulmifolia*, y pasto privilegio (*Megathyrsus maximus*), jaragua (*Hyparrhenia rufa*) y pangola (*Digitaria eriantha*), con una densidad de 1 500 guácimos/ha y con prácticas de manejo agroecológicas (Farías *et al.*, 2015).

Asimismo, estos SSP son una estrategia integral de manejo que podría favorecer la adaptación al CC de los escarabajos del estiércol, reduciendo su vulnerabilidad, porque mantienen la humedad del suelo y reducen las altas temperaturas ambientales en los potreros. En condiciones de la región tropical reducen la temperatura promedio anual de 2 a 3 °C, incrementan la humedad relativa en las regiones secas entre 10 y 20% y reducen la evapotranspiración con 1.8 mm/día (Rueda *et al.*, 2010).

Los escarabajos estercoleros pueden ser grandes socios de los ganaderos en sus fincas generando los servicios ecosistémicos descritos en este capítulo, siempre y cuando existan las condiciones ambientales y de recursos que ellos necesitan. Los cambios en el uso del suelo generan alteraciones ambientales que dificultan la supervivencia de algunas especies, principalmente las que habitan exclusivamente en la vegetación primaria. No sólo se debe promover el establecimiento de árboles en las áreas de pastoreo, el paquete tecnológico debe considerar la selección de las especies ideales para las funciones productivas y los servicios ambientales del sistema completo, entre ellos realizar acciones para restaurar y mantener la salud del suelo porque el suelo es el principal componente de soporte para todos los subsistemas vivos que hay en ese espacio.

Es sabido que el silvopastoreo y otras tecnologías agroforestales cuando se implementan en un rancho ganadero no solo traen múltiples beneficios al terreno y a sus propietarios, sino que generan externalidades positivas para la sociedad como es la mitigación de los efectos del cambio climático (la emisión de GEI disminuye mediante el secuestro de C en la vegetación y en el suelo), la disponibilidad de agua mediante la captación y la infiltración a los mantos acuíferos, mejora la calidad del paisaje al pasar de un ambiente antropizado a uno más natural, entre otros.

El conocimiento de la tasa de desintegración del estiércol ayuda a establecer el valor económico del servicio ecosistémico que brindan los escarabajos estercoleros al sector de producción ganadera de diferentes zonas (ver estimaciones en López-Collado *et al.*, 2017). Ampliar este tipo de estudios a nivel de especies o de grupos funcionales contribuiría a una mejor definición de la importancia de éstos para la producción ganadera en México.

Cuando no hay escarabajos estercoleros o se pierden las funciones que realizan, puede deberse a causas naturales (como aquéllas relacionadas con el cambio climático), o a causas relacionadas con actividades humanas (por ejemplo, la pérdida de cobertura vegetal o de la calidad del suelo). Como respuesta, muchos productores tienen la inquietud de introducir escarabajos del estiércol en sus ranchos. Sin embargo, para poder tomar la decisión correcta, se debería consultar a especialistas que puedan capacitar al productor para hacer una evaluación rápida de las especies que existan en ranchos aledaños y/o buscar los registros históricos de especies en esa área para así poder sugerir las especies más adecuadas a re-introducir. Una vez seleccionadas las especies, se puede establecer una cría en laboratorio y diseñar un programa de marca recaptura para monitorear el éxito de la introducción.

Aun cuando los escarabajos estercoleros son un grupo muy estudiado y reconocido como indicador ambiental, existen muchos temas que se tratan de manera muy general a nivel internacional y que se trabajan escasamente en nuestro país, entre ellos el efecto de los escarabajos estercoleros en la mitigación de emisiones de GEI. El reto para las instituciones de investigación es seguir cubriendo los vacíos de conocimiento para así estar en la posibilidad de ofrecer a quienes hacen la transferencia y a los productores opciones para una ganadería más sustentable, y a los funcionarios datos para la toma de decisiones.

Aspectos destacados

1. Los sistemas agropecuarios pueden reducir drásticamente sus efectos negativos hacia los ecosistemas, mejorando sus técnicas de manejo.
2. La gama de organismos dentro del suelo debe de ser mejor aprovechada para beneficio de la sociedad, y con efectos positivos para la biodiversidad.
3. Los escarabajos estercoleros destacan como conectores importantes entre la materia orgánica de la superficie del suelo y la efectividad de los microorganismos del suelo.

Literatura citada

- Arellano, L. y Halffter, G. (2003). Gamma diversity: derived from and a determinant of alpha diversity and beta diversity. An analysis of three tropical landscapes. *Acta Zoológica Mexicana (nueva serie)*, 90: 27-76.
- Arellano, L.; León-Cortés, J. y Halffter, G. (2008a). Response of dung beetle assemblages and their conservation in remnant natural and modified habitats in southern Mexico. *Insect Conservation and Diversity*, 1(4): 253-262. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4598.2008.00033.x>.
- Arellano, L.; León-Cortés, J. y Ovaskainen, O. (2008b). Patterns of abundance and movement in relation to landscape structure – a study of a common scarab (*Canthon cyanellus cyanellus*) in Southern Mexico. *Landscape Ecology*, 23(1): 69-78. <https://doi.org/10.1007/s10980-007-9165-8>.
- Arellano, L. y León-Cortés, J.L. (2011). *Patrones de diversidad y movilidad de escarabajos del estiércol*. Editorial Académica Española. 137 p.
- Arellano, L.; León-Cortés, J.; Halffter, G. y Montero, J. (2013). *Acacia* habitats, cattle and dung beetles (Coleoptera: Scarabaeinae) in a Mexican silvopastoral system. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(2): 650-660. <http://dx.doi.org/10.7550/rmb.32911>.
- Arellano, L.; Cruz-Rosales, M. y Huerta, C. (2014). El estiércol: material de desecho, de provecho y algo más. Instituto de Ecología, Xalapa, Veracruz, México. 40 p.
- Arellano, L. (2016). A novel method for measuring the dung removal function of dung beetles (Coleoptera: Scarabaeinae) in pastures. *The Coleopterist Bulletin*, 70(1): 185-188. <https://doi.org/10.1649/072.070.0129>.
- Argoty, F.; Zamora, F.A.; Brenes, J.C.; Schlesinger, P.; Cifuentes, M. y Imbach, P.A. (2017). *Insumos metodológicos para el establecimiento de niveles de referencia par RED+: Deforestación y recuperación forestal en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua*. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Laboratorio de Modelado Ambiental. 86 p.
- Barois, I.; Contreras-Ramos, S.M.; B. Hernández-Castellanos, M. de los Santos, F. Martínez y D. R. García. (2018). *El suelo y el petróleo: Estudio de caso de biorremediación en pasivo-ambiental de Papantla, México*. Instituto de Ecología A.C., Xalapa, Veracruz, México. 30 p.
- Barragán, F.; Moreno, C.; Bueno-Villegas, J. y Halffter G. (2014). The impact of grazing on dung beetle diversity depends on both biogeographical and ecological context. *Journal of Biogeography*, 41(19), 1991-2002. <https://doi.org/10.1111/jbi.12351>.
- Barragán, F.; Douterlungne, D.; Ramírez-Hernández, A.; Gelviz-Gelvez, S.M.; Guzmán-Miranda, A.V. y Rodas-Ortíz, J.P. (2022) The rolling dung master: An ecosystem engineer beetle mobilizing soil nutrients to enhance plant growth across a grassland management intensity gradient in drylands. *Journal of Arid Environments*, 197, 104673. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104673>
- Demeza, A. y Arellano, L. (2013). Remoción de estiércol por escarabajos coprófagos (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae) en un gradiente de duración de la actividad ganadera, en Chamela, Jalisco. *Entomología Mexicana*, 12(1): 611-616.
- Demeza, D.A. (2014). *Efectos del régimen de manejo ganadero en la magnitud de la función de remoción de estiércol y en la estructura funcional de escarabajos (Coleoptera: Scarabaeinae) en un paisaje de bosque tropical seco en Jalisco*. Tesis de licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 71 p.
- Espinosa-Palomeque, O.; Castillo-Campos, G.; Arellano, L.; Pérez-Hernández, P. y López-Ortiz, S. (2020). Floristic diversity and animal loading in dry forest secondary vegetation used for grazing. *Global Ecology and Conservation*, 23 e01088. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01088>.

- Evans, K.S.; Mamo, M.; Wingeyer, A.; Schacht, W.H.; Eskridge, K.M.; Bradshaw, J. y Ginting, D. (2020). Dung Beetles Increase Greenhouse Gas Fluxes from Dung Pats in a North Temperate Grassland. *Journal of Environmental Quality*. 48(3): 537-548. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.03.0111>.
- FAO (2018). Soluciones ganaderas para el cambio climático. FAO, Roma, ITA.
- Farías, P.M.de.; Arellano, L.; Medina Hernández, M.I. y López-Ortiz, S. (2015). Response of the coprophagous beetles (Coleoptera: Scarabaeinae) assemblage to a range of soil characteristics and livestock management in a Mexican tropical landscape. *Journal of Insect Conservation*. 19(5): 947-960. <https://doi.org/10.1007/s10841-015-9812-3>.
- Farías, P.M. de y Arellano, L. (2016). La importancia de los suelos en los sistemas ganaderos. En: Huerta, C.C. y Cruz-Rosales, M. (compiladoras), *Hacia una ganadería sustentable y amigable con la biodiversidad. Estudio de caso: Xico: Veracruz*. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Veracruz, México. Pp. 55-78.
- Fowler, F.; Denning, S.; Hu, S. y Watson, W. (2020). Carbon Neutral: The Failure of Dung Beetles (Coleoptera: Scarabaeidae) to Affect Dung-Generated Greenhouse Gases in the Pasture. *Environmental Entomology*. 49(5): 1105-1116. <https://doi.org/10.1093/ee/nvaa094>.
- Giménez-Gómez, V.; Verdú, J.R.; Alonso, C.G. y Zurita, G.A. (2018). Relationship between land uses and diversity of dung beetles (Coleoptera: Scarabaeinae) in the southern Atlantic forest of Argentina: which are the key factors? *Biodiversity and Conservation*. 27(12): 3201-3213. <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1597-8>.
- Giraldo, C.; Chará, J. y Noriega, J. (2009). Efecto de los sistemas silvopastoriles en la población de escarabajos coprófagos en la cuenca del río La Vieja, Colombia [Reporte de investigación]. *Calí, Colombia: Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV)*. 75 p.
- Giraldo, C.; Montoya, S. y Escobar, F. (2018). *Escarabajos del estiércol en paisajes ganaderos de Colombia*. Fundación CIPAV. Cali, Colombia. 146 p.
- Godoy, R.Y. (2019). Diversidad de especies de escarabajos del estiércol (Coleoptera: Scarabaeinae) en un mosaico de sistemas productivos en Úrsulo Galván, Veracruz. *Tlamati Sabiduría*, número especial. 10(2): 3-19.
- Gómez-Cifuentes, A.; Gómez, V.C.G.; Moreno, C.E. y Zurita, G.A. (2019). Tree retention in cattle ranching systems partially preserves dung beetle diversity and functional groups in the semideciduous Atlantic forest: The role of microclimate and soil conditions. *Basic and Applied Ecology*. 34: 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2018.10.002>.
- Gómez-Cifuentes, A.; Vespa, N.; Semmartín, M. y Zurita, G. (2020). Canopy cover is a key factor to preserve the ecological functions of dung beetles in the southern Atlantic Forest. *Applied Soil Ecology*. 154: 103652. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103652>.
- Guzmán-Miranda, A.V. (2018) *Efecto del manejo ganadero en la diversidad de escarabajos estercoleros (Scarabaeidae) de la Huasteca Potosina*. 2018. Tesis de Maestría. IPICYT. San Luis Potosí, SLP, México. 75 p.
- Halffter, G. y Matthews, E.G. (1999). The natural history of dung beetles of the subfamily Scarabaeinae (Coleoptera: Scarabaeidae). *Folia Entomologica Mexicana*, 12-14 (1966): Mexico D. F. Reimpreso por Medical Books di G. Cafaro (1999). Palermo, Italia. 312 p.
- Hernández-Vigoa, G.; Cabrera-Dávila, G.D.L.C.; Izquierdo-Brito, I.; Socarrás-Rivero, A.A.; Hernández-Martínez, L. y Sánchez-Rendón, J.A. (2018). Indicadores edáficos después de la conversión de un pastizal a sistemas agroecológicos. *Pastos y Forrajes*. 41(1): 3-12.
- Hanski, I. y Cambefort, I. (1991). *Dung Beetles Ecology*. Princeton University Press, Princeton, N.Y. 481 p.
- Hernández, E.; Huerta, C. y Cruz, M. (2016). Efecto de los escarabajos coprófagos en las emisiones de metano durante la descomposición de excretas bovinas, bajo condiciones controladas. En: Paz, F. y R. Torres (editores). *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2016*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Texcoco, Estado de México, México. Pp. 474-478.
- Johnson, S.N.; Lopaticki, G.; Barnett, K.; Facey, S.L.; Powell, J.R. y Hartley, S.E. (2016). An insect ecosystem engineer alleviates drought stress in plants without increasing plant susceptibility to an above ground herbivore. *Functional Ecology*. 30(6): 894-902. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12582>.
- Juárez-Carballo, J.A. (2019). Diversidad de escarabajos del estiércol (Coleoptera: Scarabaeinae) en pasturas en monocultivos y sistema silvopastoril (*Cratylia argentea* y *Brachiaria brizantha*) bajo pastoreo

- en el trópico húmedo veracruzano. Informe técnico de Residencia. Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván, Extensión Tlapacoyan. 52 p.
- Lal, R.; Smith, P.; Jungkunst, H.F.; Mitsch, W.J.; Lehmann, J.; Nair, P.R. y Ravindranath, N. H. (2018). The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. *Journal of Soil and Water Conservation*. 73(6): 145A-152A. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.6.145A>.
- Lopes, L.B.; Pitta, R.M.; Eckstein, C.; e Pedreira, B.C.; Grossi, P.C.; Sindeaux, E. y Cornelissen, T.G. (2020). Diversity of coleopterans associated with cattle dung in open pastures and silvopastoral systems in the brazilian amazon. *Agroforestry Systems*. 94(6): 2277-2287. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00549-8>.
- López-Collado, J.; Cruz-Rosales, M.; Vilaboa-Arroniz, J.; Martínez, M.I. y González- Hernández, H. (2017). Contribution of dung beetles to cattle productivity in the tropics: A stochastic-dynamic modeling approach. En *Agricultural Systems*. 155: 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.05.001>.
- Mares, M.A. (2018). Remoción de estiércol y calidad del suelo por escarabajos del estiércol (Coleoptera: Scarabaeinae) en tres tipos de manejo ganadero en el municipio de Paso de Ovejas, Veracruz. Universidad Autónoma de Guerrero. Unidad Académica de Ciencias Ambientales. Acapulco, Guerrero. 124 p.
- Martínez, I.; Ramírez-Hernández, A. y Lumaret, J.P. (2017). Medicinas Veterinarias, plaguicidas, y los escarabajos del estiércol en la zona tropical de Palma Sola, Veracruz, México. *Southwestern Entomologist*. 42(2): 563-574. 1 <https://doi.org/0.3958/059.042.0225>.
- Mejía Kergelén, S.; Suárez-Paternina, E.; Martínez-Atencia, J.; Atencio-Solano, L.; Sánchez-López, D.; Pérez-García, J.E.; Cuadrado-Capella, H.; Rodríguez-Vitola, J.L.; Aguayo-Ulloa, L.; Mayorga-Mogollón, O.; Martínez-Reina, A.; Tapia Coronado, J.J.; Mestra-Vargas, L.; Pérez-Pazos, J.; Garrido-Pineda, J.; Fernández-Niño, J.C.; Doria-Ramos, M.; Paternina-Paternina, Y.; Ibáñez Miranda, K. y Mancipe-Muñoz, E. (2019). Modelo productivo de carne bovina en la región Caribe colombiana. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). 184 p. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.740-272-8>.
- Mendívil-Nieto, J.A.M.; Echeverri, C.G.; Vega, C.J.Q.; Medina, C.A. y Chara, J. (2020). Escarabajos estercoleros asociados a sistemas de ganadería sostenible en diferentes regiones de Colombia. *Biota Colombiana*. 21(2): 134-141. <https://doi.org/10.21068/c2020.v21n02a09>.
- Montoya-Molina, S.; Giraldo-Echeverri, C.; Montoya-Lerma, J.; Chará, J.; Escobar, F. y Calle, Z. (2016). Land sharing vs. land sparing in the dry Caribbean lowlands: A dung beetles' perspective. *Applied Soil Ecology*. 98: 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.017>.
- Morales, T.J.J. (2019). Efecto de la duración del manejo ganadero sobre el ensamble de escarabajos coprófagos (Coleoptera: Scarabaeidae) y en la dispersión secundaria de semillas en un bosque tropical seco. Maestría en Ciencias. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Veracruz, México. 52 p.
- Nichols, E.; Spector, S.; Louzada, J.; Larsen, T.; Amezcuita, S. y Favila, M.E. (2008). Ecological functions and ecosystem services provided by Scarabaeinae dung beetles. *Biological Conservation*. 141: 1461-1474. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.04.011>.
- Orjuela, H.B. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 35(1): 82-96. <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>.
- Ortega-Martínez, I.J.; Moreno, C.E.; Sánchez-Rojas, G. y Barragán, F. (2014). The role of *Canthon humectus hidalgoensis* (Bates)(Coleoptera: Scarabaeidae) in dung removal from a cattle pasture. *The Coleopterists Bulletin*. 68(4): 656-658. <https://doi.org/10.1649/0010-065X-68.4.656>.
- Ortega-Martínez, I.J.; Moreno, C.E. y Escobar, F. (2016). A dirty job: manure removal by dung beetles in both a cattle ranch and laboratory setting. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 161(1): 70-78. <https://doi.org/10.1111/eea.12488>.
- Palma-García, J.M. y Torres-Rivera, J.A. 2021. Manejo Silvopastoril en el trópico seco y húmedo de México. En: Gavito, M. (comp.). Colección de materiales didácticos "Ciencia para una convivencia duradera con nuestros ecosistemas" Cap. 34. (en prensa)
- Penttilä, A.; Slade, E.M.; Simojoki, A.; Riutta, T.; Minkkinen, K. y Roslin, T. (2013). Quantifying Beetle-Mediated Effects on Gas Fluxes from Dung Pats. *PLoS ONE*. 8(8):e71454. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071454>.
- Pinheiro, M.L.C. (2018). Pastoreo racional Voisin: tecnología agroecológica para el tercer milenio. Editorial Hemisferio Sur S.A., Buenos Aires, Argentina. Pp. 1-83.

- Post, W.M.; Izaurralde, C.R.; Jastrow, J.D.; McCarl, B.A.; Amonette, J.E.; Bailey, V.L.; Jardine, P.M.; O. y Zhou, J. (2017). Enhancement of Carbon Sequestration in US Soils, *BioScience*. 54(10): 895–908. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0895:EOCSIU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0895:EOCSIU]2.0.CO;2).
- Ramírez-Espinoza, K.M.; Ortega-Martínez, I.J.; Rios-Díaz, C.L. y Moreno, C.E. (2020). Sheep Dung Removal by Coexisting Rainbow Scarabs (Coleoptera: Scarabaeidae: *Phanaeus* MacLeay) under Experimental Laboratory Conditions. *The Coleopterists Bulletin*. 74(4): 869-874. <https://doi.org/10.1649/0010-065X-74.4.869>.
- Rodríguez, A.G. (2016). Actividad ovicida y larvicida *in vitro* de extracto hidro-alcohólico de *Acacia cochliacantha* en *Haemonchus contortus*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México. Temascaltepec, México. 58 p.
- Rougon, D.; Rougon, C.; Levieux, J. y Trichet, J. (1990). Variations in the amino-acid content in zebu dung in the Sahel during nesting by dung-beetles (Coleoptera, Scarabaeidae). *Soil Biology and Biochemistry*, 22(2): 217-223. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90090-M](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90090-M).
- Rueda, O.; Cuartas, C.; Naranjo, J.; Córdoba, C.; Murgueitio, E. y Anzola, H. (2011). Comportamiento de variables climáticas durante estaciones secas y de lluvia, bajo influencia del ENSO 2009-2010 (El Niño) y 2010-2011 (La Niña) dentro y fuera de sistemas silvopastoriles intensivos en el Caribe seco de Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 24(3): 512.
- Sánchez-de-Jesús, H.A.; Arroyo-Rodríguez, V.; Andresen, E. y Escobar, F. (2016). Forest loss and matrix composition are the major drivers shaping dung beetle assemblages in a fragmented rainforest. *Landscape Ecology*. 31: 843–854. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0293-2>.
- Santos-Chable, B.E.; Lara-Peréz, L.A.; Ramírez-Barajas, P.J.; Escobedo-Cabrera, A.; Tucuch Haas, I.; Cabañas-Gallardo, A.; Pat-Ake I. y Casanova-Lugo, F. (2019). Abundancia y riqueza de escarabajos (Coleoptera: Scarabaeidae) en agro-ecosistemas contrastantes en el sur de Quintana Roo, México. En: W. Cetzal-Ix, F. Casanova Lugo, A. J. Chay-Canul, J. F. Martínez-Puc (editores). *Agroecosistemas tropicales: conservación de recursos naturales y seguridad alimentaria*. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Chiná–Instituto Tecnológico de la Zona Maya. México. Pp. 158-166.
- Santos-Heredia, C.; Andresen, E.; del-Val, E.; Zárate, D.A.; Nava Mendoza, M. y Jaramillo, V. J. (2016). The activity of dung beetles increases foliar nutrient concentration in tropical seedlings. *Biotropica*. 48(5): 565-567. <https://doi.org/10.1111/btp.12364>.
- Soca, M.; Simón, L.; Sánchez, S. y Gómez, E. (2002). Dinámica parasitológica en bostas de bovinos bajo condiciones silvopastoriles. *Agroforestería en las Américas*. 9(33-34): 38-42. <https://doi.org/10.1111/btp.12364>.
- Soto, C.N. (2019). Relación de la calidad de la dieta de bovinos con la remoción de excretas por escarabajos coprófagos, en distintos ambientes de pastoreo. Tesis de Maestría en Ciencias, Programa de Maestría en Agroecosistemas Tropicales. Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz. 70 p.
- Teixeira, C.M.G.L.; Ludes, T.; Sarmiento, N.; Proenca, V. y Domingos, T. (2018). Ficha técnica de biodiversidad. Ganadería. Proyecto Life Food and Biodiversity. Global Nature Foundation. 21 p.
- Torres-Rivera, J.A. (2020). *Tara cacalaco* (Humb. y Bonpl.) Molinari y Sánchez Och. En: Palma-García, J.M y Torres-Rivera, J.A. Recursos arbóreos y arbustivos tropicales. Editorial Buen Plan / Universidad de Colima. Pp 106-114.
- Velásquez, E. y Lavelle, P. (2019). Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil based ecosystem services in agricultural landscapes. *Acta Oecologica*. 100: 103446. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2019.103446>.
- Verdú, J.R.; Cortez, V.; Ortiz, A.J.; González-Rodríguez, E.; Martínez-Pinna, J.; Lumaret, J.P.; Lobo, J.M.; Numa, C. y Sánchez-Piñero, F. (2015). Low doses of ivermectin cause sensory and locomotor disorders in dung beetles. *Scientific Reports*. 5: 13912. <https://doi.org/10.1038/srep13912>.
- Yokoyama, K.; Kai, H.; Koga, T. y Kawaguchi, S. (1991). Effect of dung beetle, *Onthophagus lenzii* H. on nitrogen transformation in cow dung and dung balls. *Soil Science and Plant Nutrition*. 37(2): 341-345. <https://doi.org/10.1080/00380768.1991.10415044>.

Agradecimientos

Agradecemos a Jesús Jarillo del CEIEGT, UNAM, a Cecilia Gómez Bautista y a sus estudiantes del CBTA 17, Úrsulo Galván; y a Patricia Menegaz de Farías (UNISUL, Brasil), por permitirnos compartir resultados parciales de investigaciones que estamos realizando en colaboración.

VI.4. Importancia de accesiones nativas de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit para la adaptación y mitigación al cambio climático

Claudio Vite Cristóbal^{1*}

José Manuel Palma García²

Enrique Cortés Díaz³

Pedro Arturo Martínez Hernández³

Ponciano Pérez Hernández⁴

¹Maestría en Producción Pecuaria Tropical, Tecnológico Nacional de México-ITS Tantoyuca, Veracruz, México.

²Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Colima, Colima, México.

³Posgrado en Producción Animal, Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México.

⁴Postgrado en Agroecosistemas Tropicales, Colegio de Postgraduados, Veracruz, México.

*Autor de correspondencia: claudio.vite@itsta.edu.mx

Introducción

La especie arbórea con mayor difusión en los sistemas ganaderos tropicales y en los subtropicales es *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit (leucaena), fabácea nativa de México con la cual se tienen diferentes tecnologías, sea como banco de proteína (Román-Miranda *et al.*, 2016) o en callejones con diferentes densidades de siembra (Anguiano *et al.*, 2013; Buck *et al.*, 2019).

El uso de accesiones nativas de leucaena para el desarrollo de sistemas silvopastoriles y agrosilvopastoriles en México es una necesidad de valoración para una ganadería sustentable, además de que estos recursos aportan diferentes servicios ecosistémicos (Palma y González-Rebeles, 2018; Palma y Torres, 2020).

A pesar de ser originaria de México, esta especie fue mejorada en otros países (Abair *et al.*, 2019; Dalzell, 2019), por lo que la disponibilidad de semilla de esas variedades hace que tengan que comprarse cuando se quiere implementar su utilización. Por tanto, la valoración del recurso arbóreo de leucaena como una especie nativa con potencial para el suministro de semilla es de importancia para la implementación de las tecnologías agroforestales.

Asimismo, una estrategia de adaptación al cambio climático es valorar los recursos locales con la visión de generar independencia en insumos y en tecnologías para nuestros productores, con el fin de que la selección de especies nativas sobresalientes de leucaena en condiciones agroclimáticas específicas y su evaluación en la predicción de rendimiento de forraje favorezcan la reducción en las emisiones de CO₂, incrementen el secuestro de carbono y disminuyan la producción de metano, lo que permitirá la gene-

ración de propuestas contra la vulnerabilidad al cambio climático, reducción de gases de efecto invernadero CO₂ y CH₄, mejoramiento del hábitat de vida silvestre y del enfoque productivo.

El presente capítulo tiene por objetivo valorar diferentes accesiones nativas de leucaena de diferente origen en distintos ambientes de crecimiento para conocer su aporte en la mitigación y adaptación al cambio climático, para lo cual se consideran las experiencias previas del estudio de accesiones nativas, las ventajas de su aprovechamiento en la agroforestería, la importancia de la conservación *in situ* y el estudio de diferentes accesiones en trópico como estrategia de adaptación, de captura de carbono, de evaluación de producción de metano y de descripción del ataque de una nueva plaga a las accesiones de leucaena en México.

Distribución geográfica del estudio de accesiones nativas de *Leucaena* en México

La preservación *in vivo* es una estrategia de conservación vegetal recientemente difundida y utilizada en la diversidad genética (Abair *et al.*, 2019), misma que involucra la remoción del material vegetal reproductivo de su medio natural para mantenerlo en colecciones de semilla, de tejidos o de plantaciones (Molina y Córdova, 2006). De esta manera se realizan colectas de material vegetal para su conservación en distintas modalidades, tales como: colección de semillas, colección de trabajos, colección de campo (*arboretum*, *pinetum*, frutales, forrajes, entre otros), colección *in vitro* y en jardines botánicos (Molina y Córdova, 2006).

En este sentido, las colectas de material vegetal en sitios diseñados para preservar material biológico a través de técnicas de manejo garantizan el aprovechamiento y la provisión de semillas a mediano y largo plazo. Sin embargo, son múltiples los beneficios que generan a nivel de ecosistema, tales como: la conservación de la biodiversidad, material vegetativo vivo y reproducible, sobrevivencia a eventos destructivos y evitan que se pierda la diversidad genética (plantas cultivadas y silvestres) (Abair *et al.*, 2019), esto último ya sea por efecto de factores ambientales, físicos, biológicos o por actividades antropogénicas (CICY, 2020). Además, conservan la diversidad de plantas cultivadas y silvestres a nivel de genes, de individuos, de poblaciones, de especies o de ecosistemas, lo cual es indispensable para el mantenimiento y la restauración del equilibrio ecológico en paisajes antropizados durante la obtención de productos primarios que demanda la sociedad (CICY, 2020).

En México y para el caso específico de leucaena nativa se encontraron diferentes registros de colecciones de semillas y de accesiones en campo a nivel regional y nacional.

Los primeros trabajos en México que tuvieron este enfoque de conservación *in situ* con accesiones de leucaena nativa fueron los desarrollados por Pérez-Guerrero *et al.* (1980) en Ajuchitlán, Guerrero, a través del FIRA (Fideicomiso Instituido en Relación a la Agricultura), pionero en México en divulgar el aprovechamiento de esta especie con productores en sistemas silvopastoriles.

Por otro lado, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en el Campo Experimental “Quintana Roo”, estableció en 1982 un banco de germoplasma de leucaena nativa de Río Hondo, Quintana Roo (Becerra *et al.*, 1986).

Asimismo, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en Ixmiquilpan, Hidalgo, realizó una colección de semillas de leucaena nativa para su posterior caracterización y establecimiento en campo para el control de la erosión del suelo (Jiménez, 1999).

En este sentido el Colegio de Posgraduados (CP), en el altiplano de México, colectaron y establecieron leucaena de las regiones del desierto chihuahuense y potosino, en altitudes de hasta 2,100 msnm para evaluar la resistencia del cultivo a temperaturas invernales y a la sequía (Quero *et al.*, 1986) y en el 2003, el CP realizó una colección de semillas nativas con productores de las zonas áridas de Hidalgo, para su posterior establecimiento en campo y para el aprovechamiento en el pastoreo con rumiantes en condiciones de temporal (Quero-Carrillo *et al.*, 2014).

Por otra parte, Molina y Córdova (2006) reportaron accesiones conservadas de colectas de semillas del género *Leucaena* tres para la región Centro (Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Querétaro y San Luis Potosí) y 20 para la región Centro-Sur (Distrito Federal, Estado de México, Hidalgo, Guerrero, Morelos, Oaxaca, Puebla, Tlaxcala y Veracruz) y accesiones conservadas por región en colecciones de campo, para la región Centro una, para la región Centro-Sur 21 y una para la región Sureste (Campeche, Chiapas, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán).

En el caso de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” (UAAN), ésta realizó una colecta de semilla de la accesión Montemorelos, en Nuevo León (Narcia, 2009).

Actualmente el INIFAP cuenta con el Centro Nacional de Recursos Genéticos, con la más alta tecnología e infraestructura para la conservación a largo plazo de especies de importancia económica y cultivos subutilizados, que en el caso de *Leucaena* sp. tienen 107 accesiones bajo resguardo (Cuevas y de la Torre, 2015).

El CP y el Tecnológico Nacional de México - ITS Tantoyuca (TecNM-ITSTa), ambos en Veracruz en Manlio Fabio Altamirano, realizaron en conjunto una colección de semillas de las accesiones Cosamaloapan, Paso de Ovejas y Tantoyuca, mismas que se enfocaron a una colección de campo establecidas en Tantoyuca, Veracruz para su comparación con el cultivar Cunningham (Ortega *et al.*, 2015). También, el CP y la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) realizaron una colección de semillas de la accesión Cotaxtla, Veracruz (Sánchez-Gómez *et al.*, 2018).

El TecNM-ITS Tantoyuca realizó una colección de semillas de 78 accesiones procedentes de Chicontepec, Chontla, Ixcatepec, Pánuco, Tantoyuca y Tempoal de la región Huasteca de Veracruz (Ángeles *et al.*, 2015).

La Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y el TecNM-ITSTa realizaron en conjunto una colección de semillas de 149 accesiones procedentes de Colima, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nuevo León y Veracruz, de las cuales 11 accesiones fueron establecidas en El Limón, Tepalcingo, Morelos, 11 accesiones en Pantepec, Puebla y 14 accesiones en Tantoyuca, Veracruz (Vite *et al.*, 2020).

En este tipo de estudios resaltaron la importancia del reconocimiento y la valoración de leucaena como un recurso nativo en México, que debe aprovecharse y divulgarse en su ambiente natural, así como considerar sus características sobresalientes para su disponibilidad a nivel nacional, mediante su conservación de material vegetativo reproducible, resistente a eventos ambientales desfavorables, eficiente en la captura de carbono, bajo en emisiones de metano y que propicie la diversidad genética de este recurso.

Ventajas de aprovechamiento de accesiones nativas de *Leucaena* en agroforestería

Las accesiones nativas de leucaena ofrecen diversos beneficios al agroecosistema, al considerar su integración en sistemas silvopastoriles o agrosilvopastoriles. Estos sistemas son arreglos planificados con leñosas, herbáceas y con herbívoros domésticos; en dicho arreglo las leñosas son arbustos y árboles forrajeros y no forrajeros como las accesiones nativas de leucaena, y las herbáceas son de diferentes familias botánicas, entre ellas destacan las gramíneas y las leguminosas nativas e introducidas (Martínez-Hernández *et al.*, 2019), pero además se destaca no sólo la asociación biológica sino la importancia social y económica como estrategia para una ganadería sustentable (Palma *et al.*, 2020).

La importancia de las especies nativas en el desarrollo de un agroecosistema radica, en:

- Conservación de material genético silvestre y mejorado para la alimentación humana y del ganado, en colecciones de recursos locales e introducidos por diferentes centros de investigación y de otras instituciones.
- Generación de conocimiento local sobre la caracterización y la evaluación de atributos morfológicos y contenido nutrimental de las colecciones de accesiones para su disponibilidad a productores y a centros de mejoramiento genético, tales como: CP, FIRA, INIFAP, TecNM-ITSTa, UAAN, UACH, UAM y UNAM, entre otras instituciones.
- Desarrollo de conocimiento básico asociado a métodos alternativos de conservación y de multiplicación de accesiones nativas.
- Permite aprovechar diferentes atributos como la resistencia a plagas, a enfermedades y a factores abióticos específicos de cada región agroclimática del país.
- Beneficia la evaluación de las potencialidades de las accesiones referidas a la precocidad, latencia, producción de forraje, resistencia a plagas y a enfermedades, resistencia a la sequía y al frío, tolerancia a la salinidad y a la acidez del suelo, contenido nutrimental, producción de metano, captura de carbono, entre otros.
- Favorece la regeneración y multiplicación de accesiones nativas de las colecciones de campo.
- Permite la gestión y coordinación de actividades de conservación de accesiones nativas entre universidades públicas y privadas, instituciones estatales y privadas y organizaciones de productores, enfocada a la selección de este recurso nativo que ayuda en la promoción de estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático.

Conservación de semillas nativas *in situ* y establecimiento de accesiones de *Leucaena* en trópico como estrategia de adaptación

El uso de colecciones *in situ* permite la conservación de semillas en campo o en vivero, tiene como ventaja el uso de infraestructura poco sofisticada y de bajo costo a diferencia de la conservación que se realiza en almacenes, invernaderos, cámaras frías, y laboratorios de biología molecular, entomología, fitopatología y en suelos que son utilizados para la conservación en colecciones y en cultivos *in vitro* (Molina y Córdova, 2006). Asimismo,

se favorecen los sistemas de documentación sean manuales y/o electrónicos, que utilizan los sistemas de información geográficos (Molina y Córdova, 2006).

A pesar de ser originaria de México, la leucaena fue mejorada en otros países, por lo que la disponibilidad de semilla hace que tengan que comprarse cuando se quiere implementar su utilización en los sistemas agroforestales. Por lo tanto, una estrategia de adaptación al cambio climático es su valoración como un recurso local, con la visión de generar independencia en insumos y en tecnologías para los sistemas silvopastoriles, en donde la selección de especies nativas sobresalientes de leucaena en condiciones agroclimáticas específicas, y su evaluación en la predicción de rendimiento de forraje, favorezcan la disponibilidad de alimento para el ganado en épocas críticas.

Lo anterior da pauta al aprovechamiento y al mejoramiento de ecotipos de leucaena nativos para la alimentación animal, lo que representa una alternativa económica para los productores ante las complicaciones de la importación de semillas mejoradas, donde existe la posibilidad de utilizar accesiones nativas de México que superan o que igualan en crecimiento a los cultivares mejorados como Cunningham (Vite *et al.*, 2020).

Asimismo, es relevante el rescate de recursos locales en la recuperación de la flora endémica, que al conservarlos *in situ* garantizan la disponibilidad de la semilla para el momento de la siembra, con lo cual se supera esta limitante.

Esta tecnología se establece en áreas pequeñas por accesión dentro de los sistemas de producción y son protegidas con cerco fijo para evitar perturbación durante su crecimiento inicial y hasta su establecimiento. La semilla debe colectarse de los bancos de germoplasma *in situ* presentes en los remanentes de vegetación cercanos al lugar del establecimiento justo antes de que las vainas abran y tiren las semillas, lo cual ocurre durante la temporada en las que las vainas inician su cambio de color de verde a marrón y de terminar su secado bajo sombra.

La semilla para la siembra debe seleccionarse en función de su tamaño y de su grosor que garanticen la cantidad de reservas de nutrientes para su germinación, dichas semillas deben además estar libres de daños físicos por insectos e identificarlas por procedencia para manejarlas como accesiones.

En el caso de leucaena, que en condiciones naturales presenta una germinación baja (5 a 10%), es recomendable favorecer un proceso de escarificación de la semilla antes de la siembra, sumergiéndola en agua corriente a 80 °C durante tres minutos, seguida de un proceso de imbibición en agua corriente a temperatura ambiente por 24 horas (Sánchez-Gómez *et al.*, 2018).

La siembra puede realizarse en almácigos de arena por 28 a 30 días y trasplantar cada plántula en una bolsa de polietileno cubriendo totalmente la raíz y en un orificio que permita su entrada vertical o sembrar directo a las bolsas de polietileno orificadas de 8 x 24 cm con dos a tres semillas por punto de siembra con profundidad de 2 a 3 cm. El sustrato puede elaborarse con base de tierra común y composta de estiércol de bovino o por tierra común, tierra de monte y sustrato forestal comercial, ambas en partes iguales. Permitir un periodo de aviveramiento de entre 60 a 90 días, manteniendo el sustrato húmedo mediante riegos, con o sin nutrición foliar y bajo casa sombra o invernadero.

El trasplante a campo puede hacerse desde 1 x 2 hasta 2 x 3 m para permitir el máximo desarrollo de las plantas sin que compitan entre ellas por luz, por agua y por nu-

trientes. Mantener el área libre de arvenses mediante un control manual o poda mecánica. Las plantas se desarrollan sin problemas sin fertilización foliar o al suelo, por tanto, es opcional la nutrición con macro y micro nutrientes. En caso de que se decida fertilizar, esta práctica debe ser dirigida al suelo en una dosis de 50 g de fosfato diamónico por planta durante el trasplante, lo cual garantiza el requerimiento de fósforo de la planta durante el periodo de establecimiento (Torres *et al.*, 2005), así como supervisión de incidencia de plagas y de enfermedades para su control mecánico, biológico o químico, además de realizar podas de formación y de sanidad conforme se requieran.

Captura de carbono en accesiones de *Leucaena*

El carbono capturado, estimado a partir de la materia seca del follaje producido de acuerdo con el IPCC (2006) para el carbono contenido en árboles y para tronco, ramas y follaje de árboles de leucaena, estuvo en función de las accesiones colectadas en las distintas procedencias de la República mexicana (cuadro 1). Esto se atribuye a que la información de campo provino de áreas con condiciones climáticas diversas, tal como lo describieron Vite *et al.* (2020).

Tantoyuca fue un sitio cálido y húmedo, mientras que Tepalcingo fue un semicálido subhúmedo. El área de Tepalcingo registró 879 mm de precipitación, la temperatura máxima mensual varió de 28.3 a 33.6 °C y la mínima mensual de 8.9 a 16.8 °C. Tantoyuca registró 1 228 mm de precipitación, la temperatura máxima mensual fue de 22.7 a 33.5 °C y la mínima mensual de 13.4 a 23.1 °C. Además, el suelo en Morelos es de textura franco-arenosa, con pH de 6.3, CE de 0.04 dS/m y presentó un contenido de materia orgánica (MO) de 1.8%, con 15.8 mg/kg de N aprovechable y 3.7 mg/kg de P asimilable; en tanto, Tantoyuca tiene un suelo de textura arcillosa, con pH de 7.2, CE de 0.18 dS/m, 4.2% MO, 12.5 mg/kg de N aprovechable y 4.3 mg/kg de P asimilable. Ambos sitios tienen suelo vertisol y en ambos casos el cultivo se desarrolló con la fertilidad de cada suelo.

La plantación se realizó en hileras con tres metros de separación y con plantas cada dos metros dentro de una misma hilera, con una densidad de población inicial de 1 667 plantas/ha, con el objetivo de permitir el máximo potencial de crecimiento de la planta. La primera y la segunda cosechas se realizaron en plantas de 17 y 20 meses de edad, durante los meses de septiembre y de diciembre de 2018.

Para ambos sitios de plantación, el crecimiento del cultivo de la primera cosecha abarcó los meses de mayor precipitación (enero-septiembre) y la segunda cosecha abarcó los meses de menor precipitación (octubre-diciembre), a los cuales se les llamó estación de crecimiento lluviosa y sequía, respectivamente.

La acumulación de carbono se comportó distinto a través de las estaciones de crecimiento dentro de cada sitio; en la plantación de Morelos se capturó dos veces más carbono en la estación lluviosa respecto a la estación de sequía, contrario a lo observado en la plantación de Veracruz, donde se capturó 2.3 veces más carbono en la sequía respecto a la lluviosa. En general, la plantación de Veracruz produjo 34 veces más carbono que la plantación de Morelos.

La accesión Tepalcingo colectada en el sitio 2 presentó una respuesta extraordinaria en la sequía, lo que demuestra la importancia del manejo del recurso nativo, debido a que en este caso correspondió a una accesión establecida en la misma región agroclimá-

tica de colecta. En la plantación de Veracruz la accesión Apodaca colectada en el sitio 2 fue la única que mostró bajo crecimiento y menor producción de carbono en la sequía, lo cual era de esperarse debido a que las semillas colectadas se caracterizaron por ser delgadas y de mayor longitud que el resto de las accesiones. La accesión UdeC, colectada en Tecmán, Colima, destacó por arriba de la media más una desviación estándar en ambas estaciones de crecimiento, se expresó el potencial genético del cultivar Cunningham procedente de Colima con su alto rendimiento y aprovechamiento de las mejores condiciones ambientales que las ocurridas en la plantación de Morelos.

La variabilidad para las accesiones dentro de cada procedencia y sitio de plantación también fue evidente. Las accesiones sobresalientes por arriba del promedio más una desviación estándar en contenido de carbono para la plantación en Morelos, son: Chicontepec, Tepalcingo 2 y UACH; en tanto, para la plantación en Veracruz sólo fue superior a la media más una desviación estándar la accesión UdeC, demostrando una producción de carbono mayor y más homogénea para la plantación de Veracruz por las mejores características en fertilidad de suelo, en temperatura ambiental, así como en distribución y en cantidad de precipitación durante el año. En la accesión Tepalcingo 2 durante la estación lluviosa en la plantación de Morelos no se registró biomasa, por lo tanto, el cálculo de la captura de carbono no fue posible, ello se asoció a la entrada accidental de bovinos quienes consumieron esta accesión. Similar problema se presentó en la época de sequía en la plantación de Veracruz en donde la presencia accidental de bovinos limitó la producción de biomasa de las accesiones: Tepalcingo 2 y Apodaca 2.

En la época de sequía las accesiones Tecmán 1 y 2, Brasil, Apodaca 1 y 2 y Chicontepec en la plantación de Morelos fueron atacados por un minador del tallo que provocó daño y posteriormente muerte de las plantas, por lo tanto, no se logró producción de biomasa para el cálculo de captura de carbono.

Un aspecto relevante con el pastoreo accidental de bovinos es que posterior a este evento, cuando se volvió a registrar la producción de biomasa, la accesión Tepalcingo logró ser la segunda de mejor respuesta en fijación de carbono total para la plantación de Morelos.

La variabilidad mostrada en el cuadro 1 resalta la importancia de la captura de carbono por el germoplasma nativo existente en las diferentes procedencias evaluadas de la República mexicana. Por tanto, existen accesiones valiosas que poseen un metabolismo elevado que las hacen eficientes en la conversión de CO₂ en carbohidratos y en compuestos carbonados.

El secuestro de carbono de leucaena en la biomasa aérea del sistema agrosilvopastoril *Cocos nucifera-Leucaena leucocephala-Cenchrus purpureus* Schum. cv. Cuba CT-115, establecido en Tecmán, Colima, México, fue de 13.42 t C⁺ ha/año (Anguiano *et al.*, 2013), nivel elevado que no fue superado por ninguna de las accesiones establecidas en Morelos y en Veracruz debido a las condiciones y al manejo que hicieron estos autores con ganado en sistema de doble propósito, a pesar de que las edades de las plantas fueron similares. Además, el cultivo de Anguiano *et al.* (2013) al que se refiere en este párrafo es el que correspondió al tratamiento con una densidad de 40 mil plantas/ha, mientras que la información del cuadro 1 fue generada con plantaciones que al momento de la cosecha mostraron 263 y 1 415 plantas/ha, en las plantaciones de Morelos y de Veracruz, respec-

tivamente. Por tanto, esta diferencia en densidad de población es el argumento también del diferencial de fijación de carbono entre sitios de plantación y de estaciones de crecimiento.

Otro aspecto es el número de cosechas realizadas en el año en el estudio de Anaguiano *et al.* (2013), en el cual la frecuencia de las cosechas por el ganado fue cada 40 días en promedio.

El carbono capturado entre sitios y estaciones de crecimiento por árbol se comportó de manera similar a lo explicado para la producción por unidad de superficie; sin embargo, el comportamiento fue distinto entre accesiones dentro de estaciones de crecimiento y del sitio de plantación (cuadro 1).

Además de las accesiones sobresalientes dentro de cada procedencia y sitio de plantación antes descritas, también resaltaron para la plantación en Morelos las accesiones Tecomán 1 y Tepalcingo 1 bajo el mismo criterio durante las estaciones lluviosa y sequía; en tanto, para la plantación en Veracruz destacó además la accesión Tecomán 2 durante la sequía. Estos resultados demostraron que la estructura del cultivo en función de la disminución de la densidad de población causada por el ataque de la plaga posteriormente descrita y el estrés por sequía entre las estaciones de crecimiento impactaron sobre la fijación de carbono por planta, seguramente debido a la menor competencia por luz, agua, nutrientes y por presencia de arvenses.

Cuadro 1

Captura de carbono por unidad de superficie y por individuo de un banco de germoplasma de *Leucaena leucocephala* en función de la estación de crecimiento y de la accesión colectada en México (enero-diciembre, 2018)*

Sitio**	Procedencia	Accesión	Superficie (t/ha)			Individuo (kg/árbol)		
			LI	S	Total	LI	S	Total
Morelos	Colima	Tecomán 1	0.020	-	0.020	0.194	-	0.194
		Tecomán 2	0.008	-	0.008	0.038	-	0.038
		Tecomán 3	0.051	0.006	0.057	0.163	0.019	0.182
	Cunningham	Brasil	0.012	-	0.012	0.039	-	0.039
		UdeC	0.043	0.008	0.052	0.104	0.020	0.124
		UACH	0.063	0.003	0.066	0.122	0.008	0.130
	Morelos	Tepalcingo 1	0.024	0.006	0.030	0.234	0.056	0.289
		Tepalcingo 2	-	0.069	0.069	-	0.051	0.051
		Axochiapan	0.011	0.005	0.016	0.022	0.009	0.031
	Nuevo León	San Nicolás de los Garza	0.009	0.003	0.012	0.090	0.026	0.116
		Apodaca 1	0.003	-	0.003	0.010	-	0.010
		Apodaca 2	0.002	-	0.002	0.010	-	0.010

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

Sitio**	Procedencia	Accesión	Superficie (t/ha)			Individuo (kg/árbol)		
			LI	S	Total	LI	S	Total
Morelos	Veracruz	Tantoyuca 1	0.010	0.004	0.014	0.033	0.013	0.046
		Chicontepec	0.078	-	0.078	0.188	-	0.188
		Media ±DS	0.024± 0.025	0.007± 0.018	0.031± 0.027	0.096± 0.078	0.025± 0.018	0.103± 0.085
Veracruz	Colima	Tecomán 1	0.153	0.666	0.819	0.092	0.400	0.492
		Tecomán 2	0.491	1.454	1.945	0.363	1.074	1.436
		Tecomán 3	0.358	0.446	0.804	0.229	0.285	0.514
	Cunningham	Brasil	0.501	1.494	1.995	0.301	0.897	1.197
		UdeC	1.560	1.890	3.450	0.998	1.209	2.208
		UACH	0.190	0.378	0.568	0.114	0.227	0.340
	Morelos	Tepalcingo 1	0.041	0.353	0.394	0.028	0.260	0.289
		Tepalcingo 2	0.039	-	0.039	0.074	-	0.074
		Axochiapan	0.420	1.086	1.506	0.252	0.652	0.904
	Nuevo León	San Nicolás de los Garza	0.038	0.000	0.038	0.028	'	0.028
		Apodaca 1	0.533	0.594	1.127	0.320	0.356	0.676
		Apodaca 2	0.006	0.002	0.008	0.018	0.008	0.026
	Veracruz	Tantoyuca	0.161	0.340	0.501	0.103	0.218	0.321
		Chicontepec	0.227	1.433	1.660	0.136	0.859	0.996
		Media ±DS	0.337 ±0.399	0.724± 0.632	1.061± 0.971	0.218± 0.252	0.537± 0.388	0.679± 0.620

*LI = Estación de crecimiento lluviosa, S = Estación de crecimiento seca, UACH = Universidad Autónoma Chapingo y UdeC = Universidad de Colima.

**La densidad de población fue de 263 y de 1 415 plantas/ha en las plantaciones de Morelos y de Veracruz, respectivamente.

Evaluación de producción de metano en accesiones de *Leucaena*

La emisión de gas metano (CH₄) es el mayor impacto negativo sobre el ambiente que tiene la ganadería con rumiantes en pastoreo o alimentados con forrajes toscos, particularmente en condiciones de ambientes tropicales (Martínez-Hernández *et al.*, 2019). En este sentido, la sostenibilidad de la ganadería pastoril con rumiantes alimentados con praderas monófitas de gramíneas está fuertemente amenazada por señalarse que es emisora de hasta 50% del CH₄, 26% del CO₂, 24% del óxido nitroso (N₂O), todos ellos gases de efecto invernadero (FAO, 2020).

La variabilidad en la producción de metano está en función de las accesiones colectadas en las distintas procedencias de leucaena de la República mexicana (cuadro 2). La

medición de esta variable se basó en la técnica *in vitro* de producción de gases que permite determinar la degradación del alimento a través del volumen de gas producido durante el proceso fermentativo de 24 horas, a partir del cual se estimaron los volúmenes totales de gas, CO₂ y de metano, expresados en mL/g de sustrato; finalmente, el metano se expresó en porcentaje al considerar la proporción del volumen producido con respecto al volumen total de gas. Cabe resaltar que la estimación de metano se realizó con biomasa comestible constituida de hojas y de tallos de menos de 3 mm de grosor.

El crecimiento microbiano necesita energía la cual es obtenida a partir de la fermentación de los carbohidratos, entre ellos, almidón, celulosa, hemicelulosa, pectina, cuya digestión anaeróbica produce ácidos grasos volátiles (AGV), succinato, formato, lactato, etanol, CO₂, CH₄, y trazas de hidrógeno (H₂) esenciales para la multiplicación microbiana (Tan *et al.*, 2011).

El potencial para mitigar metano del follaje de leucaena está bien documentado (Singh *et al.*, 2012; Jiménez-Santiago *et al.*, 2019; Pérez-Can *et al.*, 2020). La reducción en la producción de este contaminante está asociada con el mayor contenido de taninos condensados y saponinas (Pérez-Can *et al.*, 2020), que tienen efecto directo en los metanógenos y en los protozoarios, y éstos tienen la capacidad de incrementar la proporción molar de ácido propiónico y de reducir la producción de metano (Tan *et al.*, 2011).

La producción de metano, al igual que en el caso de la captura de carbono, se comporta distinto a través de las estaciones de crecimiento dentro de cada sitio de plantación; en este caso, ambas plantaciones (Morelos y Veracruz) producen 1.4 veces más metano en la estación lluviosa que en la sequía. La variabilidad en emisión de metano por las accesiones dentro de cada procedencia y sitio de plantación es menos evidente que en el caso del carbono capturado.

La accesión Axochiapan es la que menos metano produce con respecto a la media menos una desviación estándar en la plantación de Morelos, resultado que es necesario ponderar dado que sólo se obtuvo una cosecha, en tanto, para la plantación en Veracruz la de menor producción de metano fue la accesión Tecomán 2.

En general durante la estación lluviosa, ambas plantaciones resaltan por su baja emisión de metano por debajo del promedio menos una desviación estándar las accesiones San Nicolás de los Garza y Apodaca 1, mientras que para la sequía sobresalen por su baja emisión de este contaminante las accesiones UdeC para Morelos y Tecomán 2 para Veracruz.

Las accesiones de Axochiapan durante la estación lluviosa, y Tecomán 1, UACH, Axochiapan 1 y 2 y Tantoyuca durante la sequía para la plantación de Morelos, así como las accesiones de Apodaca 1, San Nicolás de los Garza y Tepalcingo 2 durante la sequía en la plantación de Veracruz no se registró metano producido debido a que en su totalidad las parcelas en el área de exclusión fueron invadidas por bovinos que consumieron el follaje de las plantas, sumado a que fueron atacados por un minador del tallo que afectó el rendimiento de follaje hasta terminar en la muerte de las mismas, situación previamente señalada (cuadro 2).

La variabilidad de la producción de metano mostrada en el cuadro 2, también resalta la importancia del germoplasma nativo procedente de los diferentes sitios de colecta de la República mexicana; se enfatiza que existe material genético disponible de leucaena que podría utilizarse en programas de mejoramiento genético enfocados a la producción de eco-

tipos productores de forraje que disminuyan la emisión de metano. El rango de 14.2 a 31.8% para metano obtenido a las 24 h de incubación caen dentro del rango de valores publicados en la literatura, 14.7% obtenido por Pérez-Can *et al.* (2020) y 30.8% obtenido por Jiménez-Santiago *et al.* (2019), ambos para las 24 h de fermentación, con la misma especie de leucaena y en condición *in vitro*. En promedio también es similar al 19.6% de metano para follaje de leucaena obtenida a las 24 h de incubación por Singh *et al.* (2012).

Cuadro 2

Producción de metano (%) en función de la estación de crecimiento (lluviosa y seca) y la de acceso de *Leucaena leucocephala* colectada en México (enero-diciembre, 2018)

Sitio*	Procedencia	Accesión**	Estación		Media
			Lluviosa	Sequía	
Morelos	Colima	Tecomán 1	27.9	-	27.9
		Tecomán 3	22.3	15.1	18.7
	Cunningham	UdeC	20.4	14.1	17.3
		UACH	24.4	-	24.4
	Morelos	Tepalcingo 1	22.1	16.5	19.3
		Axochiapan	-	14.2	14.2
	Nuevo León	San Nicolás de los Garza	18.1	17.4	17.7
		Apodaca 1	18.8	-	18.8
		Apodaca 2	23.2	-	23.2
	Veracruz	Tantoyuca 1	19.8	-	19.8
		Chicontepepec	24.3	15.2	19.8
		Media ±DS	22.1 ±3.0	15.4 ±1.3	20.1 ±3.8
	Veracruz	Colima	Tecomán 1	29.3	17.5
Tecomán 2			27.2	12.4	19.8
Tecomán 3			27.3	15.8	21.5
Cunningham		Brasil	24.5	19.0	21.7
		UdeC	25.2	20.0	22.6
		UACH	26.8	19.5	23.2
Morelos		Tepalcingo 1	30.5	23.0	26.7
		Tepalcingo 2	31.8	-	31.8
		Axochiapan	25.2	20.2	22.7

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

Sitio*	Procedencia	Accesión**	Estación		Media
			Lluviosa	Sequía	
Veracruz	Nuevo León	San Nicolás de los Garza	21.6	-	21.6
		Apodaca 1	22.4	-	22.4
		Apodaca 2	27.7	15.5	21.6
	Veracruz	Tantoyuca 1	23.6	18.4	21.0
		Chicontepec	28.4	19.5	23.9
		Media	26.5	18.2	23.1
		±DS	±3.0	±2.9	±3.0

*La densidad de población fue de 263 y de 1 415 plantas/ha⁻¹ en las plantaciones de Morelos y de Veracruz, respectivamente.

**UACH = Universidad Autónoma Chapingo y UdeC = Universidad de Colima.

Nueva plaga de insecto en accesiones nativas de *Leucaena*

Uno de los planteamientos en cuanto a sanidad vegetal está relacionado con las plagas y con el cambio climático, aspectos que se desconoce cómo se presentarán en el futuro, dado los cada vez más frecuentes fenómenos meteorológicos que incluyen sequías e inundaciones con mayor intensidad, que disminuirán nuestra capacidad de producir alimentos, en donde los insectos plaga jugarán un papel importante en el daño que se presente en los cultivos de interés debido a que éstos aumentan su tasa metabólica y reproductiva, lo que implica una población de insectos mayor y hambrienta que atacará a los cultivos.

En el caso de leucaena es ampliamente conocido el daño que origina el psílido *Heteropsylla cubana* (Dalzell, 2019), así como en menor énfasis el microlepidóptero *Ithome lassula* y el pentatómido *Loxa viridis* (Alonso-Amaro *et al.*, 2020).

Sin embargo, la presencia de nuevas plagas y sus efectos son desconocidos, en donde el cambio climático sea más favorable para insectos poco conocidos o que dañan a otras especies arbóreas y que generen daños a la leucaena; ante estos nuevos escenarios climáticos, se muestra la susceptibilidad de esta leguminosa a una nueva plaga, que alerta la susceptibilidad de la leucaena al ataque de un minador del tallo.

Al detectar plantas sin producción de biomasa o muertas, además de observar en la parte basal de los tallos presencia de gomosis, se confirmó la presencia de un minador del tallo conocido como *Anthaxia aeneogaster* ([Gory & Laporte] Coleoptera: Buprestidae), el cual se encontró en estados de larva (figura 1a) y pupa (figura 1b). Este insecto causó lesiones que se manifestaron en destrucción del floema desde la raíz y hasta una altura aproximada de 10 cm sobre el suelo; generó engrosamiento del tallo en la región afectada, gomosis e inclusive la muerte de la planta (figura 1c). Generalmente, se observó un insecto en cada perforación del tallo, aunque en más de alguna ocasión se registraron dos.

En ese contexto, el ataque de *A. aeneogaster* provocó daño que afectaron a las plantas de leucaena, con lo que se afectó la sobrevivencia, que fue variable entre estacio-

nes de crecimiento, procedencias y sitios de establecimiento (cuadro 3). En la plantación de Morelos las plantas sobrevivieron 1.8 veces más durante la primera cosecha (lluviosa) en comparación con la segunda (sequía). La introducción de accesiones nativas de leucaena como un nuevo material vegetal de consistencia blanda y seguramente la presencia del insecto en el lugar propicio originó el ataque de esta plaga a la leucaena.

Figura 1

Minador *Anthaxia aeneogaster* en estado de larva (a) y pupa (b) causando daño en la corteza y floema (c) en plantas de las accesiones nativas de *Leucaena leucocephala*



Fuente: Elaborada por los autores.

La plantación de Morelos fue infestada desde el establecimiento por la larva, que se considera como un nuevo reporte de plaga para leucaena y para la zona centro de la República mexicana, debido a que dicho insecto sólo fue informado para las especies forestales del noroeste de México (GBIF, 2019).

La presencia de *A. aeneogaster* se atribuye a que es una especie polífaga de climas templados que en estado de larva ataca a diversas leñosas, tales como: *Abies*, *Acer*, *Cedrus*, *Cytisus*, *Malus*, *Nerium*, *Pistacia*, *Pinus*, *Pyrus*, *Prunus*, *Quercus*, *Rhus*, *Salix*, *Ulmus*, entre otros (Verdugo, 2002).

Tepalcingo, Morelos, forma parte de la selva baja caducifolia y presenta temperaturas frías extremosas, principalmente durante el invierno, que fue el momento en que la plaga incidió en el banco de germoplasma, asociado también a que leucaena es una leguminosa leñosa de consistencia blanda en la madera que, como se aprecia, *A. aeneogaster* es capaz de alimentarse de leguminosas leñosas. De esta manera, se confirma la importancia económica forestal de esta plaga que impactó en la producción de biomasa y por tanto en la fijación de carbono en la selva baja caducifolia.

Es relevante resaltar la sobrevivencia de la accesión Axochiapan que en ambas estaciones de crecimiento estuvo por arriba de la media más una desviación estándar para la plantación de Morelos, lo cual confirma su plasticidad elevada en la resistencia al minador del tallo, representando un material biológico de alto valor para su propagación y para su establecimiento en la región donde se encuentra, lo que pone de manifiesto la relevancia de los materiales nativos por un lado y por otro el conocimiento de nuevas plagas que pueden atacar la introducción de leucaena en caso de utilizar accesiones mejoradas.

Este hallazgo del minador confirma que al incrementar la población de leucaena en el sitio de estudio, el insecto seguramente ya se encontraba en el lugar y encontró un lugar idóneo para multiplicarse, ante lo cual es un riesgo latente llevar materiales exógenos a los nuevos plantíos con accesiones nativas que generan fallas en el establecimiento del sistema agroforestal. Dicho hallazgo también da pauta a investigaciones futuras enfocadas al estudio de la dinámica de la población para dejar en claro los mecanismos de invasión del insecto en sus diferentes estadios de desarrollo y así tener los diferentes escenarios del daño que causan al cultivo de leucaena en esta región específica de la Sierra de Huautla, Morelos.

Cabe señalar que el 60% de las accesiones en la plantación de Veracruz sobrevivieron en ambas cosechas por arriba de la media más una desviación estándar. Este hecho fue favorecido por la mayor precipitación ocurrida en Veracruz que en Morelos (Vite *et al.*, 2020), lo cual deja en claro la importancia de la precipitación y de la distribución de la misma a través del año requeridas para el éxito del establecimiento de las accesiones nativas de leucaena que lleven a cultivos saludables para su uso en sistemas silvopastoriles y en agrosilvopastoriles.

Cuadro 3

Sobrevivencia de plantas (%) al ataque del minador *Anthaxia aeneogaster* en un cultivo de *Leucaena leucocephala* en función de la estación de crecimiento (lluviosa y seca) y la accesión colectada en México (enero-diciembre, 2018)

Sitio*	Procedencia	Accesión**	Estación		Media
			Lluviosa	Sequía	
Morelos	Colima	Tecomán 1	9.1	0.0	4.5
		Tecomán 2	28.6	0.0	14.3
		Tecomán 3	20.0	20.0	20.0
	Cunningham	Brasil	18.8	0.0	9.4
		UACH	25.0	25.0	25.0
		UdeC	31.3	18.8	25.0
	Morelos	Tepalcingo 1	6.3	6.3	6.3
		Axochiapan	50.0	50.0	50.0
	Nuevo León	San Nicolás de los Garza	8.3	8.3	8.3
		Apodaca 1	18.8	0.0	9.4
		Apodaca 2	28.6	0.0	14.3

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

Sitio*	Procedencia	Accesión**	Estación		Media	
			Lluviosa	Sequía		
Morelos	Veracruz	Tantoyuca 1	9.1	0.0	4.5	
		Chicontepec	18.8	18.8	18.8	
		Media ±DS	21.0 ±12.1	11.3 ±14.9	16.1 ±12.4	
Veracruz	Colima	Tecomán 1	100.0	100.0	100.0	
		Tecomán 2	100.0	100.0	100.0	
		Tecomán 3	100.0	100.0	100.0	
	Cunningham	Brasil	100.0	100.0	100.0	
		UdeC	100.0	100.0	100.0	
		UACH	100.0	100.0	100.0	
	Morelos	Tepalcingo	Tepalcingo 1	100.0	92.9	96.4
			Tepalcingo 2	83.3	83.3	83.3
			Axochiapan	100.0	100.0	100.0
	Nuevo León	San Nicolás de los Garza	San Nicolás de los Garza	92.9	92.9	92.9
			Apodaca 1	100.0	100.0	100.0
			Apodaca 2	75.0	75.0	75.0
	Veracruz	Tantoyuca	Tantoyuca	93.8	93.8	93.8
			Chicontepec	100.0	100.0	100.0
			Media ±DS	96.1 ±7.7	95.6 ±7.7	95.8 ±7.6

*La densidad de población fue de 263 y 1 415 plantas/ha⁻¹ en las plantaciones de Morelos y de Veracruz, respectivamente.

**UACH = Universidad Autónoma Chapingo y UdeC = Universidad de Colima.

Reflexión final

México tiene una gran riqueza de accesiones de leucaena que pueden potencializar a los sistemas silvopastoriles y a los agrosilvopastoriles de forma local y económica, sin necesidad de comprar la semilla en el mercado global, como medida de adaptación de nuestros productores sobre todo de aquéllos de escasos recursos.

El aprovechamiento de las accesiones nativas de leucaena en el país favorece la implementación de los sistemas silvopastoriles y de los agrosilvopastoriles por los productores con enfoque de resiliencia para enfrentar el cambio climático.

Este estudio sugiere que hay una relación entre la región agroclimatológica de establecimiento y el tipo de accesión utilizada, que permite diferenciar las estrategias de manejo desarrolladas en respuesta al clima y del suelo dominante de cada región, lo cual

es un aporte relevante de las accesiones nativas de leucaena a la adaptación de los sistemas agropecuarios ante el cambio climático.

Lo anterior permite identificar y promover el aprovechamiento de accesiones de leucaena nativas y valiosas dentro del agroecosistema y que generen beneficios para los productores, además de beneficios ecológicos en el paisaje rural.

La selección de accesiones nativas de leucaena para el establecimiento de diferentes tecnologías agroforestales permitirá una mejor propuesta en el secuestro de carbono atmosférico, producir bajas emisiones de metano y adaptarse a la resistencia a plagas, beneficios que atenúan y que mitigan los efectos del cambio climático.

El establecimiento de ensayos de procedencias con accesiones de leucaena nativa en las distintas regiones agroclimáticas de México es incipiente y aunque existe información de algunos ensayos de este tipo, éstos no se mantienen hasta la fecha. Por tanto, es importante realizar estudios *in situ* de los usos de las accesiones nativas de leucaena, de su caracterización morfológica y de su utilización en programas de mejoramiento genético.

La capacitación del personal es una pieza clave para lograr el éxito deseado en la conservación, en el manejo y en la utilización del germoplasma nativo. El desarrollo de talleres de capacitación y de ferias de semillas podrían ayudar a la divulgación de la conservación de germoplasma a nivel local, para sensibilizar a los productores y para despertar el interés de investigadores con el fin de aprovechar las accesiones nativas subutilizadas.

Finalmente, existen investigaciones que apuntan a la diferencia entre accesiones nativas de leucaena, por lo que se debe continuar con estudios de campo, que consideren densidad de plantación y diversos arreglos agroforestales.

Aspectos destacados

1. El presente capítulo resalta la importancia de la leucaena como un forraje nativo bajo en emisiones de metano.
2. Se aporta conocimiento sobre una nueva plaga de insecto en accesiones nativas y mejoradas.
3. Valora el potencial del recurso arbóreo nativo para suministrar semilla en la implementación de tecnologías agroforestales.

Literatura citada

- Abair, A.; Hughes, C.E. y Bailey, C.D. (2019). The evolutionary history of *Leucaena*: Recent research, new genomic resources and future directions. *Tropical Grasslands*. 7: 65-73.
- Alonso-Amaro, O.; Núñez-Águila, R.; Grillo-Ravelo, V.H.; Lezcano-Fleires, J.C. y Suris-Campos, M. (2020). Insectos plagas potenciales de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit en la fase de producción de semillas en Cuba. *Pastos y Forrajes*. 43:74-83.
- Ángeles, M.J.; Vite, C.C.; Purroy, V.R.; Hernández, S.Q. y Hernández, S.E. (2015). Características morfológicas del fruto y la semilla de accesiones de *Leucaena leucocephala* con potencial de bancos de germoplasma *in situ*. *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social*. 1(1): 325-330.
- Anguiano, J.; Aguirre, J. y Palma, J.M. (2013). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de *Cocos nucifera*, *Leucaena leucocephala* var. Cunningham y *Pennisetum purpureum* Cuba CT-115. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 17(1): 149-160.
- Becerra, J.B.; Buenfil, G.Z. y Ruelas, A.C. (1986). Productividad de la *Leucaena leucocephala* en la Cuenca del Río Hondo, Quintana Roo: efecto de la altura y frecuencia del corte. *Técnica Pecuaria en México*. 50: 151-159.
- Buck, S.; Rolfe, J.; Lemin, C. e English, B. (2019). Establishment of *Leucaena* in Australia. *Tropical Grasslands*. 7(2): 104-111.
- CICY, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. (2020). Banco de germoplasma. Recuperado de: <https://www.cicy.mx/sitios/Germoplasma/#el-contexto-nacional>. (Consultado 30 noviembre 2020).
- Cuevas, F.A. y de la Torre, F. (2015). Conservación de las especies subvaloradas como recursos genéticos agrícolas. En *Revista Digital Universitaria*. 16(5). Recuperado de <http://www.revista.unam.mx/vol.16/num5/art37> (Consultado 15 diciembre 2020).
- Dalzell, S.A. (2019). *Leucaena* cultivars - current releases and future opportunities. *Tropical Grasslands*. 7(2): 56-64.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2020). GLEAM 2.0 Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y su potencial de mitigación. Recuperado de <http://www.fao.org/gleam/results/es/> (Consultado 22 diciembre 2020).
- GBIF (Global Biodiversity Information Facility). (2019). *Anthaxia aeneogaster* Gory & Laporte, 1839 in GBIF Secretariat. GBIF Backbone Taxonomy. Checklist dataset <https://doi.org/10.15468/39omei>, accessed via GBIF.org. Consultado el 14 de noviembre de 2020.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (eds.), Published: IGES, Japan. 304 p.
- Jiménez, M.V. (1999). Propagación y producción de especies (*Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. Ex Willd.) M.C. Johnston, *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. y *Mimosa depauperata* Benth) de importancia forestal no maderable en El Dexthi San Juanico, de Ixmiquilpan, Hgo. Tesis Profesional. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. Tlalnepantla, Estado de México. 84 p.
- Jiménez-Santiago, A.; Jiménez-Ferrer, G.; Alayón-Gamboa, A.; Pérez-Luna, E.J.; Piñeiro-Vázquez, Á.T.; Albores-Moreno, S.; Pérez-Escobar, M.G. y Castro-Chan, R. (2019). Fermentación ruminal y producción de metano usando la técnica de gas *in vitro* en forrajes de un sistema silvopastoril de ovinos de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 10(2): 298-314.
- Martínez-Hernández, P.A.; Cortés-Díaz, E.; Purroy-Vásquez, R.; Palma-García, J.M.; Del Pozo-Rodríguez, P.P. y Vite-Cristóbal, C. (2019). *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit especie clave para una producción bovina sostenible en el trópico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 22(2): 331-357.
- Molina, M.J.C. y Córdova, T.L. (eds.). (2006). Recursos fitogenéticos de México para la alimentación y la agricultura: Informe Nacional 2006. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación y Sociedad Mexicana de Fitogenética, A.C. Chapingo, México. 172 p.
- Narcia, V.M. (2009). Técnicas de escarificación en semillas de guaje (*Leucaena leucocephala* Lam.) de Wit para aumentar la capacidad germinativa. Tesis de Grado. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Saltillo, Coahuila, México. 76 p.

- Ortega, V.E.; López, O.S.; Arrieta, G.A.; Reséndiz, O.A. y Bautista, E. (2015). Comparación del crecimiento en vivero de tres ecotipos de *Leucaena leucocephala* procedentes del estado de Veracruz contra CV Cunningham. *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social*. 1(1): 319-324.
- Palma, J.M. y González-Rebeles, C. (2018). Recursos arbóreos y arbustivos tropicales para una ganadería bovina sustentable. Ed. Universidad de Colima. Universidad de Colima-REDGATRO-CONACYT. 133 p.
- Palma, J.M., y Torres, J.A. (2020). Recursos arbóreos y arbustivos tropicales para una ganadería bovina sustentable II. Ed. Universidad de Colima. Universidad de Colima. 127 p.
- Palma, J.M.; Torres, J.A. y Zorrilla, J.M. (2020). Agroforestería pecuaria - producción ganadera sustentable en México. *La Jornada en el Campo*. 159: 6.
- Pérez-Can, G.E.; Tzec-Gamboa, M.; Albores-Moreno, S.; Sanginés-García, J.; Aguilar-Urquiza, E.; Chay-Canul, A.; Canul-Solis, J.; Muñoz-Gonzalez, J.; Diaz-Echeverria, V. y Piñero-Vázquez, A.T. (2020). Degradabilidad y producción de metano *in vitro* del follaje de árboles y arbustos con potencial en la nutrición de rumiantes. *Acta Universitaria*. 30: 1-13.
- Pérez-Guerrero, J.; Sánchez, G.; Gallo, J. y Neri, O. (1980). *Leucaena* (huaje), leguminosa tropical mexicana; usos y potencial. XXV aniversario FIRA. 36 p.
- Quero, C.A.R.; Talavera-Magaña, D. y Hussey, M.A. (1996). *Leucaena* for the Arid High Plateaus (Altiplano of Mexico). In: Proceedings of the American Society of Agronomy. Abstract. Indianapolis, Indiana. 175 p.
- Quero-Carrillo, A.R.; Miranda-Jiménez, L. y Hernández-Guzmán, F.J. (2014). *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit en México, bases para su utilización en la alimentación de rumiantes. Folleto Técnico. Colegio de Postgraduados. 32 p.
- Román-Miranda, M.L.; Palma, J.M.; Zorrilla-Ríos, J.M.; Mora-Santacruz, A. (2016). Producción de materia seca de *Leucaena leucocephala* y vegetación herbácea en un banco de proteína pastoreada por ovinos. *Revista de Sistemas Experimentales*. 3(6): 42-50.
- Sánchez-Gómez, A.; Rosendo-Ponce, A.; Vargas-Romero, J.M.; Rosales-Martínez, F.; Platas-Rosado, D.E. y Becerril-Pérez, C.M. (2018). Energía germinativa en guaje (*Leucaena leucocephala* cv. Cunningham) con diferentes métodos de escarificación de la semilla. *Agrociencia*. 52(6): 863-874.
- Singh, S.; Kushwaha, B.P.; Nag, S.K.; Mishra, A.K.; Singh, A. y Anele, U.Y. (2012). *In vitro* ruminal fermentation, protein and carbohydrate fractionation, methane production and prediction of twelve commonly used Indian green forages. *Animal Feed Science and Technology*. 178: 2-11.
- Tan, H.Y.; Sieo, C.C.; Abdullah, N.; Liang, J.B.; Huang, X.D. y Ho, Y.W. (2011). Effects of condensed tannins from *Leucaena* on methane production, rumen fermentation and populations of methanogens and protozoa *in vitro*. *Animal Feed Science and Technology*. 169(3-4): 212-227.
- Torres, A.; Chacón, E.; Armas, S. y Espinoza, F. (2005). Efecto de los patrones de siembra sobre la producción de proteína cruda en bancos de *Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit. *Zootecnia Tropical*. 23(1): 28-50.
- Verdugo, P.A. (2002). Los Buprestidos de la Comunidad Autónoma Andaluza (COLEOPTERA, BUPRESTIDAE). *Boletín de la SAE*. 5: 5-65.
- Vite, C.C.; Martínez, H.P.A.; Cortés, D.E.; Pérez, H.P.; Palma, G.J.M.; Escalante, E.J.A.S.; Rodríguez, G.M.T. (2020). Modelos cuantitativos desarrollados con estrategias no destructivas para la estimación del área foliar en *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 24(2): 51-66.

Abreviaturas, siglas, unidades de medida, unidades y sus equivalencias, y elementos y compuestos químicos

Abreviaturas

AE	Aceites esenciales
AOA	Arqueas
B/C	Relación Beneficio/costo
BOA	Bacterias oxidantes de amoniaco
CA	Consumo de agua
CAS	Carbono almacenado en el suelo
CC	Cambio Climático
CE	Conductividad Eléctrica
COS	Carbono Orgánico del suelo
C3	Ruta metabólica de tres carbonos
C4	Ruta metabólica de cuatro carbonos
<i>et al.</i>	y otros
GDP	Ganancia diaria de peso
GEI	Gases de Efecto Invernadero
Gg de CO ₂ eq	Unidad equivalente a 1 000 toneladas de CO ₂
HLB	Huanglongbing
kg	Kilogramo
FBN	Fijación Biológica de Nitrógeno
FND	Fibra Neutro Detergente
FDA	Fibra Detergente Ácido
MCO	Mínimos Cuadrados Ordinarios
M.O.	Materia orgánica
MOS	Materia Orgánica del Suelo
MS	Materia Seca
NVA	Número de veces que acceden al agua
NVO	Número de veces que orinan
PC	Proteína Cruda
pH	Potencial hidrógeno
PMe	Producto medio
PMg	Producto Marginal

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

ppm	Partes por millón
ppb	Partes por mil millones
PT	Producto Total
PV	Peso Vivo
s.f.	Sin fecha
spp	Especies
TAF	Tecnologías Agroforestales
TC	Taninos condensados
TIR	Tasa Interna de Retorno
TH	Taninos hidrosolubles
UA	Unidad Animal 450 kg peso vivo
UET	Uso Equivalente de la Tierra
UGM	Carga ganadera mínima
UP	Unidad productiva
UPG	Unidad de Producción Ganadera
v.gr.	Por ejemplo
=	Igual
≤	Es menor o igual que
≥	Es mayor o igual que
%	Porcentaje

Siglas

CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONEVAL	Consejo Nacional de Evaluación de la política de Desarrollo Social
EEA	European Economic Area
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
INAFED	Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal
IPCC	Panel intergubernamental del cambio climático
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SIAP	Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera
SSP	Sistema Silvopastoril

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

RedSAM	Red Temática CONACYT Sistemas Agroforestales de México
WWF	Organización Internacional para la Conservación de la Naturaleza
SSPi	Sistema silvopastoril intensivo

Unidades de medida

Brix	Grados Brix
°C	Grados centígrados
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro cuadrado
cm ³	Centímetro cúbico
dm ³	Decímetro cúbico
d	Día
g	Gramos
ha	Hectárea
h	Hora
kg	Kilogramos
L	Litro
M	Metros lineales
m ²	Metros cuadrados
m ³	Metro cúbico
mg	Miligramos
mL	Mililitros
mm	Milímetro
mmhos	Milimhos
pH	Potencial hidrógeno
t	Tonelada
%	Porcentaje

Unidades y sus equivalencias

Ggt = 1 Gigatonelada = 10⁹ toneladas

Gg = Gigagramo = 1000 t métricas = 10⁹ g = 10⁶ kg

Mg = 10⁶ g = 1 t = 1000 kg

Elementos y compuestos químicos

ATP	Adenosin trifosfato
C	Carbono
Ca	Calcio

Continúa en la página siguiente.

Viene de la página anterior.

CaCO ₃	Carbonato de calcio
CFC	Clorofluorocarbonos
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Bióxido de carbono o Dióxido de carbono
CO ₂ eq	Dióxido de carbono equivalente
CO ₂	Dióxido de carbono
CoA	Coenzima A
H ₂	Hidrógeno
H ₂ O	Agua
HCFC	Hidroclorofluorocarbonos
HFC	Hidrofluorocarbonos
K	Potasio
LiCl	Cloruro de litio
McrA	Metil coenzima M reductasa
Mg	Magnesio
MgO	Óxido de magnesio
N	Nitrógeno
N ₂	Dinitrógeno
NAD ⁺	Nicotinamida adenina dinucleótido reducido
NADH	Nicotinamida adenina dinucleótido oxidado
NH ₃	Amoniaco
NH ₄	Amonio
NH ₂ OH	Hidroxilamina
N ₂ O	Óxido nitroso
NO	Óxido de nitrógeno/Óxido nítrico
NO ₂	Dióxido de Nitrógeno/Nitrito
NO ₃	Nitrato
N ₂ O	Óxido nitroso
NO _x	Óxidos de nitrógeno
OH	Hidroxilo
P	Fósforo
SF ₆	Hexafluoruro de azufre
SO ₂	Anhídrido sulfuroso
COV	Compuestos orgánicos volátiles totales

Epílogo

El auge de tecnologías en pro del paradigma agroforestal pecuario en México y sus bondades para la adaptación y mitigación al cambio climático

Me place constatar con satisfacción que la publicación de esta obra contribuye de forma importante con el acervo cuyo título alude a “Tecnologías agroforestales para la adaptación y mitigación al cambio climático. Opciones y perspectivas”. Es un libro meritorio producto del esfuerzo, de la tenacidad, del profesionalismo y de la coordinación de tres connotados científicos mexicanos, los doctores, José Manuel Palma García (de la Universidad de Colima), José Antonio Torres Rivera (del Centro Regional de Oriente - Universidad Autónoma Chapingo) y Eduardo Valdés Velarde (del Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible de la Universidad Autónoma Chapingo), y de 76 destacados autores adscritos a 19 instituciones de diferentes regiones o estados del territorio mexicano, una de Estados Unidos y una de la República de Chile. El libro está integrado por 15 capítulos que están organizados en seis secciones. Muestra el auge de las tecnologías en pro del paradigma agroforestal en México y sus bondades para la adaptación y mitigación al cambio climático.

Tanto su contenido teórico, como el aporte de información empírica, son apremiantes para revertir los múltiples efectos poco favorables de la ganadería convencional en México y en América Latina. Los trabajos versan sobre dimensiones tecnológicas, ambientales, sociales, económicas y políticas, y se desarrollan en las escalas de análisis de componente, sistema de producción, unidad de producción, grupo de productores, comunidad, municipio, región, estado y de la República mexicana. Las investigaciones van desde lo cualitativo y lo cuantitativo, observacional y experimental, documental y laboratorio, ensayos en campo y controlados, hasta entrevistas e investigación participativa. Un trabajo (el primero) aborda el tema central del libro a nivel del territorio nacional; otro capítulo se desarrolló en el sur, en el estado de Guerrero; cuatro fueron focalizados en el sureste, en los estados de Chiapas y de Campeche; tres en el estado de Veracruz (el capítulo VI.3, además, con muestreo en los estados de Quintana Roo, de Chiapas y de San Luis Potosí), al oriente de México, en el Golfo de México; cuatro capítulos se realizaron en el altiplano central mexicano, en los estados de Tlaxcala, Morelos, y Estado de México; y tres en el occidente, en los estados de Colima y de Jalisco.

Los quince capítulos que integran el libro abarcan una matriz geográfica amplia, dado que va desde la costa del Atlántico hasta la del Pacífico, atravesando por zonas montañosas, de ladera, de valles y el altiplano mexicano; con climas cálidos y templados, húmedos y subhúmedos, y semiáridos; diversidad de flora y de fauna; grupos étnicos

originarios y mestizos, así como tipos de tenencia de la tierra, por lo que prevalecen desigualdades de condiciones socioeconómicas, culturales, educativas y nivel de desarrollo.

Tanto los diferentes factores ya señalados, como los temas específicos en los 15 capítulos, condujeron a conclusiones de suma importancia en la temática abordada. A continuación, se presentan de forma sintética los hallazgos, de acuerdo con las seis secciones en que los capítulos están agrupados.

La primera sección del libro, “Agroforestería en la adaptación y mitigación”, incluye sólo el capítulo I.1 y aborda “La función de la agroforestería en la mitigación y adaptación al cambio climático en México”. Este capítulo hace una reflexión global del potencial que tienen los sistemas agroforestales para la mitigación y adaptación al cambio climático en la República mexicana. Evidencia que los impactos del cambio climático van en aumento y se muestran algunas estrategias de adaptación que deben fomentarse frente al cambio climático, particularmente en los sistemas agroforestales, en los suelos y los productores que los manejan. Se sugiere que la producción de alimentos bajo algún sistema agroforestal mejora la resiliencia de las familias, asimismo protege la biodiversidad y los nutrimentos del suelo, lo cual contribuye a mitigar el cambio climático en tanto se conserve el carbono orgánico del mismo. Por ello, es imperante incluirlos en las agendas políticas y de desarrollo regional.

La segunda sección del libro acerca de “Adaptación-tecnologías agrosilvopastoriles” está integrada por los capítulos II.1, II.2, II.3 y II.4. El capítulo II.1 analiza la “Adaptabilidad de ganaderos de Chiapas frente a cambios socioambientales: perspectivas para la implementación de tecnologías agroforestales”. En ellos se refiere que los sistemas agrosilvopastoriles tradicionales de ganado bovino de doble propósito del noroeste de Chiapas (municipios de Tecpatán y Mezcalapa) muestran cambios socioambientales manifestados en perturbaciones. Las respuestas de los ganaderos frente a cambios socioambientales son tipificadas como mecanismos de reacción (respuestas efectivas en el corto plazo, que no reducen la vulnerabilidad del sistema en el largo plazo), y como estrategias de adaptación (cambios en las prácticas que reducen la vulnerabilidad frente a perturbaciones presentes y futuras, y por lo tanto son efectivas en el largo plazo). La interacción entre perturbaciones y respuestas permitió diferenciar dos trayectorias: la ganadería convencional y la ganadería orgánica. El análisis de la base de recursos o capitales de ambos grupos refleja mejores características en los ganaderos orgánicos, lo cual indica que tienen mayor adaptabilidad, en comparación con los ganaderos convencionales. También se revela que los sistemas agrosilvopastoriles facilitan el proceso de transición de la ganadería convencional hacia la ganadería orgánica, y por lo tanto promueven la adaptabilidad y la resiliencia de los sistemas ganaderos. Para fomentar su implementación se sugiere fortalecer los capitales humano y social, así como la corresponsabilidad de todos los actores involucrados.

El capítulo II.2 referente a “Módulos integrales (MI) con sistemas agrosilvopastoriles y especies ganaderas menores como estrategia de adaptación al cambio climático”, arriba a que una vía de solución de la vulnerabilidad de las personas en situación de pobreza alimentaria y con acceso a tierra, en Campeche, pueden ser los MI para obtener alimentos de calidad mediante el uso eficiente de los recursos locales disponibles, los cuales tienen un bajo impacto ambiental y son capaces de adaptarse y de resistir los efectos del

cambio climático. Dichos MI son una alternativa sustentable ante la producción de alimentos convencionales, debido a que emplean conocimiento local y técnicas agroecológicas con interacciones positivas entre los componentes de los sistemas productivos. Los MI de conejos y de codornices vinculados mediante arreglos agrosilvopastoriles con especies arbóreas y arbustivas locales e introducidas, y con organismos del suelo, muestran aceptable funcionalidad, productividad y estabilidad, dado que dichas especies silvestres, producidas en los MI, son adquiridas y consumidas por los pobladores, cuando en la actualidad son obtenidas de forma tradicional en condiciones silvestres, mediante la cacería.

En el capítulo II.3 titulado “El meteplante asociado con ganado y árboles tecnología-agrosilvopastoril para mejorar la lechería familiar”, en la comunidad La Reforma, municipio de Españita en el estado de Tlaxcala, ubicado en el altiplano central mexicano, se argumenta que es un modo de gestión tradicional del agroecosistema. El meteplante tiene como eje principal el maguey que se intercala con especies perennes, como frutales y forestales, junto con cultivos del sistema milpa o forrajeras anuales y cereales, además de plantas silvestres, donde sus componentes bióticos y abióticos interactúan en función de elementos socioculturales, que dan como resultado una amplia variedad de usos. Con un enfoque agroforestal, el meteplante constituye un sistema agrosilvopastoril que mejora la producción de leche mediante el uso racional de sus componentes, el bienestar animal, la implementación de innovaciones biotecnológicas y la participación de los productores, lo que favorece la adaptación y mitigación al cambio climático. Genera múltiples productos y beneficios, está estrechamente ligado a la lechería familiar a través del corte y del acarreo de forrajes del metepantle a los establos para la alimentación del ganado lechero familiar, con un enfoque de economía circular, pues el estiércol es utilizado para mejorar la fertilidad del suelo. Se llega a que las interacciones biológicas positivas de la alta agrodiversidad del metepantle permite mayor adaptabilidad y resiliencia para enfrentar los embates del cambio climático, no sólo para la alimentación del ganado lechero sino también para generar seguridad alimentaria de las familias productoras, ya que la mayoría de sus componentes son básicos para la gastronomía tradicional del altiplano mexicano.

El Capítulo II.4, referente a la “Transición de una producción de monocultivo a un sistema agrosilvopastoril con enfoque de economía circular” revela que actualmente la implementación de actividades agrícolas basadas en monocultivos y en procesos productivos que se enfocan a la economía lineal (ciclo: innovación tecnológica-extraer-producir-desechar) generan un gran impacto medioambiental. La alternativa basada en la introducción de un modelo de sistema agrosilvopastoril con enfoque de economía circular (ciclo de desarrollo continuo positivo que preserva e incrementa el capital natural, optimiza los rendimientos de los recursos al hacer circular siempre productos y al minimizar los riesgos del sistema, gestionando *stocks* finitos y flujos renovables), introducido en una unidad productiva de monocultivo como estrategia de adaptación, ubicada en Atlautla, Estado de México, evidencia que las actividades agrícolas mixtas y orgánicas disminuyeron el uso y dependencia de productos químicos. La presencia de aves de corral funcionó, además, como un elemento de control biológico de insectos y de ácaros en la unidad productiva. Las actividades forestales aportaron productos para el autoabasto de la unidad productiva, venta en los mercados locales y produjeron sombra y bienestar a los animales. El subsistema piscícola permitió captar agua de lluvia, utilizarla para riego y

produjo proteína animal con alto contenido proteínico. Dichas tecnologías favorecieron la adaptación del sistema agrosilvopastoril al cambio climático. Se requiere evaluar el efecto económico en su conjunto y las cargas ambientales de todo el sistema agrosilvopastoril, ya que el presente trabajo aportó evidencia económica del subsistema ovino como parte integral del sistema agrosilvopastoril.

La tercera sección del libro trata sobre adaptación y tecnologías silvopastoriles. El capítulo III.1, denominado “Elementos para el diseño de paisajes silvopastoriles sustentables en el trópico seco”, se basa en los estudios realizados en una zona de bosque tropical seco con manejo silvopastoril tradicional en la costa centro de Jalisco. Se alude que ante el escenario actual de cambio climático y la creciente demanda de carne, el fomento de tecnologías silvopastoriles en el sector ganadero favorece la adaptación y mitigación al cambio climático y la seguridad alimentaria. En este sentido, los paisajes silvopastoriles de cada región tienen funciones trascendentales, con limitaciones, con oportunidades y con potencialidades socioambientales que requieren ser comprendidas para atenderlas. En el trópico, la abundancia y la riqueza de especies leñosas forrajeras son recursos potenciales para la producción pecuaria mediante el enriquecimiento de pastizales y el aprovechamiento sustentable de áreas boscosas multifuncionales. Ello sugiere que mediante el diseño adecuado de paisajes silvopastoriles es posible desarrollar las bases de una ganadería tropical sustentable que garantice el bienestar social, el económico y el ambiental en las comunidades rurales.

El capítulo III.2, titulado “Tecnologías agroforestales (TAF) en ganadería: estrategia de adaptación al cambio climático en territorios costeros”, revela las experiencias tecnológicas promovidas en la cuenca Coapa de la costa de Chiapas. En él se refiere que el fomento de sistemas silvopastoriles influyó en la sensibilización de los productores para conservar e incrementar diversas especies de árboles locales, adaptar y reforzar tecnologías agroforestales que algunos ganaderos, históricamente, ya tenían en sus potreros antes de iniciar el proyecto, tales como cercas vivas perimetrales y árboles de reserva en potreros. También contribuyó a promover el crecimiento de árboles dispersos en potreros y en cercos vivos interiores, y evitó la apertura de nuevas tierras al pastoreo a cielo abierto mediante el corte selectivo de árboles de reserva para proporcionar mayor paso de luz y estimular el crecimiento del pasto. La ubicación del predio en la cuenca (alta y baja) y el tipo de productor inciden en la diversidad de arreglos espaciales en los potreros y en la cobertura forestal. La mayor cobertura forestal se relacionó con la menor cantidad de ganado y con la menor superficie de potrero de la unidad de producción. El tipo de manejo, el fin productivo y el tipo de productor determinan el grado de adaptabilidad, así como el impacto ambiental en la ganadería. El uso de árboles en los potreros contribuye a diversificar la alimentación del ganado, de animales silvestres y de las personas. También suministra bienes y servicios de uso doméstico y aporta servicios agroecosistémicos, genera hábitat para la fauna silvestre, mejora el microclima, retiene tierra en zonas de ladera y reduce los impactos de los eventos meteorológicos.

En el capítulo III.3 se evalúa la “Hoja de *Ricinus communis* L., forraje no convencional de tipo proteínico-energético para el desarrollo de tecnologías silvopastoriles”. En éste se concluye que el desarrollo de tecnologías agro y silvopastoriles mediante la incorporación de *Ricinus communis*, comúnmente conocida como higuierilla, es una opción

poco explorada, pero con amplio potencial dadas sus características de adaptabilidad y de plasticidad a condiciones adversas, con un vigoroso desarrollo en su establecimiento, en Colima. Las características nutrimentales de la lámina de hoja de *Ricinus communis* (PC = 21.9 - 32.2%; EM = 2.61 - 2.80 Mcal EM/kg MS y DisMS = 93.2 a 97.0%,) permiten valorar este recurso forrajero como una estrategia para la adaptación al cambio climático en agroecosistemas ganaderos con ambientes adversos asociados a sequía y sin problemas de toxicidad cuando las hojas son consumidas por rumiantes. La exploración de diferentes opciones de sistemas agroforestales (silvopastoriles y agrosilvopastoriles), incorporando higuera, permite nuevas oportunidades y potencialidades para productores en condiciones adversas para la alimentación del ganado, lo que favorece a esquemas de agricultura familiar.

La cuarta sección del libro hace referencia a mitigación-tecnologías silvopastoriles. El capítulo IV.1 indaga sobre el “Uso de vainas de fabáceas arbóreas tropicales en la mitigación de metano entérico”. Se deriva que actualmente, en el estado de Guerrero y otras regiones de México, existen sistemas silvopastoriles con arreglos agronómicos que incluyen especies de fabáceas arbóreas, debido a la alta calidad nutritiva del follaje, propicia para la alimentación de rumiantes. La presencia de saponinas, taninos, flavonoides y aceites esenciales (terpenoides y enilpropanoides) en las vainas de diferentes especies de fabáceas arbóreas tienen importante potencial para mitigar las emisiones de CH₄ entérico de los rumiantes, debido a sus propiedades anti-metanogénicas, por lo que contribuyen a mitigar el cambio climático. En las vainas de las fabáceas generalmente se identifican metabolitos secundarios que favorecen la síntesis de propionato y afectan la metanogénesis por competencia reducida del hidrógeno, mejoran la eficiencia energética y son tóxicos para los protozoarios ciliados, hospederos de arqueobacterias metanogénicas. El uso de vainas de fabácea arbóreas en la alimentación de rumiantes, requiere mayor estudio para conocer su potencial agroforestal y las posibilidades de incrementar la proporción del 25% en la dieta de rumiantes en el trópico. Igualmente, se requiere identificar todos los metabolitos secundarios presentes en las vainas de fabáceas que favorezcan la manipulación y la positiva respuesta metabólica.

En el capítulo IV.2 se revisan los beneficios de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit en sistemas silvopastoriles utilizado por ganado vacuno y su efecto en la emisión del óxido nitroso. Los sistemas silvopastoriles con *Leucaena leucocephala* y bovinos en pastoreo permiten mayor acumulación de carbono orgánico en el suelo y mayor activación biológica que los sistemas extensivos, debido al rol trófico de la macrofauna edáfica. Los animales mejoran la producción de carne, al ofrecer una dieta diversa y rica en nutrientes principalmente proteína. También existen fuentes de emisión de N₂O, debido a la deposición de nitrógeno al suelo en forma de excretas (heces y orina), por procesos de nitrificación y desnitrificación. Esto se traduce en pérdida de N como N₂O. Al aumentar la carga animal en los SSPi, con más de 10 000 plantas/ha., los flujos de emisión de N₂O, por heces y orina se incrementan. Existen estrategias de manejo de los componentes de los sistemas silvopastoriles en pastoreo que permiten mitigar la emisión de N₂O, como rotación de áreas de pastoreo, reducción de las horas de pastoreo para controlar el tiempo de consumo animal en praderas con alta densidad de leguminosas arbóreas (>10 000 plantas/ha), arreglos agronómicos de bancos de proteína y el uso de inhibidores de los

procesos de producción de N₂O. Se requieren mediciones robustas de flujos de emisiones de N₂O en los diversos tipos de sistemas silvopastoriles con *Leucaena leucocephala* para crear inventarios regionales que coadyuven a desarrollar estrategias de mitigación *ad hoc*.

La quinta sección del libro sobre adaptación y mitigación-tecnologías agrosilvopastoriles, incluye solo el capítulo V.1 titulado “Tecnología agrosilvopastoril basada en cocotero *Cocos nucifera* L + *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit + *Cenchrus purpureus* Cuba 115 en pastoreo con bovinos”. Esta tecnología está orientada a la obtención de becerros y leche bovina en la costa de Colima, y es una estrategia de mitigación al cambio climático ya que fomenta alta densidad de la leguminosa arbórea *L. leucocephala*. Ello implica una reforestación productiva asociada al cocotero que convierte al agroecosistema como sumidero de carbono. La biodiversidad vegetal es un complejo componente que evita la degradación de pasturas y del suelo, favorece la macrofauna e incrementa la materia orgánica del suelo, así como la producción de leche del sistema bovino de doble propósito. La incorporación de la leguminosa herbácea *Canavalia ensiformis* se plantea como una alternativa para el control del insecto *R. palmarum*. Esta propuesta tecnológica debe comprenderse mejor para aumentar los beneficios socioeconómicos.

La sexta sección del libro se denomina “Adaptación y mitigación-tecnologías silvopastoriles” y abarca los capítulos VI.1, VI.2, VI.3 y VI.4. El capítulo VI.1, titulado “Una visión holística del sistema agroforestal cítricos-ovinos: posibilidades de adaptación y mitigación frente al cambio climático”, analiza de manera integral el funcionamiento de dicho sistema agroforestal-silvopastoril a escala de parcela y rebaño en sus dimensiones técnico-productivas y agroecológicas, en Veracruz. De éste se deriva que la interacción de ambos componentes principales, cítricos y ovinos, conducen a una producción diversificada y sustentable de alimentos de origen vegetal y animal, con objetivos multipropósito y multifuncionales, en secuencias espaciales y temporales, que confieren homeostasis al sistema integral, y lo hacen menos vulnerable al cambio climático. Los productos de un componente son entradas del otro componente, cuyo intercambio-flujo-interacción permite que el sistema permanezca pese al desorden que provocan las presiones externas. Es prioritario mantener la estructura y la función apropiada del sistema, maximizar las interacciones positivas y minimizar las negativas.

El capítulo VI.2 se orienta a divulgar “Experiencias del uso de tecnologías agroforestales en sistemas ganaderos de Chiapas, México, como estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático”. Aquí se analiza cómo el cambio climático afecta a los sistemas ganaderos del trópico como bucle de retroalimentación en el que la producción pecuaria contribuye al problema, sufre las consecuencias y también puede coadyuvar a mejorarlo. Se alude a que el uso de tecnologías agroforestales como árboles dispersos en potrero, en cercas vivas y en un sistema silvopastoril de pastura en callejones asociando los pastos *Cynodon plectostachyus* e *Hyparrhenia ruffa*, con *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia*, interactúan positivamente con el pastoreo y con la dieta, con las actividades asociadas al pastoreo y con la temperatura corporal del animal. También contribuyen de manera importante en la retención de carbono en planta y en suelo, así como en el mejoramiento y en manejo animal, lo que brinda oportunidades de mitigación y adaptación al cambio climático en los sistemas ganaderos. Las estrategias de

manejo del socioecosistema deberán basarse en un conocimiento profundo de los procesos naturales y en reconocer aquellas externalidades y otras limitantes que impiden su escalamiento.

El capítulo VI.3, titulado “Escarabajos estercoleros: adaptación y mitigación al cambio climático en sistemas agroforestales pecuarios”, se desarrolló principalmente en Veracruz, México (con muestreo en Quintana Roo, en Chiapas y en San Luis Potosí). En éste se sugiere que los escarabajos estercoleros (Coleoptera: Scarabaeinae) proporcionan servicios agroecosistémicos al ganadero, mediante la remoción y el enterramiento de estiércol, que se relaciona con la salud del suelo y con la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Para mantener la diversidad y la persistencia de estos insectos, así como sus funciones ecológicas, es importante favorecer la presencia de bosques y usos de la tierra arbolados (vegetación secundaria bajo pastoreo, sistemas silvopastoriles, cercos vivos) puesto que aumentan la conectividad y la heterogeneidad de los paisajes ganaderos. Una dieta del ganado que incluye el follaje de los árboles permite la desparasitación natural (los taninos en las hojas y en tallos inhiben la actividad de los principales parásitos internos de los rumiantes) y un decremento en el uso de desparasitantes como la ivermectina, que altera las capacidades locomotora y sensorial de los escarabajos. Se debe evitar, además, la quema y el uso indiscriminado de agroquímicos como los herbicidas, los insecticidas y los fertilizantes químicos. Los Scarabaeinae pueden ser utilizados para monitorear alteraciones en la diversidad biológica de un sitio, para calificar el impacto que tiene el cambio de la vegetación original a otros usos del suelo, entre ellos la calidad del ambiente edáfico. Tales cambios pueden ser usados como apoyo para la toma de decisiones, como las prácticas del uso de la tierra que deben ser evitadas o conservadas. Las tecnologías silvopastoriles son una estrategia integral de manejo que podría favorecer la adaptación y mitigación al cambio climático de los escarabajos del estiércol, reduciendo su vulnerabilidad, ya que mantienen la humedad del suelo y reducen las altas temperaturas ambientales en los potreros. Asimismo, albergan a muchos otros organismos y conservan condiciones que permiten una producción ganadera sustentable. El silvopastoreo genera, además, externalidades positivas para la sociedad, como la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático, al mitigar la emisión de gases de efecto invernadero mediante el secuestro de C en la vegetación y en el suelo.

El capítulo VI.4, denominado “Importancia de accesiones nativas de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit para la adaptación y mitigación al cambio climático”, refiere que en el territorio mexicano existe alta riqueza de accesiones de leucaena que pueden potenciar y favorece la implementación de sistemas silvopastoriles y agrosilvopastoriles resilientes de forma local. Estas tecnologías son instrumentos de adaptación y mitigación al cambio climático, sin necesidad de que los productores con recursos o escasos recursos económicos compren semillas en el mercado global. Se sugiere que existe una relación entre región agroclimatológica de establecimiento, tipo de suelo y tipo de accesión utilizada, que permite diferenciar las estrategias de manejo particulares desarrolladas. La selección, la promoción y el aprovechamiento de accesiones de leucaena nativas mediante agroecosistemas silvopastoriles y agrosilvopastoriles son alternativas viables que generan beneficios socioeconómicos para los productores. También, mejoran el paisaje

rural y el secuestro de carbono atmosférico; producen bajas emisiones de metano, resisten a las plagas y mitigan los efectos del cambio climático.

Es grato conocer el auge de las tecnologías agroforestales para la adaptación y mitigación al cambio climático que aborda cada capítulo de la presente obra, en diferentes rincones de la República mexicana. Éstos parten de la premisa concerniente a que la evolución sociocultural de la humanidad se logró adoptando estilos de vida con armonía socioambiental, para contar con poblaciones sanas, con fortaleza física, mental y espiritual.

Dichas tecnologías están orientadas a revertir la creciente presión sobre la tierra, el aire, el agua, y la biodiversidad, observados en la deforestación, reducción de la fertilidad, salinización, acidificación y erosión del suelo, desertificación, ruptura de ciclos hídricos y de nutrimentos, pérdida de biodiversidad, contaminación, emisiones mayores de gases con efecto invernadero, calentamiento global, cambio climático, aumento de la pobreza, marginación y hambre, así como brotes y diseminación de enfermedades emergentes y reemergentes en muchas regiones del planeta.

Este panorama indica la urgente necesidad de actuar por conciencia, por compromiso y por responsabilidad social en el cuidado de la salud de la alimentación, del ambiente, de la tierra y de la humanidad. Y debe traducirse en la definición de estrategias de intervención funcionales (de manejo) y estructurales (de gestión, toma de decisiones y de políticas institucionales) orientadas a proveer bienes y servicios, como el derecho a la atención primaria a la salud y el consumo de alimentos sanos, que no representan riesgos ni causan daños a la salud de los consumidores, la protección ambiental, los servicios agroecosistémicos, la producción limpia y la sustentabilidad.

El desarrollo de sistemas silvopastoriles y agrosilvopastoriles con capacidad de adaptación, resilientes, amigables con el ambiente, sustentables y sin riesgos ni daños a la salud de los consumidores es un reto vigente y apremiante para los diferentes actores sociales involucrados. Éste es el mensaje y la visión entusiasta que los editores y los autores del libro “Tecnologías agroforestales para la adaptación y mitigación al cambio climático. Opciones y perspectivas”, buscan transmitir al ofrecer información actualizada, y motivar a los lectores interesados a seguir trabajando con pasión en el tema.

Puesto que el tema que aborda este libro es prioritario por su escaso conocimiento, y porque la generación de información es dinámica y permanente, requiere que éste se difunda, se analice, se retroalimente y se enriquezca con nuevas aportaciones sistémicas, profundas y virtuosas.

JOSÉ NAHED TORAL
Investigador Titular “C”, Grupo de Agroecología.
Departamento de Agricultura, Sociedad y Ambiente.
El Colegio de la Frontera Sur.
Unidad San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México.

Autores

Adalberto Hernández López

Mexicano | Institución de adscripción: Facultad de Ciencias Agronómicas, Campus V, Universidad Autónoma de Chiapas | Maestro en ciencias | Línea de investigación: sistemas apiforestales.

Alejandro Ismael Monterroso Rivas

Mexicano | Institución de adscripción: Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo | Doctor en geografía | Línea de investigación: recursos naturales y cambio climático.

Alfredo Ramírez Hernández

Mexicano | Institución de adscripción: División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C. (IPICYT) | Doctor en ciencias | Línea de investigación: estrategias de alimentación para rumiantes. Diversidad taxonómica y funcional de insectos mediterráneos, neotropicales y de zonas áridas. Estudio de interacciones planta-insecto. Factores de origen antrópico que afectan la diversidad y su segregación espacial y temporal de insectos.

Alma Liz Vargas de la Mora

Mexicana | Institución de adscripción: El Colegio de la Frontera Sur; Ciencias de la sustentabilidad | Doctora en ciencias | Línea de investigación: planeación y gestión territorial participativa. Evaluación geográfica socioecológica del paisaje y cambio climático.

Bernardino Candelaria Martínez

Mexicano | Institución de adscripción: Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chiná | Doctor en ciencias | Línea de investigación: ganadería sustentable.

Carlos Ernesto Aguilar Jiménez

Mexicano | Institución de adscripción: Universidad Autónoma de Chiapas-Facultad de Ciencias Agronómicas. | Doctor en ciencias | Línea de investigación: indicadores de sostenibilidad.

Carlos Ernesto González Esquivel

Mexicano | Institución de adscripción: Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, UNAM | Doctor | Líneas de investigación: agroecología, evaluación de sustentabilidad, sistemas silvopastoriles.

Carlos Montes de Oca Sánchez

Mexicano | Institución de adscripción: Centro de Economía Social Julián Garcés A.C. | Ingeniería en Agrotecnología | Línea de investigación: biofertilizantes en sistemas agroforestales en altiplano mexicano.

Carolina Flota Bañuelos

Mexicana | Institución de adscripción: CONACYT/Colegio de Postgraduados, Campus Campeche | Doctora en ciencias | Línea de investigación: fauna silvestre y agroecosistemas.

Cesar Lara González

Mexicano | Institución de adscripción: Departamento técnico y de investigación de Laboratorio BIOZOO | M.C. | Línea de investigación: Bovinos, carne nutrición y reproducción.

Claudio Vite Cristóbal

Mexicano | Institución de adscripción: Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca | Doctor en ciencias | Línea de investigación: manejo reproductivo, genético y nutricional. Sistemas de producción agropecuarios del trópico.

Daniel Hernández Archundia

Mexicano | Institución de adscripción: Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo | Doctor en agricultura multifuncional para el desarrollo sostenible | Línea de investigación: Sistema agroforestal metepantle y transición agroecológica.

David Douterlungne

Belga | Institución de adscripción: CONACYT comisionado a la división de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT) | Doctorado | Línea de investigación: restauración ecológica – sucesión forestal - uso de recursos naturales.

Deb Raj Aryal

Nepalí | Institución de adscripción: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) - Universidad Autónoma de Chiapas | Doctor en ciencias | Línea de investigación: ciclo de carbono y servicios ecosistémicos.

Diana Ayala Montejo

Peruana | Institución de adscripción: Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo | Doctora en agricultura multifuncional para el desarrollo sostenible | Línea de investigación: sistemas agroforestales en zonas tropicales (cacao y café).

Diego Felipe Portela Díaz

Colombiano | Institución de adscripción: Universidad de la Costa | Doctor en ciencias | Línea de investigación: Materias primas no convencionales para la alimentación de rumiantes.

Eduardo Valdés Velarde

Mexicano | Institución de adscripción: Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo | Doctor en edafología | Línea de investigación: captura y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de café y cacao, así como en manglares.

Enrique Cortés Díaz

Mexicano | Institución de adscripción: Centro Regional Universitario del Anáhuac - Universidad Autónoma Chapingo | Doctor en ciencias | Línea de investigación: optimización del aporte forrajero a sistemas pecuarios. Sistemas silvopastoriles y de vida silvestre.

Eric Amaro Peralta

Mexicano | Institución de adscripción: Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario UAEM Amecameca | Pasante de la Licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia | Línea de investigación: manejo sustentable en la producción animal.

Felipe Barragán Torres

Mexicano | Institución de adscripción: CONACYT - Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT) | Doctor en ciencias | Línea de investigación: biodiversidad y bienestar humano. Caracterizar la biodiversidad (diferentes grupos taxonómicos y funcionales) de distintos ecosistemas y su análisis a través de escalas espaciales.

Francisca Avilés Nova

Mexicana | Institución de adscripción: Universidad Autónoma del Estado de México | Doctora en ciencias agropecuarias y recursos naturales | Línea de Investigación: desarrollo de estrategias de alimentación en rumiantes en sistemas silvopastoriles en el trópico seco. Cambio climático y dedición de la emisión del GEI óxido nitroso debido a la mancha de orina de bovinos en pastoreo.

Francisco Ernesto Martínez Castañeda

Mexicano | Institución de adscripción: Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales | Doctorado | Línea de investigación: socioeconomía y ambiente de la producción agropecuaria.

Francisco Guevara Hernández

Mexicano | Institución de adscripción: Facultad de Ciencias agronómicas, Universidad Autónoma De Chiapas | PhD | Línea de investigación: agroecosistemas tradicionales. Innovación agroambiental y extensionismo.

Francisco Javier Hernández Archundia

Mexicano | Institución de adscripción: Dirección General de Logística y Alimentación, SADER | Maestro en ciencias en agroforestería para el desarrollo sostenible | Línea de investigación: transición agroecológica en sistemas agroforestales.

José Manuel Palma • José Antonio Torres • Eduardo Valdés | Coordinadores

Francisco Javier Medina Jonapá

Mexicano | Institución de adscripción: Facultad de Ciencias Agronómicas, Campus V, Universidad Autónoma de Chiapas | Maestro en ciencias | Línea de investigación: sistemas silvopastoriles.

Francisco Javier Salazar Sperberg

Chileno | Institución de adscripción: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro regional de Investigaciones Remehue | Doctor of Phylosophy | Línea de investigación: manejo y utilización de residuos orgánicos animales. Impacto ambiental de sistemas de producción bovina. Pérdida de nutrientes en sistemas agropecuarios.

Gabriela Rodríguez Licea

Mexicana | Institución de adscripción: Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario UAEM Amecameca | Doctorado en ciencias en economía | Línea de investigación: desarrollo económico, competitividad e investigación de mercados del Sector Agropecuario.

Ingrid Abril Valdivieso Pérez

Mexicana | Institución de adscripción: El Colegio de la Frontera Sur | Doctora en ciencias | Línea de investigación: Ganadería ecológica. Cambio climático. Producción orgánica.

Jacqueline Zamora Beltrán

Mexicana | Institución de adscripción: Programa sembrando vida, Secretaría del Bienestar | M.C. | Línea de investigación: sistemas agroforestales.

Jerónimo Herrera Pérez

Mexicano | Institución de adscripción: Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia No. 2, Universidad Autónoma de Guerrero | Doctor en ciencias | Línea de investigación: nutrición de rumiantes.

Jorge Vargas Monter

Mexicano | Institución de adscripción: Ingeniería en Producción Animal. Universidad Politécnica de Francisco I Madero | Maestría en Ciencias en Estrategias para el Desarrollo Agrícola regional | Línea de investigación: sistemas silvopastoriles con base de morera.

José Antonio Torres Rivera

Mexicano | Institución de adscripción: Centro Regional Universitario Oriente (CRUO-UACH) | Maestro en ciencias | Línea de investigación: sistemas agroforestales con ganado ovino, caprino, bovino, gallinas y peces. Agroecología. Agricultura multifuncional y economía circular.

José Apolonio Venegas Venegas

Mexicano | Institución de adscripción: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) - Universidad Autónoma de Chiapas | Doctor en ciencias | Línea de investigación: economía ambiental.

José María Anguiano Cárdenas

Mexicano | Institución de adscripción: AGROTESO | Doctor en ciencias | Línea de investigación: agricultura regenerativa.

José Manuel Palma García

Mexicano | Institución de adscripción: Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Colima | Doctor en ciencias | Línea de investigación: Estrategias de alimentación para rumiantes. Sistemas silvopastoriles y agrosilvopastoriles en el trópico seco. Identificación, caracterización y aprovechamiento de recursos locales en la alimentación de rumiantes.

José Manuel Zorrilla Ríos

Mexicano | Institución de adscripción: Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara | PhD | Línea de investigación: modelos bio-económicos en eslabones de producción de carne. Identificación, caracterización y aprovechamiento de recursos locales en la alimentación de rumiantes.

José Nahed Toral

Mexicano | Institución de adscripción: El Colegio de la Frontera Sur | Doctor en ciencias | Línea de investigación: sistemas de producción ganadera. Sistemas silvopastoriles. Ganadería orgánica. Ganadería sustentable.

José Roberto Aguilar Jiménez

Mexicano | Institución de adscripción: Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Chiapas | Doctor en ciencias | Línea de investigación: sustentabilidad de los sistemas ganaderos. Sistemas silvopastoriles. Ganadería orgánica.

Juan Antonio Rivera Lorca

Mexicano | Institución de adscripción: Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Conkal | Doctor en ciencias | Línea de investigación: agroforestería.

Juan Guillermo Cruz Castillo

Mexicano | Institución de adscripción: Centro Regional Universitario Oriente, Universidad Autónoma Chapingo | PhD | Línea de investigación: frutales tropicales. Fisiología vegetal.

Julio Baca del Moral

Mexicano | Institución de adscripción: Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo | Doctor en desarrollo rural | Línea de investigación: políticas públicas en el campo mexicano.

José Manuel Palma • José Antonio Torres • Eduardo Valdés | Coordinadores

Leticia Citlaly López Teloxa

Mexicana | Institución de adscripción: Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo | Doctora en ciencias ambientales | Línea de investigación: mitigación del cambio climático.

Lucio Alberto Pat Fernández

Mexicano | Institución de adscripción: El Colegio de la Frontera Sur | Doctor en ciencias | Línea de investigación: estudios socioambientales y sistemas alimentarios.

Lucrecia Arellano Gámez

Mexicana | Institución de adscripción: Instituto de Ecología, A. C. | Doctora en ecología y desarrollo sustentable | Línea de investigación: ecología de escarabajos del estiércol, análisis de la diversidad de especies, funciones ecológicas y servicios ecosistémicos, ganadería sustentable y suelo.

Luis Antonio Ramírez Navarro

Mexicano | Institución de adscripción: Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara | M.C. | Línea de investigación: sistemas silvopastoriles. Producción de ovinos.

Luz María Macías Morales

Mexicana | Institución de adscripción: Facultad de Ciencias Agronómicas, Campus V, Universidad Autónoma de Chiapas | Ingeniero agrónomo | Línea de investigación: producción animal y ambiente.

Manuel Jesús Cach Pérez

Mexicano | Institución de adscripción: El Colegio de la Frontera Sur; CONACYT - Departamento de Agricultura Sociedad y Ambiente | Doctor en ciencias | Línea de investigación: ecofisiología vegetal y cambio climático.

Manuel Roberto Parra Vázquez

Mexicano | Institución de adscripción: El Colegio de la Frontera Sur | Doctor en economía | Línea de investigación: desarrollo rural en áreas campesinas con enfoque territorial y multinivel.

Marco Antonio Ayala Monter

Mexicano | Institución de adscripción: Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia No. 2, Universidad Autónoma de Guerrero | Doctor en ciencias | Línea de investigación: uso de probióticos, prebióticos y productos herbales en la alimentación animal.

María del Carmen Hernández Moreno

Mexicano | Institución de adscripción: Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.; Departamento de Estudios Sociales del Sistema Alimentario | Doctora en ciencias | Línea de investigación: sociología económica de los sistemas agroalimentarios.

Mariela Beatriz Reyes Sosa

Mexicana | Institución de adscripción: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) - Universidad Autónoma de Chiapas | Doctora en ciencias | Línea de investigación: biotecnología agroambiental.

Nicolás Torres Salado

Mexicano | Institución de adscripción: Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia No. 2, Universidad Autónoma de Guerrero | Doctor en ciencias | Línea de investigación: estrategias de alimentación en rumiantes.

Octavio A. Castelán Ortega

Mexicano | Institución de adscripción: Universidad Autónoma del Estado de México | Doctor | Línea de Investigación: manejo de recursos naturales en sistemas ganaderos y ganadería y cambio climático.

Paulino Sánchez Santillán

Mexicano | Institución de adscripción: Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia No. 2, Universidad Autónoma de Guerrero | Doctor en ciencias | Línea de investigación: optimización de la producción de rumiantes en ambientes tropicales.

Pedro Arturo Martínez Hernández

Mexicano | Institución de adscripción: Posgrado en Producción Animal, Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo | Ph. D. | Línea de investigación: optimización del aporte forrajero a sistemas pecuarios.

Ponciano Pérez Hernández

Mexicano | Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz | Doctor en ciencias | Línea de investigación: producción animal limpia, verde y ética. Sistemas agrosilvopastoriles. Cadenas y redes de valor.

René Pinto Ruiz

Mexicano | Institución de adscripción: Facultad de Ciencias Agronómicas, Campus V, Universidad Autónoma de Chiapas | Doctor en ciencias | Línea de investigación: producción animal y ambiente.

Romeo Josué Trujillo Vázquez

Mexicano | Institución de adscripción: El Colegio de la Frontera Sur | Maestro en ciencias | Línea de investigación: investigación acción participativa. Sistemas silvo y agrosilvopastoriles y extensionismo.

Rosa Alejandra del Viento Camacho

Mexicana | Institución de adscripción: Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Colima | M.C. | Línea de investigación: Producción animal.

José Manuel Palma • José Antonio Torres • Eduardo Valdés | Coordinadores

Rosa Sánchez Romero

Mexicana | Institución de adscripción: Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, UNAM | Doctora en ciencias | Línea de investigación: sistemas socioecológicos, agroecología y sistemas agrosilvopastoriles.

Sergio Alberto Curti Díaz

Mexicano | Institución de adscripción: Centro de Investigación Regional del Golfo Centro, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias | MC | Línea de investigación: cítricos.

Tania Guadalupe Osorio Montor

Mexicana | Institución de adscripción: Universidad Autónoma del Estado de México | Maestra en ciencias agropecuarias y recursos naturales | Línea de investigación: medición de la emisión del GEI óxido nitroso debido a la mancha de orina de bovinos.

Timothy O. Randhir

Indú | Institución de adscripción: Department of Environmental Conservation, University of Massachusetts | PhD | Línea de investigación: política y manejo del agua y de los recursos naturales.

Venancio Cuevas Reyes

Mexicano | Institución de adscripción: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuaria | Doctor en problemas económico-agroindustriales | Línea de investigación: valorización de sostenibilidad en sistemas agroforestales.

Vera Camacho Valdez

Mexicana | Institución de adscripción: El Colegio de la Frontera Sur; CONACYT - Departamento de Conservación de la Biodiversidad | Doctora en ciencias | Línea de investigación: servicios ecosistémicos, cambio de uso de suelo y análisis espacial.

Victor Daniel Cuervo Osorio

Mexicano | Institución de adscripción: Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chiná | Doctor en ciencias | Línea de investigación: agroecosistemas tropicales.

Wilberth Chan Cupul

Mexicano | Institución de adscripción: Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Colima | Doctor en ciencias | Línea de investigación: control biológico microbiano.

Tecnologías agroforestales para la adaptación y mitigación al cambio climático. Opciones y perspectivas, coordinado por José Manuel Palma García, José Antonio Torres Rivera y Eduardo Valdés Velarde, fue editado en la Dirección General de Publicaciones de la Universidad de Colima, avenida Universidad 333, Colima, Colima, México, www.ucol.mx. La edición digital se terminó en septiembre de 2022. En la composición tipográfica se utilizó la familia Arial. El tamaño del libro es de 28 cm de alto por 21.5 cm de ancho. Programa Editorial: Eréndira Cortés Ventura. Gestión administrativa: Inés Sandoval Venegas Diseño de interiores: José Augusto Estrella. Diseño de portada: Guillermo Campanur. Editor responsable: José Augusto Estrella.

El trabajo colectivo es el sello que hemos impuesto en la publicación de los últimos tres libros que coordinamos y en esta cuarta propuesta no puede ser la excepción. Además, por el tema elegido que combina las tecnologías de tipo agroforestal como herramienta para enfrentar el cambio climático, en México, resulta de vital importancia mantener ese enfoque. Esto permitió que participaran 66 autores adscritos a 19 instituciones de diferentes regiones o estados del territorio mexicano. El enfoque desarrollado implicó la propuesta de tecnologías silvopastoriles o agrosilvopastoriles que evidenciaran mecanismos de adaptación, mitigación o ambas opciones para enfrentar el cambio climático. Al respecto, el primer capítulo es introductorio para entender a la agroforestería y su aportación a la adaptación y mitigación al cambio climático, en México. El resto de los capítulos se dividen de la siguiente manera: siete sobre adaptación, en donde cuatro son de tipo agrosilvopastoriles y tres silvopastoril; en relación a la mitigación sólo se presentaron dos que corresponden a tecnologías silvopastoriles y, finalmente, con la combinación de adaptación y mitigación se lograron conjuntar cinco tecnologías, una de tipo agrosilvopastoril y cuatro silvopastoril. Por lo tanto, este libro es una muestra de lo que existe en México sobre el tema y esperamos que sirva de incentivo para que otros colegas e instituciones aborden este tipo de propuesta y muestren sus aportes en tecnologías agroforestales.



UNIVERSIDAD
DE COLIMA



Universidad Autónoma Chapingo