



Elementos para Políticas Públicas

Volumen 4 • Número 1 • enero-abril de 2020

Ciclo del Carbono y sus Interacciones

Ecosistemas Acuáticos
Epicontinentales

Ganadería

Bioenergía

Ambientes Ribereños

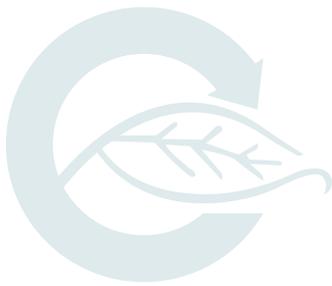
Dinámica del Uso del
Suelo y Vegetación



PMC

Programa Mexicano del Carbono

RED TEMÁTICA DEL **CONACYT**



Elementos para **Políticas Públicas**

Volumen 4 • Número 1 • Enero - Abril de 2020

Ciclo del Carbono y sus Interacciones



Programa Mexicano del Carbono

RED TEMÁTICA DEL **CONACYT**

ELEMENTOS PARA POLÍTICAS PÚBLICAS. Volumen 4, No. 1, enero - abril de 2020. Es una publicación cuatrimestral editada por el Programa Mexicano del Carbono, A.C. (PMC), Calle Chiconautla No. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56225 Texcoco, Estado de México, México. Tel. +52 (595) 951•2182, www.pmc carbono.org, coordinacion_general@pmc carbono.org. Editor responsable: Alma S. Velázquez Rodríguez. RESERVAS DE DERECHOS AL USO EXCLUSIVO No. 04-2015-120910081700-203, ISSN 2448-5578. Ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número: Alma S. Velázquez Rodríguez, Calle Chiconautla No. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56225 Texcoco, Estado de México, México, fecha de última modificación, febrero de 2020.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura de los editores de la publicación.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Programa Mexicano del Carbono, A.C.



Elementos para **Políticas Públicas**

Comité Editorial

Dra. Alma Velázquez Rodríguez

EDITORA EN JEFE

Dr. Fernando Paz Pellat

CO-EDITOR

Ing. Marlén Rojo Martínez

Pas. de Biol. Mónica E. Muñoz Albiter

EDITOR DE ESTILO

C.G. Oscar Velázquez Rodríguez

EDITOR DE MAQUETACIÓN

Coordinación Editorial

Alma Velázquez

COORDINADOR DEL PROCESO DE ARBITRAJE

Oscar Velázquez

COORDINADOR DE DISEÑO

Antoine Libert

CORRECCIÓN DE TEXTOS EN INGLÉS

Cristopher Escalera

WEB MASTER Y SOPORTE TÉCNICO

Consejo Editorial

Dr. Ben de Jong

El Colegio de la Frontera Sur, México.

Dr. Felipe García Oliva

Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Dra. Georgina C. Sandoval Fabián

Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño
del Estado de Jalisco, A.C., México.

Dr. Guillermo Jiménez Ferrer

El Colegio de la Frontera Sur, México.

Dr. J. Martín Hernández Ayón

Universidad Autónoma de Baja California, México.

Dr. Jaime Garatuza Payán

Instituto Tecnológico de Sonora, México.

Dr. Jorge D. Etchevers Barra

Colegio de Postgraduados, México.

Dr. Jorge Herrera Silveira

Instituto Politécnico Nacional, México.

Dra. Leticia Merino Pérez

Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Dra. Mariela Fuentes Ponce

Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Consejo Editorial

Dr. Mario G. Manzano Camarillo

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México.

Dr. Omar R. Masera Cerutti

Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Dr. Oscar L. Briones Villarreal

Instituto de Ecología, A.C., México.

Dr. Ramón Sosa Ávalos

Universidad de Colima, México.

Dr. Tulio Arredondo Moreno

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., México.

Dr. Christian Prat

Institut de Recherche pour le Développement, Francia.

Dr. Juan F. Gallardo Lancho

Consejo Superior de Investigación Científica, España.

Dr. Rodrigo Vargas

University of Delaware, U.S.A.

Dr. Werner Kurz

Canadian Forest Service, Canadá.

Índice de Autores

Alma S. Velázquez Rodríguez

Facultad de Ciencias,
Universidad Autónoma del Estado de México.
Toluca, Estado de México, México.

Ben de Jong

El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Campeche
Campeche, Campeche, México.

Eloísa A. Guerra Hernández

Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal,
Facultad de Estudios Superiores Zaragoza,
Universidad Nacional Autónoma de México.
Iztapalapa, Ciudad de México, México.

Enrique Kato

CIATEC. Medio Ambiente y Biotecnología.
León, Guanajuato, México.

Epigmenio Castillo Gallegos

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Nacional Autónoma de México.
Ciudad de México, México.

Ermias Kebreab

Department of Animal Science,
University of California,
Davis, CA 95616, USA.

Fernando Paz Pellat

GRENASER, Colegio de Postgraduados.
Montecillo, Estado de México, México.

Gerardo Cruz Flores

Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal,
Facultad de Estudios Superiores Zaragoza,
Universidad Nacional Autónoma de México.
Iztapalapa, Ciudad de México, México.

Índice de Autores

Inyasid Santiago Aguilar

Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal,
Facultad de Estudios Superiores Zaragoza,
Universidad Nacional Autónoma de México.
Iztapalapa, Ciudad de México, México.

Javier Alcocer

Grupo de Investigación en Limnología Tropical,
Facultad de Estudios Superiores Iztacala,
Universidad Nacional Autónoma de México.
Tlalnepantla, Estado de México, México.

Jorge D. Etchevers

Programa de Edafología,
Colegio de Postgraduados.
Montecillo, Estado de México, México.

Jorge Herrera

Laboratorio de Producción Primaria,
CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida.
Mérida, Yucatán, México.

Juan Carlos Ku Vera

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán.
Mérida, Yucatán, México.

Luis A. Oseguera

Grupo de Investigación en Limnología Tropical,
Facultad de Estudios Superiores Iztacala,
Universidad Nacional Autónoma de México.
Tlalnepantla, Estado de México, México.

Ma. Isabel Marín

Programa Mexicano del Carbono.
Texcoco, Estado de México, México.

Índice de Autores

Manuel González Ronquillo

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma del Estado de México.
Toluca, Estado de México, México.

María Fernanda Vázquez Carrillo

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Nacional Autónoma de México.
Ciudad de México, México.

Mariana Vargas

Programa de Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología,
Universidad Nacional Autónoma de México.
Ciudad de México, México.

Martín A. Bolaños González

Programa de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados.
Montecillo, Estado de México, México.

Octavio Alonso Castelán Ortega

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma del Estado de México.
Toluca, Estado de México, México.

Omar Masera

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

René David Martínez Bravo

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

Editorial

En el año 2019, el Programa Mexicano del Carbono (PMC) publicó el Primer Reporte del Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde, en el que se desarrollaron capítulos del estado del conocimiento de las áreas temáticas del Comité Científico: Ecosistemas marinos, Ecosistemas costeros, Ecosistemas acuáticos terrestres, Ecosistemas terrestres, Sistemas agropecuarios, Atmósfera, Bioenergía y Dimensión social. Dentro de cada área temática hay subáreas, las cuales corresponden con los capítulos del reporte.

En seguimiento a la publicación del primer reporte, Elementos para Políticas Públicas da a conocer artículos relacionados con propuestas de políticas públicas relacionadas con cada uno de los capítulos del reporte, con la intención de desarrollar primeras aproximaciones a acciones futuras requeridas, planteadas en función del diagnóstico realizado y que orienten desarrollos a corto plazo, para tomar decisiones con bases científicas.

En este primer número se abordan los subtemas: Ecosistemas Acuáticos Epicontinentales, Ganadería, Bioenergía, Ambientes Ribereños y Dinámica del Usos del Suelo y Vegetación. Los planteamientos en los artículos definen una hoja de ruta para desarrollos de corto y medio plazo, hacia el objetivo de conocimiento informado para la toma de decisiones y construcción del andamiaje de programas y políticas públicas temáticas.

Contenido

Carbono en ecosistemas acuáticos epicontinentales: una visión para el desarrollo de políticas públicas <i>Javier Alcocer, Mariana Vargas, Enrique Kato y Luis A. Oseguera</i>	1
Emisiones de metano por fermentación entérica de la ganadería bovina de México: la importancia de contar con inventarios nacionales precisos y de estrategias viables de mitigación <i>María Fernanda Vázquez Carrillo, Juan Carlos Ku Vera, Manuel González Ronquillo, Epigmenio Castillo Gallegos, Ermias Kebreab, Octavio Alonso Castelán Ortega.</i>	13
Perspectivas de disminución de emisiones de carbono en México por el uso de la bioenergía: panorama actual <i>René David Martínez Bravo y Omar Masera</i>	27
Carbono orgánico en ecosistemas ribereños y manejo sustentable en la Reserva de la Biósfera los Volcanes <i>Gerardo Cruz Flores, Eloísa A. Guerra Hernández e Inyasid Santiago Aguilar</i>	43
La urgente necesidad de México de contar con datos de actividad a escala apropiada para el sector agricultura, forestería y otros usos del suelo <i>Fernando Paz, Ma. Isabel Marín, Martín Bolaños González, Jorge D. Etchevers, Ben de Jong, Jorge Herrera y Alma S. Velázquez Rodríguez</i>	61

CARBONO EN ECOSISTEMAS ACUÁTICOS EPICONTINENTALES: UNA VISIÓN PARA EL DESARROLLO DE POLÍTICAS PÚBLICAS

CARBON IN EPICONTINENTAL AQUATIC ECOSYSTEMS: A VISION FOR THE DEVELOPMENT OF PUBLIC POLICIES

Javier Alcocer^{1†}, Mariana Vargas², Enrique Kato³ y Luis A. Oseguera¹

¹Grupo de Investigación en Limnología Tropical, FES Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. De los Barrios 1, Los Reyes Iztacala, CP 54090, Tlalnepantla, Estado de México

²Programa de Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Delegación Coyoacán, CP 04510, Ciudad de México, México

³CIATEC. Medio Ambiente y Biotecnología. Omega 201. Col. Industrial Delta, C.P. 37545, León, Guanajuato, México.

†Autor de correspondencia: jalcocer@unam.mx

RESUMEN

Hasta hace poco más de diez años, el papel de los cuerpos acuáticos epicontinentales en el ciclo global del carbono (C) era considerado poco importante. Sin embargo, se ha demostrado que éstos desempeñan un papel significativo en el ciclo global del C y por ende en el fenómeno de cambio climático. Los cuerpos acuáticos epicontinentales mexicanos proveen importantes servicios de regulación, tales como la modulación del clima, el ciclo hidrológico y el secuestro de C. Estos sistemas pueden funcionar como factores de secuestro o sumideros de C al incorporar dióxido de C (CO₂) atmosférico, pero, asimismo, pueden funcionar como fuentes o emisores de CO₂ y otros gases activos en el efecto de invernadero. Las estimaciones de los flujos de C en sistemas acuáticos epicontinentales son vitales para comprender el ciclo global del C y con ello realizar proyecciones a futuro de los posibles cambios climáticos que la humanidad enfrentará. Para alcanzar la precisión necesaria para sustentar la toma de decisiones y la intercomparabilidad de resultados en los cuerpos de agua estudiados por distintos grupos de investigación, es indispensable la estandarización de métodos. El uso y principalmente el mal uso de los cuerpos acuáticos epicontinentales ha conducido a su deterioro, en su mayoría por las crecientes actividades humanas, lo cual evidencia la impetuosa necesidad de manejarlos correctamente con el fin de poder garantizar su uso sostenible. El aprovechamiento sostenible de estos valiosos recursos acuáticos garantizaría seguir obteniendo la gran variedad de bienes y servicios que proporcionan en generaciones futuras. El objetivo anterior, la conservación de los cuerpos acuáticos epicontinentales debe ser entendido como una prioridad nacional y reconocer que éstos constituyen el recurso acuático necesario para el uso doméstico, agrícola, pecuario e industrial del país, por lo que se presenta una visión del estado actual del conocimiento que se tiene sobre su papel en el ciclo del C en México, los vacíos y omisiones en el conocimiento, ante la urgencia de diseñar políticas precisas y orientadas a establecer las prioridades para su conservación y restauración con el fin de garantizar el desarrollo sostenible del país.

Palabras Clave: ciclo del carbono; secuestro de carbono; cambio global; GEI; servicios ambientales.

ABSTRACT

Until just over ten years ago, the role of epicontinental aquatic bodies in the global cycle of carbon (C) was considered unimportant. However, it has been shown that they play a significant role in the global C cycle, and therefore, in climate change. The Mexican epicontinental water bodies provide important regulatory services, such as C sequestration, and climate and hydrological cycle modulation. These aquatic systems can function as C

sequestration factors or sinks by incorporating atmospheric C dioxide (CO₂), but they can also function as sources or emitters of CO₂ and other active greenhouse gases. Estimates of C fluxes in epicontinental aquatic systems are vital to understanding the global C cycle and thus making future projections of the possible climate changes that humanity could face. Methodological standardization is essential to achieve the precision necessary to support decision-making, and the intercomparison of the water bodies studied by different research groups. The use, and mostly misuse, of epicontinental aquatic bodies has led to their deterioration, which shows the impetuous need to handle them correctly to guarantee their sustainability. The sustainable use of these valuable aquatic resources would guarantee the future use of the great variety of environmental goods and services they provide. The conservation of epicontinental aquatic bodies should be understood as a national priority. Likewise, it is compulsory recognizing these water bodies constitute the essential aquatic resources for domestic, agricultural, livestock and industrial use in the country. Therefore, this paper presents a vision of the current status of knowledge of the epicontinental aquatic ecosystems on the C cycle in Mexico, their gaps and omissions, given the urgency of designing precise policies aimed to establish conservation and restoration priorities to guarantee the sustainable development of the country.

Index words: carbon cycle; carbon sequestration; global change; GHG; environmental services.

INTRODUCCIÓN

La concentración de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), ha aumentado en la atmósfera rápidamente desde el comienzo de la revolución industrial. Dicho aumento ha sido generado por diversas actividades antrópicas como la utilización de combustibles fósiles, la deforestación y los cambios en el uso de suelo, entre muchas otras. Ello ha derivado en planes y acciones tendientes a, en esencia, mitigar las emisiones y/o adaptarse a los cambios climáticos que puedan generar.

Hasta hace poco más de una década, los ecosistemas acuáticos epicontinentales no eran considerados como elementos relevantes en el ciclo global del carbono (C) (Cramer *et al.*, 2001); se pensaba que éstos eran tan sólo medios “inertes” de transporte entre los sistemas terrestre (cuena de drenaje) y oceánico (Aufdenkampe *et al.*, 2011). Sin embargo, Cole *et al.* (2007) mostraron que estos sistemas reciben anualmente, a partir de la suma de los aportes naturales y de las fuentes antropogénicas, aproximadamente 1.9 Pg C año⁻¹ de los cuales ~ 0.2 Pg C año⁻¹ se depositan y atrapan en los sedimentos acuáticos, al menos 0.8 Pg C año⁻¹ regresan a la atmósfera y 0.9 Pg C año⁻¹ llega a los océanos. Si se compara este balance con los ~ 5.0 Pg C año⁻¹ que capturan los bosques a nivel global (CIFOR, 2009), es claro que los sistemas acuáticos epicontinentales, a pesar de que ocupan una pequeña fracción de la superficie de

la Tierra, desempeñan un papel importante en el ciclo global del C y en la modulación del cambio climático (Dean y Gorham, 1998; Cole *et al.*, 2007; Battin *et al.*, 2008). Esta información ha llevado a un interés creciente por utilizar los ecosistemas acuáticos epicontinentales como indicadores del cambio climático, dado que los cambios ecológicos y biogeoquímicos acaecidos en ellos pueden reflejar patrones en escalas mayores (Williamson *et al.*, 2008).

En todos los trabajos realizados con anterioridad se ha enfatizado la gran incertidumbre asociada con los cálculos globales de emisiones y captura de C a nivel mundial, la cual deriva de la falta de datos y mediciones confiables (Raymond *et al.*, 2013; Wehrli, 2013; Ward *et al.*, 2017). El conocimiento de las concentraciones y los patrones espacio-temporales del flujo de C es esencial para evaluar el balance mundial, pero aun así no se conocen bien los efectos del cambio climático global ni la intensificación de los efectos antropogénicos sobre las estimaciones del antes mencionado flujo de C (Raymond *et al.*, 2008).

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo es exponer una visión general sobre el papel que juegan los cuerpos acuáticos epicontinentales en el ciclo del C en México, en un lenguaje apropiado para ser comunicada a los tomadores de decisiones y el público en general. Con base en esta visión se plantean los vacíos y omisiones en el conocimiento, así como los requerimientos urgentes para diseñar políticas públicas precisas y orientadas a establecer las prioridades para

su conservación y restauración, con el fin de garantizar el desarrollo sostenible del país.

México posee aguas epicontinentales relativamente limitadas en extensión y volumen, pues constituyen únicamente el 0.1% del total de las reservas del mundo. Aunado a lo anterior, la elevada diversidad climática y fisiográfica en México ha dado por resultado una distribución inestable y heterogénea del recurso acuático epicontinental (CONAGUA, 2018). Nuestro país recibe cada año aproximadamente 1,450 km³ de agua en forma de precipitación pluvial. Se estima que, de ese volumen cerca del 70% se evapo-transpira y regresa a la atmósfera, el 25% escurre por los ríos y arroyos de una red hidrográfica con aproximadamente 630,000 km de longitud y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie territorial continental del país, y el 5% restante se infiltra y recarga los acuíferos (CONAGUA, 2018). Por esta razón es pertinente recalcar que el volumen de agua almacenado en los ecosistemas lénticos y lóticos del país es relativamente pequeño si se contrasta con el volumen utilizado sólo para el abastecimiento público nacional.

En el territorio nacional, la calidad del agua se monitorea sistemáticamente desde 1973 a través de la Red Nacional de Monitoreo (RNMCA) de la CONAGUA. De ahí se conoce que uno de los principales retos a enfrentar actualmente es la eutrofización de los cuerpos acuáticos. El término proviene del griego *eutrofia*, que significa “bien nutrido” y consiste en el

enriquecimiento del agua con nutrientes, especialmente compuestos de nitrógeno y fósforo, sedimentos y materia orgánica. Lo anterior provoca un crecimiento acelerado de la biomasa algal (llamados florecimientos) y produce una perturbación indeseable en el equilibrio del ecosistema con el consecuente deterioro de su calidad y potenciales de uso (Farley, 2012).

De los cuerpos de agua epicontinentales mexicanos para los que se cuenta con información acerca de la dinámica del C, el 37.7% son hipertróficos y eutróficos, el 19.5% son mesotróficos y finalmente un 23.4% son oligotróficos y ultraoligotróficos, lo cual no necesariamente refleja el balance trófico de los cuerpos acuáticos epicontinentales a nivel nacional (Fig. 1). Actualmente, no existe un inventario nacional del estado trófico de todos los cuerpos acuáticos epicontinentales, por lo que es imposible conocer si estos porcentajes coinciden con los datos publicados en estudios científicos. La mayoría de estos cuerpos acuáticos epicontinentales se localizan en el centro de México, la franja más desarrollada urbana e industrialmente y, por ende, más contaminada, por lo que son eutróficos o hipertróficos (Alcocer, 2019). En el extremo opuesto, los cuerpos acuáticos ultraoligotróficos se ubican en regiones remotas, relativamente alejadas de la influencia humana directa; por ejemplo, dos de ellos están en el cráter del volcán Nevado de Toluca a una altura de más de 4,000 m s.n.m. (Alcocer *et al.*, 2004).

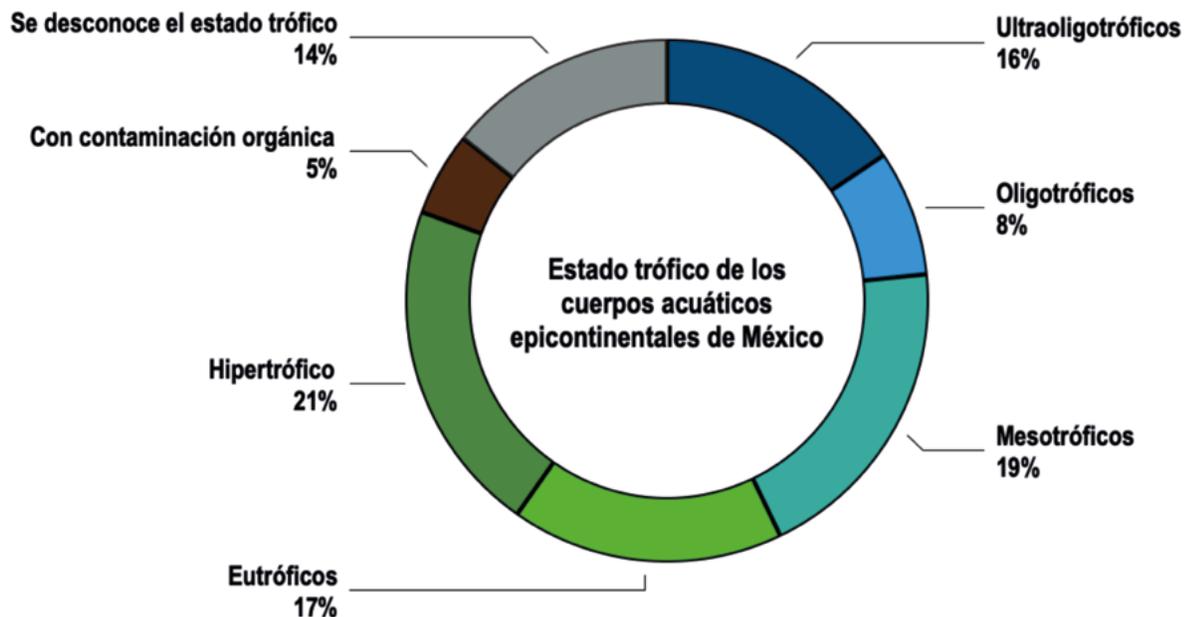


Figura 1. Estado trófico de los cuerpos acuáticos epicontinentales de México con información sobre carbono (Modificada de Alcocer *et al.*, 2019).

En general, México cuenta con muy escasos trabajos relacionados con los flujos de C en sistemas acuáticos epicontinentales (Alcocer *et al.*, 2018; Butman *et al.*, 2018) (Fig. 2). Sin embargo, el reconocimiento de la importancia ecológica, económica y social de estos

ecosistemas, en México y a nivel mundial, ha generado en los últimos años un incremento significativo en la necesidad de evaluar los cambios ocurridos en ellos, ya sea causados de manera natural o por actividades antropogénicas.

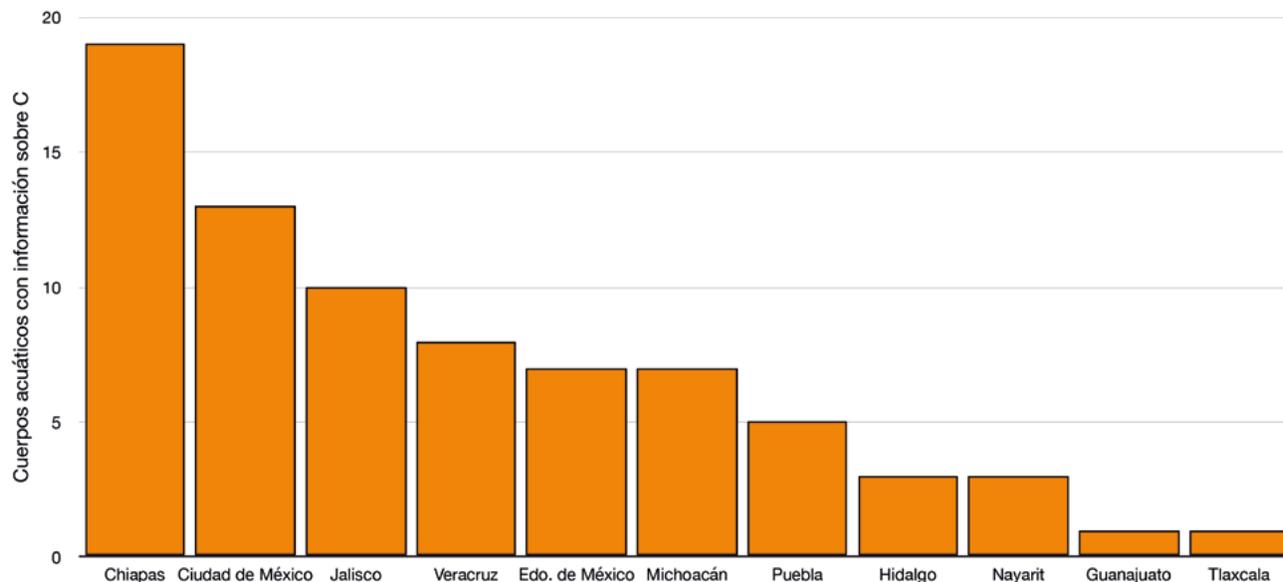


Figura 2. Número de cuerpos acuáticos epicontinentales por estado de la República Mexicana con información sobre carbono (Modificada de Alcocer *et al.*, 2019).

SERVICIOS AMBIENTALES

Idealmente, la interacción de los ecosistemas acuáticos epicontinentales y la sociedad debería estar fundamentada en diagnósticos realizados por distintos grupos de trabajo científico enfocados en su estudio. Sin embargo, la realidad es que las actividades económicas, a nivel local y regional, siempre han sido privilegiadas y consideradas de mayor importancia, lo cual deriva en acciones que, de acuerdo con los protocolos internacionales y la legislación nacional, no son adecuadas para la conservación de los cuerpos acuáticos.

El uso, problemática y grado de deterioro que han sufrido los cuerpos de agua epicontinentales es muy variado. En años recientes se han definido los *servicios ambientales* como los beneficios que las

sociedades humanas obtienen de la biodiversidad y de los ecosistemas (Alcocer *et al.*, 2016). Las actividades antropogénicas han provocado cambios severos en la dinámica de los sistemas acuáticos epicontinentales, debido a que, además de aportar agua para satisfacer las necesidades fisiológicas humanas, éstos han sido utilizados como transportadores (sistemas lóticos) o receptáculos (sistemas lénticos) de desechos. Y por ello, de acuerdo con la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005), alrededor del 60% de los servicios ambientales que proveen los cuerpos de agua interiores están degradados o son usados de manera insostenible. Aunque calcular del valor económico de los servicios ambientales es bastante complicado, se han hecho algunas estimaciones descritas a continuación (Fig.3).

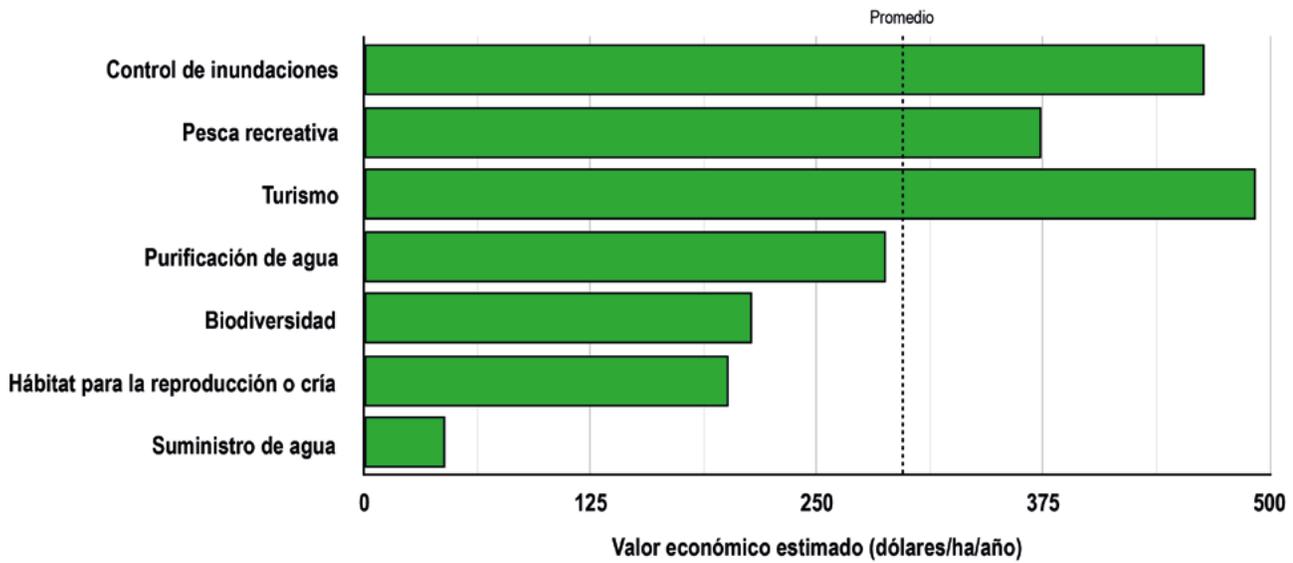


Figura 3. Valoración económica promedio de los servicios ambientales proporcionados por los sistemas acuáticos epicontinentales a nivel global (Schuyt y Brander, 2004).

La producción económica está dividida en bienes físicos y servicios intangibles. Un concepto importante es el relativo a la *función* del ecosistema, la cual se refiere a todos los procesos ecológicos, locales o regionales, llevados a cabo en él mismo. Por otro lado, cuando se describen los *valores* de un ecosistema se hace referencia a lo que tiene relevancia, es deseable o útil para los humanos, desde el punto de vista económico, histórico, educativo, recreativo, estético o espiritual (Cervantes, 2007). Se pueden enlistar los siguientes: 1) servicios de regulación, 2) servicios

de provisión, 3) servicios de soporte y 4) servicios culturales (Cuadro 1).

Los cuerpos de agua interiores proporcionan una gran variedad de bienes y servicios indispensables para la vida diaria y el desarrollo humano. Una de las principales funciones de los ecosistemas acuáticos epicontinentales es el papel que juegan en el ciclo hidrológico. Estos ecosistemas funcionan como almacenes de agua y fuentes de vapor que alcanza la atmósfera, es decir, actúan directa e indirectamente sobre la disponibilidad del recurso hídrico (SEMARNAT, 2008).

Cuadro 1. Principales servicios ambientales proporcionados por sistemas acuáticos epicontinentales (Modificada de SEMARNAT 2015). A: ausente, P: presente, V: valor común e importante.

Servicios ambientales	Ríos y canales	Lagos y reservorios permanentes
Servicios de regulación		
Regulación atmosférica y del clima	A	V
Balance hidrológico	V	V
Control de la contaminación	V	P
Protección contra la erosión	P	A
Protección contra tormentas y vientos	P	V
Secuestro de carbono	V	V

Cuadro 1. Principales servicios ambientales proporcionados por sistemas acuáticos epicontinentales (Modificada de SEMARNAT 2015). A: ausente, P: presente, V: valor común e importante. (Continuación).

Servicios ambientales	Ríos y canales	Lagos y reservorios permanentes
Servicios de provisión		
Alimento: pesca comercial y deportiva	V	V
Agua dulce: agua para consumo humano y agrícola.	V	V
Servicios de soporte		
Biodiversidad	V	V
Formación de suelo	V	P
Servicios culturales		
Espiritual e inspiracional	V	V
Recreación: turismo y actividades recreativas	V	V
Valor estético	P	P

Debe resaltarse el importante papel de los sistemas acuáticos epicontinentales mexicanos en los servicios de regulación, que surgen de procesos ecológicos a través de los ciclos biogeoquímicos y otros procesos biológicos, tales como la regulación del clima y del ciclo hidrológico y, en especial, en el secuestro de C. Estos sistemas pueden funcionar como factores de secuestro o sumideros de C al incorporar el CO₂ atmosférico durante la producción de materia orgánica o actuar como fuentes de CO₂ a la atmósfera mediante desequilibrios en la respiración, la producción primaria, la entrada de C en el agua subterránea, en la precipitación de CaCO₃ o en la metanogénesis (producción anaerobia de CH₄) llevada a cabo en el hipolimnion y en los sedimentos de los cuerpos acuáticos lénticos (Cole *et al.*, 1994; Duarte y Prairie, 2005; Sobek *et al.*, 2005; Bastviken *et al.*, 2011).

En las zonas tropicales, como es el caso de México, los procesos metabólicos que ocurren en los cuerpos acuáticos tienen mayor intensidad e implican mayores tasas de emisiones de GEI en comparación con las zonas templadas (Barros *et al.*, 2011; Raymond *et al.*, 2013; Amado y Roland, 2017). En los trópicos se conjetura que las emisiones de CO₂ y CH₄ aumentan porque las altas temperaturas del agua

incrementan la productividad primaria y los procesos de mineralización de la materia orgánica, responsable del consumo de oxígeno (anoxia) y, finalmente, de la metanogénesis (Sjögersten *et al.*, 2014).

La cuantificación y análisis del C en sus diferentes fracciones ayuda a comprender la importancia de la producción autóctona y del aporte alóctono y permite calcular la eficiencia en el procesamiento de materiales y su transporte entre depósitos (Cole *et al.*, 2007); por tal razón, es importante realizar estimaciones en ambientes acuáticos epicontinentales a nivel mundial (Cole *et al.*, 2007; Tranvik *et al.*, 2018) y elucidar cómo las aguas continentales impactan el ciclo del C (Cuadro 2).

La información disponible acerca de estimaciones de almacenes y flujos de C de cuerpos acuáticos epicontinentales en México, a la fecha, es muy reducido considerando la extensión del país y su heterogeneidad climática y topográfica (Alcocer *et al.*, 2018; Butman *et al.*, 2018). Por lo anterior, las estimaciones de los almacenes y flujos de C actuales reflejan amplias incertidumbres. Realizar estimaciones precisas de los flujos de C es importante para comprender mejor su ciclo global y con ello ser capaces de realizar proyecciones a futuro de los posibles cambios climáticos que enfrentaremos (DelSontro *et al.*, 2018).

Cuadro 2. Concentraciones de C medidas en cuerpos acuáticos epicontinentales de México (Alcocer *et al.*, 2019). (n = número de cuerpos de agua cuantificados, D.E. = desviación estándar, CTP = carbono total particulado, COP = carbono orgánico particulado, COD = carbono orgánico disuelto, CID = carbono inorgánico disuelto, CO = carbono orgánico, CI = carbono inorgánico, COT = carbono orgánico total, CO₂ = dióxido de carbono, CH₄ = metano).

Fracción	n	Promedio	D.E.	Mínimo	Máximo
Almacenes en agua					
CTP ($\mu\text{g L}^{-1}$)	18	1,866	1,654	428	5,719
COP ($\mu\text{g L}^{-1}$)	21	1,741	1,529	315	4,758
COD (mg L^{-1})	5	6.5	3.8	1.9	12.0
CID ($\mu\text{g C g}^{-1}$)	26	96.5	122.1	6.7	426.8
Almacenes en sedimento superficial					
CO (%)	19	9.8	5.1	2.1	19.8
CI (%)	1	5.4			
COP (g C m^{-2})	1	26.7	9.6	17.1	36.3
Almacenes en núcleos sedimentarios					
CO (%)	9	2.8	0.6	2.0	3.5
Flujos de carbono					
CTP ($\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	1	220	61	140	279
Fracción	n	Promedio	D. E.	Mínimo	Máximo
COP ($\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	1	251			
COT ($\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	1	343	83	260	427
CO ₂ ($\text{t CO}_2 \text{ d}^{-1}$)	3	414	381	112	1,060
CH ₄ ($\text{t CH}_4 \text{ d}^{-1}$)	17	6,410	14,295	5	45,400

CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN

Anteriormente se definía a la conservación como el estado de armonía entre el hombre y la Tierra (Leopold, 1953). Hoy en día, cuando se habla de conservación, se hace referencia a todas aquellas acciones encaminadas a mantener los ecosistemas en un estado óptimo. Lo anterior se logra mediante la prevención de la degradación del hábitat y la extinción de especies, con el objetivo de fomentar relaciones sustentables entre las comunidades humanas y los ecosistemas (Primack, 1995). Un conocimiento más profundo de la dinámica de los sistemas acuáticos epicontinentales, su diversidad, estado de conservación y posibilidades de restauración debe integrarse

funcionalmente en la sociedad para facilitar la unión de esfuerzos entre los tomadores de decisiones (en todos los niveles de gobierno), la sociedad, los académicos y otras instancias. Es decir, estos ecosistemas requieren figuras de protección multidisciplinarias que incluyan su gestión y conservación (Antón-Pardo *et al.*, 2011).

Los cuerpos acuáticos epicontinentales son ecosistemas que muestran grandes variaciones a lo largo de su vida geológica, lo cual los hace ecosistemas muy dinámicos. Sin embargo y a pesar de dicha condición, son sensibles a ciertos cambios que hoy en día son básicamente originados por actividades antropogénicas: factores como la extracción excesiva de agua, el vertimiento de desechos o la introducción de especies exóticas representan un alto riesgo para

ellos (Cervantes, 2007). Actualmente, tenemos severas repercusiones sociales, problemas de salud pública y afectaciones económicas a nivel nacional como consecuencia de monitoreos deficientes, una regulación y la escasa comunicación entre las autoridades relacionadas con el manejo de los ecosistemas acuáticos epicontinentales (Mazari-Hiriart *et al.*, 2010). Con el objetivo de garantizar un aprovechamiento sostenible de los recursos que proporcionan los cuerpos de agua epicontinentales, así como la conservación de la biodiversidad, existe la necesidad urgente de manejar correctamente dichos sistemas (Lindig-Cisneros y Zambrano, 2007). Esto obliga a incorporar de manera eficiente diversas estrategias entre las cuales se cuentan: 1) el reconocimiento de la importancia de los sistemas acuáticos epicontinentales y los diversos servicios ambientales que proveen y 2) la creación de políticas públicas nacionales claras, precisas efectivas y para establecer prioridades de conservación y restauración.

El crecimiento exponencial de la población humana ha traído consigo un enorme incremento de los desechos generados, y la esquizofrenia y abuso con que se han utilizado arroyos, ríos, lagos y presas como fuentes de agua, suministro de energía eléctrica o como simples drenajes, han causado daños severos que, probablemente, ya no son reversibles. Visto desde otra perspectiva, las condiciones socio-económicas actuales simplemente no permiten la reducción de la presión sobre los ecosistemas, ya que dominan los intereses económicos, más el desinterés general respecto a la irrecuperable riqueza de ecosistemas acuáticos epicontinentales y de formas de vida silvestre. Es muy importante aumentar los esfuerzos para avanzar en el entendimiento de la dinámica general de nuestros ecosistemas acuáticos y en particular de aquellos que son perturbados rápidamente. Los escasos esfuerzos realizados se basan en información puntual y acotada, cuya extrapolación a todo el país es limitada y, por lo tanto, los modelos generados no son precisos (Escobar y Maass, 2008).

POLÍTICAS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

La mitigación del cambio climático puede entenderse como las acciones humanas encaminadas a reducir las fuentes o potenciar los sumideros de GEI (IPCC, 2014). Recientemente nos enfrentamos al reto de desarrollar políticas públicas y mecanismos prácticos que nos permitan adaptarnos y mitigar el cambio

climático global. Por ello, es de vital importancia proporcionar las bases analíticas y cuantitativas que permitan fundamentar e instrumentar dichas políticas y estrategias (Espinosa *et al.*, 2015). Para lograr el antes mencionado reto, es necesario realizar estudios y monitoreos de largo plazo que reflejen el efecto del cambio global sobre los sistemas acuáticos epicontinentales, y con ello analizar las causas precisas del impacto en estos cuerpos acuáticos e identificar los medios para frenarlas.

Los riesgos de los impactos del cambio climático surgen de la interacción entre un peligro (provocado por un fenómeno o tendencia relacionados con el cambio climático), la vulnerabilidad (susceptibilidad a sufrir daños) y la exposición (personas, activos o ecosistemas en riesgo) (IPCC, 2014). Es posible que la emisión continua de GEI causará distorsiones en la temperatura y cambios duraderos en todos los componentes del sistema climático, lo que haría que aumente la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles para los ecosistemas.

México forma parte de los 20 países que más GEI emiten en el mundo; sin embargo, sus emisiones nunca han sido superiores al 1.5% del total mundial (ENCC, 2013). En ese sentido, cabe señalar que los criterios nacionales de mitigación se basan en inventarios nacionales de GEI, que desde octubre de 2012 con la promulgación de la Ley General de Cambio Climático se encuentran regulados por ésta, aunque ya se realizaban a nivel nacional y, en algunos casos estatal, desde años anteriores.

Entre los principales impactos que el cambio climático ha tenido sobre las aguas epicontinentales mexicanas y que han podido ser reconocidos a través de estudios científicos se pueden enlistar los siguientes (Alcocer *et al.*, 2015): 1) cambios en el régimen de precipitación y otros componentes meteorológicos y, por lo tanto, cambios en el nivel de agua de ríos, lagos y presas; 2) cambios en la temperatura del agua y, por ende, en la circulación vertical del agua debido a que lo obstaculiza la conformación de capas de agua con distintas temperaturas (alteración en su estratificación) y 3) cambios en las características fisicoquímicas del agua, en particular para los lagos en el rango latitudinal de México, un aumento en la eutrofización (Martínez-Austria *et al.*, 2010). Para frenar los efectos antes mencionados es necesario reducir de forma sustancial y sostenida las emisiones de GEI, lo cual, junto con la adaptación, podría limitar los riesgos del cambio climático.

MARCO JURÍDICO-ADMINISTRATIVO

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su reglamento establecen regulaciones para descargar aguas residuales de origen industrial, de servicios y urbanas en cuerpos de agua nacionales, tanto marinos como epicontinentales, bajo el principio de “*el que contamina paga*”. Se fundamentan en límites máximos permisibles de concentraciones de contaminantes vertidos a cuerpos nacionales o sistemas de drenaje municipal, determinados en las Normas Oficiales Mexicanas de 1996 (NOM-001-SEMARNAT y NOM-002-SEMARNAT), así como en “*condiciones particulares de descarga*” para casos específicos. Además, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) puede exigir a los generadores de las aguas residuales que inviertan en el tratamiento de las mismas antes de su vertido final.

Se suman a las regulaciones anteriores las disposiciones de la Ley General de Cambio Climático (LGCC) de 2012, orientadas a la mitigación de emisiones de GEI y las medidas de adaptación necesarias. En ella se establece que la preservación, restauración, conservación, manejo y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas acuáticos, se sujetan a regulación e instrumentación de acciones federales para la mitigación y adaptación al cambio climático (Art. 7°), así como lo es el saneamiento de las aguas para los municipios (Art. 9°).

Para lograr lo anterior, la LGCC determina que la política nacional de cambio climático, con énfasis en las medidas de adaptación, se sustente en instrumentos de diagnóstico, planificación, medición, reporte, verificación y evaluación, con el objetivo de identificar la vulnerabilidad y capacidad de adaptación y transformación de los sistemas ecológicos (Art. 27°) y los programas hídricos de cuencas hidrológicas (Art. 29°). En particular, el Art. 30° señala que los tres órdenes de gobierno deben elaborar los “*diagnósticos de daño en los ecosistemas hídricos*”, sobre los volúmenes de agua y su distribución territorial, al igual que promover el “*aprovechamiento sustentable de fuentes superficiales y subterráneas de agua*”.

En materia de mitigación de emisiones de GEI (Art. 34°) señala también, para los tres órdenes de gobierno, la obligación de diseñar políticas y acciones para proteger, conservar y restaurar la vegetación riparia en el uso y aprovechamiento de las zonas federales de conformidad con la LAN.

A pesar de las disposiciones anteriores, existen vacíos legales y de investigación formal. Un ejemplo es que se desconoce la “*capacidad de carga*” de cada uno de los cuerpos de agua epicontinentales receptores de descargas. Hasta el día de hoy, sólo se cuenta con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001-89, que establecen las características de calidad del agua deseables para propósitos como la protección de la vida de agua dulce (epicontinental) y marina entre otras, aunque no necesariamente en el contexto de cambio climático.

El vacío mencionado consiste en la carencia de un instrumento metodológico que permita relacionar: a) la calidad de agua regulada en las descargas (asumiendo que sí se cumplieran las NOM-001 y NOM-002), b) la cantidad de descargas autorizadas en un mismo cuerpo de agua y c) el “estado de salud” real del ecosistema. En otras palabras, no hay una herramienta operativa que facilite al personal de la CONAGUA respaldar las autorizaciones que otorga con base en una adecuada estimación de la carga contaminante total que un cuerpo de agua puede recibir sin comprometer su integridad ecosistémica y su aporte a favor de las metas nacionales en función de la adaptación y mitigación del cambio climático.

El desarrollo del instrumento mencionado deberá fundamentarse en trabajo serio de investigación científica como se mencionó antes; de otra manera, no es factible garantizar la salud de los ecosistemas acuáticos —como lo demuestra con contundencia la realidad— y menos aún, entender el impacto de la condición real de éstos respecto a las emisiones de GEI o bien su capacidad de captura de carbono, de acuerdo al espíritu de la LGCC.

La procuración de fondos para la investigación requerida se prevé en la LGCC mediante la creación del Fondo para el Cambio Climático cuyo objetivo es captar y canalizar recursos a las acciones contra el cambio climático, con énfasis en las de adaptación, que permitan recargar mantos acuíferos, conservar la vegetación riparia y aprovechar sustentablemente la biodiversidad (Art. 82°).

Si bien es correcto enfocar los esfuerzos en las medidas de adaptación, la investigación que se apoye debe abrir el abanico de opciones para mejorar la comprensión del papel que juegan los sistemas acuáticos epicontinentales —sujetos a fuertes cargas contaminantes— como fuentes de emisión de GEI o bien del papel que tienen sus características ecosistémicas en el secuestro de carbono y en la reducción de vulnerabilidad a eventos hidrometeorológicos.

Por último, es importante señalar el vacío legal en la LAN respecto a la definición de los cuerpos de agua epicontinentales de competencia local: entre aquellos de carácter nacional y los sistemas artificiales de drenaje, las definiciones señaladas en las legislaciones estatales son ambiguas al grado de que realmente no hay un inventario de tales cuerpos de agua de competencia estatal y, por ende, no están debidamente atendidos.

Obviar la atención a las necesidades y al vacío legal mencionado conduciría a no aprovechar las posibilidades que brindan los cuerpos acuáticos epicontinentales en las tareas de mitigación y adaptación y, más importante aún, a no entender la dimensión que éstos tienen y el papel que juegan en el secuestro neto de C o emisiones GEI que el país realiza y reporta para demostrar el avance hacia las metas comprometidas en el escenario internacional. La investigación científica permitirá evaluar dicho papel, al mismo nivel y profundidad metodológica con los que hoy se hace para los ecosistemas terrestres y sus cambios de uso del suelo.

CONCLUSIONES

En la literatura científica se han acumulado evidencias a favor de la importancia de los cuerpos de agua epicontinentales en la emisión y secuestro del C atmosférico, en un escenario de cambio climático. A pesar de ello, el conocimiento de las estimaciones de la emisión y secuestro del C atmosférico por los cuerpos de agua epicontinentales en México es incipiente e insuficiente para ponderar su papel en el balance nacional y regional que se estima, entre otros indicadores, a través de los inventarios de GEI.

En términos de representación en el territorio nacional, queda claro que el conocimiento es precario en general, pero prácticamente inexistente en las regiones del norte del país; también, que hay una importante sub-representación de información para cuerpos de agua lóticos.

Las publicaciones nacionales revelan lo indispensable de adoptar una visión integral que valore holísticamente, a partir de la dinámica del metabolismo del C, el papel de estos cuerpos en el contexto de degradación de la calidad de sus aguas y de su vegetación riparia, de manera que permita atender preguntas específicas tales como ¿de qué manera se alteran los flujos de C bajo condiciones de enriquecimiento trófico o de cargas contaminantes industriales?, ¿qué servicios ambientales de provisión y de regulación de dichos cuerpos no se

aprovechan?, ¿qué medidas de protección, conservación y/o restauración se hacen necesarias para potenciar el papel que juegan a favor de las estrategias nacionales de mitigación y adaptación? y ¿cómo cambia y se adecúa el metabolismo del C ante los cambios estacionales y las distorsiones globales propiciadas por el cambio climático?

Los esfuerzos ordenados de investigación deben partir del establecimiento de metodologías intercomparables y la sistematización de los grupos de investigación del país para cubrir las deficiencias actuales.

El marco legal enfoca apropiadamente la atención a los cuerpos epicontinentales dentro de las estrategias de adaptación al cambio climático y prevé incluso los mecanismos de fondeo para la investigación necesaria; sin embargo, el impacto potencial en aquellas de mitigación, no son tan explícitas.

La ampliación de los objetivos y los mecanismos de fondeo a la investigación, permitirán apoyar la investigación necesaria para contar, por una parte, con los elementos de conocimiento científico que posibiliten corregir, adecuar o incluso crear las políticas públicas respectivas y, por la otra, propiciar la continuidad del monitoreo de las condiciones de esos cuerpos acuáticos, a fin de evaluar la eficacia de las que se adopten.

REFERENCIAS

- Alcocer, J., L. A. Oseguera, E. Escobar, L. Peralta y A. Lugo. 2004. Phytoplankton biomass and water chemistry in two high-mountain tropical lakes in Central Mexico. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 36:341-345.
- Alcocer, J., G. Vilaclara-Fatjo, O. A. Escolero-Fuentes, L. I. Falcón, P. M. Valdespino y M. Mazari-Hiriart. 2015. Aguas Continentales. En: C. Gay, A. Cos y C. T. Peña (Eds.). *Reporte Mexicano de Cambio Climático; Impactos, vulnerabilidad y adaptación*. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 41-56 pp.
- Alcocer, J., E. Barba-Macías, V. Díaz-Castañeda, M. de L. Jiménez-Badillo, A. L. Lara-Domínguez y J. Sosa-Ramírez. 2016. Cambios en la biodiversidad y sus consecuencias en el funcionamiento de los ecosistemas y sus servicios. En: Balvanera, P., E. Arias-González, R. Rodríguez-Estrella, L. Almeida-Leñero y J. J. Schmitter-Soto (Eds.). *Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, 191-227 pp.
- Alcocer, J., M. Caballero, A. C. Ruiz-Fernández, L. A. Oseguera-Pérez, J. A. Sánchez-Cabeza, J. D. Cuevas-Lara y I. F. Soria-Reinoso. 2018. Base de datos del carbono en cuerpos

- acuáticos epicontinentales de México. Elementos para Políticas Públicas. Programa Mexicano del Carbono 2(1): 1- 18.
- Alcocer, J., M. Caballero, A. C. Ruiz-Fernández, L. A. Osegue-
ra-Pérez, J. A. Sánchez-Cabeza, J. D. Cuevas-Lara y I.F. So-
ria-Reinoso. 2019. Ecosistemas Acuáticos Epicontinentales.
En: Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y
A. S. Velázquez-Rodríguez (Eds.). Estado del Ciclo del Car-
bono: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbo-
no. Texcoco, Estado de México, México. ISBN: EN TRÁMI-
TE. 716 p.
- Amado, A. y M. Roland. 2017. Microbial role in the carbon cycle
in tropical inland aquatic ecosystems. *Frontiers in microbiol-
ogy* 8:20. doi:10.3389/fmicb.2017.00020
- Antón-Pardo, M., C. Olmo, R. Ortells y X. Armengol. 2011. La
restauración de sistemas acuáticos continentales y su interés
para la conservación: el ejemplo de las malladas en el Parque
Natural de l'Albufera (Valencia). *Chronica naturae* 1: 10-19.
- Aufdenkampe, A. K., E. Mayorga, P. A. Raymond, J. M. Melack,
S. C. Doney, S. R. Alin, R. E. Aalto y K. Yoo. 2011. Rivers
and the coupling of biogeochemical cycles. *Frontiers in Ecol-
ogy and the Environment* 9: 53-60 .
- Barros, N., J. J. Cole, L. J. Tranvik, Y. T. Prairie, D. Bastviken,
V. L. M. Huszar, P. Del Giorgio y F. Roland. 2011. Carbon
emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age
and latitude. *Natural Geoscience* 4: 593-596.
- Bastviken, D., L. J. Tranvik, J. A. Downing, P. M. Crill y A. En-
rich-Prast. 2011. Freshwater methane emissions offset the
continental carbon sink. *Science* 331:50. doi: 10.1126/sci-
ence.1196808
- Battin, T. J., L. A. Kaplan, S. Findlay, C. S. Hopkinson, E. Marti,
A. I. Packman, J. D. Newbold y F. Sabater. 2008. Biophysical
controls on organic carbon fluxes in fluvial networks. *Nature
Geoscience* 1: 95-100.
- Butman, D., R. Striegl, S. Stackpoole, P. del Giorgio, Y. Prairie,
D. Pilcher, P. Raymond, F. Paz Pellat and J. Alcocer. 2018.
Chapter 14: Inland waters. In: Cavallaro, N., G. Shrestha, R.
Birdsey, M. A. Mayes, R. G. Najjar, S. C. Reed, P. Rome-
ro-Lankao and Z. Zhu (Eds.). *Second State of the Carbon Cy-
cle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report*, U.S.
Global Change Research Program, Washington, DC, USA,
568-595 pp.
- Centro Internacional de Investigación Forestal. 2009. Senci-
llamente REDD: Guía sobre bosques, cambio climático y
REDD. CIFOR. Indonesia.
- Cervantes, M. 2007. Conceptos fundamentales sobre ecosistemas
acuáticos y su estado en México. En: Sánchez, O., M. Her-
zig, E. Peters, R. Márquez y L. Zambrano (Eds.). *Perspecti-
vas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*.
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 293 pp.
- Cole, J. J., N. F. Caraco, G. W. Kling and T. K. Kratz. 1994. Car-
bon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes.
Science 265: 1568-1570.
- Cole, J.J., Y. Prairie, N. Caraco, W. McDowell, L. Tranvik, R.
Striegl, C.M. Duarte, P. Kortelainen, J.A. Downing, J.J. Mid-
delburg and J. Melack. 2007. Plumbing the global carbon
cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon
budget. *Ecosystems* 10:172-185. doi.org/10.1007/s10021-
006-9013-8
- Comisión Nacional del Agua. 2018. Atlas del agua en México,
CONAGUA, SEMARNAT. México.
- Comisión Nacional del Agua. 2018. Estadísticas del agua en Mé-
xico, CONAGUA, SEMARNAT. México.
- Comisión Nacional del Agua. (s/a). Normas Oficiales Mexicanas.
NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT,
1996, NOM-003-SEMARNAT-1997. SEMARNAT-CONA-
GUA. Ciudad de México. [http://www.conagua.gob.mx/CO-
NAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf)
(Consulta: 18 septiembre, 2019)
- Cramer, W., A. Bondeau, F. Woodward, I. Prentice, R. Betts, V.
Brovkin, P. Cox, V. Fisher, J. Foley, A. Friend, C. Kuchar-
ik, M. Lomas, N. Ramankutty, S. Sitch, B. Smith, A. White
and C. Young-Molling. 2001. Global response of terrestrial
ecosystem structure and function to CO₂ and climate change:
results from six dynamic global vegetation models. *Global
Change Biology* 7: 357-373.
- Dean, W. E. and E. Gorham. 1998. Magnitude and significance
of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands. *Geology*
26: 535-538.
- Del Sontro, T., J. J. Beaulieu and J. A. Downing. 2018. Green-
house gas emissions from lakes and impoundments: Upscal-
ing in the face of global change. *Limnology and Oceanogra-
phy* 3: 64-75.
- Duarte, C. M. and Y. T. Prairie. 2005. Prevalence of heterotrophy
and atmospheric CO₂ emissions from aquatic ecosystems.
Ecosystems 8: 862-870.
- ENCC. 2013. Estrategia Nacional de Cambio Climático. Visión
10-20-40. Gobierno de la República.
- Escobar, E. y M. Maass. 2008. Diversidad de procesos funciona-
les en los ecosistemas. En: *Capital natural de México: Cono-
cimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO, México. 1:
161-189.
- Espinosa, M., O. A. Peralta-Rosales y T. Castro-Romero. 2015. Ci-
clos Biogeoquímicos. En: C. Gay, A. Cos y C. T. Peña (Eds.).
*Reporte Mexicano de Cambio Climático; Bases científicas,
modelos y modelación*. Universidad Nacional Autónoma de
México. México. 157-176 pp.
- Farley, M. 2012. Eutrophication in Fresh Waters: An International
Review. In: Bengtsson, L., R. W. Herschy and R. W. Fair-

- bridge (Eds.). *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. 954 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. *Cambio climático 2014: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. R.K. Pachauri y L.A. Meyer, Eds. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 pp.
- Leopold, A. 1953. Conservation. In: Leopold, L. B. (Ed.) *Round River: From the Journals of Aldo Leopold*. Oxford University Press, Nueva York. 286 p.
- Lindig-Cisneros, R. y L. Zambrano. 2007. Aplicaciones prácticas para la conservación y restauración de humedales y otros ecosistemas acuáticos. En: Sánchez, O., M. Herzig, E. Peters, R. Márquez y L. Zambrano (Eds.). *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 293 pp.
- Martínez-Austria, P., C. Patiño-Gómez, M. J. Montero-Martínez, J. L. Pérez-López, W. Ojeda-Bustamante, M. D. Mundo-Molina y L. Hernández Barrios. 2010. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos. En: Jiménez-Cisneros, B., M. L. Torregrosa y A. L. Aboites-Aguilar (Eds.). *El agua En México: Cauces y Encauces*. Academia Mexicana de Ciencias y Comisión Nacional del Agua. 702 p.
- Mazari-Hiriart, M., A. C. Espinosa, Y. López-Vidal, R. Arredondo-Hernández, E. Díaz-Torres y C. Equihua-Zamora. 2010. Visión integral sobre el agua y la salud. En: Jiménez-Cisneros, B., M. L. Torregrosa y A. L. Aboites-Aguilar (Eds.). *El agua En México: Cauces y Encauces*. Academia Mexicana de Ciencias y Comisión Nacional del Agua. 702 p.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis*. World Resources Institute. MEA. Washington, D.C.
- Primack, R. 1995. *A primer of conservation biology*. Sinauer-Sunderland. USA, 277 pp.
- Raymond, P. A., N. Oh, R. Turner and W. Broussard. 2008. Anthropogenically enhanced fluxes of water and carbon from the Mississippi River. *Nature* 451: 449-452 pp.
- Raymond, P. A., J. Hartmann, R. Lauerwald, S. Sobek, C. McDonald, M. Hoover, D. Butman, R. Striegl, E. Mayorga, C. Humborg, P. Kortelainen, H. Dür, M. Meybeck, P. Ciais and Y. P. Guth. 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature* 503(7476): 355-359. doi:10.1038/nature12760
- Schuyt, K. and L. Brander. 2004. *Living waters: Conserving the source of life. The economic value of the world's wetlands*. WWF. Switzerland.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2008. *Informe de la situación del medio ambiente en México*. Compendio de estadísticas ambientales. SEMARNAT. México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2015. *Informe de la situación del medio ambiente en México*. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. SEMARNAT. México
- Sjögersten, S., C. R. Black, S. Evers, J. Hoyos-Santillan, E. L. Wright and B. L. Turner. 2014. Tropical wetlands: A missing link in the global carbon cycle? *Global biogeochemical cycles* 28: 1371-1386.
- Sobek, S., L. J. Tranvik and J. J. Cole. 2005. Temperature independence of carbon dioxide supersaturation in global lakes. *Global Biogeochemical Cycles* 19: 1-10. doi:10.1029/2004GB002264
- Tranvik, L. J., J. J. Cole and Y. T. Prairie. 2018. The study of carbon in inland waters: from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle. *Limnology and Oceanography letters* 3:41-48. doi:10.1002/lol2.10068
- Ward, N. D., T. Bianchi, P. Medeiros, M. Seidel, J. Richey, R. Keil and H. Sawakuchi. 2017. Where carbon goes when water flows: carbon cycling across the aquatic continuum. *Frontiers in Marine Science* 4: 1-27.
- Wehrli, B. 2013. Biogeochemistry: conduits of the carbon cycle. *Nature* 503: 346-347.
- Williamson, C., W. Dodds, T. Kratz and M. Palmer. 2008. Lakes and streams as sentinels of environmental change in terrestrial and atmospheric processes. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6: 247-254.

EMISIONES DE METANO POR FERMENTACIÓN ENTÉRICA DE LA GANADERÍA BOVINA DE MÉXICO: LA IMPORTANCIA DE CONTAR CON INVENTARIOS NACIONALES PRECISOS Y DE ESTRATEGIAS VIABLES DE MITIGACIÓN

METHANE EMISSIONS FROM ENTERIC FERMENTATION OF MEXICAN CATTLE: THE IMPORTANCE OF ACCURATE NATIONAL INVENTORIES AND VIABLE MITIGATION STRATEGIES

María Fernanda Vázquez-Carrillo¹, Juan Carlos Ku-Vera², Manuel González-Ronquillo³, Epigmenio Castillo-Gallegos¹, Ermias Kebreab⁴, Octavio Alonso Castelán-Ortega^{3†}.

¹Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, CP 04510, Ciudad de México

²Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán, carretera Mérida-Xmatkuil km 15.5, Mérida, Yucatán, México

³Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del estado de México. Instituto Literario 100, Colonia Centro, Toluca, CP 50000, Estado de México

⁴Department of Animal Science, University of California, Davis, CA 95616, USA.

†Autor para correspondencia: oacastelano@uaemex.mx

RESUMEN

El sector ganadero contribuye al calentamiento global con el 18% de la emisión antropogénica total de gases de efecto invernadero (GEI), estas emisiones tienen su origen en la producción y procesamiento de alimento para el ganado, el uso de tierra, la fermentación entérica y el manejo de desechos de los animales. Gracias a su eficiente sistema digestivo los rumiantes pueden aprovechar una gran diversidad de plantas forrajeras y transformarlas en alimentos de alto valor biológico para la humanidad, no obstante, como resultado de este proceso se pierde parte de la energía consumida por el animal en forma de gas metano (CH₄). Para el año 2018, México contaba con un inventario de casi 32 millones de cabezas de ganado bovino (la más numerosa después de las aves de corral), el cual generaba alrededor de 2039.21 ± 205.5 Gg de CH₄ al año, ocupando el octavo lugar entre los países productores de metano por fermentación entérica a nivel mundial. Por lo tanto, es importante, por un lado conocer, e identificar los factores que intervienen en la emisión de CH₄ por fermentación entérica de los bovinos en México, para mejorar la eficiencia de utilización de la energía de los alimentos por los animales y reducir las pérdidas a través del CH₄. Y, por otro lado, desarrollar métodos y procedimientos robustos para la generación de inventarios de éste gas, con el objetivo de desarrollar estrategias y políticas nacionales para la mitigación de emisiones de metano por fermentación entérica del ganado bovino en México, tales como la inclusión de plantas taníferas en la alimentación animal, y así diseñar e implementar políticas públicas adecuadas al contexto ganadero del país.

Palabras Clave: alimentación; GEI; GHG; metano; rumiantes.

ABSTRACT

The livestock sector contributes to global warming with ~18% of the total anthropogenic emission of greenhouse gases (GHG), these emissions have their origin in the production and processing of feed for livestock, land-use change, enteric fermentation and animal waste management. The efficient digestive system of ruminants can take advantage of a great diversity of forage plants and transform them into foods of high biological value for humanity. However, as a result of this process, part of the energy consumed by the animal is lost in the form of methane gas (CH₄), a potent green house gas. For 2018, Mexico had an inventory of almost 32 million head of cattle (the most numerous livestock species after poultry), which generated around 2,039.21 ± 205.5 Gg of CH₄ per year, ranking eighth among methane-producing countries by enteric fermentation worldwide. Therefore, it is crucial to know and identify the factors that intervene in the emission of CH₄ by enteric fermentation of cattle in Mexico in order to improve the efficiency of the use of energy from food by animals and reduce the losses through CH₄. On the other hand, it is necessary to develop robust methods and procedures for the calculations of inventories of this gas, aimed at developing national strategies and policies for the mitigation of methane emissions originated from enteric fermentation of cattle in Mexico. These strategies can include the inclusion of tanniferous plants as a supplement to cattle's feed, and thus design and implement appropriate public policies for the country's livestock context.

Index words: *feed; GEI; GHG; methane; ruminants.*

INTRODUCCIÓN

Debido al aumento progresivo de la población mundial y la demanda de proteínas de origen animal para consumo humano, existe una elevada preocupación por el papel que desempeñan los rumiantes domésticos en el calentamiento global, principalmente por la producción de gases de efecto invernadero (GEI), pues en forma directa contribuyen con la emisión de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) a partir de la fermentación ruminal y de óxido nitroso (N₂O) por la degradación de sus heces y orina en el ambiente (Eckard *et al.*, 2010; FAO, 2018); y en forma indirecta a través de las actividades que involucran la producción de forrajes y la conversión de bosques en pasturas para su alimentación. De acuerdo con Steinfeld *et al.* (2006) el sector ganadero emite 7.1 Gt de CO₂ eq aproximadamente, es decir, alrededor del 18% de la emisión antropogénica global de GEI. Entre los GEI que emite el ganado, el metano juega un papel muy importante ya que lo producen en grandes volúmenes, y es 28 veces más potente que el CO₂ para contribuir al efecto invernadero. Por otro lado, el metano, tiene una vida media de 9 a 15 años en la atmósfera (Eckard *et al.*, 2010), periodo relativamente corto en comparación

con otros GEI. En este contexto, los resultados de las acciones y políticas de mitigación del cambio climático, en particular para la reducción de la emisión de metano por fermentación entérica del ganado bovino, se apreciarían en el corto-mediano plazo en comparación con otros GEI en donde se tendría que esperar decenas sino cientos de años antes de observar un efecto.

En la actualidad, la mayoría de los estudios en ganadería y cambio climático en América Latina están enfocados en la cuantificación de los volúmenes de la emisión de CH₄, la determinación de los factores de emisión y el cálculo de los inventarios nacionales; pocos estudios se enfocan en el desarrollo de estrategias de mitigación (Benaouda *et al.*, 2017). Para el año 2017, México se encontró dentro de los 10 países con mayor producción de GEI, con una contribución equivalente al 1.68% de las emisiones globales (WRI, 2017) (Figura 1). Recientemente, se publicó el Primer Inventario Nacional Tier 2 de emisiones de metano por fermentación entérica del ganado bovino de México, registrando 2039.21 ± 205.5 Gg de CH₄ al año (Castelán-Ortega *et al.*, 2019), para una población aproximada de 31.8 millones de cabezas, registradas por el Padrón Ganadero Nacional (2016).

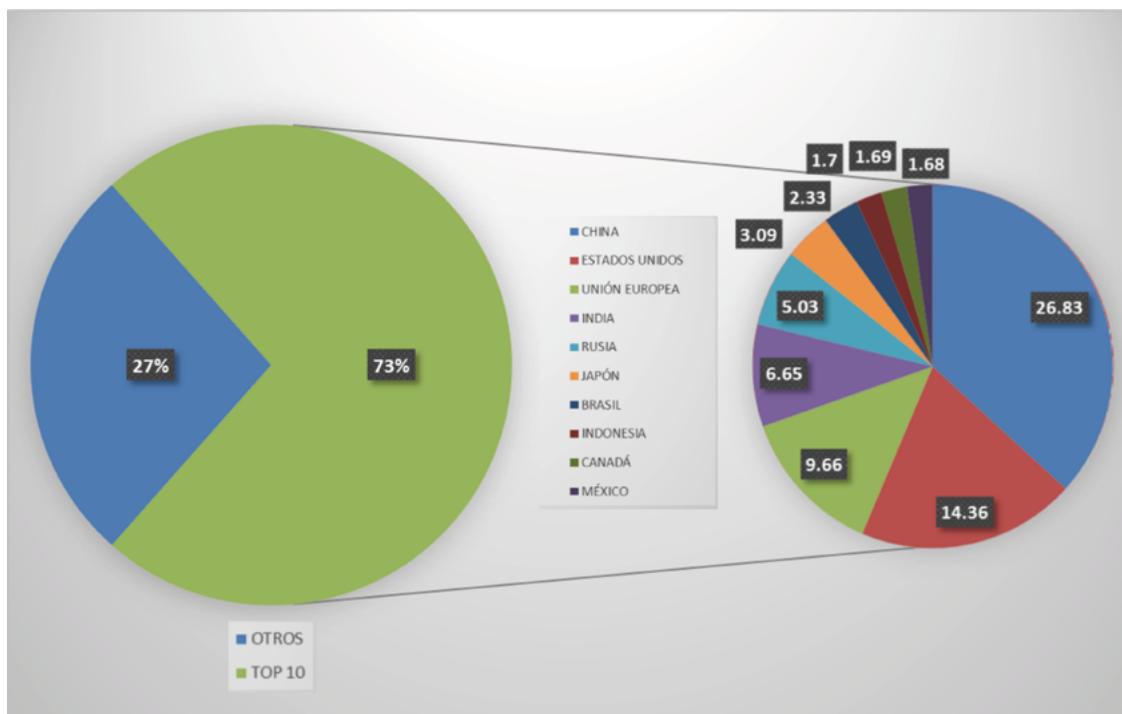


Figura 1. Principales países generadores de gases de efecto invernadero. Modificado de WRI, 2017.

Existen diferentes técnicas para cuantificar las emisiones de metano por los bovinos (es la especie doméstica que más metano emite), como son analizadores portátiles, el método trazador de gases como SF₆ (Hexafluoruro de Azufre) (Johnson *et al.*, 1994), sistema de túnel de polietileno, GreenFeed, cámaras de respiración, entre otros (Cersosimo y Wright, 2015); la técnica que emplea cámaras de respiración es considerada la de mayor precisión, ya que se mide todo el metano producido por el animal. Hasta hace poco, México carecía de información precisa sobre emisiones de metano entérico por bovinos debido a la falta de laboratorios especializados donde se pudieran llevar a cabo mediciones *in vivo*. Desde el año 2014 se cuenta en el país con dos laboratorios con la infraestructura para medir *in vivo* las emisiones de metano en bovinos alojados en cámaras de respiración de circuito abierto; ubicados estratégicamente en dos importantes regiones geo-climáticas de México, el primero localizado en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), el cual estudia las emisiones de CH₄ de las regiones de clima tropical del sur, Golfo de México y las regiones de clima tropical de la Costa del Pacífico; mientras que el segundo ubicado en la FMVZ de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), en el

Estado de México, estudia los sistemas ganaderos de las regiones de clima templado, árido y semi-árido de México (Castelán-Ortega *et al.*, 2019). Recientemente se ha implementado un Laboratorio de Cromatografía de Gases para medir emisiones de metano entérico y óxido nítrico en sistemas ganaderos en pastoreo, usando la técnica de SF₆, el cual se encuentra en el El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) en el Estado de Chiapas, México.

La producción de metano entérico se encuentra influenciada por diversos factores, principalmente por la composición química y calidad de la dieta, así como el nivel de consumo del animal (Johnson y Johnson, 1995; Hook *et al.*, 2010). El metano es un producto resultado de la fermentación de los carbohidratos del alimento ingerido, durante ésta fermentación, las bacterias arqueas metanogénicas presentes en el rumen, utilizan como sustrato el CO₂ y el H₂ para formar CH₄ y así reducir la acumulación de H₂ en el rumen evitando problemas digestivos y metabólicos en el animal (Benaouda *et al.*, 2017); la producción de metano implica una pérdida energética para el animal, que puede llegar a representar hasta el 12% de la energía bruta (EB) total consumida en el alimento (Johnson y Johnson, 1995). El patrón de fermentación ruminal depende principalmente del

tipo de carbohidratos contenidos en la dieta animal, por ejemplo, los carbohidratos estructurales de los forrajes (celulosa, hemi-celulosa y lignina) agrupados en la porción conocida como fibra detergente neutro (FDN) dirigen la fermentación ruminal hacia una de tipo acética, donde se liberan ocho iones de hidrógeno por cada mol de acetato producido, mientras que una fermentación de tipo propiónica, dada por una dieta alta en alimentos concentrados, no libera moléculas de hidrógeno y por lo tanto no promueve la formación de metano (Johnson y Johnson, 1995; Moss y Givens, 2002). De esta manera, modificar la inclusión de diferentes tipos de carbohidratos en la dieta puede definir el tipo de fermentación y por ende la cantidad de metano producido por fermentación entérica. Es por lo anterior, que algunas de las estrategias de mitigación de metano producido por fermentación entérica más prometedoras se basan precisamente en modificar la composición de la dieta y se encuentran asociadas al uso de recursos alimenticios locales y de bajo costo, los cuales puedan producir una fermentación de tipo propiónica. Existen también otras estrategias que favorecen una menor producción de metano, las cuales se basan en diferentes niveles de inclusión de plantas taníferas y saponíferas en la dieta de los rumiantes como se describe ampliamente en Ku-Vera *et al.* (2020) y Vázquez-Carrillo *et al.* (2020), las cuales han mostrado resultados prometedores y de aplicabilidad para México, ya que fueron desarrolladas en el país.

El presente documento tiene como objetivos el presentar una síntesis del estado actual de las investigaciones sobre emisiones de metano por fermentación entérica de los bóvidos en México; y presentar algunas estrategias y políticas públicas sugeridas para la mitigación de las emisiones de metano por fermentación entérica del ganado bovino, pensadas para el contexto ganadero del país.

DESARROLLO DEL PRIMER INVENTARIO NACIONAL NIVEL TIER 2 DEL IPCC DE EMISIONES DE METANO POR FERMENTACIÓN ENTÉRICA, EMPLEANDO MEDICIONES *in vivo* EN MÉXICO

En México, hasta hace poco, no se habían realizado mediciones *in vivo* de las emisiones de metano por fermentación entérica en ganado bovino, y por ende existía poca información sobre este tema. Además, no se contaba con estudios de emisiones de metano por

regiones geo-climáticas del país, lo cual generaba una sub o sobreestimación de emisiones de metano por fermentación entérica por la variación que existe en la composición y calidad de los forrajes y dietas entre regiones geo-climáticas, siendo menor la calidad en los forrajes de clima tropical respecto a los de clima templado (Castelán-Ortega *et al.*, 2014). Se sabe que los primeros generan una menor emisión mientras que los segundos presentan una mayor emisión de metano (Castelán-Ortega *et al.*, 2014).

Los estudios generados por el presente grupo de trabajo permitieron publicar en el año 2019 el primer inventario nacional, con factores de emisión de metano específicos para el ganado bovino de México (Castelán-Ortega *et al.*, 2019), el cual se llevó a cabo utilizando una metodología más completa que la usada hasta el momento por el gobierno mexicano, el nivel 2 (Tier 2, por sus siglas en inglés) del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Antes de nuestro inventario de nivel Tier 2, los inventarios en México se calculaban con base en factores de emisión por defecto recomendados en las directrices del IPCC (2006), en su forma más simple que es el nivel Tier 1, que consiste en multiplicar el número de cabezas de ganado por un factor de emisión por defecto, sin considerar los factores que influyen en el volumen de las emisiones, como la función productiva del ganado (leche, carne, doble propósito), el sistema de producción, el consumo de materia seca (CMS), y sobre todo, el tipo y la calidad de la dieta, el clima y la eficiencia productiva (IPCC, 2006; Sejian *et al.*, 2011), en resumen no se consideraba el efecto de la región geo-climática sobre la emisión de metano entérico. Es por lo anterior, que los resultados derivados de modelos como el Tier 1 son cuestionables debido a su baja precisión y elevada incertidumbre. Sin embargo, la implementación de un inventario de nivel 2, es complejo, debido a la falta infraestructura y financiamiento para el desarrollo de estudios más rigurosos como lo plantea Sejian *et al.* (2011), así como la necesidad de mantener animales en experimentación y en condiciones ambientales específicas (Marques *et al.*, 2020). México al ser un país con una gran diversidad climática, posee diferentes sistemas de producción de bovinos, tipos de alimentación, ganado con diferente fin zootécnico, razas, entre otros; por lo anterior el hacer uso del nivel Tier 1 del IPCC (2006) sin duda sub-estima o sobre-estima las emisiones de metano en los inventarios regionales y/o nacionales.

Procedimiento para el desarrollo del inventario Tier 2

El desarrollo del inventario, publicado por Castelán-Ortega *et al.* (2019), consistió en la recopilación de información bibliográfica y estadística sobre las características de los sistemas de producción de ganado bovino, su población y estructura del hato en México, para ello se utilizó como base el Padrón

Ganadero Nacional (2016) y su clasificación para dicho fin, de igual forma se colectó información sobre la alimentación de los bovinos y composición química de forrajes y alimentos. Después, se dividió el territorio nacional en regiones geo-climáticas y se ubicó la población nacional de ganado bovino correspondiente a cada región, obteniéndose cinco regiones: cálido húmedo, cálido sub-húmedo, templado, seco y muy seco como se muestra en la Figura 2.

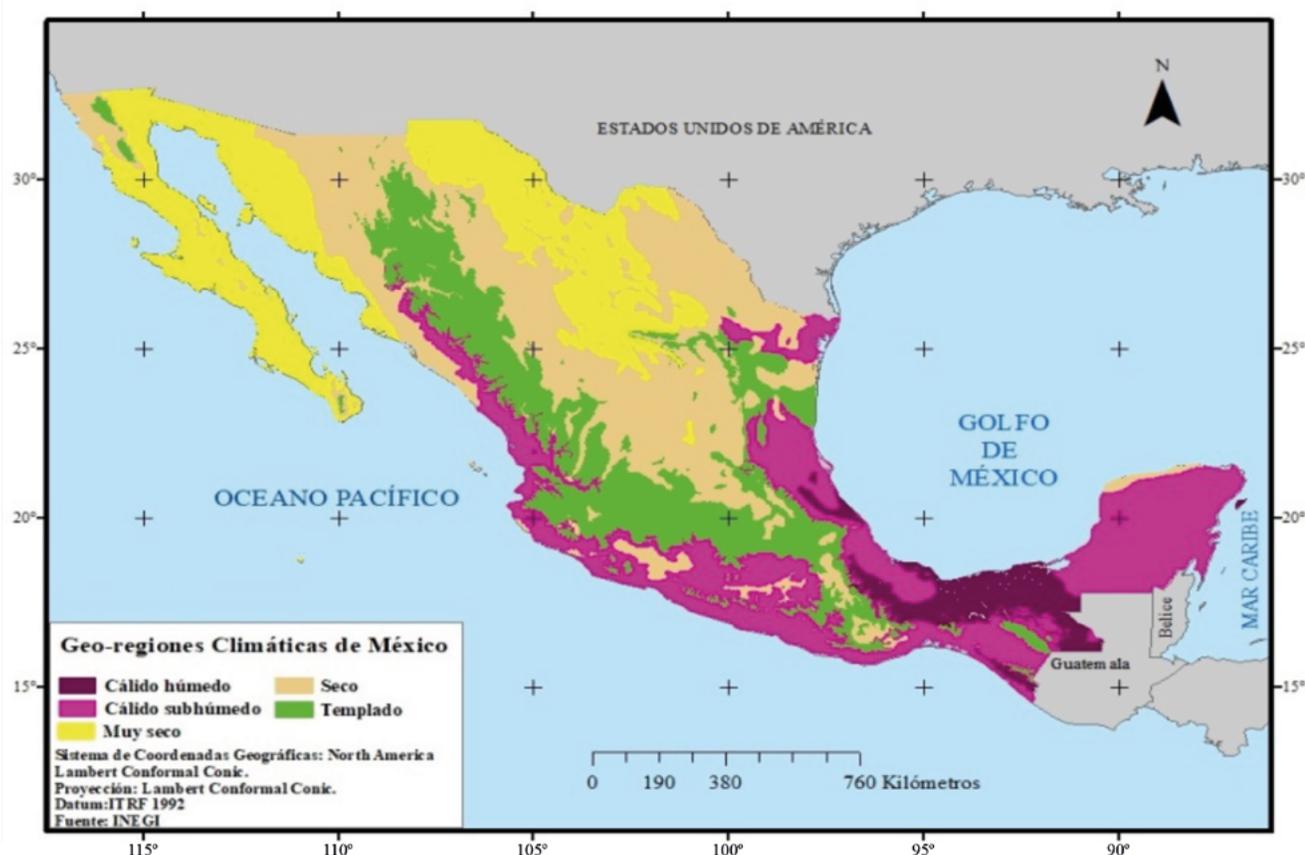


Figura 2. Regiones geo-climáticas de la República Mexicana empleadas en la elaboración del inventario de nivel Tier 2 de emisiones de metano por fermentación entérica del ganado bovino. Tomado de: Castelán-Ortega *et al.* (2019).

Posteriormente, se realizaron encuestas en 15 estados representativos de cada región geo-climática de la república y con una población importante de ganado; también se empleó el método de observación directa y se recolectaron muestras de forrajes y dietas empleadas en las unidades de producción pecuaria, a éstas últimas se les determinó la concentración de energía bruta,

dato indispensable para el cálculo de los factores de emisión de metano de acuerdo con el método Tier 2 del IPCC (2006). En la Figura 3 se representan diferentes sistemas de producción, que ejemplifican algunos de los sistemas de México, con distintas razas de bovinos y tipos de alimentación.



Figura 3. Diferentes sistemas de producción y alimentación del ganado bovino en México. (a) Pastoreo en las regiones de clima cálido sub-húmedo, (b) Engorda intensiva en corrales en la región de clima muy seco y (c) Producción intensiva de leche en la región de clima seco.

Mediante un análisis estadístico multivariado de las encuestas aplicadas, se identificaron los principales ingredientes empleados en la alimentación, y posteriormente, se definieron las dietas tipo para cada región geo-climática y categoría de ganado. Las dietas tipo se reprodujeron y ofertaron a bovinos experimentales y sus emisiones de metano fueron medidas en las cámaras de respiración de circuito abierto (Figura 4), de los laboratorios de la UAEMex y la UADY; es decir una dieta tipo para cada región climática y categoría de ganado. Las cámaras de respiración están equipadas con aire acondicionado, luz artificial, ventilador y una jaula metabólica; ésta última provista de comedero, bebedero, piso antiderrapante y un contenedor en la parte inferior posterior, que permitió la colecta total de heces del animal como se describe en Canul *et al.* (2017); esta infraestructura fue necesaria para el cálculo de consumo de materia seca (CMS) y digestibilidad de la dieta, además de la emisión de metano. Los animales tuvieron un periodo de adaptación a las dietas tipo, para posteriormente seguir con un periodo de muestreo, en el cual se realizaron mediciones de consumo, digestibilidad de la

dieta y de la energía; finalizando con 24 hr de medición dentro de las cámaras de respiración para cuantificar la emisión de metano de los animales.

Una vez medida la emisión de metano se procedió a calcular el factor de partición de la energía consumida hacia metano conocido como factor Y_m (Y_m , por sus siglas en inglés). Este factor Y_m determina el porcentaje de energía consumida que se pierde en forma de metano. Los factores de emisión para las regiones de clima templado, seco y muy seco se generaron a partir de experimentos en bovinos de las razas Holstein y Charolais realizados en el Laboratorio de Ganadería, Medio Ambiente y Energías Renovables de la FMVZ-UAEMex (Castelán-Ortega *et al.*, 2015; Hernández-Pineda *et al.*, 2018; Castelán-Ortega *et al.*, 2018; Castelán-Ortega *et al.*, 2020). Mientras que los factores de emisión para las regiones de clima cálido húmedo y cálido sub-húmedo se determinaron a través de experimentos *ex profeso* con ganado cebú en el Laboratorio de Cambio Climático y Ganadería de la FMVZ-UADY (Canul *et al.*, 2017; Ku-Vera *et al.*, 2018; Arceo-Castillo *et al.*, 2019).



Figura 4. Equipo de medición de emisiones de metano y cámaras de respiración de circuito abierto de la FMVZ-UAEMex.

Finalmente, con los datos obtenidos: factor Y_m , digestibilidad y variables sobre las características productivas del animal, se calculó el inventario de emisiones de metano por región geo-climática, función productiva y categoría del ganado, acorde al modelo del Tier 2 (IPCC, 2006), utilizando como base el censo del Padrón Ganadero Nacional al año 2016. También, se determinó la magnitud de la incertidumbre asociada al modelo (Valenzuela *et al.*, 2017), y la propagación de la incertidumbre por el método de simulación

matemática Monte Carlo. El inventario de metano por fermentación entérica Tier 2 obtenido de esta forma fue de 2039.21 Gg año⁻¹ y su incertidumbre asociada fue de -18.2 a 21.2 como se muestra en el Cuadro 1. La incertidumbre del inventario es muy similar a la reportada por otros países (Karimi-Zindashty *et al.*, 2012; Milne *et al.*, 2014; Hristov *et al.*, 2017). Para una descripción detallada del proceso de elaboración del inventario se sugiere consultar el documento publicado en Castelán-Ortega *et al.* (2019).

Cuadro 1. Inventario de emisiones de metano por fermentación entérica de bovinos en México para el año 2018 y su incertidumbre asociada.

	FD	γ'	δ	λ	ξ	X	σ	I. C. 95%	(%)
CH ₄ total (Gg año ⁻¹)	Johnson SU	1037	1007.35	-6.06	6.97	2039.21	205.50	1666.36- 2471.61	-18.28 a +21.20

FD = Función Distribución de Probabilidad. γ = Gama. δ = parámetros. λ = Lambda. X = media σ = desviación estándar. I.C. = Intervalo de confianza.

El inventario nacional expuesto anteriormente, es el reflejo del esfuerzo de investigación, metodologías planeadas y experimentos en cámaras de respiración de circuito abierto, así como el uso de métodos estadísticos robustos y confiables para el análisis correcto de información; tratándose del primer estudio en su tipo para México.

Consideraciones con respecto al inventario de aproximación Tier 2

Investigaciones como la que se describe en el presente documento son necesarias para la obtención de resultados más precisos acorde al contexto ganadero regional y nacional del país. Entre más información de calidad se obtenga del sector ganadero nacional, respecto a las variantes involucradas en la producción de GEI, se pueden reemplazar las aproximaciones cualitativas por cuantitativas y refinar los valores de los diferentes parámetros implicados en el modelo, para aumentar la precisión y reducir la incertidumbre de los inventarios. Siguiendo esta corriente de pensamiento, es necesaria la actualización del inventario nacional, para sentar las condiciones a las que se enfrenta el país en este campo, con la finalidad de desarrollar y mejorar políticas gubernamentales enfocadas a la mitigación de GEI. Por otro lado, es necesario tomar en cuenta las consideraciones señaladas por Marques *et al.* (2020), para regiones que no cuentan con cámaras de respiración; quienes enfatizan la necesidad de la implementación de modelos mecanísticos, los cuales disminuyen la necesidad de mantener animales en experimentación intensiva, y en condiciones

ambientales específicas. Estos modelos estiman las emisiones de GEI basándose en procesos metabólicos, pero tienen que ser desarrollados, calibrados y validados usando información generada en México y relevante para el contexto ganadero nacional.

LA NECESIDAD DE CONTAR CON INVENTARIOS NACIONALES DE GEI PRECISOS PARA EL SECTOR AGROPECUARIO DE MÉXICO

El cambio climático influye sobre el aumento en la frecuencia de fenómenos climáticos extremos en México afectando a familias rurales, principalmente. La estela de destrucción e inundaciones dejada por la tormenta tropical “Cristóbal” tras su paso en junio de 2020 por el sur de México, es un signo tangible del impacto del cambio climático sobre la ganadería en México (Figura 5). Potreros inundados, ganado en el agua y forrajes perdidos, son muestra evidente de que la alteración de los ciclos de la naturaleza por la actividad antropogénica, tiene consecuencias graves sobre el bienestar económico de miles de personas en el sector rural. Por tales razones, es indispensable que el país cuente con inventarios precisos de emisiones de gases de efecto invernadero y estrategias eficientes de mitigación y adaptación al cambio climático. El Plan Nacional de Desarrollo 2018-2024 no contiene un instrumento de política pública para tal efecto, por lo que es necesario diseñarla y ponerla en operación, so pena de pagar el precio social y económico de no haber tomado las medidas suficientes para mitigar los efectos del cambio climático.



Figura 5. Potreros inundados y vacas en el agua en Tizimín, Yucatán (impacto de la tormenta tropical Cristóbal en junio de 2020 en el sur de México).

Para obtener una mejor respuesta de los ganaderos hacia las estrategias de mitigación, es recomendable que estas se combinen con acciones de adaptación, dada la experiencia previa del productor. Folke (2006) subraya la importancia del aprendizaje social e institucional,

los cuales surgen como respuesta a crisis anteriores. De esta forma, las crisis son el momento clave para crear oportunidades dirigidas a la autoorganización, incluido el fortalecimiento de las instituciones locales y la construcción de vínculos entre escalas y redes

de resolución de problemas (Berkes, 2007). En este sentido el IPCC (2007), menciona que la capacidad de adaptación es dinámica y se ve influenciada por la sociedad y la experiencia previa, así como por el capital humano y las instituciones, la gobernanza, los ingresos nacionales, la salud y la tecnología; influyen también en ella una multiplicidad de factores de estrés climáticos y no climáticos, así como las políticas de desarrollo de los gobiernos. Desde este enfoque, los cambios no se pueden realizar de forma aislada de factores físicos y sociales, ya que se encuentran interrelacionados. Los sistemas sociales dependen en gran medida de las variables biofísicas y éstas, a su vez, de las actividades humanas. Estos sistemas (ambientales y sociales) han evolucionado en conjunto, por lo cual se necesita un análisis profundo de su interacción, para mejorar la capacidad de pronosticar y responder al cambio (Folke, 2006). Por lo anterior, es importante reforzar la innovación después de sucesos clave para estimular el aprendizaje de cómo afrontarlo, fortaleciendo la capacidad de respuesta ante el cambio; un ejemplo muy claro de ello es toda innovación e investigación que se esta llevando a cabo para resolver la crisis humanitaria desatada por el virus SARS-CoV-2.

En México, se han realizado estudios acerca de la adopción de nuevas tecnologías, la respuesta de los ganaderos y cómo influye la experiencia obtenida por éstos para integrarla a sus unidades de producción pecuaria (UPP), como ejemplo, Zepeda-Cancino *et al.* (2016) realizaron un estudio sobre la adopción de sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi) en Chiapas, y encontraron que factores sociodemográficos, socioculturales, personales y de apoyos gubernamentales y académicos, influyen en la alta o baja adopción de nuevas tecnologías. Dentro de estos destacaron la edad (adultos mayores), grado de escolaridad (primaria), nivel de ingresos económicos (bajo), alto intermediarismo en la venta de los animales, la baja frecuencia con la que reciben apoyos gubernamentales y el conocimiento limitado, como factores que obstaculizan la adopción de SSPi. Lo anterior concuerda con lo mencionado por el IPCC (2007) y Clavero *et al.* (2006) en el sentido de que las limitaciones económicas, tecnológicas, cognitivas, políticas, institucionales y socio-culturales restringen tanto la aplicabilidad como la efectividad de las medidas de adaptación. Por otro lado, Villanueva *et al.* (2009) enfatizan la importancia del conocimiento local o adquirido de los ganaderos, con el cual reconocen la importancia económica, social y ambiental de los

sistemas silvopastoriles. Lo anterior demuestra que la educación e información es pieza clave para la adopción y el establecimiento de estrategias de mitigación. Resalta la importancia de la implementación de asesorías, talleres y cursos, para informar y capacitar al ganadero/productor, acerca del calentamiento global, el papel de la ganadería y el impacto que genera en el sistema socioambiental, las consecuencias a corto, mediano y largo plazo, para resaltar la importancia de su estudio, investigación, y el establecimiento de acciones de adaptación y estrategias de mitigación. Fomentar el aprendizaje y la colaboración entre las comunidades y las instituciones gubernamentales y académicas, para examinar los patrones de respuesta a las amenazas, permitiría conocer qué opciones de políticas son prometedoras (Folke, 2006). Un conocimiento limitado frena el proceso de adopción y el desarrollo de nuevas tecnologías, por lo tanto es una de las principales barreras para la adopción de las mismas (Clavero *et al.*, 2006; Zepeda-Cancino *et al.*, 2016).

Asimismo, el otorgar presupuestos suficientes, accesibles y estables, no temporales; incentivos económicos como pagos por servicios ambientales y de asistencia técnica para potencializar la adopción de nuevas tecnologías, política pública permanente dirigida a resolver los problemas de la cadena productiva, incrementaría la adopción y desarrollo de estrategias de mitigación (Aguirre-Ortega *et al.*, 2015).

HACIA UN CAMINO PARA EL DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DE LAS EMISIONES DE METANO POR FERMENTACIÓN ENTÉRICA DE BOVINOS EN MÉXICO

En México no existe una política pública para mitigar las emisiones de metano por fermentación entérica provenientes de la ganadería bovina. El principal programa de impulso ganadero actual: “Crédito Ganadero a la Palabra”, no contempla medidas de adaptación o de mitigación ante los impactos del cambio climático en el sub-sector ganadero nacional (Presidencia de la República; Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024). En este sentido, se necesita el apoyo y financiamiento de las autoridades del sector agropecuario hacia la investigación, así como la cooperación y el entendimiento de la problemática por parte de los ganaderos, para la actualización y mejoramiento de los inventarios nacionales, el desarrollo de estrategias de mitigación de metano de

forma sustentable, todo lo cual redunde en la producción de proteína de origen animal de alto valor biológico, de buena calidad y con el menor impacto posible sobre el medio ambiente.

La FAO (2018), propone tres formas para reducir sustancialmente las emisiones de GEI de la producción ganadera: 1) realizando mejoras de la productividad animal para reducir las intensidades de emisiones, es decir menos metano por kilogramo de leche o carne; 2) la captura de carbono a través de un manejo mejorado de los pastos; y 3) una mejor integración ganadera en la bio-economía circular; como el uso de subproductos de la agroindustria en la alimentación animal, el aumento de la productividad de los cultivos a través del uso del estiércol como fertilizante y la tracción animal, así como el uso de biodigestores para el tratamiento de excretas.

En México, en los últimos años se han dado importantes avances en la búsqueda de estrategias de mitigación de GEI en diversos sistemas ganaderos de diferentes zonas agroecológicas. Por ejemplo, ha tomado relevancia la utilización de recursos arbóreos locales para reducir la emisión de metano en diversas especies de rumiantes. Por ejemplo, la inclusión en la dieta animal del follaje de diversos árboles y arbustos con alto contenido de taninos como *Cosmos bipinnatus*, Cav., han mostrado su potencial para reducir las emisiones de CH₄ entérico. Hernández-Pineda *et al.* (2018) encontraron que con la adición de 0.5 kg de materia seca (MS) al día de *C. bipinnatus* se redujeron hasta en un 16% las emisiones de metano en vacas lecheras sin afectar el consumo de alimento ni la productividad animal; de igual forma, Apodaca-Martínez y Estrada-Montero (2018) en un estudio realizado con tres niveles de inclusión de *C. bipinnatus* (0, 5 y 10% del consumo de MS) en una dieta 50:50 forraje:concentrado, obtuvieron la mejor respuesta con el 5% de inclusión de la planta con respecto a la dieta control, lo que resultó en una disminución de 24% en el rendimiento de CH₄ en L kg⁻¹ de materia seca ingerida (MSI) en becerros Holstein. Así mismo, Vázquez-Carrillo *et al.* (2020) encontraron que la inclusión de 365 g MS día⁻¹ de *C. bipinnatus* o 100 g MS día⁻¹ de *Cymbopogon citratus* en dietas con proporción de 20:80 forraje:concentrado redujeron el rendimiento de CH₄ en g kg⁻¹ MSI en bovinos F1 productores de carne en un 27.6 y 32.5% respectivamente. Por otro lado, Benaouda (2018) evaluó el efecto de cuatro niveles crecientes de fibra de baja digestibilidad (FDN) en vacas lecheras y encontró que con el aumento de FDN el

rendimiento de metano disminuyó gradualmente (32.1, 28.1, 23.1 y 21.2 CH₄ L kg⁻¹ MSI, respectivamente), en dicho estudio se concluye que a mayor concentración de FDN en la dieta de vacas lecheras, es menor la digestibilidad de la MS y de la fibra, lo cual resulta en menor sustrato digestible en el rumen, lo que conlleva a una reducción en la emisión de metano, ya que disminuye el sustrato para la formación de CH₄ al haber una menor degradación de la fibra. En las regiones geoclimáticas tropicales del sureste de México, Piñero-Vázquez *et al.* (2017), en un estudio con niveles crecientes de *Leucaena leucocephala* (0, 20, 40, 60 y 80%) en una dieta a base de *Pennisetum purpureum*, encontraron que tanto la producción diaria de metano como el rendimiento en g kg⁻¹ MSI disminuyó desde un 29.5 hasta 63% en esta última variable con respecto a su dieta control; esta leguminosa tropical originaria de México ha mostrado ser eficaz en la reducción de las emisiones de metano por los rumiantes en regiones tropicales, y además incrementa la captura de carbono por el agroecosistema (Ku-Vera *et al.*, 2018).

El diseño de acciones y políticas para la mitigación de GEI y la adaptación de la ganadería al cambio climático debe contemplar varios aspectos, a fin de favorecer el desarrollo de sistemas de producción sostenibles. Los resultados anteriores evidencian el potencial de la inclusión de plantas taníferas, así como el uso de los sistemas silvopastoriles (Palmer, 2014) para contribuir hacia el desarrollo de una ganadería más amigable con el medio ambiente.

La implementación de las estrategias, descritas arriba, para mitigar las emisiones de metano por el ganado bovino, tienen que ser gestionadas de forma integral, con el fin de visualizar su escalamiento a nivel regional y posteriormente a nivel nacional. En las regiones tropicales, con sistemas extensivos, se pueden aprovechar gran cantidad de plantas forrajeras; para lograr una mejor calidad y digestibilidad de la dieta, lo cual se reflejaría en una mayor productividad animal y, por lo tanto, en una reducción en la intensidad de las emisiones de metano por fermentación entérica. Para ello, parte de la superficie ocupada para el pastoreo se puede dedicar a la implementación de bancos de leguminosas nativas, haciendo énfasis en sistemas agroforestales y/o agroecológicos (FAO, 2019).

La inclusión de follaje de plantas taníferas en la dieta, puede ser utilizado en un amplio abanico de sistemas ganaderos del país, de tal forma que se puede asegurar el consumo de la planta por los animales y tener beneficios productivos y ambientales. Para esto,

es necesario contemplar diversos factores, que permitan asegurar la distribución y manejo de la planta en las UPP y así, obtener una respuesta animal favorable, en términos productivos, pero también ambientales. Inicialmente, se deberá de contar con superficies con las condiciones adecuadas de temperatura, humedad, riego, entre otros factores, que permitan el crecimiento y desarrollo de las plantas taníferas, con la finalidad de asegurar el abastecimiento a las UPP. De igual forma, el corte de la planta debe ser en una etapa fenológica adecuada y el manejo posterior a su cosecha debe de ser cuidado con el fin de evitar la pérdida de los taninos u otros metabolitos secundarios de las plantas de interés. Dentro de los factores y recomendaciones a considerar, acorde a los estudios previamente expuestos, un aspecto que destaca es el secado bajo sombra de la planta con las condiciones apropiadas de temperatura, humedad y ventilación; todo lo anterior para asegurar un porcentaje de MS adecuado y concentración de metabolitos secundarios que se mantengan viables para que lleven a cabo su efecto antimetanogénico en el rumen del animal, una vez ingerida por éste. Posteriormente, es necesario realizar un mezclado adecuado de la planta tanífera/saponífera con su dieta, que asegure de esta forma el consumo diario de la planta con propiedades antimetanogénicas. También, es importante establecer la cantidad mínima necesaria de inclusión de la planta en la dieta animal y el periodo de consumo, esto para obtener resultados favorables en los bovinos, traducidos en una reducción en el largo plazo de la emisión de metano por fermentación entérica y en la obtención de productos de alta calidad como carne y leche. Sin embargo, es importante establecer con claridad que las posibilidades de implementación de estas estrategias dependerán del financiamiento y disponibilidad de recursos como son las tierras para la siembra de las plantas en cuestión; también de la capacitación técnica de los productores y disponibilidad de maquinaria para preparar las plantas con las características adecuadas, mediante el secado, el molido y la mezcla de las plantas taníferas con la dieta. La distribución de la plantas a nivel regional y nacional se plantea también como un reto importante.

CONCLUSIONES

Lo anteriormente expuesto demuestra que existen soluciones que se pueden llegar a adaptar al contexto regional y nacional, de tal forma que puedan ser aplicadas en las UPP. Sin embargo, se requieren

implementar a nivel nacional, principalmente en las grandes explotaciones pecuarias, haciendo visible la necesidad del trabajo interdisciplinario, para contemplar los diferentes escenarios que se puedan presentar en el desarrollo y la implementación de las acciones de adaptación y estrategias de mitigación de la emisión de GEI en el país.

Finalmente, para que las acciones de adaptación y mitigación se lleven a cabo es necesario, en principio, que las políticas nacionales respalden su necesidad. Por ello, se considera importante se contemplen en los planes y programas nacionales y a la par se les asigne el financiamiento enfocado a investigaciones que conlleven a la generación de información respecto a el potencial antimetanogénico de plantas taníferas/saponíferas nativas de México, así como pruebas de comportamiento en bovinos, no sólo para analizar su potencial para mitigar las emisiones de metano por fermentación entérica, sino evaluar que no afecten el comportamiento productivo y la salud de los animales. Asimismo, se requiere de talleres y cursos dirigidos a los ganaderos, con la finalidad de concientizarlos en este contexto, es sustancial, la implementación conjunta de programas con financiamiento que permitan el desarrollo de éstas estrategias, de tal forma que se facilite la adopción e implementación de las medidas mencionadas. Se necesita del genuino interés y compromiso del liderazgo pecuario federal de México, para que los inventarios y estudios de metano entérico bovino obtenidos a la fecha en los laboratorios de investigación de las universidades públicas, se traduzcan por medio de políticas públicas, en acciones concretas de mitigación en las diversas unidades ganaderas de México.

LITERATURA CITADA

- Aguirre-Ortega, J., J. Bonilla-Cárdenas, F. Carrillo-Díaz, A. Herrera-Corredor, F. Escalera-Valente, M. Rivas-Jacobo y S. Martínez-González. 2015. Alternativas para ganadería ante el cambio climático en Nayarit. *Abanico Veterinario* 5:28-37.
- Arceo-Castillo, J., M. Montoya-Flores, L. T. Molina, A. Piñero-Vázquez, C. Aguilar-Pérez, A. J. Ayala-Burgos, F. J. Sánchez, O. A. Castelán-Ortega, P. Quintana-Owen and J. Ku-Vera. 2019. Effect of the volume of methane released into respiration chambers on full system methane recovery. *Animal Feed Science and Technology* 249:54-61.
- Apodaca-Martínez, G. y B. P. Estrada-Montero. 2018. Efecto de *Cosmos bipinnatus* (planta tanífera) sobre la producción de metano ruminal en becerros de raza Holstein. Tesis de Li-

- cenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México. México. 34 p.
- Benaouda, M., M. González, L. T. Molina y O. A. Castelán. 2017. Estado de la investigación sobre emisiones de metano entérico y estrategias de mitigación en América Latina. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8:965-974.
- Benaouda, M. 2018. Efecto de la calidad de la dieta y el nivel de la fibra en la cinética de digestión y la producción de metano en bovino lechero. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma del Estado de México. México. 95 p.
- Berkes, F. 2007. Understanding uncertainty and reducing vulnerability: lessons from resilience thinking. *Natural Hazards* 41:283-295.
- Canul, S. C. J., A. T. Piñeiro, J. I. Arceo, J. A. Alayón, A. J. Ayala, C. F. Aguilar, F. J. Solorio, O. A. Castelán, M. Lachica, P. Quintana and J. C. Ku V. 2017. Design and construction of low-cost respiration chambers for ruminal methane measurements in ruminants. *Revista Mexicana Ciencias Pecuarias* 8:185-191.
- Castelán-Ortega, O. A., J. C. Ku-Vera, L. T. Molina, P. E. Pedraza-Beltrán, J. Canúl-Solis, A. Piñeiro-Vázquez, G. Hernández-Pineda and M. Benaouda. 2015. First in vivo Measurements of Methane Emissions from Ruminant Livestock Enteric Fermentation in Mexico Using Respiration Chambers. *Proceedings of the American Geophysical Union, San Francisco California*. <https://agu.confex.com/agu/fm15/webprogram/Paper80839.html>
- Castelán-Ortega, O. A., J. C. Ku-Vera y J. Estrada-Flores. 2014. Modeling methane emissions and methane inventories for cattle production systems in Mexico. *Atmósfera* 27:185-191.
- Castelán-Ortega, O. A., J. C. Ku-Vera, S. V. Castelán-Jaime, G. S. Hernández-Pineda, M. Benaouda, J. C. Ángeles-Hernández, A. R. Praga-Ayala and H. Montelongo-Pérez. 2018. Inventory of enteric methane emissions by cattle in the dry-land regions of México using the IPCC 2006 Tier 2 main method. Herbivore nutrition supporting sustainable intensification and agro-ecological approaches. *Proceedings of the 10th International Symposium on the Nutrition of Herbivores ISNH 2018. Advances in Animal Biosciences* 9:739 p.
- Castelán-Ortega, O. A., J. C. Ku-Vera, J. C. Ángeles-Hernández, M. Benaouda, G. S. Hernández-Pineda, T. L. Molina, L. Ramírez-Cancino, S.V. Castelán-Jaime, A. R. Praga-Ayala, F. Lazos-Balbuena, H. Montelongo-Pérez, M. González-Ronquillo, M. F. Vázquez-Carrillo, E. Cardoso-Gutiérrez, E. Aranda-Aguirre, D. Villegas-Estrada, A. P. Guadarrama-López y G. Apodaca-Martínez. 2019. Ganadería. Capítulo 22. pp. 492-528. En: Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez (eds.). 2019. Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. ISBN: 978-607-96490-7-4.
- Castelán-Ortega, O. A., P. E. Pedraza-Beltrán, G. S. Hernández-Pineda, M. Benaouda, M. González-Ronquillo, L. T. Molina, H. Montelongo-Pérez and M. F. Vázquez-Carrillo. 2020. Construction and operation of a respiration chamber of the head-box type for methane measurement from cattle. *Animals Basel* 10(2):227.
- Cersosimo, L. M. and A. G. Wrigh. 2015. Estimation Methodologies for enteric methane emission in ruminants. pp. 209-220. *In: Sejian V., J. Gaughan, L. Baumgard, C. Prasad (eds.). 2015. Climate Change Impact of Livestock: Adaptation and Mitigation*. V. Springer, India. ISBN: 978-81-322-2264-4.
- Clavero, T. y J. Suarez. 2006. Limitaciones en la adopción de los sistemas silvopastoriles en México. *Pastos y Forrajes* 29:1-6.
- Eckard, R. J., C. Grainger and C. A. M. de Klein. 2010. Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review. *Livestock Science* 130:47-56.
- FAO. 2006. Las repercusiones del ganado en el medio ambiente. El desafío estriba en reconciliar dos demandas: la de productos animales y la de servicios ambientales. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, México. <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0612sp1.htm> (Consulta: febrero 03, 2020).
- FAO. 2018. Soluciones ganaderas para combatir el cambio climático. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, México. <http://www.fao.org/3/I8098ES/I8098es.pdf> (Consulta: mayo 11, 2020)
- FAO. 2019. Agroecological and other innovative approaches. HLPE Report 14, Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO, Rome. 162 p.
- Folke, C. 2006. Resilience: The emergence of a perspective for socio-ecological systems analyses. *Global Environmental Change* 16:253-267.
- Hernández-Pineda, G. S., P. E. Pedraza-Beltrán, M. Benaouda, G. J. M. Palma, N. F. Avilés, L. T. Molina and O. A. Castelán-Ortega. 2018. *Pithecellobium dulce, Tagetes erecta and Cosmos bipinnatus* on reducing enteric methane emission by dairy cows. *Ciencia Rural* DOI:10.1590/0103-8478cr20170484.
- Hook, S. E., A. D. Wright and B. W. McBride. 2010. Methanogens: methane producers of the rumen and mitigation strategies. *Archaea* 30:945785. DOI:10.1155/2010/945785.
- Hristov, A. N., M. Harper, R. Meinen, R. Day, J. Lopes, T. Ott, A. Venkatesh and C. A. Randles. 2017. Discrepancies and uncertainties in bottom-up gridded inventories of livestock methane emissions for the contiguous United States. *Environ. Sci. Technol.* 51:13668–13677.
- IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Pro-

- gramme Intergovernmental Panel on Climate Change, Japan. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html> (Consulta febrero 03, 2020)
- IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Equipo de redacción principal: Pachauri, R. K. y Reisinger, A. (directores de la publicación). IPCC, Ginebra, Suiza. ISBN 92-9169-322-7.
- Johnson, K. A. and D. E. Johnson. 1995. Methane emission from cattle. *Journal of Animal Science* 13:2483-2492.
- Johnson, K., M. Huylar, H. Westberg, B. Lamb and P. Zimmerman. 1994. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF₆ tracer technique. *Environmental Science & Technology* 28:359-362.
- Karimi-Zindashty, Y., J. D. Macdonald, R. Desjardins and D. E. Worth. 2012. Sources of uncertainty in the IPCC Tier 2 Canadian livestock model. *The Journal of Agricultural Science* 150:1-14.
- Ku-Vera J, C., S. S. Valencia-Salazar, A. T. Piñeiro-Vázquez, I. C. Molina-Botero, J. Arroyave-Jaramillo, M. D. Montoya-Flores, F. J. Lazos-Balbuena, J. R. Canul-Solis, J. I. Arceo-Castillo, L. Ramírez-Cancino, C. S. Escobar-Restrepo, J. A. Alayón-Gamboa, G. Jiménez-Ferrer, L. M. Zavala-Escalante, O. A. Castelán-Ortega, P. Quintana-Owen, A. J. Ayala-Burgos, C. F. Aguilar-Pérez and F. J. Solorio-Sánchez. 2018. Determination of methane yield in cattle fed tropical grasses as measured in open-circuit respiration chambers. *Agricultural and Forest Meteorology* 258:3-7.
- Ku-Vera, J. C., A. Piñeiro Vázquez, S. S. Valencia Salazar, F. J. Solorio Sánchez, C. F. Aguilar Pérez, A. J. Ayala Burgos y L. Ramírez Avilés. 2018. Mitigación de las emisiones de metano entérico en rumiantes alimentados con leguminosas tropicales. pp. 303-312. En: Herrera, C. J. A., A. J. Chay-Canul, F. Casanova-Lugo, A. Piñeiro-Vázquez, L. Márquez-Benavides, E. Santillán-Ferreyra, J. Arce-Menocal (eds.). 2018. Avances de la investigación sobre producción animal y seguridad alimentaria en México. Morelia, Michoacán, México. ISBN: 978-607-542-022-6.
- Ku-Vera, J. C., O. A. Castelán-Ortega, F. Galindo-Maldonado, J. Arango, N. Chirinda, R. Jiménez-Ocampo, S. Valencia-Salazar, E. J. Flores-Santiago, M. D. Montoya-Flores, I. C. Molina-Botero, A. T. Piñeiro-Vázquez, J. I. Arceo-Castillo, C. F. Aguilar-Pérez, L. Ramírez-Áviles and F. J. Solorio-Sánchez. 2020. Review: Strategies for enteric methane mitigation in cattle fed tropical forages. *Animal* 14:S453-S463. DOI:10.1017/S1751731120001780
- Marques, G. M., M. G. L. C. Teixeira, S. T. Tiago, T. Sousa, T. G. Morais, F. M. T. Teixeira and T. Domingos. 2020. Minimizing direct greenhouse gas emissions in livestock production: The need for a metabolic theory. *Ecological Modelling* 434:109259.
- Milne, A. E., M. J. Glendining, P. Bellamy, T. Misselbrook, S. L. Gilhespy, M. Rivas-Casado, A. Hulin, M. Van Oijen and A. P. Whitmore. 2014. Analysis of uncertainties in the estimates of nitrous oxide and methane emissions in the UK's greenhouse gas inventory for agriculture. *Atmospheric Environment* 82:94-105.
- Moss, A. R. and D. I. Givens. 2002. The effect of supplementing grass silage with soya bean meal on digestibility, in sacco degradability, rumen fermentation and methane production in sheep. *Animal Feed Science and Technology* 97:127-143.
- Padrón Ganadero Nacional. 2016. SIAP. 2019. Población ganadera. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). México.
- Palmer, L. 2014. A new climate for grazing livestock. *Nature Climate Change* 4:321-323.
- Piñeiro-Vázquez, A. T., J. R. Canul-Solis, J. A. Alayón-Gamboa, A. J. Chay-Canul, A. J. Ayala-Burgos, F. J. Solorio-Sánchez, C. F. Aguilar-Pérez and J. Ku-Vera. 2017. Energy utilization, nitrogen balance and microbial protein supply in cattle fed *Penisetum purpureum* and condensed tannins. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 101:159-169.
- Sejian, V., V. P. Maurya and S. M. K. Naqvi. 2011. Effect of thermal, nutritional and combined (thermal and nutritional) stresses on growth and reproductive performance of Malpura ewes under semi-arid tropical environment. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 95:252-258.
- https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/516353/Inventario_2018_Bovinos.pdf (Consultado: Mayo 18, 2020).
- Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales and C. de-Haan. 2006. *Livestock's long shadow*. FAO. Rome. 416 p.
- Tukey, J. W. 1977. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley. Reading, Massachusetts. 717 p.
- Valenzuela, M. M., M. Espinosa, E. Virgüez and E. Behrentz. 2017. Uncertainty of Greenhouse Gas Emission Models: A case in Colombia's Transport Sector. *Transportation Research Procedia* 25:4606-4622.
- Vázquez-Carrillo, M. F., H. D. Montelongo-Pérez, M. González-Ronquillo, E. Castillo-Gallegos, O. A. Castelán-Ortega. 2020. Effects of Three Herbs on Methane Emissions from Beef Cattle. *Animals* 10:1671.
- Villanueva, C., I. Muhammad, F. Casasola, N. Rios y C. Sepúlveda. 2009. Sistemas silvopastoriles: una herramienta para la adaptación al cambio climático en las fincas ganaderas en América Central. pp. 103-125. En: Sepúlveda, C. y I. Muhammad (eds.). 2009. Políticas y sistemas de incentivos para el fomento y adopción de buenas prácticas agrícolas como una medida de adaptación al cambio climático en América Central. Turrialba, C.R.: CATIE. ISBN: 978-9977-57-485-1.

- WRI. 2017. Friedrich, M. J. and A. Pickens. This Interactive Chart Explains World's Top 10 Emitters, and How They've Changed. World Resources Institute (WRI). <https://www.wri.org/blog/2017/04/interactive-chart-explains-worlds-top-10-emitters-and-how-theyve-changed> (Consultado: Mayo 11, 2020).
- Zepeda-Cancino, R. M., M. E. Velasco-Zebadúa, J. Nahed Toral, A. Hernández-Garay, J. y J. Martínez-Tinajero. 2016. Adopción de sistemas silvopastoriles y contexto sociocultural de los productores: apoyos y limitantes. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 7:471-488.

PERSPECTIVAS DE DISMINUCIÓN DE EMISIONES DE CARBONO EN MÉXICO POR EL USO DE LA BIOENERGÍA: PANORAMA ACTUAL

PROSPECTS FOR REDUCING CARBON EMISSIONS IN MEXICO THROUGH THE USE OF BIOENERGY: CURRENT OUTLOOK

René David Martínez-Bravo^{1†} y Omar Masera¹

¹ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, UNAM Campus Morelia, México.

[†] Autor para correspondencia: redamar@cieco.unam.mx

RESUMEN

Al provenir de los sumideros/reservorios de la biósfera, la bioenergía participa en el ciclo natural del carbono. Es una pieza clave para la descarbonización del sector energético y para la mitigación del cambio climático global. Al ser derivada de diferentes fuentes de biomasa, se producen bioenergéticos sólidos, líquidos y gaseosos. En este trabajo se realiza una revisión del papel de la bioenergía en la mitigación de gases de efecto invernadero en México. La aportación actual de la bioenergía en la matriz energética de México es de aproximadamente el 4.2% representada por leña y bagazo de caña; sin embargo, los sectores doméstico e industrial pueden aumentar su uso y llegar a ser ejemplos exitosos de mitigación de CO₂, si se acompañan de tecnologías de transformación eficientes. A nivel nacional, se cuenta con biomasa forestal suficiente para generar entre 1135 y 1923 PJ año⁻¹ en tareas térmicas, principalmente (mitigación de hasta 84.4 MtonCO₂ año⁻¹). La mitigación acumulada del uso de leña asociada a tecnología eficiente y al gas LP puede alcanzar los 126.3 Mt CO₂e al 2030. La reducción de emisiones de CO₂ de los biocombustibles depende en gran medida de la tecnología de transformación. A corto plazo, los biocombustibles sólidos presentan el mayor potencial de penetración en el mercado nacional; los líquidos y gaseosos aún enfrentan desafíos. La principal barrera del uso de los bioenergéticos *versus* el energético a sustituir, es demostrar que son una opción viable y sostenible de mitigación. Otros retos de los biocombustibles son de índole económico y de aceptación social, también requieren de un esquema favorable de políticas públicas en las que se muestren como una alternativa para la descarbonización del sector energético. Para superar los retos, es imprescindible validar los inventarios de provisión de materia prima y mejorar los escenarios de mitigación.

Palabras Clave: *mitigación; biocombustibles; política energética; recursos biomásicos.*

ABSTRACT

Coming from the biosphere's sinks/reservoirs, bioenergy participates in the natural carbon cycle. It is a key part of the decarbonization of the energy sector and the mitigation of global climate change. As it is derived from different sources of biomass, solid, liquid and gaseous bioenergy is produced. In this work, a review of the role of bioenergy in the mitigation of greenhouse gases in Mexico is carried out. The current contribution of bioenergy in Mexico's energy matrix is approximately 4.2% represented by firewood and bagasse; however, the domestic and industrial sectors can increase its use, and become successful examples of CO₂ mitigation if accompanied by efficient transformation technologies. At the national level, there is enough forest biomass to generate between 1135 and 1923 PJ year⁻¹, mainly for thermal purposes (mitigation of up to 84.4 MtonCO₂ year⁻¹). The accumulated mitigation of wood use associated with efficient technology and LP gas can reach 126.3 Mt CO₂e by 2030. The reduction of CO₂ emissions from biofuels depends largely on the transformation technology. In the short term, solid biofuels present the greatest potential for domestic market penetration; liquid and gaseous biofuels still face

challenges. The main barrier to the use of bioenergy versus energy to be substituted is to demonstrate that it is a viable and sustainable mitigation option. Other challenges of biofuels are of an economic nature and of social acceptance. They also require a favorable public policy framework in which they are shown to be an alternative for the decarbonization of the energy sector. To overcome these challenges, it is essential to validate inventories of raw material supply and improve mitigation scenarios.

Index words: mitigation; biofuels; energy policy; biomass resources.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional en México lleva ligado un aumento en la demanda y el consumo de energía (INEGI 2015; SENER 2017). La fuente principal de energía nacional está basada en los combustibles fósiles (García *et al.*, 2013; Ferrari *et al.*, 2020). La bioenergía es una alternativa para la diversificación energética en conjunto con las energías renovables, además de proveer beneficios ambientales (Islas y Martínez, 2010).

En el esquema de la sustentabilidad, la bioenergía es un recurso renovable a largo plazo, construida por diversos recursos biomásicos como madera y sus residuos, residuos agroindustriales, animales y sólidos urbanos principalmente (García-Bustamante y Masera, 2016). A diferencia de otros energéticos, la bioenergía es la única que puede sustituir las emisiones de los combustibles fósiles y contribuir de manera efectiva a la descarbonización del sector energético si su producción genera menos CO₂ (Arvizu *et al.*, 2011; REN21, 2019) porque está vinculada con el ciclo biogeoquímico del carbono (Figura 1).

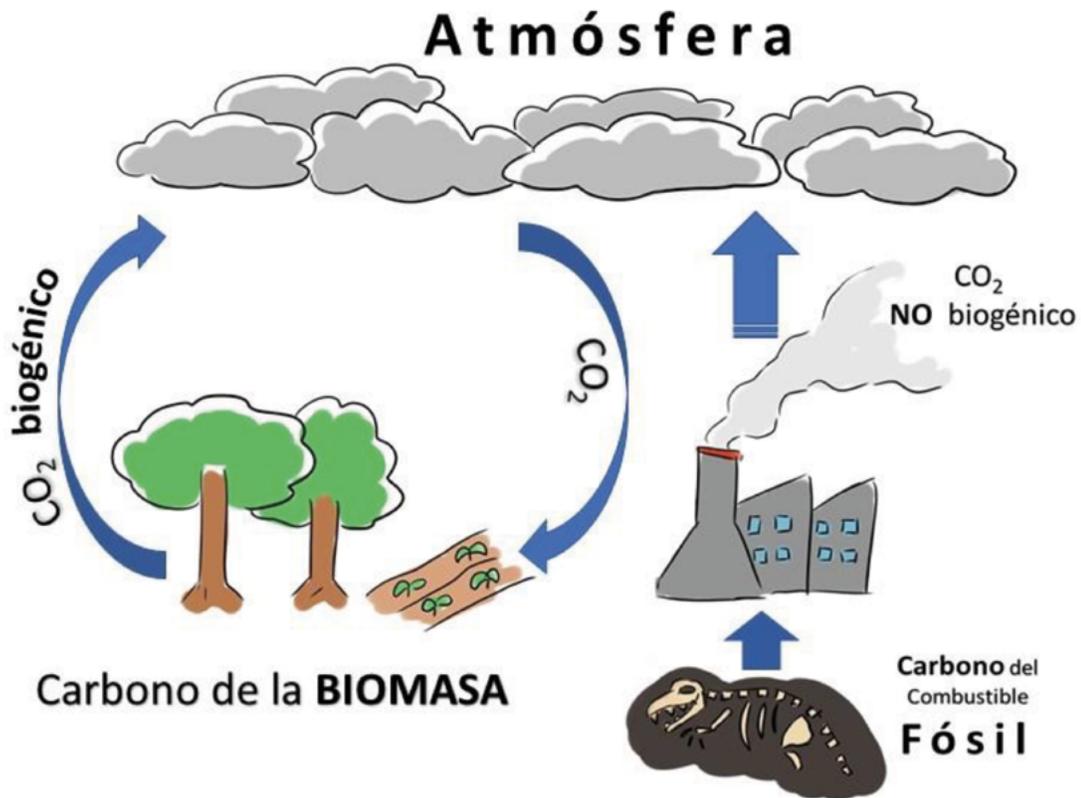


Figura 1. Ciclo del carbono proveniente de la bioenergía y emisiones de carbono derivadas del combustible fósil. Elaborado por Emilian Martínez, modificado de NCASI (2010).

Los biocombustibles pueden jugar un papel muy relevante en la estrategia de mitigación de emisiones de CO₂ sobre todo aquellos provenientes del sector forestal. Por citar una cifra, la FAO en su informe 2018 confirma que los bosques del mundo actúan como sumideros de carbono, con una captura cercana a 2000 GtC por año. En este sentido, la bioenergía proveniente del manejo forestal sustentable promueve las emisiones evitadas, reduce la deforestación y la degradación forestal (Masera, 2006; Johnson *et al.*, 2009). Aunque la participación de la bioenergía en la matriz energética global es aún incipiente; el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por su siglas en inglés) coincide en que los diferentes biocombustibles tienen un escenario prometedor en el sector energético para mitigar las emisiones de CO₂ en el mediano plazo (Chum *et al.*, 2011).

A nivel global, el Renewables Global Status Report (REN21, 2018) indica que la biomasa contribuye de manera significativa con la demanda de energía final, provee cerca del 13% del consumo mundial de energía, del cual el 8% se ubica en el sector residencial para usos térmicos tradicionales y el otro 5% se consume en las nuevas aplicaciones de la bioenergía (Chum *et al.*, 2011). El panorama energético demuestra que uno de los sectores fuertes en el uso de bioenergía es el residencial (Masera, 2006); aunque tienen una menor participación en la demanda final de la energía en las áreas urbanas, donde proporcionan el 4% de la demanda de calor en la industria, el 2% de la producción de electricidad y el 3% de la energía en el transporte (Zamarripa, 2011; SENER, 2014; Ayala-Medivil y Sandoval, 2018).

El uso de la bioenergía enfrenta un doble desafío para la mitigación del CO₂. Por el lado ambiental, se debe mostrar que es una opción real de reducción de emisiones de carbono, sostenible y por debajo de las que provienen de energéticos fósiles y, por el lado económico, se debe probar que es capaz de reemplazar a la energía derivada del petróleo, con precios

competitivos. Aunado a lo anterior, no se debe perder de vista que la tecnología de transformación para aprovechar eficientemente la bioenergía juega un papel determinante y debe ser específica para cada uso final de la bioenergía.

El propósito de este trabajo es presentar, con la información disponible hasta el momento, una síntesis del panorama actual de los bioenergéticos en México. El documento analiza con cierto detalle la pertinencia de la bioenergía, en términos de: la mitigación de dióxido de carbono, de la urgencia de aumentar su oferta dentro de las energías renovables y, de la carencia de un esquema de políticas públicas que promuevan su uso, desarrollo y competitividad en el mercado nacional.

BIOENERGÍA Y BIOCMBUSTIBLES

La bioenergía está representada por diferentes tipos de biocombustibles, estos son sólidos, líquidos y gaseosos. Las fuentes de biomasa para producirlos son muy diversas; así también, los procesos para su producción son diferentes: los térmicos, la pirólisis, la gasificación y los procesos bioquímicos de la biomasa (Figura 2); este último con una fase de pretratamiento que involucra procesos enzimáticos (Ayala-Medivil y Sandoval, 2018).

En términos del uso sustentable de la bioenergía, varios autores enfatizan que la materia prima para producirla provenga en primer grado, de residuos de diferentes tipos, tales como: los de aprovechamientos forestales, de aserrío, agrícolas, pecuarios y de sólidos urbanos y, en segundo lugar, aquella que se obtenga de plantaciones y cultivos dedicados *ex profeso* (Cherubini *et al.*, 2009; McKechnie *et al.*, 2011; Rieglhaupt, 2016). Adicionalmente, al reciclar los residuos biomásicos se evita su descomposición y dejan de ser emisores directos de CH₄ y NO_x, gases que contribuyen al calentamiento global (Figura 2).

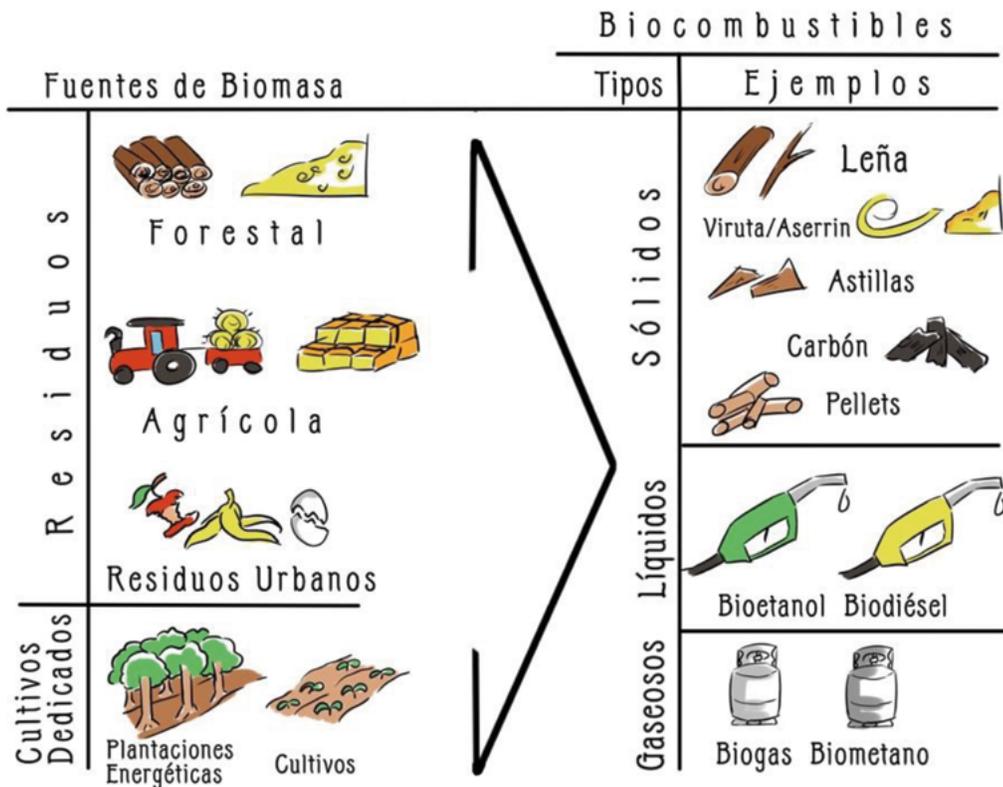


Figura 2. Fuentes de biomasa para la producción de biocombustibles. Elaborado por Emilian Martínez.

Los residuos de biomasa forestal al ser productos secundarios en la industria se clasifican como subproductos, esta condición permite vincular la producción de energía con las fuentes primarias de biomasa en bosques, selvas y plantaciones o cultivos para energía (Riegelhaupt, 2016; Ayala-Mendivil y Sandoval, 2018). De la discusión anterior se desprende que son los residuos de la industria forestal los que tienen el mayor potencial de aplicación como biocombustibles, en el corto y mediano plazo, para sustituir las tareas térmicas que realizan los derivados del petróleo. Asimismo, será posible sumar los residuos agroindustriales y de cultivos para producción de biocombustibles, una vez que se superen algunas barreras sociales y de política pública (Masera, 2006; REMBIO, 2011).

La lista de biocombustibles sólidos (BCS) incluye la leña de monte y la leña industrial (los residuos de madera como las astillas y derivados del aserrío de la madera), conocidos como tradicionales. Por otro lado, están los pellets y briquetas, que son resultado del procesamiento mecánico de residuos agrícolas, del manejo forestal, de la industria de aserrío y de algunos residuos urbanos; y finalmente está el carbón vegetal, el cual es producto de la pirólisis de la madera (Tauro *et al.*, 2018a).

Los biocombustibles líquidos (BCL) se refieren al etanol, al biodiesel y la bioturbosina; se producen por medio de procesos bioquímicos y transformaciones catalíticas de residuos agrícolas, cultivos de oleaginosas, grasas animales, residuos celulósicos, entre otros (Aleman-Nava *et al.*, 2015; Ayala-Mendivil y Sandoval, 2018). Debido al grado de procesamiento que requiere su producción, se clasifican como *biocombustibles avanzados o de segunda generación* (REMBIO, 2011).

El tercer grupo de bioenergéticos lo conforman los biocombustibles gaseosos (BCG), cuya síntesis involucra complejos procesos bioquímicos o termoquímicos, que dan como resultado la producción de biogás y biometano, principalmente; se incluye también la obtención de gas de síntesis. Con base en el proceso de transformación, se pueden definir *biocombustibles de primera, segunda y tercera generación* (García-Bustamante y Masera, 2016).

La Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO, 2011), precisa que la bioenergía tiene las siguientes prerrogativas: a) es almacenable en la biomasa, con lo que supera la barrera de la intermitencia de otras fuentes renovables de energía, b) satisface la mayor parte de los usos finales, como renovable puede sustituir a la

mayoría de los combustibles fósiles en casi todas las aplicaciones y finalidades; c) es escalable, debido a la diversidad de fuentes y equipos, puede satisfacer bajas y altas potencias, acorde con la escala de necesidad.

BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO

En México, aun es poca la participación de la biomasa en la matriz energética. Dentro del grupo de las energías renovables, los biocombustibles apenas aportaron del 3.3% al 5.7% en el periodo del 2007 al 2018 (SENER, 2009; 2019); siendo la leña para usos tradicionales la que representa el mayor porcentaje por encima del bagazo de caña utilizado para la cogeneración. De acuerdo con el gran potencial que tiene para su desarrollo (REMBIO, 2011), es importante que la política nacional, de un impulso a la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (DOF, 2008).

Con base en la disponibilidad de biomasa, la fuente con mayor potencial a nivel nacional son los aprovechamientos forestales y de la industria de la madera (Riegelhaupt, 2016; Tauro, 2018) Debido a la cantidad de información disponible y el nivel de participación de los BCS como energéticos a

nivel nacional, este trabajo se centra en este tipo de bioenergéticos, sin dejar de atender el panorama general de los BCL y BCG.

La CONAFOR (2019) estima la superficie forestal de México en 64.2 millones de hectáreas, lo que equivale al 46.6% del territorio nacional (Figura 3). El potencial de generación de energía a partir de la biomasa de bosques y selvas naturales en el país se estima entre 1135 y 1923 PJ año⁻¹ (REMBIO, 2011; García *et al.*, 2016;), con un promedio de 1515 PJ año⁻¹ de energía térmica (García *et al.*, 2013). Con ella, se podría reemplazar parcialmente a los energéticos fósiles y sustituir sus emisiones de CO₂ por emisiones biogénicas.

Johnson *et al.* (2009) señalan que la producción de calor y electricidad a partir de BCS podría alcanzar una mitigación de 25 Mt CO₂ año⁻¹. Los valores dejan ver el alto potencial de mitigación que puede lograrse mediante la aplicación criterios de sustentabilidad al manejo forestal con implicaciones en el ciclo del carbono forestal. Respecto a los BCS también hay prioridades de investigación, y desarrollo como son la necesidad de analizar, en forma integral y comparada, los potenciales de producción sostenible, de mitigación de emisiones de GEI, de innovación tecnológica, de generación de empleos y del valor económico (Arias, 2018).



Figura 3. Distribución de bosques y selvas en el territorio nacional. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI

En el contexto de la investigación sobre los biocombustibles, el CONACYT y la SENER en 2016 impulsaron la creación de fondos de investigación para formar el Centro Mexicano de Innovación en Energía CEMIE-BIO, conformado por clústeres de biocombustibles sólidos, gaseosos y líquidos, cuyo objetivo común consiste en ser elementos importantes en la transición energética de México y descarbonizar la economía del sector. Como proyecto antecedente al CEMIE-Bio, en 2013 el proyecto “Estudio de viabilidad, barreras e impactos de aprovechamiento de residuos forestales para energía renovable” ENEFOR evaluó la disponibilidad de residuos de la industria forestal

y planteó la posibilidad de fabricar biocombustibles o transportadores energéticos Forestales (TEF) a nivel de empresa, demostrando que es factible producir y comercializar TEF a nivel nacional porque hay residuos forestales suficientes (CONACYT-SENER, 2016). Sobre los impactos ambientales, energéticos y sociales de los TEF para México, resalta la alta capacidad de los biocombustibles para producir energía renovable con pocos insumos fósiles. También, los bajos valores de emisiones de GEI en el ciclo de vida de los TEF confirman que pueden sustituir a los combustibles fósiles (Figura 4).

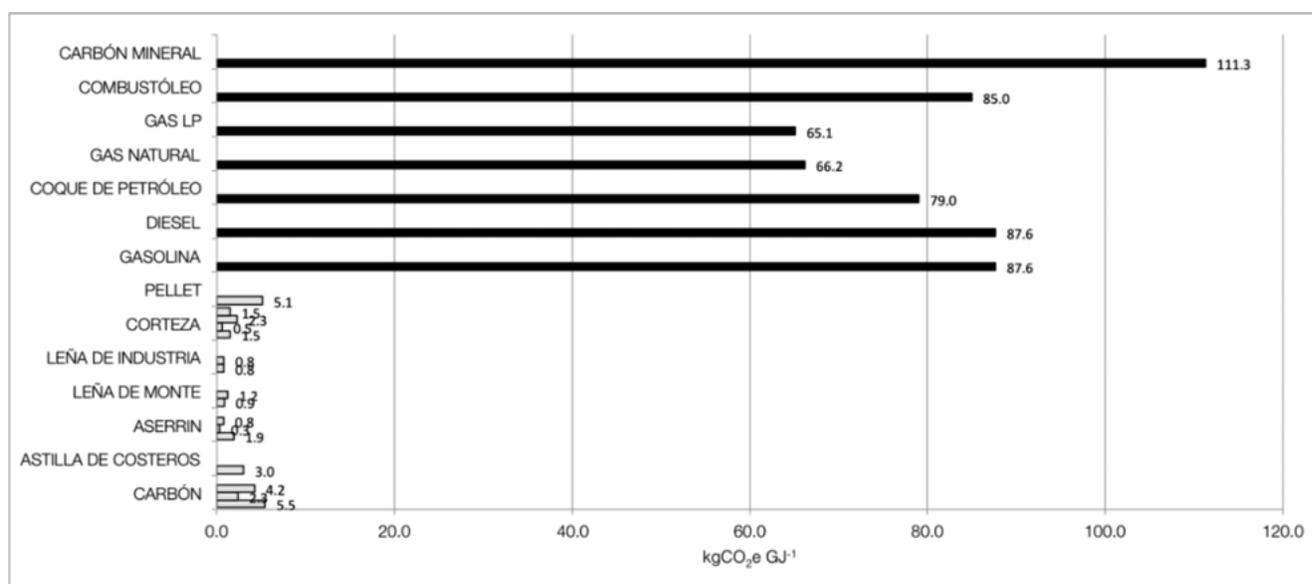


Figura 4. Emisiones de gases de efecto invernadero de los TEF y de combustibles fósiles (en kgCO₂e GJ⁻¹). Fuente: para los TEF, datos propios y, para los combustibles fósiles, de la Comisión Europea (2015) y el INECC (2014).

Biocombustibles sólidos

Leña

La leña y carbón vegetal son los principales BCS provenientes del sector forestal. Su aplicación es térmica para generar calor, principalmente, de uso doméstico y en la pequeña industria. Serrano-Medrano *et al.* (2014) estiman que aproximadamente 22.5 millones de personas localizadas en zonas rurales y periurbanas utilizan la leña como fuente de energía para cocinar, lo que representa una demanda anual de 72 Kt año⁻¹ de biomasa (Figura 5). La leña representa más del 50% de la biomasa utilizada como bioenergía y las cifras de consumo superan tres veces el volumen autorizado en los aprovechamientos forestales (Masera *et al.*, 2015; Riegelhaupt, 2016); es decir, el sector residencial es

el consumidor más importante de este biocombustible (Serrano-Medrano *et al.*, 2018).

En una vivienda promedio, la mayor parte de la leña se quema en un fogón abierto o de tres piedras (FTP) (IEA, 2017), lo que resulta en emisiones de diversos contaminantes asociados a la combustión incompleta, particularmente carbono negro (CN), metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), entre otros. Esta forma tradicional de uso de los fogones, además de ineficiente, causa importantes problemas ambientales, de salud y socioeconómicos (Masera *et al.*, 2015). Una medida de mitigación que soluciona todos los problemas citados es la adopción de estufas de leña con cámara de combustión cerrada y chimenea para alejar los humos del contacto humano (Berrueta *et al.*, 2008; Díaz *et al.*, 2011).

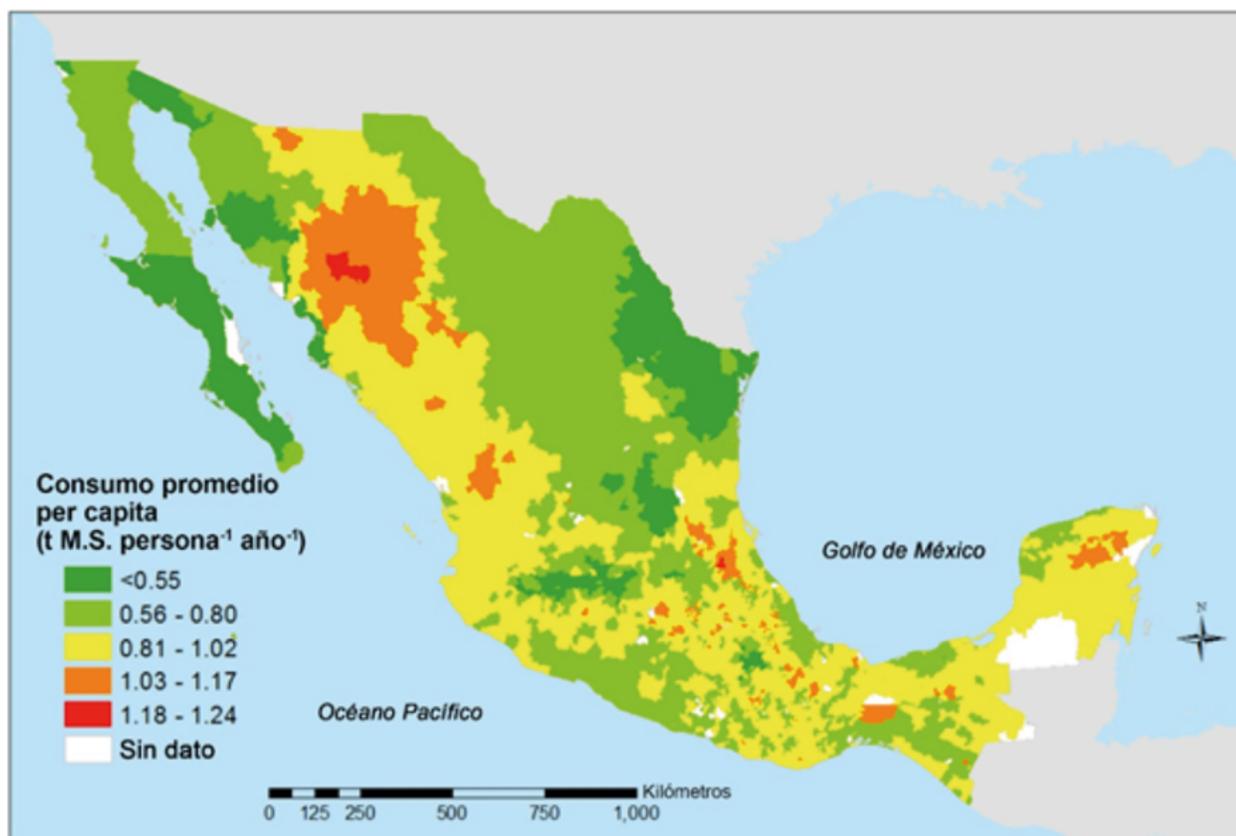


Figura 5. Distribución del consumo de leña *per cápita* a nivel nacional. Fuente: Serrano-Medrano *et al.* (2014).

Dispositivos para el aprovechamiento de leña. La mitigación efectiva de CO_2 que la leña provee, requiere de escenarios en los cuales la tecnología o el reemplazo del combustible fósil demuestren emisiones totales menores a las que genera el combustible fósil con el que se compara (García-Bustamante y Masera, 2016). En el caso de la tecnología las estufas de leña deben sustituir al FTP. Por otro lado, algunos autores señalan que las emisiones de carbono provenientes del uso de la leña se consideran neutras cuando el volumen que se cosecha es menor o igual al crecimiento anual del bosque de donde proviene la biomasa, lo que se conoce como el factor de No renovabilidad de la biomasa (fNRB) (Masera *et al.*, 2006; Ghilardi *et al.*, 2007; Johnson *et al.*, 2009).

Serrano-Medrano *et al.* (2018) muestran los resultados del papel de la leña en un escenario de mitigación de GEI entre los años 2014-2030 donde la combinación de las estufas de leña, el fNRB y el uso de gas LP, permite alcanzar un ahorro entre 60 y 111.6 Mt M.S. de leña, lo que equivale a una mitigación acumulada de 50.4 a 126.3 Mt CO_2e , dependiendo de la combinación de las tecnologías (Figura 6).

Del resultado total de mitigación, destaca que el CO_2 representa entre el 49% y el 57% del total, mientras que el restante es aporte de otros gases (CO , CH_4 y CN). El porcentaje muestra que la tecnología que se utiliza como reemplazo del fogón (FTP) mejora la combustión de la leña. Se constata que, las ganancias en la mitigación de GEI, se dan una vez que el biocombustible se une a la estrategia de adopción de estufas de leña. Sin embargo, el escenario puede disminuir hasta 60% en el mejor de los casos, debido a la penetración del gas LP en los hogares a nivel nacional y como un sustituto de FTP (Serrano-Medrano *et al.*, 2018).

Respecto a la importancia de la gestión de la leña, los escenarios estiman que la demanda tendrá poca variación al menos hasta el 2030. Por lo tanto, las necesidades de investigación y desarrollo (I+D) deben enfocarse en: a) mejorar el diseño de los dispositivos por parte de los institutos de investigación y universidades, b) certificación de fogones bajo la norma mexicana NMX-Q-001-NORMEX 2017 y, c) mejoramiento de las estufas de leña con esquemas múltiples.

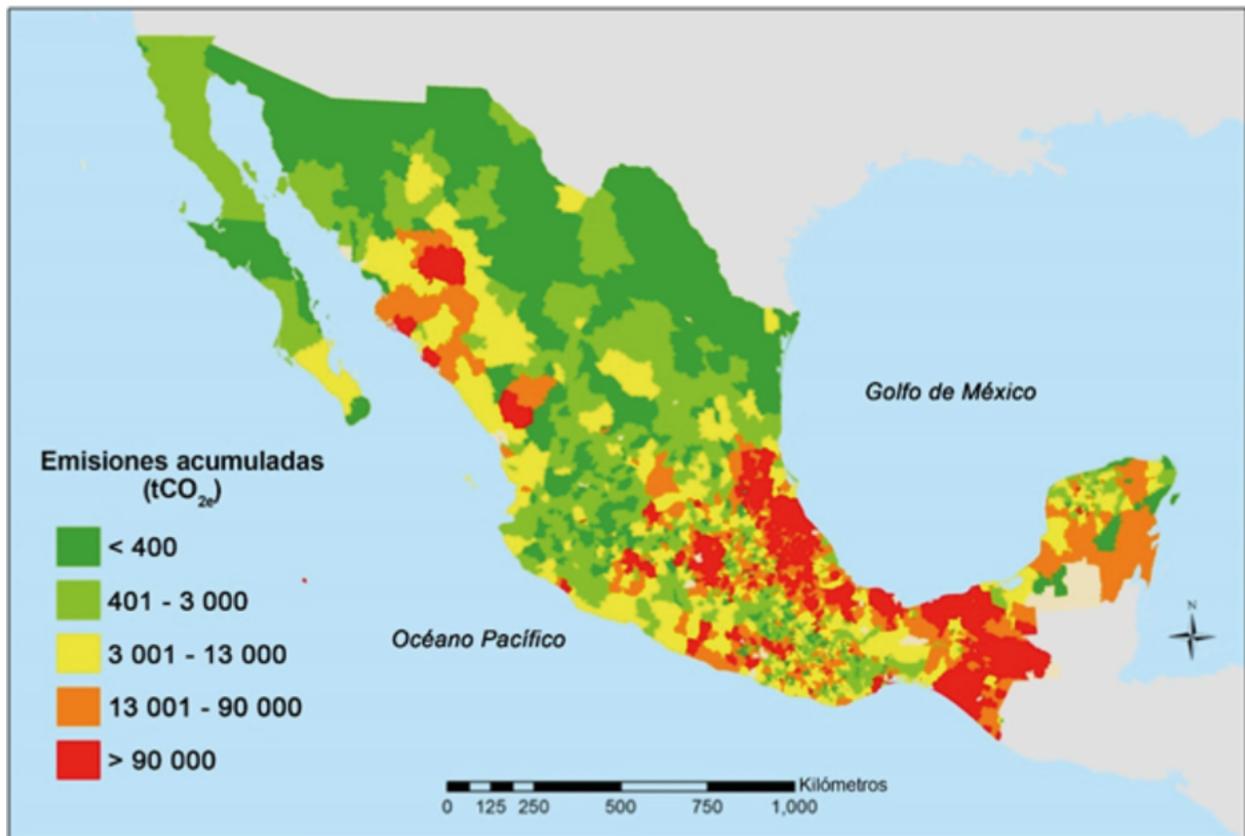


Figura 6. Distribución espacial de la mitigación de GEI acumulados por el uso de leña en el sector residencial; escenario al 2030. Fuente: Serrano-Medrano *et al.* (2018).

Astillas y aserrín

Dentro de los BCS, la producción actual de astillas y aserrín se lleva a cabo en los aserraderos y durante los aprovechamientos forestales. Se disponen como coproductos de la industria forestal y se comercializan por empresas especializadas. Los volúmenes de producción de aserrín a nivel nacional aún no han sido determinados. Sin embargo, existe una demanda industrial de astilla para usos diferentes a los energéticos, de la cual se tiene un potencial de 760 mil toneladas anuales (Riegelhaupt, 2016). Por lo tanto, la demanda como TEF puede aumentar como política corporativa *verde* en la industria: tequilera, de destilados, azucarera y tabacalera, favoreciendo la sustitución parcial del diésel, gas LP y combustóleo, y disminuyendo las emisiones de CO₂ fósil (García *et al.*, 2016; Arias, 2018; Tauro, 2018).

Residuos agrícolas

México cuenta con un potencial de uso de residuos agrícolas para producir biocombustibles procesados, especialmente en las regiones donde los esquilmos

de cosecha son quemados por no cumplir con características de uso forrajero (Valdez-Vazquez *et al.*, 2010). Actualmente, el uso más común de los residuos agrícolas es forrajero; sin embargo, el sector energético ha comenzado a reconocer su potencial como fuente de materia prima para producir BCS densificados como pellets y briquetas, bioetanol y también Biogás (BG) (Alemán-Nava *et al.*, 2015). El reuso de los residuos como bioenergéticos cumple varios propósitos: 1) reducir las emisiones de GEI por la quema a cielo abierto, 2) sustituir tareas térmicas de los combustibles fósiles y, 3) aprovecharlos como alternativa de energía térmica en la industria.

En la actualidad existen pocas aproximaciones sobre el potencial de uso de los residuos agrícolas para el aprovechamiento energético. Valdez-Vazquez *et al.* (2010) señalan que en 2006 se produjeron 75.73 Mt M.S. (materia seca) de residuos provenientes de 20 cultivos en México. Este estudio considera que el 50% de ellos podría utilizarse con propósitos energéticos, para producir entre 100 y 127 PJ año⁻¹ (Cuadro 1).

Cuadro 1. Potencial energético de los residuos agrícolas y agroindustriales.

Cultivo	Tipo de Residuo	Generación de Residuos (Mt M.S. año ⁻¹)	Potencial mínimo (PJ año ⁻¹)	Potencial máximo (PJ año ⁻¹)
Caña de azúcar	Hojas y punta	2.5 - 7.6	38	77
Maíz	Rastrojo	14 - 33	210	248
Sorgo	Rastrojo	4.2 - 8.3	63	62
Trigo	Rastrojo	1.9 - 5.1	29	38
Otros	Rastrojo	2.2 - 6.0	32	45
Total de Residuos Agrícolas (BCS)		24.8 - 60.1	372	470
Caña de azúcar	Bagazo	3 - 7.6	45	57
Maíz	Oloté	2.8 - 6.6	42	50
Maguey	Bagazo	0.6 - 1.5	8	11
Café	Pulpa	0.1 - 0.4	2	3
Arroz	Cascarilla	0.03 - 0.1	0.5	1
Cítricos	Cáscara	0.11	1	2
Otros	Cascarilla-bagazo	0.2 - 0.3	2	3
Total de Residuos agroindustriales (BCS)		6.8 - 16.6	100.5	127
Cultivo		Tierras marginales disponibles (Mha)		
Caña de azúcar	Jugo	2.9	226	338
Sorgo	Grano	2.9	2.6	84
Total (BCL-etanol)		5.8	228.6	422
Jatrofa	Grano	3.2	66	36
Palma de aceite	Fruto	1.8		120
Total (BCL-biodiesel)		5.0	66	156
Recurso				
Residuos municipales			35	305
Residuos ganaderos			148	190
Total (BCG-biogás)			183	495

Fuente: Valdez-Vazquez *et al.* (2010).

Además de los residuos de cultivos, existe en México una disponibilidad regionalizada de residuos agroindustriales como el bagazo de caña y agave, olotes, cascarilla de arroz y trigo, cáscaras de café, cacahuete y de cítricos, entre otros. Por su parte, la mayor producción de paja de sorgo se localiza en Guanajuato, Sinaloa y Tamaulipas (Valdez-Vazquez *et al.*, 2010; Reyes-Muro *et al.*, 2013).

Los residuos agrícolas y agroindustriales podrían sustituir de 57.82 a 140.36 Mt CO_{2e} año⁻¹, si el carbono contenido en la biomasa se convirtiera totalmente a bióxido de carbono. Sin embargo, la emisión final de CO₂ depende, en gran medida, de las características intrínsecas de la biomasa y de la tecnología de transformación. Además, la emisión puede ser cero si se aplican criterios de sustentabilidad en la producción de los cultivos, lo que favorece su incorporación para satisfacer la demanda futura de energía como lo establece el escenario de IRENA (2015), que estima una demanda de energía de los biocombustibles para el 2030 de 810 PJ para sustituir el 32% de combustibles en el sector transporte, el 28% en el sector comercial, el 15% en la generación de energía eléctrica y el 25% en la industria.

El aprovechamiento de los rastrojos y otros residuos de biomasa como una fuente de bioenergía muestra cierta inseguridad por parte de los usuarios respecto a su adopción o al cambio tecnológico. La disponibilidad de la materia prima es una de las principales barreras a superar, derivado de ello, la productividad es una pieza clave para generar confianza. Los costos de adquisición, las reglas de mercado, gestión y la logística de transporte y accesibilidad deben estar sujetos a una normatividad (Arias, 2018). En el rubro del aprovechamiento de los residuos municipales y ganaderos, la principal barrera es de índole sociopolítica, por lo que a pesar del alto potencial energético y que la mitigación de GEI es una medida necesaria, no se pueden plantear alternativas sin resolver todos los puntos previos.

Respecto a las prioridades I+D+T para la producción de bioenergía a partir de los residuos agrícolas, se requiere: a) la generación de análisis espaciales del potencial técnico de producción de biocombustibles y la proyección de escenarios de disponibilidad la materia prima; b) la elaboración de estrategias para hacer competitivos los precios respecto a los combustibles de petróleo, así como marcos de apoyo y subsidio para el cambio tecnológico y, c) mayor investigación en la innovación tecnológica para mejorar la eficiencia de transformación y aprovechamiento de la energía en

los dispositivos de uso final que usan biocombustibles avanzados hechos con residuos agrícolas.

Pellets

Los pellets son biocombustibles procesados (densificados de biomasa) y clasificados como BCS. Se elaboran principalmente a partir de los residuos biomásicos forestales y agrícolas (Tauro, 2018). Al ser producidos con residuos, los pellets ayudan a resolver problemas ambientales, principalmente de la agroindustria, donde por ejemplo en 2006 se produjeron 75.73 Mton de materia seca de rastrojos (Valdez-Vazquez *et al.*, 2010). El mercado de pellets en México es incipiente, pero se espera su comercialización sea en el corto plazo porque son una alternativa energética con aplicaciones en la industria y en la generación de energía eléctrica (Tauro *et al.*, 2018).

El tema de los pellets requiere ser abordado con información internacional. La estimación de emisiones de GEI es un tema relevante a nivel global, y es impulsado internacionalmente mediante esquemas de apoyos económicos y políticas públicas del Estado. Los resultados demuestran que la producción de 1 MJ de energía térmica por medio de pellets de madera implica la emisión de 13.1 g CO_{2e}, incluyendo en los cálculos su transporte en barco (que genera más del 40% de las emisiones) (Sjølie y Solberg, 2011). La emisión puede rebasar los 20 g CO_{2e} MJ⁻¹, dependiendo del tipo de materia prima utilizada y de las condiciones de humedad y tamaño de partícula. Estas emisiones son casi despreciables, si se comparan con las emisiones de los combustibles fósiles, que son entre 6 (gas natural) y 20 (carbón mineral) veces mayores.

El potencial de mitigación de los pellets de manera teórica requiere de un combustible al cual reemplazar, en el caso de México los pellets de aserrín son competitivos con los precios actuales del combustóleo y su potencial de mercado, calculado en 10 PJ año⁻¹, pudiendo cubrir el 64% de la demanda actual. Dentro del sector eléctrico, los pellets tienen el mayor potencial de mitigación, con un máximo del 18% de las 127 Mt CO_{2e} emitidas en la actualidad (Molina Center for Strategy Studies in Energy and Environment, 2013).

Dado el elevado precio actual del gas LP, este podría suplirse por cualquier tipo de pellet, sustituyendo el 73% de todo el gas LP utilizado en los sectores comercial y residencial. Bajo estas premisas, el escenario de mitigación de los pellets cambiaría, lo que representa un gran potencial en estos sectores.

A pesar de que actualmente no es económico

reemplazar algunos combustibles fósiles por pellets, es importante incluir el potencial de mitigación en la planeación. De acuerdo con Arias (2018), los pellets tienen algunas barreras de índole diversa, que se deben superar por el hecho de ser un producto de reciente ingreso al mercado nacional: carece de una demanda residencial e industrial; depende de equipos novedosos para su producción y uso; hay pocas empresas centradas en su producción; el precio de venta sólo le permite competir con hidrocarburos baratos. Respecto a la investigación, desarrollo y tecnología (I+D+T) aún se requiere de investigación para innovar en el diseño y fabricación de los dispositivos.

Si se aplican incentivos, tales como impuestos sobre el carbono y se superan los vacíos normativos, fiscales y de certificación de calidad, los pellets podrían sustituir a todos los combustibles fósiles que se utilizan en el sector industrial, siempre y cuando se alcance la máxima producción de pellets calculada en 233 PJ año⁻¹ (Tauro, 2018).

Escenario MEDEC

Como ya se mencionó, la situación actual de la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) a través del uso de biocombustibles se apuntala fuertemente en los BCS. A partir de los estudios entorno a la leña se abrió el panorama de investigación sobre otros biocombustibles. El estudio base para estimar la mitigación de los GEI provenientes de los biocombustibles es el denominado *escenarios MEDEC* (México: Estudio sobre la Disminución de Emisiones de Carbono). Este proyecto diseñó un escenario de reducción de emisiones de GEI, de 2010 a 2030 en los que incluyó a los sectores con mayores emisiones de CO₂ a nivel nacional. En materia de bioenergía, se enfocaron los biocombustibles sólidos y líquidos, mismos que están incluidos en los sectores agrícola y forestal. El resultado de la mitigación por el uso de biocombustibles se estimó en 84.4 Mt CO₂e año⁻¹ (Johnson *et al.*, 2009).

Biocombustibles líquidos

El conjunto de los biocombustibles líquidos y gaseosos (avanzados) han tenido poca penetración en el país. Actualmente y, pese a los impactos negativos, a nivel mundial existe una dependencia energética muy marcada hacia los hidrocarburos. En México, por ejemplo, cerca del 90% de la energía total consumida y casi el 100% de la energía para el sector transporte

proviene de los hidrocarburos (2485 PJ) (SENER, 2017). La producción BCL ha sufrido diversos tropiezos, por lo que aún se encuentra en fase I+D en los institutos y centros de investigación nacionales.

De acuerdo con Sandoval (2010), en México, hasta el año 2012, el consumo de bioetanol no supera los 0.3 miles de barriles por día, mientras que para el biodiesel y la bioturbosina, no hay cifras oficiales. Aunque en México es aún incipiente y actualmente no existe producción industrial de bioetanol, de biodiesel y de bioturbosina, hay una estrategia nacional para incorporar estos bioenergéticos al sector productivo.

Anteriormente, se mencionó que el CEMIE-BIO incluye los clústeres de bioetanol, biodiesel avanzado y de bioturbosina en los que se espera que los frutos de las investigaciones marquen la ruta para transitar a la implementación de programas de producción y comercialización de estos biocombustibles principalmente en el sector transporte, conforme a los lineamientos para las especificaciones de calidad y características de los BCL (DOF, 2018). Con ello, se espera que el transporte deje de ser uno de los más importantes emisores nacionales de GEI y transite hacia escenarios de mitigación del cambio climático global.

En muchos países de Europa, así como en Brasil y EUA, los biocombustibles líquidos avanzados son una fuente de energía desde hace más de 30 años. Estos países han superado diversas barreras como la controversia de la competencia con la producción de alimentos, la disponibilidad de los lignocelulósicos y de los criterios de sustentabilidad aplicables a la producción de carburantes como el etanol (Sandoval, 2010).

Respecto a la producción de biodiesel en México, varios estados del país participaron en proyectos de producción con semillas de jatrofa (*Jatropha spp.*) y de higuera (*Ricinus communis*), el cual no tuvo los resultados esperados por problemas en la fase agronómica principalmente. En el sureste del país se introdujo la palma de aceite, la cual, aunque con producción limitada, es el proyecto que continúa con el objetivo de producir biodiesel.

El estudio prospectivo sobre el potencial de producción de microalgas en México de Lozano-García *et al.* (2019), muestran que un poco más del 26% del territorio nacional tiene condiciones propicias para esta actividad, con un potencial de producción cercano a 9 millones de toneladas anuales de biomasa seca, lo que representaría una mitigación de 16.2 MtCO₂ año⁻¹ (Chisti, 2007). Como estrategia biológica de

captura de CO₂, el cultivo de microalgas es una opción debido a que las tasas de crecimiento son mayores que las plantas terrestres al absorber entre 10 y 50 veces más carbono (Costa *et al.*, 2000; Tredici, 2010).

Ante el panorama actual de producción, la única información respecto al biodiesel es la internacional. Mendes-Souza *et al.* (2015), señalan que hasta 2011, se habían cultivado 11.2 Mha con oleaginosas para producir biodiesel en varias partes del mundo, de las cuales se espera obtener aproximadamente 1300 L/ha. También se está investigando la producción de biodiesel a partir de algas marinas. A este respecto, la I+D+T utiliza un esquema de bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS, por sus siglas en inglés). Los resultados reportados hasta ahora se plantean a nivel de biorreactores, los cuales pueden ser instalados en diversos lugares. Sin embargo, la producción de biodiesel aún presenta grandes retos como es mejorar el balance de energía, porque actualmente este sistema consume mayor cantidad de energía que la que produce, por el lado económico, es más barato cultivar microalgas para el consumo humano que para producir biodiesel (Petkov *et al.*, 2011). Aunado a los costos de producción de los BCL, se deben añadir mayores estudios acerca de la logística de producción y la eficiencia de uso final, para poder estimar el potencial de mitigación que pueden proporcionar.

Biogás

El metano e hidrógeno biogénicos son los gases que sobresalen en la producción de biogás. Las fuentes de biomasa son: residuos orgánicos, sedimentos y estiércol. Su producción se realiza en un reactor anaerobio donde se produce biogás como primer producto y este se puede refinar para producir biometano. En el ámbito internacional, Buitrón *et al.* (2016) determinaron que la tecnología para la obtención de biogás es madura para el caso del biometano, mientras que la del biohidrógeno continúa en el estatus de I+D+T. Por su parte, Eaton (2010) describe a México como uno de los países líderes en la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia durante el periodo de 2002 a 2005; sin embargo, acota que su crecimiento se detuvo y la producción se frenó, a causa de problemas técnicos y de mercado. No obstante, se mantiene el potencial de producción de metano biogénico proveniente principalmente de residuos agrícolas, estimado entre 5 y 7 MtCO₂e.

Es necesario superar algunas de las barreras que limitan la producción de biogás entre ellas destaca: la carencia de un inventario espacialmente explícito sobre la producción de desechos; la insuficiencia de estudios de factibilidad económica para la implementación de centrales productoras de biogás; la incipiente difusión social sobre las ventajas de la producción de biogás; la ausencia de un portafolio y plan de incentivos económicos que fomenten la inversión en la producción de biogás; la falta de redes de distribución y abasto a escala local y regional; el desacoplamiento de tecnologías para el uso combinado de gas, así como los altos costos de producción.

DISCUSIÓN

La bioenergía es una alternativa renovable y sostenible, con gran potencial para aumentar su participación en la matriz energética de México, y con ello, mostrar su efecto real sobre la mitigación de CO₂ y otros GEI. Sin embargo, hasta la fecha no hay un inventario completo que incluya a todos los biocombustibles con sus respectivos potenciales.

La mitigación de CO₂ que pueden ofrecer los biocombustibles depende de los siguientes factores; de las características de la biomasa que conforma al bioenergético, del manejo sustentable de la materia prima, del combustible fósil con el que se le compara, pero sobre todo depende de la eficiencia de la tecnología de transformación, porque si no es la apropiada, la bioenergía puede dejar de ser la mejor alternativa energética, tal como lo señalan Masera *et al.* (2012).

Los biocombustibles sólidos, a excepción de los pellets, son los que cuentan con más información acerca de la madurez teórica, de las tecnologías de conversión, de aceptación social y de mercado, con respecto a los otros tipos de bioenergéticos. Por lo tanto, son estos biocombustibles los que cuentan con los valores de mitigación de CO₂ más reales.

Los biocombustibles líquidos y gaseosos aún deben superar una serie de barreras de investigación y de desarrollo tecnológico, además de sociopolíticas para posicionarse como alternativas de oferta viables en el mercado energético mexicano. Para ello serán determinantes los resultados de los clústeres del CEMIE-BIO.

Los resultados de cada tipo de biocombustibles muestran diferentes potenciales de mitigación de CO₂, mismos que responden al grado de madurez y de interés científico en ellos. Los resultados deberán

servir para facilitar las condiciones nacionales de aplicación y proveer de herramientas al sector energía en el tránsito para operar con bajas emisiones de carbono en el mediano y largo plazo. El cumplimiento de este mandato abre un nicho de oportunidad para la bioenergía, alineando su desempeño al Acuerdo de París que precisa la descarbonización de la economía de todos los sectores productivos para el 2050.

En el contexto de la política ambiental, para lograr una verdadera transición energética es necesario diseñar políticas públicas más agresivas y ambiciosas en las que la mitigación de GEI se refuerce a partir del desarrollo de un marco regulatorio que fomente el uso sustentable de la bioenergía (Islas *et al.*, 2007; García *et al.*, 2016).

CONCLUSIONES

Los resultados de los estudios sobre bioenergía muestran que los mayores avances están en los biocombustibles sólidos, los otros energéticos (líquidos y gaseosos) presentan adelantos importantes, pero todavía carecen de información de campo contextualizada para México.

La leña es un biocombustible sólido que se ha mantenido como fuente de energía térmica y los escenarios muestran que en el futuro seguirá vigente, por lo tanto, es necesario acompañarla de tecnología moderna para favorecer su consumo de manera eficiente.

Los sectores transporte, industrial y generación de energía, de acuerdo a los reportes de emisiones de GEI, son los que más emisiones originan, sin embargo, los biocombustibles adecuados para ellos son los menos maduros tecnológicamente, por lo que la descarbonización de sus procesos en el corto plazo no podrá realizarse, hasta que se superen las barreras de índole técnico-económicas para la producción de biocombustibles avanzados como son los líquidos.

En síntesis, los distintos estudios muestran que los bioenergéticos pueden ser una opción efectiva de mitigación de GEI, solo que para obtener grandes impactos es indispensable un escenario político favorable en el que las diferentes leyes como la de la transición energética y la del fomento del uso de los biocombustibles, generen instrumentos de política favorables a los biocombustibles y que estos estén acoplados a un fuerte apoyo económico gubernamental para hacer competitivas todas las opciones bioenergéticas.

RECOMENDACIONES

Es prudente insistir en, sin reparar en los detalles, que cualquier estrategia de política pública próxima a desarrollarse, debe entender que la bioenergía no solo es sobresaliente por su carácter renovable y sostenible, sino porque su participación es indispensable en los futuros escenarios de desarrollo nacional. El mensaje claro, es que los biocombustibles constituyen quizá la única fuente de energía que es compatible a su vez, con el objetivo de mitigar parte de los graves impactos generados por el uso de combustibles fósiles y la urgente necesidad de preservar los ecosistemas por medio del manejo sustentable de los recursos naturales, entre otros. Consideramos que las necesidades mínimas y urgentes que cimentan la esperanza de que en el futuro inmediato la bioenergía aumente su participación en la oferta energética nacional son:

Desarrollar información confiable para fortalecer los instrumentos de política pública que faciliten la incorporación de los biocombustibles a la matriz energética nacional.

Superar las barreras sociopolíticas para ser un energético confiable.

Buscar alternativas para posicionarse en la industria como un biocombustible capaz de desplazar a los derivados del petróleo.

Fortalecer su presencia en la Ley de Energías Renovables y en la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, para tener mayor impulso.

Solicitar apoyo para establecer modelos de competencia con precios favorables.

Por lo tanto, la bioenergía debería ser reconsiderada y revalorada dentro del contexto socioambiental de México porque contribuye a lograr varios Objetivos de Desarrollo Sustentable como co-beneficios del servicio energético.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecemos a la Dra. Yolanda Nava-Cruz por su valioso aporte editorial en la revisión del artículo y a Emilian Martínez por el trabajo de diseño de imágenes.

LITERATURA CITADA

- Alemán-Nava, G., A. Meneses-Jácome, D. Cárdenas-Chávez, R. Díaz-Chávez, N. Dallemand, N. Ornelas-Soto, R. García-Arrazola and R. Parra. 2015. Bioenergy in Mexico: Status and Perspectives. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining* 9:8-20. DOI:10.1002/bbb.1523.
- Arias, C. T. 2018. Situación actual y escenarios para el desarrollo de biocombustibles sólidos en México hacia 2024 y 2030. REM-BIO/RTB. México.
- Arvizu, D., T. Bruckner, H. Chum, O. Edenhofer, S. Estefen, A. Faaij, M. Fishedick, G. Hansen, G. Hiriart, O. Hohmeyer, K. G. T. Hollands, J. Huckerby, S. Kadner, A. Kumar, A. Lewis, O. Lucon, P. Matschoss, L. Maurice, M. Mirza, C. Mitchell, W. Moomaw, J. Moreira, L. J. Nilsson, J. Nyboer, R. Pichs-Madruga, J. Sathaye, J. Sawin, R. Schaeffer, T. Schei, S. Schlmer, K. Seyboth, R. Sims, G. Sinden, Y. Sokona, C. von Stechow, J. Steckel, A. Verbruggen, R. Wiser, F. Yamba and T. Zwickel, 2011. Technical Summary. *In* IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlmer and C. von Stechow (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ayala-Mendivil, N. y G. Sandoval. 2018. Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. *Madera y Bosques* 24(e2401877):1-14. DOI:10.21829/myb.2018.2401877 24.
- Berrueta, V., R. Edwards and O. Masera. 2008. Energy performance of wood-burning cooks stoves in Michoacan, Mexico. *Renewable Energy* 33:859-870.
- Buitrón, G., J. Camarillo, F. Alatríste y E. Razo. 2016. Biocombustibles gaseosos. pp. 55-63. En: García-Bustamante, C. y O. Masera (eds.). Estado del Arte de la Bioenergía en México. Red Temática de Bioenergía (RTB), CONACYT, Imagia comunicación. México.
- Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25:294-306.
- Chum, H., A. Faaij, J. Moreira, G. Berndes, P. Dhamija, H. Dong, B. Gabrielle, A. Goss-Eng, W. Lucht, M. Mapako, O. Masera Cerutti, T. McIntyre, T. Minowa and K. Pingoud. 2011: Bioenergy. *In*: Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlmer and C. von Stechow (eds). IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Comisión Europea. 2015. Harmonized greenhouse gas (GHG) emissions calculations for electricity, heat and cooling from biomass throughout the European Union (BioGraceII). <http://biograce.net/app/webroot/biograce2/>
- CONACYT-SENER. 2013. Estudio de viabilidad, barreras e impactos de aprovechamiento de residuos forestales para energía renovable. 2013-219797.
- CONAFOR. 2019. El sector forestal mexicano en cifras 2019. SEMARNAT-CONAFOR, México.
- Costa, J. A. V., G. A. Linde, D. I. P. Atala, G. M. Mibielli and R. T. Krüger. 2000. Modelling of growth conditions for cyanobacterium *Spirulina platensis* in microcosms. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 16:15-18.
- Cherubini, F., N. Bird, A. Cowie, G. Jungmeier, B. Schlamadinger and S. Woess-Gallasch. 2009. Energy and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling* 53(8):434-447.
- Díaz, R., V. Berrueta y O. Masera. 2011. Estufas de leña. Cuadernos Temáticos sobre Bioenergía. REMBIO A.C. México.
- DOF. 2018. Lineamientos por los que se establecen las especificaciones de calidad y características para etanol anhidro (bioetanol), biodiesel y bioturbosina puros. 22 de octubre de 2018. SEGOB. México.
- DOF. 2013. Diario Oficial de la Federación. 30 de mayo 2013. SEGOB. México, DF.
- DOF. 2008. Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética. SEGOB. México, D.F.
- Eaton, A. 2010. Mexico biodigester development program sustainable agriculture, renewable energy and emissions reduction in the Lerma-Chapala watershed. International Renewable Resources Institute.
- FAO. 2018. El estado de los Bosques del Mundo 2018. Las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. Roma. Licencia: CC BY-NC_SA 3.0 IGO.
- Ferrari, L, O. Masera y A. Staffron. 2020. Hacia una transición energética sustentable en México. Programa Nacional de Transición Energética, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Fuentes, A. y R. Martínez-Bravo. 2018. Análisis de ciclo de vida de la producción de biodiesel incorporando el cambio de uso de suelo. RTB/REMBIO. Morelos, México.
- Fuentes, A., C. García, A. Hennecke and O. Masera. 2018. Life cycle assessment of *Jatropha curcas* biodiesel production: a case study in Mexico. *Clean Technologies and Environmental Policy* 20:1721-1733.
- García, C., E. Riegelhaupt y O. Masera. 2016. Introducción. pp. 9-14. En: García-Bustamante, C. y O. Masera. Estado del Arte de la Bioenergía en México (eds.). Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt. Imagia comunicación. México.
- García-Bustamante, C y O. Masera. 2016. Estado del Arte de la Bioenergía en México. Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt. Imagia comunicación. México.
- García, C., E. Riegelhaupt y O. Masera. 2013. Escenarios de bioenergía en México: potencial de sustitución de combusti-

- bles fósiles y mitigación de GEI. *Revista Mexicana de Física* 59(2):93-103.
- Ghilardi, A., G. Guerrero, O. Masera. 2007. Spatial analysis of residential fuelwood supply and demand patterns in Mexico Using the WISDOM approach. *Biomass and Bioenergy* 3(7):475-491.
- IEA. 2017. Energy Access Outlook 2017: From poverty to prosperity. World Energy Outlook Special Report. International Energy Agency. www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2017SpecialReport_EnergyAccessOutlook.pdf.
- INECC. 2014. Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México. Informe. INECC/IMP, México.
- INEGI. 2015. Encuesta Intercensal de Población 2015. <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura>. (Consulta: noviembre 15, 2020).
- IRENA. 2015. Renewable energy prospects: Mexico, REmap 2030 analysis Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Islas, J., F. Manzini y A. Martínez. 2010. Bioenergía. *Ciencia* 30-39.
- Islas, J., F. Manzini and O. Masera. 2007. A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy* 32:2306-2320.
- Johnson, T. M., C. Alatorre, Z. Romo y F. Liu. 2009. México: Estudio sobre la disminución de emisiones de carbono. The World Bank.
- Lozano-García, D. F., S. P. Cuellar-Bermúdez, E. del Rio-Hinojosa, F. Betancourt, G. S. Alemán-Nava and R. Parra-Saldívar. 2019. Potential land microalgae cultivation in Mexico: From food production to biofuels. *Algal Research* DOI:10.1016/j.algal.2019.101459.
- McKechnie, J., S. Colombo, J. Cheen, W. Mabee and H. Machlean. 2011. Forest Bioenergy or Forest Carbon? Assessing Trade - Off in Greenhouse Gas Mitigation with Wood-Based Fuels. *Environmental Science Technology* 45(2):789-795. DOI:101021/es1024004
- Masera, O., R. Ballis, R. Drigo, A. Ghilardi and I. Ruiz-Mercado. 2015. Environmental burden of traditional bioenergy use. *Annual Review on Environmental Resources* 40:21-50.
- Masera, O., V. Berrueta, C. García, M. Serrano y R. Martínez. 2012. Escenarios de Mitigación de gases efecto invernadero, carbono negro y otros forzadores climáticos de vida corta, mediante el uso de biocombustibles sólidos. GIRA/UNAM/INE.
- Masera, O. 2006. La Bioenergía en México: Un catalizador del desarrollo sustentable. CONAFOR. México.
- Mendes-Souza, G., R. Victoria, C. Joly, L. Verdade. 2015. Bioenergy & sustainability: bridging the gaps. *Scope* 72. Brazil. ISBN:9778-2-9545557-0-6.
- Molina Center for Strategy Studies in Energy and Environment. 2013. Apoyo a la iniciativa de planificación nacional sobre contaminantes climáticos de vida corta en México. Reporte Final. INECC. México.
- NCASI (National Council for Air and Stream Improvement). 2010. Biomass carbon neutrality in the context of forest-based fuels and products. NC. USA.
- Petkov, G., A. Ivanova, I. Iliev, I. Vaseva. 2011. A critical look at the microalgae biodiesel. *European Journal of Lipid Science and Technology* 114(2):103-111. doi.org/10.1002/ejlt.201100234
- REMBIO. 2011. La Bioenergía en México, Situación Actual y Perspectivas. Red Mexicana de Bioenergía, A. C. México.
- REN21. 2018. Renewables 2018 Global Status Report (GSR). IRENA, IEA. PNUMA. París.
- REN21. 2019. Renewables 2019 Global Status Report. IRENA, IEA. PNUMA. París.
- Reyes-Muro, L., T. C. Camacho-Villa y F. Guevara-Hernández. 2013. Rastrojos: Manejo, Uso y Mercado en el Centro y Sur de México. Cuaderno técnico. México.
- Riegelhaupt, E. 2016. Biocombustibles sólidos. pp. 23-34. En: García-Bustamante, C. y O. Masera. Estado del Arte de la Bioenergía en México (eds.). Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt. Imagia comunicación. México.
- Ríos-Badrán, I., I. Luzardo-Ocampo, J. García-Trejo, J. Santos-Cruz and C. Gutriérrez-Antonio. 2020. Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw. *Renewable Energy* 145:500-507. doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.048
- Sandoval, G. 2010. Biocombustibles avanzados en México, Estado actual y perspectivas. Cuadernos Temáticos sobre Bioenergía. REMBIO, A.C., México.
- SENER. 2009. Programa de Introducción de Bioenergéticos. SENER. México.
- SENER. 2014. Balance Nacional de Energía 2013. SENER. México.
- SENER. 2019. Balance Nacional de Energía 2018. SENER. México.
- Serrano-Medrano, M., C. García-Bustamante, V. M. Berrueta, R. Martínez-Bravo, V. M. Ruíz-García, A. Ghilardi and O. Masera. 2018. Promoting LPG, clean wood burning cook stoves or both? Climate change mitigation implications of integrated household energy transition scenarios in rural Mexico. *Environmental Research Letters* DOI:10.1088/1748-9326/aad5b8.
- Serrano-Medrano, M., T. Arias-Chalico, A. Ghilardi and O. Masera. 2014. Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico. *Energy for Sustainable Development* 19:39-46.
- Sjølie, H. K. and B. Solberg. 2011. Greenhouse gas emission impacts of use of Norwegian wood pellets: a sensitivity analysis. *Environmental Science and Policy* 14:1028-1040.
- Tauro, R., M. Serrano-Medrano and O. Masera. 2018. Solid biofuels in Mexico: a sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and power. *Clean Technologies*

and Environmental Policy. ISSN: 1618-9558. DOI:10.1007/s10098-018-1529-z- (SCI: IF 2.3).

- Tauro, R. J. 2018. Pellets de residuos agroindustriales y forestales : evaluación de factibilidad para la generación de energía térmica. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/85811>.
- Tredici, M. R. 2010. Photobiology of microalgae mass cultures: understanding the tools for the next green revolution. *Biofuels* 1:143–162.
- Valdez-Vazquez, I., J. A. Acevedo-Benítez and C. Hernández-Santiago. 2010. Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14:2147-2153.

CARBONO ORGÁNICO EN ECOSISTEMAS RIBEREÑOS Y MANEJO SUSTENTABLE EN LA RESERVA DE LA BIÓSFERA LOS VOLCANES

RIPARIAN ECOSYSTEMS ORGANIC CARBON AND SUSTAINABLE MANAGEMENT IN THE VOLCANOES BIOSPHERE RESERVE

Gerardo Cruz-Flores^{1†}, Eloísa A. Guerra-Hernández¹ e Inyasid Santiago-Aguilar¹.

¹Laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal, L-8 Primer piso, UMIEZ. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. Batalla 5 de mayo esquina Fuerte de Loreto S/N. Col. Ejército de Oriente, Iztapalapa, CD MX, México. CP 09230.

†Autor para correspondencia edaynuve@unam.mx y edaynuve@gmail.com

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo estimar contenidos de carbono orgánico en suelos y vegetación de ecosistemas ribereños (EcRi) en la cuenca del alto Balsas y conocer la relación entre su abatimiento y algunos indicadores sustentabilidad. Los EcRi brindan, entre otros, el servicio ecosistémico de captura de carbono al retener altas concentraciones en sus componentes (arroyos, ríos, suelos de bancos ribereño, sedimentos y vegetación riparia), descargando hacia los océanos solo una pequeña cantidad de carbono. Se sabe que el cambio climático global ha disminuido la masa de glaciares en altas montañas y ha alterado el ciclo hidrológico global y, regionalmente en La Reserva de la Biósfera Los Volcanes (RBLV), ha influido negativamente en su dinámica disminuyendo cantidad y calidad de sus caudales. Junto a la problemática ambiental referida, la severa presión que ejercen las actividades antrópicas sobre los ecosistemas ribereños y recursos forestales, son otro factor adverso que particularmente atenta contra la estabilidad, dinámica y conservación de estos EcRi en las porciones alta y media de la Cuenca del Balsas y en otras del país. Se encontró que los contenidos de carbono en suelo, vegetación aérea y biomasa microbiana fue mayor en los EcRi conservados ubicados a mayor altitud (bosques y ecotonos de montaña alta en suelos con alta retención de humedad), lo mismo que en los adyacentes a bosques mixtos (en suelos con altas tasas de infiltración) cuyos altos contenidos de carbono, son acordes a altos valores de su índice de calidad de vegetación ribereña y aunque, con un valor de incertidumbre significativo, también poseen los mayores valores de NDVI. Se concluye que la sustentabilidad, como se define en la misma legislación ambiental, está lejos de alcanzarse dadas las prácticas extractivas y de explotación de los recursos bióticos y abióticos existentes en los ecosistemas ribereños de esta región.

Palabras Clave: indicadores de sustentabilidad; legislación ambiental; cuenca del Balsas; áreas naturales protegidas.

ABSTRACT

This research was carried to estimating soils and vegetation carbon content of riparian ecosystems (RiEc), of upper portion of Balsas basin and to know the relationship of its abatement with some sustainability indicators. The RiEc provide ecosystem service of carbon sequestration by retaining it, in high concentration, in its components (streams, rivers, riverbank soils, sediments and riparian vegetation) and discharging only a small amount of carbon into oceans. It is known that global climate change has decreased mass glaciers of high mountains and that it has altered the global hydrological cycle and, at a regional level, in The Volcanoes Biosphere Reserve (RBLV) has influenced dynamics of RiEc decreasing quantity and quality its flows. In addition to aforementioned environmental problems, severe pressure exerted by anthropic activities on RiEc and forest resources, are another adverse factor that particularly threatens the stability, dynamics and conservation of RiEc in upper and middle

portions of Balsas River Basin, as others in country. It was found that soil, aerial vegetation and microbial biomass carbon contents were higher in RiEc of conserved sites located at higher altitudes (forests and high mountain ecotones), as well as in those adjacent to mixed forests whose high carbon contents, they are consistent with high values of their riparian vegetation quality index and although, with a significant uncertainty value, they also possess the highest NDVI values. It is concluded that sustainability, as defined in the same environmental legislation, is far from being achieved given the extractive and exploitation practices of biotic and abiotic resources existing in riparian ecosystems.

Index words: *sustainability indicators; environmental legislation; Balsas basin; protected natural areas.*

INTRODUCCIÓN

Diversas actividades productivas y extractivas de las poblaciones humanas han tenido efectos negativos sobre el ambiente en el país y en el mundo. Destacan entre ellos el incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), con una repercusión innegable sobre el calentamiento climático global (Panel Internacional de Cambio climático, IPCC, 2014). Uno de los GEI que más ha incrementado su concentración en la atmósfera es el CO₂ desde, aproximadamente 280 ppm que tuvo en la era preindustrial (fines del siglo XVIII), a más de 400 ppm en la era actual (Le Quéré *et al.*, 2018). Se sabe que las poblaciones microbianas del suelo, principal reserva de carbono lábil en ecosistemas terrestres, son predominantemente aerobias y contribuyen al ciclo de carbono (C) mediante la emisión de entre 40 y 80 % del CO₂ atmosférico como producto de su respiración y utilización de materia orgánica carbonada (Levy-Varon *et al.*, 2014) la cual, en ecosistemas en equilibrio, se restituye mediante los residuos de hojarasca y necromasa producida por actividad biológica (Cruz-Flores *et al.*, 2015). Con esto se reconoce al carbono como el motor energético de todo ecosistema por su capacidad para generar biomoléculas grandes, complejas y diversas representando poco más de 50% del peso seco de la biomasa total. Como otros bosques de ecosistemas terrestres, los ecosistemas ribereños participan activamente en el ciclo global del carbono porque en los ríos, suelo, sedimento y vegetación riparia se queda buena parte del carbono que ingresa a ellos desde los ecosistemas terrestres funcionando como un servicio ecosistémico de captura de carbono y, al final una pequeña cantidad de carbono se descarga hasta los océanos (Aufdenkampe *et al.*, 2011). Los ambientes riparios brindan además, otros servicios

ambientales en forma más eficiente si las poblaciones vegetales mantienen la composición y estructura de la vegetación e incrementan su productividad primaria mediante la fijación de CO₂ en la fotosíntesis (Chapin *et al.*, 2011).

Algunos estudios realizados en el país presentados ante el Programa Mexicano del Carbono muestran la importancia de estimar los contenidos de carbono en los principales compartimentos de los ecosistemas ribereños y el conocimiento de las líneas base de contenidos de carbono en los principales compartimentos y sus flujos (Colli-Cortés *et al.*, 2015; Romero-López *et al.*, 2015; Sandoval-Aparicio *et al.*, 2016; Guerra-Hernández y Cruz-Flores, 2017; Cruz-Flores *et al.*, 2017). Estos estudios han mostrado que la calidad del suelo, su fertilidad y la infiltración de agua en el suelo entre otras de sus propiedades edáficas, se ven favorecidas generalmente cuando son mayores sus contenidos de carbono (Andrade *et al.*, 2016; Valderrábano y Cruz Flores G, 2018); sin embargo, cualquier ecosistema incrementa la liberación o emisiones de carbono si se encuentra bajo un mal manejo, cuando se degrada por cambios de uso de suelo o eliminación de herbáceas, erosión de suelo, tala o fragmentación (Houghton *et al.*, 2012).

Los ecosistemas ribereños tienen gran importancia como ecotonos y como áreas de amortiguamiento entre ambientes terrestres, semiacuáticos y acuáticos, a pesar de su reducida superficie en México (< 1 266 158 ha con 10 m de faja de amplitud buffer) en una red hidrográfica reportada en 633 mil kilómetros de longitud (CONAGUA, 2015). La superficie estimada que se señala para esa faja de amplitud, deriva del Artículo 3°, fracción XLVII de la Ley de Aguas Nacionales (LAN) que establece como Ribera o Zona Federal a las “Las fajas de diez metros de anchura contiguas al cauce de las corrientes o al vaso de los depósitos de

propiedad nacional, medidas horizontalmente a partir del nivel de aguas máximas ordinarias” además de que “La amplitud de la ribera o zona federal será de cinco metros en los cauces con una anchura no mayor de cinco metros”.

Como ecotonos con alta productividad vegetal, los ecosistemas ribereños presentan valioso aporte de servicios ambientales y ecosistémicos diversos que, para no verlos perdidos o disminuidos en sus capacidades, se requiere de un manejo sustentable y proteger su alto potencial para la captura de carbono en suelo y en vegetación y así conservar o incrementar los contenidos de carbono que influyen en otros muchos bienes ambientales y ecológicos como la mayor acumulación y disponibilidad de nutrientes, incremento en retención de humedad e incrementos del espacio poroso del suelo, de la biodiversidad, las tasas de infiltración de agua, el amortiguamiento del clima, la retención de sustancias tóxicas y de nutrientes en suelo y vegetación riparia, factores que contribuyen a la mejora de la calidad del agua y muchos beneficios más relacionados con los altos contenidos de carbono en suelo y en la vegetación riparia de los bosques de galería. Todas estas características citadas pueden, en conjunto, considerarse indicadores de sustentabilidad.

En consecuencia y para mantener la funcionalidad de los ecosistemas surge la necesidad del manejo sustentable pero el término sustentabilidad, a pesar de que aparece hace ya más de tres décadas (Zarta, 2018), no es aún un concepto bien definido o de aceptación general porque indistintamente es mencionado en foros sobre medio ambiente o de salud humana o en ecología (Dourojeanni, 2000) y también porque, se ha utilizado, irresponsable y excesivamente, en muchos otros escenarios de la cultura y las políticas de estado. Como antecedente habrá de decir que, en 1984, la ONU conformó la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo que presentó en agosto de 1987 su informe subtítulo “Nuestro futuro común”, que ya planteaba, entre otros desafíos, el reto referente al *desarrollo duradero* como respuesta a los grandes problemas ambientales que presentaba el planeta (ONU, 1987). En este informe, al enlazarse el concepto de sustentabilidad a la economía y política de las naciones, también se ligaba a la cultura y educación. En el estudio “México, regiones que caminan hacia la sustentabilidad” Toledo y Ortiz-Espejel (2014) mencionan que la sustentabilidad es un proceso en el que se identifican doce campos de acción básicos y citan: economía social y solidaria; manejo sustentable de ecosistemas;

formas de gobierno descentralizado; revaloración de la cosmovisión; vivienda digna; seguridad ciudadana; programas de comunicación y diálogo intercultural; salud integral; energías renovables; impulso a sistemas financieros locales; impulso a formas alternativas de generación de conocimientos, saberes y tecnologías apropiadas y finalmente, programas de cultura y educación ambiental. Quiroz *et al.* (2011), mencionan tres tipos de sostenibilidad; la ecológica, la refieren al ecosistema que mantiene las características que le son esenciales para la sobrevivencia a largo plazo de las especies, poblaciones y comunidades; la sostenibilidad económica, la refieren al adecuado manejo y gestión de recursos naturales que permiten continuar con el sistema económico vigente y, la sostenibilidad social, que es referida al proceso donde los costos y beneficios se distribuyen de manera adecuada, tanto entre el total de la población actual (equidad intrageneracional) como con la población futura (equidad intergeneracional). Mesta (2017), en su estudio titulado “Bases para el desarrollo de la legislación marino-costera en México”, hace una descripción muy completa de elementos de sustentabilidad que están asentados en la legislación ambiental mexicana.

En el marco de la legislación ambiental mexicana, el Artículo 3º de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente (LGEEPA) establece en su fracción XI:

Desarrollo Sustentable: El proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras.

En referencia a los recursos hídricos, la Ley General de Aguas Nacionales vigente (LGAN) en el Artículo 3º, fracción XXI, establece como Desarrollo sustentable que:

En materia de recursos hídricos, es el proceso evaluable mediante criterios e indicadores de carácter hídrico, económico, social y ambiental, que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se fundamenta

en las medidas necesarias para la preservación del equilibrio hidrológico, el aprovechamiento y protección de los recursos hídricos, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de agua de las generaciones futuras.

Mientras que en la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS), que junto a la LGEEPA y la LGAN, son reglamentarias del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, se establece como desarrollo forestal sustentable (a) y Manejo forestal sustentable (b) los siguientes enunciados:

- a). Proceso evaluable y medible mediante criterios e indicadores de carácter ambiental, silvícola, económico y social que tienda a alcanzar una productividad óptima y sostenida de los recursos forestales sin comprometer el rendimiento, equilibrio e integridad de los ecosistemas forestales, que mejore el ingreso y la calidad de vida de las personas que participan en la actividad forestal y promueva la generación de valor agregado en las regiones forestales, diversificando las alternativas productivas y creando fuentes de empleo en el sector.
- b). Proceso que comprende el conjunto de acciones y procedimientos que tienen por objeto la ordenación, el cultivo, la protección, la conservación, la restauración y el aprovechamiento de los recursos y servicios ambientales de un ecosistema forestal, considerando los principios ecológicos, respetando la integralidad funcional e interdependencia de recursos y sin que disminuya o ponga en riesgo la capacidad productiva de los ecosistemas y recursos existentes en la misma.

En referencia a las coincidencias sobre sustentabilidad, establecidas en los artículos de las diversas leyes mencionadas, hay que aceptar que llevarlas a la realidad y aplicarlas requiere de escenarios culturales, políticos y legales, etc., aún distantes de alcanzarse, pero legítimamente deseables para subsanar

la fuerte degradación ambiental y explotación de los recursos naturales que se hace prácticamente en todo ecosistema. Derivado de lo anterior, se deduce que en el país el marco jurídico existe, solo se requiere de una justa aplicación de esa legislación para que la toma de decisiones que la autoridad realice esté sustentada en ese marco legal y en el conocimiento científico de los ecosistemas.

Respecto a los recursos naturales y servicios ambientales que brindan los ecosistemas, es importante resaltar la provisión que se generan en los ecosistemas ribereños que, al ser ecotonos entre ecosistemas terrestres y acuáticos, su biodiversidad generalmente supera a los ambientes terrestres que los circundan gracias a las favorables pero sensibles relaciones climatológicas, edafo-geomorfológicas, hidrológicas y bióticas entre los subsistemas que los conforman (Cruz-Flores, 2017). Diversos estudios han mostrado la superior capacidad en almacenamiento de carbono que poseen la mayoría de los ecosistemas ribereños en sus diferentes compartimentos (Allan, 2004; Sutfin *et al.*, 2016). La suficiencia casi permanente de adecuados niveles de agua del suelo, humedad del ambiente y otros recursos edáficos coadyuvan, junto a una mayor diversidad y riqueza de especies biológicas, a una productividad primaria más alta en los ecosistemas ribereños al ser comparados con *ecosistemas no ribereños* que, alejados del suministro constante de agua, presentan marcadas fluctuaciones de humedad e incluso un temporal estrés hídrico por la estacionalidad de los periodos de lluvia (Nilsson y Jansson, 1995; Sutfin, 2017).

Los ecosistemas ribereños en todo el planeta han sido severamente degradados (Nessimian *et al.*, 2008) y en nuestro país, se encuentran entre los ambientes más degradados como consecuencia de sobreexplotación del recurso hídrico y saqueo de plantas tanto medicinales y alimenticias, como ornamentales, así como expansión de las actividades agrícolas hacia suelos de ribera siempre de óptima fertilidad (Gerritsen *et al.*, 2005; Cruz-Flores *et al.*, 2019). En lo referente a la explotación del recurso hídrico, entre mediados de los años 80 y finales del siglo pasado, más del 65% del agua dulce que fluía hacia los océanos en todo el planeta, alimentando en su recorrido a los ecosistemas ribereños, ha visto obstruido su camino por más de 40 000 represas grandes (mayores de 15 m de altura) y por poco más del doble de represas pequeñas, diques y diques artificiales con la finalidad de destinar esa agua retenida para el consumo humano, para producción

agropecuaria e industrial, para generar electricidad o como un medio de protección contra inundaciones (Nilsson y Berggren, 2000) lo cual puede interpretarse como acciones en apoyo al desarrollo económico y al bienestar y salud humana. Sin embargo, al hacerlo como se ha venido realizando, sin ningún control sustentado en el conocimiento científico del caudal ecológico mínimo o sin ninguna regulación ambiental legal, se atenta contra el pretendido uso sustentable.

En nuestro país, los ecosistemas ribereños sufren también fuerte presión antrópica principalmente por una errática gestión de sus recursos edáficos, hídricos y bióticos. Por ejemplo, la presión sobre sus recursos hídricos inicia prácticamente en la misma zona donde se generan pues una parte del caudal de aguas, clasificadas como de primer uso (fracción III del Artículo 3° de la LAN), se retienen en depósitos desviando parte de ellas hacia zonas de cultivo de trucha, o hacia lagos artificiales para centros ecoturísticos antes de ser usadas para consumo humano y son liberadas sin tratamiento alguno.

Caso de estudio

Al considerar que los arroyos, ríos y zonas de ribera contiguas a los cauces de esos recursos hídricos (al menos de 10 m de amplitud) son zonas federales reconocidas legalmente como “bienes nacionales” (artículo 113 de la LAN) y que sin embargo, en los hechos la legislación ambiental respectiva está lejos de cumplirse, (supóngase benignamente que es por desconocimiento casi total de la población y/o de las mismas autoridades locales), entonces habrá de aceptarse que no existen mecanismos de gobernanza ni políticas de control, regulación o manejo de los sistemas ribereños en la zona de cabecera de la cuenca del Balsas en la que reside parte de la Reserva de la Biósfera Los Volcanes. Estas circunstancias evidencian un vacío legal, administrativo y de poder pues, para en el caso de la zona de estudio de esta investigación, la misma Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) no tiene incluida a la Reserva de la Biósfera Los Volcanes en su registro de reservas de la biósfera y en consecuencia, tampoco aparecerá su registro en la Red de Comités y Reservas de Biósfera de Iberoamérica y el Caribe (IberoMAB) y, ahora mismo para el año 2020, el propio Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl, tan emblemático por su belleza paisajística, por su importancia ecológica como fuente de recursos forestales y de bienes y servicios

ambientales, por la cultura, tradiciones, leyendas y cosmovisión de sus pueblos originarios, ligadas a los volcanes y, aunque es uno de los primeros Parques Nacionales oficialmente decretados en nuestro país, este parque nacional increíblemente no está registrado en el (SINAP) Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Estas situaciones descritas son las principales razones de la problemática referida sobre falta de gobernanza y gestión de recursos hídricos de los ecosistemas ribereños y también es la razón más importante que no permite que, en la región de los volcanes, se pueda utilizar la principal característica que dentro del contexto del Programa *El Hombre y la Biósfera* (MAB) de la UNESCO, tienen las reservas de la biósfera y que está relacionada con el fomento de la capacidad de gestión de sistemas socio-ecológicos complejos y que se pueda establecer un mayor diálogo en la interfaz Ciencia-política y Educación ambiental (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura UNESCO, 2020). Además de lo anterior, en la región del Iztac-Popo en particular y en la Reserva de la Biósfera de Los Volcanes en general, no se puede lograr (valdría la pena intentarlo), lo que la UNESCO pretende con el programa (MAB) y que consiste en destinar áreas de ensayo, demostración y aprendizaje que contribuyan a armonizar, con el bienestar de las comunidades humanas y sus manifestaciones culturales y espirituales, la conservación de la diversidad biológica, el equilibrio ecológico y el manejo racional de los recursos naturales que garanticen que los mismos servicios de los ecosistemas que actualmente se tienen, se mantengan para las generaciones venideras, todo lo cual encaja en el concepto de manejo sustentable (IberoMAB, 2016).

Otro factor adverso que atenta contra la estabilidad, dinámica y conservación de los ecosistemas de ribera en las cuencas alta y media de la Reserva de la Biósfera Los Volcanes, actualmente muy grave, es la severa presión que ejercen las actividades antrópicas sobre estos sistemas ribereños y recursos forestales en general, cuyos efectos se potencian si se considera la falta de gobernanza y el vacío legal y administrativo ya señalado.

Consecuencia del sometimiento de los ecosistemas a la alta densidad de población son el consumo desigual de agua y otros recursos naturales de la región, que puede generar (ya genera) conflictos territoriales y agotamiento de los recursos naturales, degradación ambiental propiciada por alteraciones del ciclo de agua, aumento de la emisión de GEI por deforestación,

extinción de especies animales y vegetales endémicas, erosión de suelos, etc., lo cual, también es causa de pobreza, marginación, despoblamiento rural, desempleo y aumento del costo de la vida (United Nations Population Fund, UNP-Fund, 1994).

Con base en los principios y fundamentos descritos, se realizó esta investigación en ecosistemas ribereños de la Reserva de la Biósfera Los Volcanes a lo largo de un gradiente altitudinal con el objetivo de estimar y presentar sus contenidos de carbono orgánico en los principales compartimentos (Suelo y vegetación) y analizar algunas afectaciones que su abatimiento genera sobre algunos indicadores de manejo sustentable.

METODOLOGÍA

Para la descripción ecológica y el diagnóstico, el monitoreo y colecta de muestras destinadas para la evaluación y estimación de los contenidos de carbono orgánico, se hicieron recorridos en cuatro biotopos previamente delimitados cartográficamente y en ellos se eligieron cuatro ambientes ribereños sobre el río Apatlaco cuyos afluentes son de régimen permanente. Tales ambientes ribereños se identificaron, señalaron y utilizaron como ambientes de referencia por considerarlos con representatividad paisajística común, con semejanza geomorfológica y edáfica y en los que la estructura y composición de la vegetación es similar y equiparable con otros sitios de las subcuencas del declive oriental de la RBLV incluidos en esta investigación. Las cotas altitudinales máxima y mínima entre las que se distribuyen los ambientes ribereños, seleccionados como biotopos de referencia, presentan un intervalo poco mayor de 1500 m, con las implicaciones geomorfológicas, edáficas, hidrológicas y bioclimáticas particulares que por ser compartidas con sitios de biotopos afines en las cuencas de los ríos Apol, Cotzala, Cuatupilco-Alseseca y San Diego-Santa Clara, permiten hacer extrapolables sus resultados. El primero de los ambientes ribereños seleccionados fue

ubicado en la zona más baja (franjas de 2400 a 2650 msnm), éste representa regiones con tierras de uso agrícola y pecuario principalmente y, en un estado altamente fragmentado, uso forestal con bosque mixto; el segundo y tercer ambientes ribereños están dentro de los macizos forestales más densos con bosques de diferentes especies de los géneros *Pinus*, *Cupressus* y *Abies* distribuidos en pisos altitudinales ubicados entre 2650 y 3700 m y, el cuarto ambiente ribereño, se eligió en el biotopo caracterizado por ser ecotono de pradera de alta montaña con especies principalmente de los géneros *Muhlenbergia*, *Festuca* y *Agrostis* y pino de altura, *Pinus hartwegii* (Cuadro 1). Una vez establecidos los criterios de homogeneidad paisajística y fisiográfico-hidrológico-edáfico y de composición y estructura de la vegetación se evaluó, en cada sitio, el índice de calidad de vegetación de ribera (QBR) mediante el método de Munné *et al.* (1998), como también lo señalaron López-Delgado *et al.* (2015), delimitando, en torno a los ríos, parcelas de 600 m² de superficie (30 m largo por 20 m ancho, 10 m por lado del arroyo). Para estimar contenidos de carbono en biomasa vegetal, se registró diámetro normal y altura de todos los árboles en el cuadrante señalado, se tomaron muestras para determinación de densidad básica de madera y se utilizó, en laboratorio, el método del máximo contenido de humedad. Los contenidos de carbono en biomasa aérea fueron estimados utilizando la información y ecuaciones alométricas citadas en Alpizar (1997) y por Torres y Guevara (2002) y aplicando el factor de contenido de carbono de 50%. Este factor de conversión de biomasa a carbono, también fue utilizado para estimar contenidos de carbono en el zacatonal haciendo el muestreo y colecta de material vegetal en áreas de un metro cuadrado donde se cortaron, a ras del suelo, los macollos de los zacatonales para posteriormente evaluar biomasa en peso seco. En cada ambiente ribereño se realizó la colecta suelo en los cuadrantes señalados.

Cuadro 1. Sitios de estudio de referencia en la Reserva de la Biósfera los Volcanes.

Unidad de paisaje	Altitud aproximada	Coordenadas UTM		Vegetación arbórea dominante	Tipo de suelo Sandoval (2016)
		X	Y		
Cascada La Ranita	3750-4000	m		Zacatonal montano - <i>Pinus hartwegii</i>	Andosol vítrico Úmbrico
Sitio ecoturístico Buenavista	3100-3700	542037	2111204	Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> - <i>Abies religiosa</i>	Andosol vítrico Úmbrico
Santiago Xalitzintla	2650-3000	547792	2111726	<i>Pinus ayacahuite</i> , <i>Salix bonplandiana</i> y <i>Buddleja cordata</i> .	Fluvisol mólico
San Nicolás de los Ranchos	2400-2600	554726	2108585	<i>Alnus acuminata</i> , <i>Prunus pérsica</i> , <i>Prunus salicifolia</i> , <i>Crataegus mexicana</i> y <i>Sambucus nigra</i>	Fluvisol háplico

Al considerar el incipiente desarrollo edáfico y las funciones ecológico-ambientales que tienen estos suelos jóvenes en los ecosistemas ribereños, para su análisis, evaluación y estimación de sus contenidos de carbono orgánico, de su contenido gravimétrico de agua (agua capilar e higroscópica) y la velocidad de infiltración de agua, se utilizaron los métodos reportados en Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research (Robertson *et al.*, 1999). Los análisis se realizaron por triplicado en muestras compuestas de 0 a 20 cm formadas con seis submuestras (tres por lado del arroyo y no distantes más allá de 10 m respecto a la orilla del arroyo). Con el método de fumigación-incubación y medición estequiométrica de CO₂ (Powlson *et al.*, 1987; Shan-Min *et al.*, 1987), se determinaron, por cuadruplicado, los contenidos de carbono en biomasa microbiana (CBM) en muestras compuestas de suelo colectadas de 0 a 10 cm de espesor formadas por 12 submuestras en cada lado del arroyo las cuales se

trasladaron en condiciones frigoríficas, almacenándose así hasta su análisis.

Una vez conocidos los resultados de los contenidos de carbono en biomasa aérea de la vegetación ribereña en cada uno de los biotopos, señalados como sitios de referencia y distribuidos a lo largo del río Apatlaco, se realizó, mediante una modelación por semejanza fisiográfica y bioclimática, la extrapolación de los resultados hacia aquellas unidades de paisaje homologas a los sitios de referencia de las subcuencas del declive oriental del Parque Nacional y su zona de influencia. La delimitación de estos sitios con paisajes fisiográficos y bioclimáticos homólogos consistió en asignar categorías a las unidades de paisaje de manera visual en una composición RGB utilizando una imagen de satélite Landsat 8 con path/row: 026/047 de diciembre de 2015 (temporada de sequía) para llevar posteriormente esos rangos a un índice de vegetación (NDVI). Mediante el software QGIS, se visualizaron

y cortaron de la red hidrológica de las subcuencas RH18DU; RH1826DP; RH18FC; RH18FB; RH18AE y RH18AD. Se aplicó un buffer de 10 m de amplitud y con este buffer se cortó el NDVI para visualizar qué categoría de este índice de vegetación se encontraba

en el buffer. Con el software ArcGIS, se obtuvo la estadística de determinación del área o superficie de la red fluvial cubierta por cada categoría (Figura 1). Estos datos se procesaron en una hoja de Excel para obtener el contenido de carbono por unidad de área

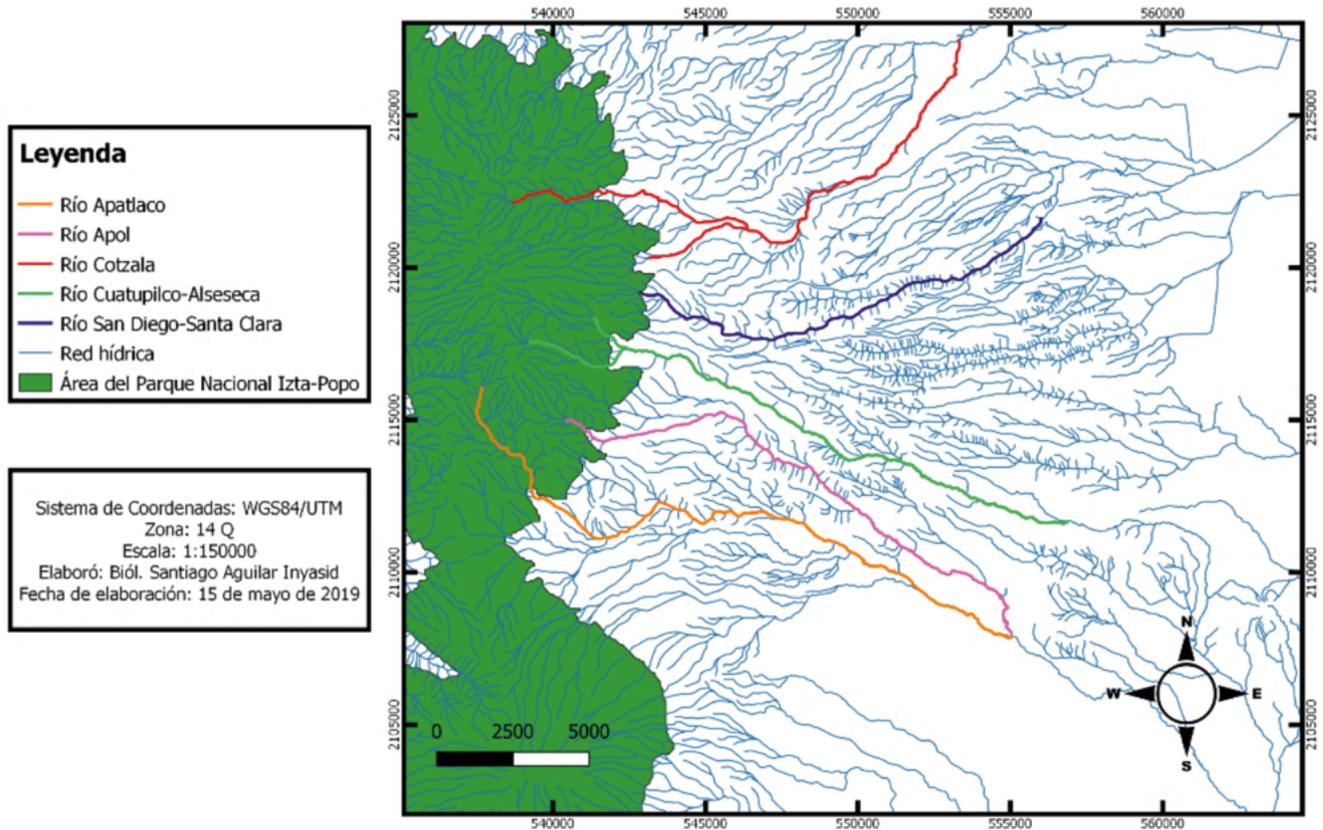


Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de referencia y sistemas fluviales de régimen permanente en la cuenca del Alto Balsas.

El efecto del componente social como factor de impactos, casi siempre negativos, hacia la estabilidad y el equilibrio de los ambientes ribereños, se evaluó con base en magnitud de densidades de población humana y de distancia de los asentamientos humanos respecto al Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl (PN-IP) y su zona de influencia (ZI-PN-IP). Considerando al PN-IP como zona núcleo de la RBLV y como zonas de amortiguamiento y de manejo de ésta a la ZI-PN-IP se manejaron tres niveles de proximidad e influencia sobre los recursos naturales de la región: a) zonas adyacentes, densidad poblacional baja a media y fuerte influencia (primer núcleo periférico), b) zonas a distancia media, de alta densidad poblacional y mediana a fuerte influencia (segundo núcleo periférico)

y c) zonas de poblados y ciudades de alta densidad de población distancia media y sensible a moderado efecto de influencia (tercer núcleo periférico). Habrá de considerar en una investigación subsecuente a ésta, las actividades económicas y extractivas que se realizan en la región. Así de las bases de datos del Censo de Población y Vivienda de 2010 (INEGI, 2010) y en las Cédulas de información municipal de SEDESOL (2015), se hizo una consulta del número de habitantes de los primeros tres núcleos periféricos poblacionales en pueblos, comunidades y urbes de los municipios de los estados de Morelos, México y Puebla que circundan a la Reserva de la Biósfera Los Volcanes, delimitados por la cercanía al Parque Nacional y su zona de influencia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Carbono en vegetación ribereña

Un indicador de sustentabilidad en todo ecosistema es el mantenimiento de contenidos de carbono en intervalos favorables aproximadamente constantes en el tiempo. El contenido de carbono (mínimo de 4.77 Mg ha⁻¹, máximo 10.72 Mg ha⁻¹) en la vegetación ribereña dominante del sitio de referencia ubicado en la parte más alta del río Apatlaco que presenta el paisaje de pastizal montano (pradera de alta montaña) fue el mayor con casi 7.8 Mg C ha⁻¹. Figueroa *et al.*, (2005), en su investigación sobre los contenidos de carbono en hierbas de la pradera de la Sierra Norte de Oaxaca presentaron resultados similares a los de este trabajo y encontraron que este biotopo almacena casi 35 % de todo el carbono para los ecosistemas de esa región del país. El segundo lugar en contenido de carbono en parte aérea de vegetación riparia, se encontró en unidades de paisaje de bosques de pino (*Pinus hartwegii*) con un mínimo de 1.0 Mg ha⁻¹, máximo de 4.07 Mg ha⁻¹ y un promedio apenas superior a 2.5 Mg C ha⁻¹, desde luego, sin posibilidad real de alguna comparación con lo reportado por Rojas (2004) para bosques de *P. hartwegii* del Parque Nacional la Malinche, (promedio de 101 Mg C ha⁻¹) enfatizando que, los resultados de aquellos bosques en la región Tlaxcalteca-Poblana de la Matlacueye, corresponden a ambientes diferentes a los sitios ribereños del Parque Nacional Iztaccíhuatl de la RBLV donde las franjas de amortiguación se establecieron a 10 metros a ambos lados del cauce de los ríos o arroyos donde la densidad de ésta especie no es alta. Los sitios ribereños con bosques fragmentados por terrenos pecuarios y los que ya se encuentran en zonas mixtas de terrenos agrícolas y de uso urbano, han perdido prácticamente su vegetación ribereña original (2700-3000 m). En los sitios de zonas más bajas con paisaje agrícola-pastizal (mínimo 0.11 Mg C ha⁻¹ y máximo 0.51 Mg C ha⁻¹) se obtuvo un promedio de 0.71 Mg C ha⁻¹ y, el menor contenido de carbono, ya con paisaje agrícola-urbano (2400-2600 m) tuvo un promedio de 0.53 Mg C ha⁻¹.

Con la delimitación de paisajes fisiográficos y bioclimáticos homólogos ya efectuada, se realizó la extrapolación de los contenidos de carbono de biomasa

vegetal aérea a las siguientes unidades de paisaje: a) sin vegetación, b) pastizal alpino y zona urbana, c) agricultura y pastizal, d) Bosque de pino y e) Bosque mixto. Es menester aclarar que el uso de un índice de vegetación puede presentar la limitante de no poder diferenciar las reflectancias de las zonas de agricultura, del pastizal y la zona urbana. Esto, como factor metodológico adverso, tiene influencia en los resultados pues se obtuvieron unidades de paisaje mezcladas lo que afecta la realización de los cálculos de carbono por superficie por lo que en las unidades de paisaje denominadas pastizal alpino o pradera de alta montaña y en la zona urbana no se diferenciaron bien estos dos componentes y aun así, en la escena en composición del modelo RGB (del inglés Red, Green, Blue; rojo, verde, azul), el pastizal abarcó mayor superficie que la urbana en el polígono delimitado. Con esta salvedad, los resultados indican que los sitios ribereños de la parte más alta y que no poseen cobertura vegetal, abarcan un área de 2985.03 ha, los sitios de zonas de Bosque de pino y Bosque mixto tienen superficies de 34 462.8 ha y 38 015.2 ha respectivamente; mientras que los sitios ribereños adyacentes a terrenos con actividad agropecuaria con 10 038.8 ha y los sitios ribereños inmersos en la zona de pastizal alpino-zona urbana tuvieron 6197.04 ha. Los ecosistemas ribereños de la unidad de paisaje Bosque de Pino y Bosque Mixto, presentaron mayores contenidos de carbono por unidad de superficie (bosque de pino, 67 783.7 Mg C en 34 000 ha y el bosque mixto con 74 770.90 Mg de carbono en 38 000 ha y ambos con una tasa ligeramente cercana a 2 Mg C ha⁻¹ de ecosistema ribereño. En los sistemas ribereños adyacentes a zonas agrícolas con 5078.40 Mg de carbono en 10 000 ha y los de áreas de pastizal montano y de pastizal en zona urbana con 4798.587 Mg de carbono en 6000 ha, presentan una tasa de escasamente 0.5 Mg C ha⁻¹ de superficie ribereña de donde se deriva que la pérdida de carbono en zonas de pastos (principalmente de la zona agropecuaria) equivale a 1.5 Mg de C ha⁻¹ de ecosistema ribereño. De la misma manera, el contenido de carbono en vegetación ribereña, para las diferentes unidades de paisaje descritas, se ve influenciado directamente por la superficie calculada del NDVI, por lo que en una mayor superficie con mayor contenido de carbono, se tiene el almacén de carbono más grande (Figura 2).

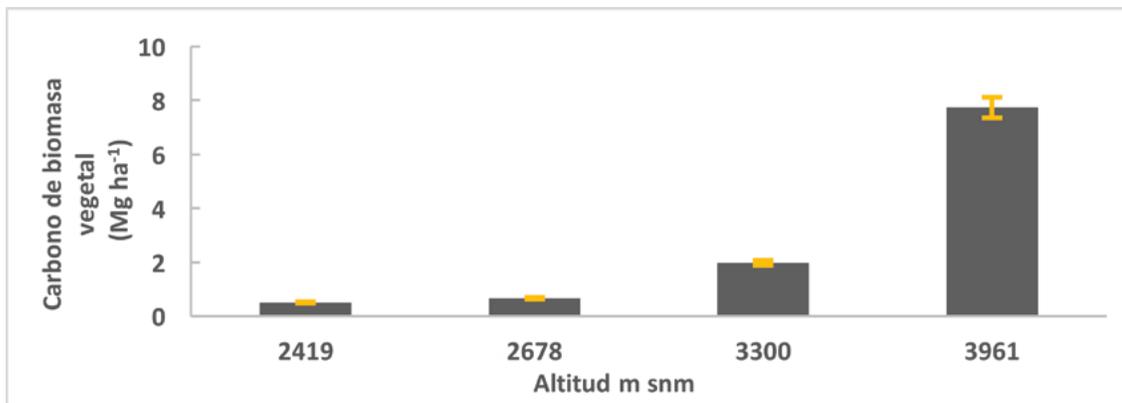


Figura 2. Contenido de carbono en biomasa aérea de vegetación riparia en la amplitud de 10 m respecto a la orilla de mayor altitud del agua del arroyo del ecosistema ribereño.

La calidad de la vegetación de ribera evaluada con el índice QBR, mostró relación directa con el NDVI, ya que, a valores altos de este índice, también los valores del índice de calidad de vegetación de ribera son los máximos de la escala (Cuadro 2).

Carbono en suelos ribereños

El principal almacén de carbono de cualquier ecosistema terrestre es el suelo. En los ecosistemas

ribereños estudiados se encontró que entre 3100 - 3700 msnm, donde el uso de suelo es forestal y la vegetación dominante es un bosque de *Pinus hartwegii-Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.), el contenido de carbono fue mayor y, a pesar de que no se encontraron diferencias significativas, el carbono orgánico de suelos ribereños de estos bosques fue cerca de 60% mayor que en los sitios ribereños donde el uso de suelo es agrícola- urbano (Figura 3).

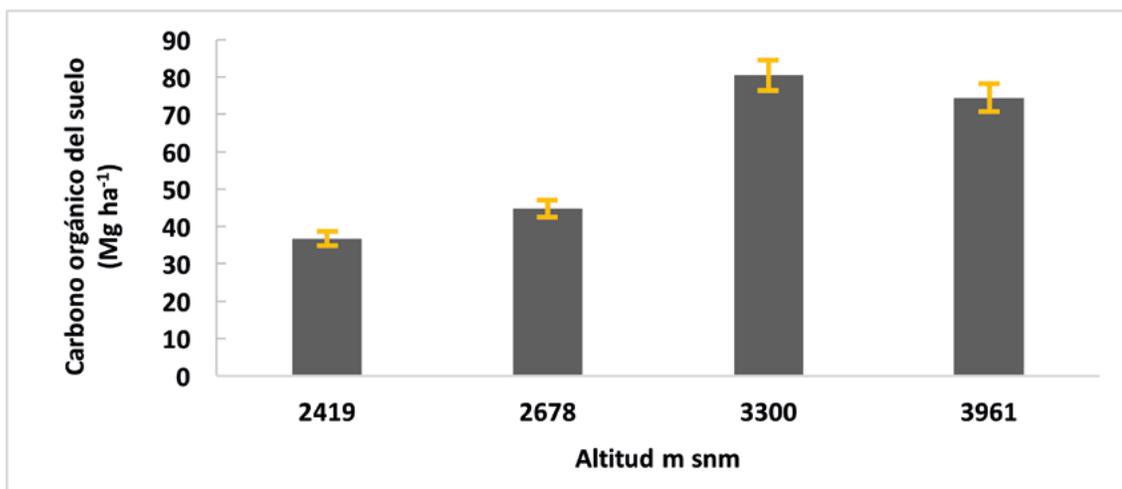


Figura 3. Contenido de carbono suelos de ecosistemas ribereños de la RBLV.

El carbono contenido en biomasa microbiana (CBM) aunque es una reducida fracción del total de carbono orgánico del suelo tiene gran importancia, por su labilidad, para el funcionamiento del ecosistema. El CBM se encontró en mayores contenidos en suelos ribereños adyacentes a los pastizales (praderas de alta montaña) donde no hay alteraciones evidentes del

suelo o de la vegetación riparia (3800 a 4000 msnm) y, aunque no se presentan diferencias significativas ($p \leq 0.05$), los contenidos de CBM de suelos ribereños fue hasta 44% mayor en los sitios de mayor altitud y mejor conservados, respecto a los suelos ribereños de zonas bajas (2400 - 2700 msnm) que son adyacentes a terrenos agrícolas y urbanos (Figura 4).

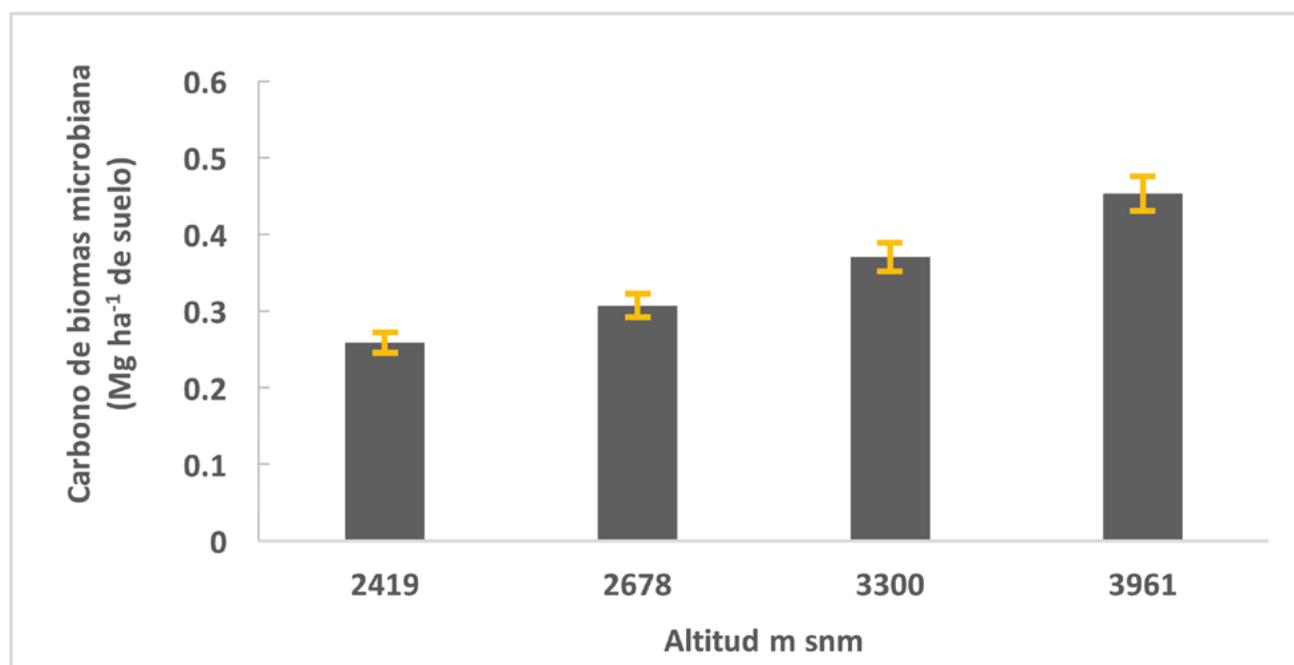


Figura 4. Contenido de carbono orgánico en biomasa microbiana en suelos ribereños en la RBLV.

Debe señalarse que los suelos ribereños estudiados, por la región en la que se desarrollan, comparten varias de las características de los grupos de suelos originados de ejetas volcánicas, como sus valores de pH que los clasifican de moderadamente ácidos a neutros (5 a 7.4), sus valores de conductividad eléctrica (CE) sumamente bajos (0.09 a 0.67 dS m⁻¹) con valores que clasifican a la densidad desde muy baja a muy alta de 0.7 a 1.7 g cm⁻³ (NOM-021-SEMARNAT-2000). Los parámetros edáficos ligados a las propiedades hidrológicas del suelo mostraron que el contenido gravimétrico de agua (CGA) fue mayor en suelos ribereños de las zonas de mayor altitud y, el contenido gravimétrico

de agua disminuye sustancialmente en más de 50% con las pérdidas de carbono que se dan en la capa u horizonte superior de los suelos. El agua capilar y el agua higroscópica, manifiestan un comportamiento similar al del CGA (Cuadro 2). Ligeramente distinto es el comportamiento de la infiltración de agua en el suelo que, aunque generalmente disminuye con la intensidad de uso en las zonas de mayores altitudes, donde dominan los zacatonales de montaña, dadas las altas densidades de raíces secundarias de los zacatonales que dan una estructura y agregación estable y muy compacta al suelo, no obstante, lo anterior, es la zona de mayor contenido de agua (Cuadro 2).

Cuadro 2. Propiedades físicas, propiedades hídricas e índice de vegetación de suelos ribereños en un gradiente de altitud.

Sitio Ribereño	pH 1:2	Conductividad Eléctrica	CAG	MOS	Agua capilar	Agua higroscópica	Velocidad de infiltración de agua	Índice de vegetación QBR
		dS m ⁻¹	g g ⁻¹	%			cm ³ h ⁻¹	
Cascada Ranita	5.1	0.09	0.52	5.78	4.6	43.3	164.2	100
Buenavista	5.9	0.11	0.40	7.03	1.43	42.78	1755.0	90
Xalitzintla	6.5	0.18	0.29	3.43	3.43	31.28	628.6	65
SN Ranchos	7.45	0.67	0.22	3.16	1.38	34.11	480.5	25

Densidad de población humana en comunidades y urbes que impactan a la RBLV

Según el Programa de la UNESCO sobre el Hombre y la Biósfera, las Reservas de Biósfera son lugares de aprendizaje del desarrollo sostenible en los que se concilia la conservación de la biodiversidad con el uso sostenible de los recursos naturales (UNESCO, 2017). Para conocer la magnitud de la influencia benéfica de los servicios ambientales brindados por sus ecosistemas y el capital natural alojado en la biodiversidad y, por otro lado, el impacto negativo generado hacia sus recursos naturales por la presión antrópica derivada de actividades productivas y extractivas, se presenta el número de habitantes según estadísticas del censo de población y vivienda de 2010. La presión de más de 800 000 habitantes (actualmente más de 1.04 millones de habitantes) en pueblos y comunidades muy cercanas

(primer núcleo periférico); más una cantidad cercana al millón y medio (1 466 848) de habitantes que se distribuye en poblaciones que circundan a la RBLV en el segundo núcleo periférico de población y ya, en el tercer núcleo periférico (que incluye algunos municipios del oriente del estado de México conurbados a la zona metropolitana de la CD MX, cuatro alcaldías de esta entidad y otras urbes de los estados de Morelos y Puebla), en un explosivo crecimiento urbano que agrega a la cifra anterior, casi siete millones (6 786 763) más de habitantes hasta alcanzar casi los 10 millones de habitantes quienes, como usuarios de su riqueza natural y los servicios ambientales, se benefician directa o indirectamente de la RBLV pero que a su vez, también ejercen fuerte presión antrópica e influencia negativa por ser la Reserva de la Biósfera del país y quizá del mundo en la que reside la mayor densidad poblacional (Cuadro 3).

Cuadro 3. Estimación de número de habitantes del primero, segundo y tercer núcleo periférico poblacionales que se benefician de los bienes y servicios ambientales de los ecosistemas de la Reserva de la Biósfera Los Volcanespero que ejercen en ella presión por actividades antrópicas.

Núcleo	Morelos		Puebla		México		CD MX		Totales y gran total
	P	H	P	H	P	H	P	H	
1o	Tetela del volcán	19 138	Tochimilco ¹	17 028	Atlautla	27 663	-	-	
	Hueyapan	6478	Huejotzingo ¹	63 457	Ecatzingo	9369	-	-	
	-	-	San Nicolás de los Ranchos.	11 734	Amecameca	48 421	-	-	
	-	-	Tlahuapan	36 518	Tlalmanalco	46 130	-	-	
	-	-	San Salvador el Verde	23 937	Ixtapaluca	322 271	-	-	
	-	-	Chiautzingo ¹	18 762	Texcoco ¹	235 151	-	-	
	<i>Subtotal</i>	<i>25 576</i>	<i>Subtotal</i>	<i>171 436</i>	<i>Subtotal</i>	<i>689 005</i>	-	-	<i>886 017</i>

Cuadro 3. Estimación de número de habitantes del primero, segundo y tercer núcleo periférico poblacionales que se benefician de los bienes y servicios ambientales de los ecosistemas de la Reserva de la Biósfera Los Volcanes pero que ejercen en ella presión por actividades antrópicas. (Continuación).

2o	Yecapixtla	16600	Calpan	85 000	Ozumba	27 207	-	-
	Oaxtepec	6939	Domingo Arenas	7421	Temamatla	11 206	-	-
	Cuatla	154 358	San Martín Texmelucan	141 112	Cocotitlán	12 142	-	-
	Yautepec	102 690	San Andrés Cholula	137 290	Valle de Chalco	357 645	-	-
-	-	-	San Pedro Cholula	113 436	Chalco	257 403	-	-
-	-	-	-	-	Tenango del aire	10 578	-	-
-	-	-	-	-	Juchitepec	23 497	-	-
-	-	-	-	-	Nepantla	2324	-	-
	<i>Subtotal</i>	<i>280 587</i>	<i>Subtotal</i>	<i>484 259</i>	<i>Subtotal</i>	<i>702 002</i>	-	- <i>1 466 848</i>
3o	Cuernavaca	338 650	Atlixco	86 690	La Paz	238 800	Milpa alta	137927
-	-	-	Cd. Puebla	1576000	Chicoloapan	172 919	Iztapalapa	1827868
-	-	-	-	-	Chimalhuacán	525 383	Tlahuac	361593
-	-	-	-	-	Cd Neza	1 105 000	Xochimilco	415933
	<i>Subtotal</i>	<i>338650</i>	<i>Subtotal</i>	<i>1662690</i>	<i>Subtotal</i>	<i>2 042 102</i>	<i>Subtotal</i>	<i>2743321 6 786 763</i>
							Gran Total	9 335 637

P= Población. H= Habitantes. Elaboración propia con las siguientes fuentes: Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2010), SEDESOL¹ Cédula de información municipal.

La mayor productividad vegetal y consecuente mayor almacenamiento de carbono es en el suelo de sitios ribereños no alterados sustancialmente por actividades antrópicas extractivas o recreativas, los cuales evidentemente poseen mayor biodiversidad y captura de carbono, mejores escenarios paisajísticos, mayor cantidad de recursos bióticos y mayores tasas de infiltración de agua en sus suelos en comparación a las zonas alteradas cuyos suelos ya están erosionados,

compactados o endurecidos y donde la infiltración ya no se presenta, la vegetación es escasa y se presentan fuertes pérdidas de especies en el ecosistema ribereño que pierde su conectividad y su función de corredor biológico y reserva genética.

Los resultados de densidades poblacionales muestran que en la medida que la presión poblacional se incrementa sobre los ecosistemas ribereños y, cuando más que aprovechamientos sustentables, se hacen

saqueos de recursos maderables y no maderables en los ecosistemas; y, cuando más que dar un uso racional del agua, se desvían y azolvan cauces, se entuban arroyos y se secan los ríos; y también, cuando más que utilizar los suelos y la vegetación de manera sustentable, se extrae suelo y sustratos (capas de musgo) para su venta, se elimina vegetación mediante tala-rasa y se saquea, para venta de tierra y saqueo de suelo destinado a su venta en invernaderos, los ecosistemas ribereños perderán al carbono en sus diferentes compartimentos y dado que es el principal elemento en la constitución de las moléculas fundamentales para la vida, se atenta día a día contra la salud del ecosistema, la del ambiente ribereño y la de la salud humana.

Siempre deberá estar presente en la mente de las personas de las generaciones actuales y venideras que, con la terrible pandemia provocada por el virus SARS-CoV-2, declarada como Emergencia de Salud Pública de Interés Internacional (Organización Mundial de la Salud OMS, 2020), ha quedado demostrada la gran interdependencia y fragilidad del equilibrio naturaleza-sociedad.

Aceptación distópica de la irreversibilidad del deterioro ambiental o educación para la sustentabilidad ecológico-económica

La situación expuesta parece no tener salida clara hacia la sustentabilidad pues los actuales manejos de los recursos no son alentadores en el sentido de alcanzar la sustentabilidad, sin embargo, la educación ambiental formal y no formal, y el rescate y aplicación de elementos de la legislación ambiental mexicana alinean la idea de aspirar a la sustentabilidad. A manera de ejemplo, para el ejercicio fiscal del año 2015, ya se planteaban lineamientos operativos para impulsar el Programa de Manejo de Tierras para la Sustentabilidad Productiva que quedó definido como:

“Sistema de prácticas de gestión de los recursos naturales terrestres para aprovechar, conservar, restaurar y mejorar su estructura, función y productividad ecosistémica y económica, sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras. Comprende la implementación de técnicas y las condiciones que hacen posible su aplicación y tiene lugar en territorios donde confluyen determinaciones sociales, culturales y económicas” (SEMARNAT, 2016).

Si está la teoría y la legislación, que se ponga en práctica. Por otro lado, considérense los elementos del marco ambiental normativo nacional e internacional en el que participa la nación mexicana en el que destacan:

a) Convenio Sobre la Diversidad Biológica, b) la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación, c) Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, d) Ley General de Vida Silvestre y su Reglamento, e) Ley de Desarrollo Rural Sustentable, f) Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados, g) Ley Federal de Presupuesto y Responsabilidad Hacendaria y su Reglamento, h) Ley Federal de Responsabilidades Administrativas de los Servidores Públicos y su Reglamento, i) Ley de Adquisiciones, Arrendamientos y Servicios del Sector Público y su Reglamento, j) Reglamento Interior de la SEMARNAT, k) NOM-059-SEMARNAT-2010 Protección ambiental -Especies nativas de México de flora y fauna silvestres -Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio -Lista de especies en riesgo, l) el Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2013-2018 cuyo Objetivo 4 fue Recuperar la funcionalidad de cuencas y paisajes a través de la conservación, restauración y aprovechamiento sustentablemente del patrimonio natural con la Estrategia 4.5 de Promover la integración de diferentes esquemas de conservación, fomento a buenas prácticas productivas y uso sustentable del patrimonio natural y la Línea de Acción 4.5.2 que fue Instrumentar el Programa de Manejo de Tierras para la Sustentabilidad Productiva.

Con todas estas leyes y reglamentos, aplicados debidamente y mediante la eliminación de mecanismos burocráticos excesivos, procesos negativos y tácticas de corrupción, puede impulsarse, aunque sea en forma gradual en un esquema participativo.

CONCLUSIONES

Los sitios ribereños de zonas con mayores contenidos de carbono almacenado en el suelo y en la vegetación aérea, son aquellos que prevalecen mejor conservados, pues los resultados mostraron

que el contenido de carbono en los compartimentos de vegetación aérea, suelo y biomasa microbiana fue mayor en sitios ribereños conservados adyacentes a las zonas forestales ubicadas a mayor altitud y en los zacatonales de las praderas de alta montaña.

Los bosques mixtos (Compuestos por dos o más especies arbóreas coexistentes), almacenan la mayor cantidad de carbono (>74 000 Mg) debido a que esa categoría abarcó mayor superficie, mayores valores del NDVI y también mayores valores de los índices de vegetación ribereña.

Esto puede asumirse como parcial y tomarse con reserva pues existe un valor de incertidumbre establecido por el mismo NDVI que no permite una delimitación más precisa de sitios con escasa vegetación.

Al carecerse de estudios incluyentes de todos los subsistemas de los ecosistemas ribereños y de aquellos que consideren los contenidos y flujos de carbono entre ellos, la sustentabilidad como fue definida, en la misma legislación ambiental está lejos de alcanzarse dadas las prácticas extractivas y de explotación de los recursos bióticos y abióticos que proporcionan los ecosistemas de ribera.

RECOMENDACIONES

Los sistemas ribereños no son iguales en cada uno de los pisos altitudinales en cualquier cuenca de todos los climas del planeta, sin embargo, sus funciones ecológicas y ambientales, sí lo son y debido a ello, se propone:

I. Definir legalmente tanto el ancho de la faja de amortiguación que debe tener el sistema ribereño, como establecer épocas de veda sobre caza furtiva y de extracción de recursos forestales sustentándose en el conocimiento de:

- a). Su dinámica y su equilibrio ecológico
- b). Las necesidades reales de uso de agua y de uso racional de otros recursos como suelo, flora y fauna
- c). Los requerimientos socio-económicos
- d). Los valores histórico-culturales y socio-económicos de las poblaciones que se sirven de ellos

II. Impulsar programas oficiales e intersectoriales de pago por servicios ambientales (hidrológicos, bonos de carbono, bonos de biodiversidad) que empiecen por favorecer a los usuarios directos y propietarios de

los bosques y ecosistemas riparios para que, viéndose beneficiados contribuyan verdaderamente y con compromiso a conservar y preservar las múltiples funciones de regulación y provisión en el marco de un manejo sustentable.

III. Crear, fomentar e impulsar programas de educación ambiental para conservar e incrementar los contenidos de carbono en cada compartimento de los ecosistemas ribereños que sean complementarios de otros programas de aprovechamiento racional de los recursos hídricos, edáficos y de organismos de la fauna y flora riparia.

IV. Promover las acciones necesarias (legales y administrativas) de gestoría, consultoría y ejecución para lograr el registro del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl en el Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas y el reconocimiento por parte de la CONANP, de la Reserva de la Biósfera Los Volcanes e incorporar ambas figuras de Áreas Naturales Protegidas en Programas nacionales e internacionales en Programas de conservación y de pagos por bonos de carbono y biodiversidad y servicios hidrológicos.

RECONOCIMIENTOS

A los estudiantes participantes de los programas de servicio social y de las asignaturas de los Laboratorios Integrales de Biología y Laboratorios de Investigación Formativa del Ciclo Terminal de la Carrera de Biología y la División de Estudios de Investigación y Posgrado de la FES Zaragoza de la Universidad Nacional Autónoma de México por los apoyos materiales y de recursos proporcionados. A la DGAPA-UNAM: PAPIIME PE 215016 y PAPIIT-IN22840 por el soporte económico de gastos de campo, becas de alumnos y materiales de laboratorio y campo. Al Programa Mexicano del Carbono por su apertura a proporcionar las fuentes de información referidas.

LITERATURA CITADA

- Allan, J. 2004. Landscapes and Riverscapes: The influence of Land use on Stream Ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 35:257-284.
- Alpizar, W. 1997. Proceso metodológico para la cuantificación de carbono de la biomasa en pie de bosque natural y sus estimaciones de no emisiones y fijación. Costa Rica: Oficina Costarricense de Implementación Conjunta.
- Andrade H. J., M. A. Segura-Madriral y A. Rojas-Patiño. 2016. Carbono orgánico del suelo en bosques riparios, arrozales y

- pasturas en Piedras, Tolima, Colombia. *Agronomía Mesoamericana* 27(2):233-241.
- Aufdenkampe, A. K., E. Mayorga, P. A. Raymond, J. M. Melack, S. C. Doney, S. R. Alin, R. E. Aalto and K. Yoo. 2011. Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9: 53–60.
- Chapin, S., P. Manson and H. Mooney. 2011. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer Science and Business Media Inc. New York, NY, USA.
- Colli-Cortés, P. M., X. De Lucas-Vázquez, R. R. Gen Laguna, G. Cruz-Flores y E. A. Guerra-Hernández. 2015. Carbono del complejo suelo-mantillo bajo bosques de especies perennifolias y caducifolias en sistemas ribereños de montaña. pp. 212-216. En: Paz-Pellat, F., J. Wong y R. Torres (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015*. Serie Síntesis Nacionales. Texcoco, Estado de México: Programa Mexicano del Carbono-Centro de Cambio Climático Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A. C. C.I.V.E. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. ISBN 978-607-96490-3-6. 702 p.
- CONAGUA. 2015. *Atlas del Agua en México*. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Cruz-Flores, G., E. A. Guerra-Hernández, L. Castillo Granada, M. Arteaga-Méjía y J. Campo. 2015. Variaciones de Carbono de Biomasa Microbiana y de ácidos húmicos y fúlvicos en suelos forestales de bosques de coníferas. pp. 133-142. En: Cruz-Flores, G. y A. B. López-López (eds.), *Re-descubriendo el suelo: Su importancia Ecológica y Agrícola*. México, D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. ISBN: 978-607-02-7468-8.
- Cruz-Flores, G. 2017. Introducción a los sistemas ribereños de montaña. pp. 1-8. En: Cruz-Flores, G. y E. A. Guerra-Hernández (eds.). *Ecosistemas Ribereños de Montaña. Descripción y estudio*. México ISBN: 978-607-02-9875-2: UNAM-FES Zaragoza.
- Cruz-Flores, G., I. Santiago-Aguilar, E. A. Guerra-Hernández y Y. Pérez-Reyes. 2017. Compartimentación del almacenamiento de carbono orgánico en ecosistemas ribereños de alta montaña. pp. 534-539. En: Paz-Pellat, F., R. Torres y A. Velázquez (eds.), *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México. Síntesis a 2017*. Serie Síntesis Nacionales ISBN 978-607-96490-5-0. Texcoco, Estado de México: Programa Mexicano del Carbono, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y Universidad Autónoma de Baja California. 656 p.
- Cruz-Flores, G., E. A. Guerra-Hernández, J. M. Valderrábano-Gómez, A. B. López-López, I. Santiago-Aguilar, C. Castillejos-Cruz, L. S. Campos-Lince, J. D. Etchevers-Barra, C. Hidalgo-Moreno, J. Sandoval-Aparicio y M. Mendoza-Cariño. 2019. Capítulo 17. Ecosistemas Ribereños. pp. 328-349. En: Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez. (eds.). 2019. *Estado del Ciclo del Carbono: Agenda Azul y Verde*. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. ISBN: 978-607-96490-7-4. 716 p.
- Dourojeanni, A. 2000. *Procedimientos de gestión para el desarrollo sustentable*. Santiago de Chile: Cepal, Eclac.
- Figueroa, N., B. Etchevers, M. Velásquez y M. Acosta. 2005. Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. *Terra Latino Americana* 23:57-64.
- Friedlingstein, P., G. Peters, R. Andres and T. Boden. 2015. *Global Carbon Budget 2015*. *Earth System Science Data* 7:349-396.
- Guerra-Hernández, E. A. y G. Cruz-Flores. 2017. Carbono y uso del suelo en ambientes riparios de montaña. pp. 579-582. En: Paz-Pellat, F., R. Torres-Alamilla y A. Velázquez (eds.). *Estado actual del conocimiento del ciclo de carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2017*. Serie Síntesis Nacionales. ISBN 978-607-96490-5-0. Texcoco, Estado de México: Programa Mexicano del Carbono- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada- Universidad Autónoma de Baja California. 656 p.
- Gerritsen, P., A. Lomelí y C. Ortíz. 2005. Urbanización y problemática socioambiental en la costa sur de Jalisco, México. Una aproximación. *Sociedad y Territorio* 17:107-137.
- Houghton, R. A., J. I. House, J. Pongratz, G. R. van der Werf, R. S. DeFries, M. C. Hansen, C. Le Quér and N. Ramankutty. 2012. Carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosciences*. 9:5125-5242.
- IberoMAB. 2016. *Reservas de la Biósfera Iberoamericanas. Información Básica*. Secretaría de la Red IberoMAB. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. Edición electrónica 2016.
- INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010. Principales resultados por localidad (ITER). <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/?ps=microdato>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. *CLIMATE CHANGE. Synthesis Report*. https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml. (Consulta: julio 20, 2020).
- Le Quéré, C., R. M. Andrew, P. Friedlingstein, S. Sitch, J. Hauck, J. Pongratz, P. A. Pickers, J. Korsbakken, P. Glen, J. G. Canadell, A. Arneeth, K. A. Vivek, L. Barbero, A. Bastos, B. Laurent, F. Chevallier, L. P. Chini, P. Ciais, S. C. Doney, T. Gkritzalis, D. S. Goll, I. Harris, V. Haverd, F. M. Hoffman, M. Hoppema, R. A. Houghton, G. Hurtt, T. Ilyina, A. K. Jain, T. Johannessen, C. D. Jones, E. Kato, R. F. Keeling, K. K. Goldewijk, P. Landschützer, N. Lefèvre, S. Lienert, Z. Liu, D. Lombardozzi, N.

- Metzl, D. R. Munro, J. Nabel, S. Nakaoka, C. Neill, A. Olsen, T. Ono, P. Patra, A. Peregon, W. Peters, P. Peylin, B. Pfeil, D. Pierrot, B. Poulter, G. Rehder, L. Resplandy, E. Robertson, M. Rocher, C. Rödenbeck, U. Schuster, J. Schwinger, R. Séférian, I. Skjelvan, T. Steinhoff, A. Sutton, P. P. Tans, H. Tian, B. Tilbrook, F. N. Tubiello, T. van der Laan-Luijkx, R. van der Werf, N. Viovy, A. P. Walker, A. J. Wiltshire, R. Wright, S. Zaehle, and B. Zheng. 2018. Global Carbon Budget 2018. *Earth Syst. Sci. Data* 10:2141–2194.
- Levy-Varon, J., W. S. Schuster and L. K. Griffin. 2014. Rapid rebound of soil respiration following partial stand disturbance by tree girdling in a temperate deciduous forest. *Oecologia* 174(4):1415-1424.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988 Texto vigente, Última reforma publicada DOF 05-06-2018.
- Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable LGDFS. 2018. Última Reforma DOF 13-04-2020.
- Ley de Aguas Nacionales (LAN) 2020. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1º de diciembre de 1992. Texto vigente. Última reforma publicada DOF 06-01-2020. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Secretaría General, Secretaría de Servicios Parlamentarios.
- López-Delgado, E., J. Vásquez-Ramos, F. Villa-Navarro y G. Reinoso-Flores. 2015. Evaluación de la calidad del bosque de ribera, utilizando un método simple y rápido en dos ríos de bosque seco tropical (Tolima, Colombia). *Revista Tumbaga* 1(10):6-29. ISSN 1909-4841.
- Mesta, F. M. E. 2017. Bases para el desarrollo de la legislación marino-costera en México. *Elementos Para Políticas Públicas* 1(1):63-76.
- Munné, A., C. Sola y N. Prat. 1998. QBR: un índice rápido para la evaluación de la calidad de los ecosistemas de ribera. *Tecnología del agua* 175:20-39.
- Nessimian, J. L., E. M. Venticinqué, J. Zuanon, P. de Marco Jr., M. Gordo, L. Fidelis, J. D'arc Batista and L. Juen. 2008. Land use, habitat integrity, and aquatic insect assemblages in Central Amazonian streams. *Hydrobiologia* 614:117.
- Nilsson, C. and K. Berggren. 2000. Alterations of Riparian Ecosystems Caused by River Regulation. *BioScience* 50(9):783.
- Nilsson, C. and R. Jansson. 1995. Floristic differences between Riparian corridors of regulated and free-flowing boreal rivers. *Regulate rivers. Research & Management* 11:55-66.
- NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. <http://dof.gob.mx/nota-detalle.php?codigo=717582&>.
- NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/435/1/NOM_059_SEMARNAT_2010.pdf. (Consulta: agosto 17, 2020).
- Organización Mundial de la Salud. OMS. 2020. https://covid19responsefund.org/es/?gclid=EA1aIQobChMI7Jr-N5ImS6wIV9P3jBx07KQOeEAAYAiAAEgLIXPD_Bw. (Consulta: julio 16, 2020).
- ONU. Organización de las Naciones Unidas. 1987. Desarrollo y Cooperación Económica Internacional: Medio Ambiente. Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. "Nuestro futuro común" Cuadragésimo segundo período de sesiones.
- Powelson, D. S., P. C. Brookes and B. T. Christensen. 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to Straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry* 19:159-164.
- Quiroz, B. I., R. S. Del Amo y P. J. M. Ramos. 2011. Desarrollo sustentable, ¿Discurso político o necesidad urgente? *Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Universidad Veracruzana* 24(3).
- Robertson, G. P., D. C. Coleman, C. S. Bledsoe and P. Sollins. 1999. *Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research*. New York, USA. Oxford University Press. pp.106-114.
- Romero-López, C. A., G. Cruz-Flores y E. A. Guerra-Hernández. 2015. Evolución de CO₂ y captura de carbono de biomasa microbiana (CBM) de suelos ribereños en ecosistemas de montaña. pp. 224-231. En: Paz-Pellat, F., J. Wong y R. Torres (eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo de carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2015. Serie Síntesis Nacionales ISBN 978-607-96490-4-3. Texcoco, Estado de México, México: Programa Mexicano del Carbono-Centro del Cambio Climático y la Sustentabilidad en el sureste, A. C.-C.I.V.E. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. 732 p.
- Rojas, F. 2004. Contenido y captura potencial de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional la Malinche: Tlaxcala-Puebla. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sandoval-Aparicio, J. C., A. B. López -López, G. Cruz-Flores y E. A. Guerra-Hernández. 2016. Contenidos de carbono en suelos ribereños en una asociación de perfiles tipo del declive oriental de la región de los volcanes Iztaccíhuatl Popocatepetl. pp. 672-679. En: Paz-Pellat, F. y R. Torres-Alamilla (eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo de carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2016. Serie Síntesis Nacionales ISBN 978-607-96490-4-3. Texcoco: Programa Mexicano del Carbono y Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 732 p.
- SEDESOL. 2015. Catálogo de localidades. Sistema de Apoyo para la Planeación del PDZP Sistema de Apoyo para la Planeación del PDZP <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/Locde->

- Mun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent. (Consulta: julio 28, 2020).
- SEMARNAT. 2016. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programa-de-manejo-de-tierras-para-la-sustentabilidad-productiva>.
- Shan-Min, S., P. C. Brookes and D. C. Jenkinson. 1987. Soil respiration and the measurement of microbial biomass C by the fumigation technique in fresh and in air-dried soil. *Soil Biology and Biochemistry* 19:153-158.
- Sutfin, N., E. Wohl and K. Dwire. 2016. Banking carbon: a review of organic carbon storage and physical factors influencing retention in floodplains and riparian ecosystems. *Earth Surf. Process. Landforms* 41:38–60.
- Sutfin, N. A. y E. Wohl. 2017. Substantial soil organic carbon retention along floodplains of mountain streams. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 122(7):1325–1338.
- Toledo, V. M. y B. Ortiz-Espejel. 2014. México, regiones que caminan hacia la sustentabilidad. © Universidad Iberoamericana. Puebla, Puebla, México. ISBN: 978-607-7901-52-5
- Torres, R. J. M. y A. Guevara. 2002. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica*. 60 p.
- UNESCO. 2017. <https://es.unesco.org/news/23-nuevas-reservas-biosfera-red-mundial-unesco>
- UNESCO. 2020. <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/ecological-sciences/biosphere-reserves/world-network-wnbr/>.
- United Nations Population Fund (UNP-Fund).94-09-07. 1994. Statement of Ind. Comm. for Population & Quality of Life. International Conference on Population and Development. Cairo, 7 September 1994. https://www.unfpa.org/sites/default/files/resource-pdf/94-09-07_Statement_of_Ind._Comm.pdf. (Consulta: julio 27, 2020).
- Valderrábano, G. J. M. y G. Cruz Flores. 2018. Sistemas de Información geográfica y distribución espacial de la calidad del suelo en el Parque Nacional Izta-Popo. XLIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo.
- Zarta-Ávila, P. 2018. La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad. *Tabula Rasa* 28:409-423. DOI: <https://doi.org/10.25058/20112742.n28.18>

LA URGENTE NECESIDAD DE MÉXICO DE CONTAR CON DATOS DE ACTIVIDAD A ESCALA APROPIADA PARA EL SECTOR AGRICULTURA, FORESTERÍA Y OTROS USOS DEL SUELO

MEXICO'S URGENT NEED FOR ACTIVITY DATA AT AN APPROPRIATE SCALE FOR THE AGRICULTURAL, FORESTRY AND OTHER LAND USE SECTORS

Fernando Paz^{1†}, Ma. Isabel Marín², Martín Bolaños-González³, Jorge D. Etchevers⁴, Ben de Jong⁵, Jorge Herrera⁶ y Alma S. Velázquez-Rodríguez⁷

¹GRENASER, *Campus* Montecillo, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México

²Programa Mexicano del Carbono, Texcoco, Estado de México, México

³Programa de Hidrociencias, *Campus* Montecillo, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México

⁴Programa de Edafología, *Campus* Montecillo, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México

⁵Unidad Campeche, El Colegio de la Frontera Sur, Campeche, Campeche, México

⁶Laboratorio de Producción Primaria, CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida, Yucatán, México

⁷Facultad de Ciencias, *Campus* El Cerrillo, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México, México

†Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

RESUMEN

Los ejercicios de inventarios nacionales de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (INEGyCEI) son insumos básicos para determinar políticas públicas sobre el cambio climático y en la determinación de compromisos internacionales del país. Los inventarios de emisiones, generalmente, utilizan datos de actividad (mapas de uso del suelo y vegetación o USyV) y factores de emisión (densidad de carbono), a través del método de ganancias y pérdidas, el cual se utiliza en México. Los datos de actividades nacionales disponibles son mapas de USyV a la escala 1:250 000 generados por el INEGI con su propio sistema de clasificación. Para analizar el impacto de los insumos de los datos de actividad actuales con relación a mapas 1:50 000 generados por el Programa Mexicano del Carbono (PMC), se estudia el caso del Estado de México y se evalúa el impacto de contar con mapas, misma metodología, con mayor resolución espacial. Los resultados de la evaluación muestran que actividades como la deforestación y degradación forestal (periodo 2007-2011) muestran diferencias significativas que se traducen en errores muy altos en las estimaciones de emisiones realizadas en México. Al final se plantean una serie de recomendaciones orientadas a aumentar la precisión y confiabilidad de los datos de actividad, como una tarea urgente de atender en México.

Palabras Clave: mapas USyV; escala cartográfica; deforestación; degradación forestal; Estado de México.

ABSTRACT

The exercises of national inventories of greenhouse gases and compounds emissions are basic inputs to determine public policies on climate change and in the determination of the country's international commitments. Emission inventories generally use activity data (maps of land use and vegetation or LUV) and emission factors (carbon densities), through the gain and loss method, which is used in Mexico. The national activity data available are LUV maps at a scale of 1: 250,000 generated by INEGI with its own classification system. To analyze the impact of the inputs of the current activity data in relation to 1:50 000 maps generated by the Mexican Carbon

Program (MCP), the case of the State of Mexico is studied and the impact of having maps with higher spatial resolution is evaluated, same methodology. The results of the evaluation show that activities such as deforestation and forest degradation (period 2007-2011) show significant differences that translate into very high errors in the emission estimates made in Mexico. In the end, a series of recommendations are proposed aimed at increasing the precision and reliability of the activity data, as an urgent task to attend to in Mexico.

Index words: *LUV maps; cartographic scale; deforestation; forest degradation; Mexico State.*

INTRODUCCIÓN

En las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) comprometidas por México (Gobierno de la República, 2015) para el Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas ante el Cambio Climático (CMNUCC), se planteó la meta de lograr una tasa cero de deforestación en el 2030, mejorar el manejo forestal y recuperar pastizales (pastizales y matorrales *sensu* INEGI - Instituto Nacional de Estadística y Geografía) para el Sector Forestal y Agropecuario. Paralelamente a este compromiso, México ha impulsado Planes Estatales y Municipales de Acción ante el Cambio Climático, previstos en la Ley General de Cambio Climático, así como los Inventarios Nacionales de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI) asociados a las Comunicaciones Nacionales que se deben presentar a la CMNUCC (Convención Marco de Naciones Unidas ante el Cambio Climático) y los Reportes Bienales (INECC y SEMARNAT, 2015 y 2018). Como insumo del Sector Agricultura, Forestería y Otros Usos del Suelo (AFOLU, por sus siglas en inglés), los inventarios, reportes, comunicaciones, planes de acción y NDC de México, se han basado en datos de actividad (mapas de uso del suelo y vegetación, USyV) (de Jong *et al.*, 2006, 2009 y 2010) con escasa resolución (escala 1:250 000, generados por el INEGI): polígonos con superficies promedio de 371 – 3110 ha; bosques y selvas con polígonos promedio de 415 - 1545 ha (Paz *et al.*, 2018). Estas superficies no representan las condiciones locales del carbono almacenado en ecosistemas terrestres, acuáticos y costeros, por lo que pueden inducir a sub o sobre estimaciones en las existencias de los diferentes tipos de vegetación. Además, limitan la planeación de acciones de intervención estatales y municipales, debilitando la gobernanza multinivel del país (Libert-Amico *et al.*, 2018). La incertidumbre asociada a la única fuente nacional (INEGI) de datos de actividad

(Mas y Fernández, 2004; Couturier y Mas, 2009; Mas *et al.*, 2009; Couturier *et al.*, 2012; Paz *et al.*, 2019a) restringe la verificación del cumplimiento de las metas de los NDC en forma confiable y robusta.

El INEGI cuenta con seis series de mapas vectoriales de USyV con diferentes años base: Serie 1, año 1985 (INEGI, 1985); Serie 2, año 1993 (INEGI, 2002); Serie 3, año 2002 (INEGI, 2005a); Serie 4, año 2007 (INEGI, 2010); Serie 5, año 2011 (INEGI, 2013) y Serie 6, año 2014 (INEGI, 2017a). Las series de mapas de USyV tienen asociadas guías para la interpretación de los usos del suelo y vegetación: Serie 1 y 2 (INEGI, 2005b), Serie 3 (INEGI, 2009), Serie 4 (INEGI, 2012), Serie 5 (INEGI, 2014) y Serie 6 (INEGI, 2017b). El sistema de clasificación de vegetación del INEGI (1980) es la fuente de las clases establecidas en los mapas de USyV.

El Programa Mexicano del Carbono (PMC) también ha generado mapas USyV escala 1:250 000 (PMC, 2016 y 2017a y b; Paz *et al.*, 2018): Serie 2.5 (año base 1999), Serie 6 (año base 2014) y Serie 6.5 (año base 2016); además de corregir los errores de georreferenciación de la Serie II del INEGI. Las series generadas por el PMC siguieron los procedimientos del INEGI (mismas clases de USyV) en su concepción (PMC, 2016 y 2017a y b; Paz *et al.*, 2018), de tal manera que las series son interoperables y llenan vacíos temporales de las series del INEGI, además de actualizarlas hasta el año 2016.

En el contexto de la CMNUCC, México tiene el compromiso de elaborar Inventarios Nacionales de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI), que son la base de las comunicaciones nacionales y reportes bienales. Para los INEGyCEI del sector USyV, México utiliza el método de ganancias-pérdidas (IPCC, 1996, 2003 y 2006), el cual consiste en multiplicar datos de actividad (mapas de USyV) por los factores de emisión (densidades de carbono) de cada dato de actividad y analizar los cambios entre dos fechas. Evidentemente, la representatividad espacial e incertidumbre de las

estimaciones de las existencias de carbono depende de la escala de los mapas usados, independientemente de los factores de emisión y sus incertidumbres, tal como se discute más adelante.

Además de lo indicado, México realiza evaluaciones de los recursos forestales para reportar a FAO el estado que guarda este sector (CONAFOR, 2010), utilizando como insumo los mapas de USyV del INEGI, y para orientar y evaluar políticas en el sector forestal.

En las negociaciones de la CMNUCC, el mecanismo REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación evitada más conservación e incremento de almacenes y manejo forestales sustentable), se ha empleado para establecer la estrategia nacional (CONAFOR, 2017), que plantea líneas base o escenarios de referencia con base en los mapas nacionales de USyV del INEGI. El Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2004 y 2009) es parte de la estrategia REDD+ para establecer los factores de emisión (CONAFOR, 2017).

En el contexto de evaluar los escenarios de intervención de las políticas públicas, la información de las clases de USyV del INEGI, además de su pobre representación espacial, tienen problemas de confusión (una actividad, muchas clases) para ligarlas a actividades locales (Paz, 2015) y así poder desarrollar

líneas base y escenarios a escala local o regional (Paz *et al.*, 2012; Covaleda *et al.*, 2016, 2017, 2018 y 2019)

De lo discutido anteriormente se concluye que uno de los aspectos más limitativos para la planeación de políticas públicas ante el cambio climático, es la escala de representación de los usos del suelo y vegetación disponibles en México (Paz *et al.*, 2019a), por lo que en este trabajo se analizan las consecuencias de las escalas de los datos de actividad en los inventarios de almacenes de carbono. El análisis de escalas es realizado para todos los usos del suelo en el Estado de México y para los manglares (vegetación hidrófila) a nivel de país, para poner en perspectiva las implicaciones de lo realizado en México hasta el momento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para tener una perspectiva de los cambios de uso del suelo del país, en la Figura 1 se muestran las tendencias de cambios de uso de Bosques, Otras Tierras Boscosas y Otras Tierras (Paz *et al.*, 2019a) de acuerdo con las clases de uso de suelo (Anexo A) de la evaluación de los recursos forestales en México. Aquí se observa que los Bosques y Otras Tierras Boscosas han disminuido en sus superficies, con incrementos de Otras Tierras, lo que implica que las metas planteadas en las NDC, tasa cero de deforestación, difícilmente se alcanzaran.

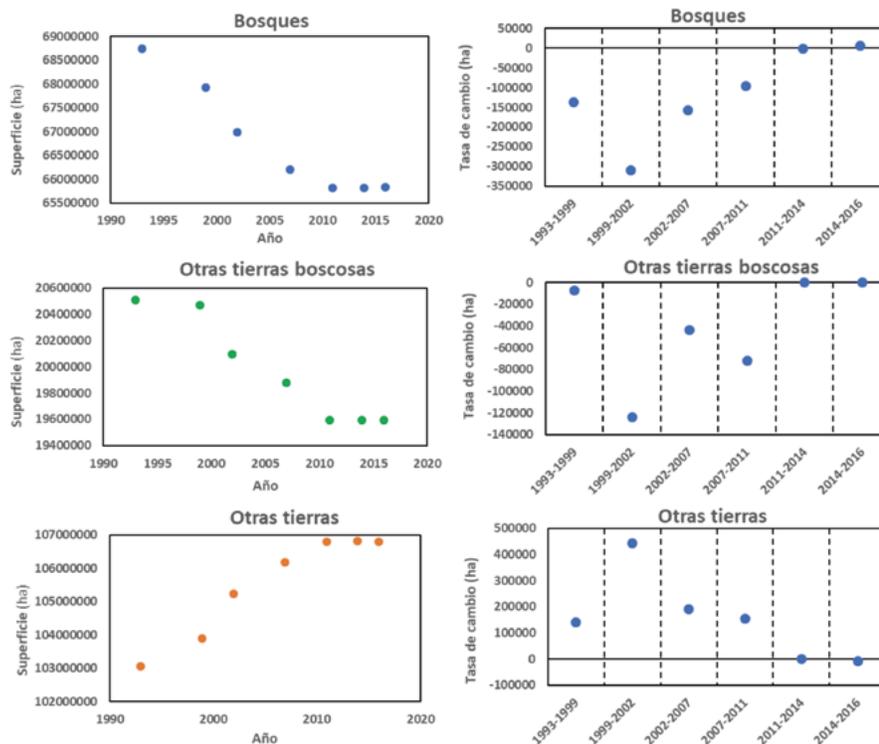


Figura 1. Evolución temporal de las superficies de las clases de FAO FRA en México.

Análisis multiescala de los territorios

La información estadística (INEGI) para el análisis de las causas y motores de los cambios de uso del suelo (CUS), está disponible a nivel de AGEE (áreas geoestadísticas estatales), AGEM (áreas geoestadísticas municipales) y AGEB (áreas geoestadísticas básicas) definidas por el INEGI, tal como se muestra en la

Figura 2. Las AGEBs (Figura 3) son la escala mínima de información social y económica y están conformadas, generalmente, por una poligonal envolvente de predios (ejidos, comunidades, propiedad privada), por lo que el análisis multiescala de los territorios debe considerar el anidamiento de las áreas geográficas para definir niveles de intervención de las políticas públicas.

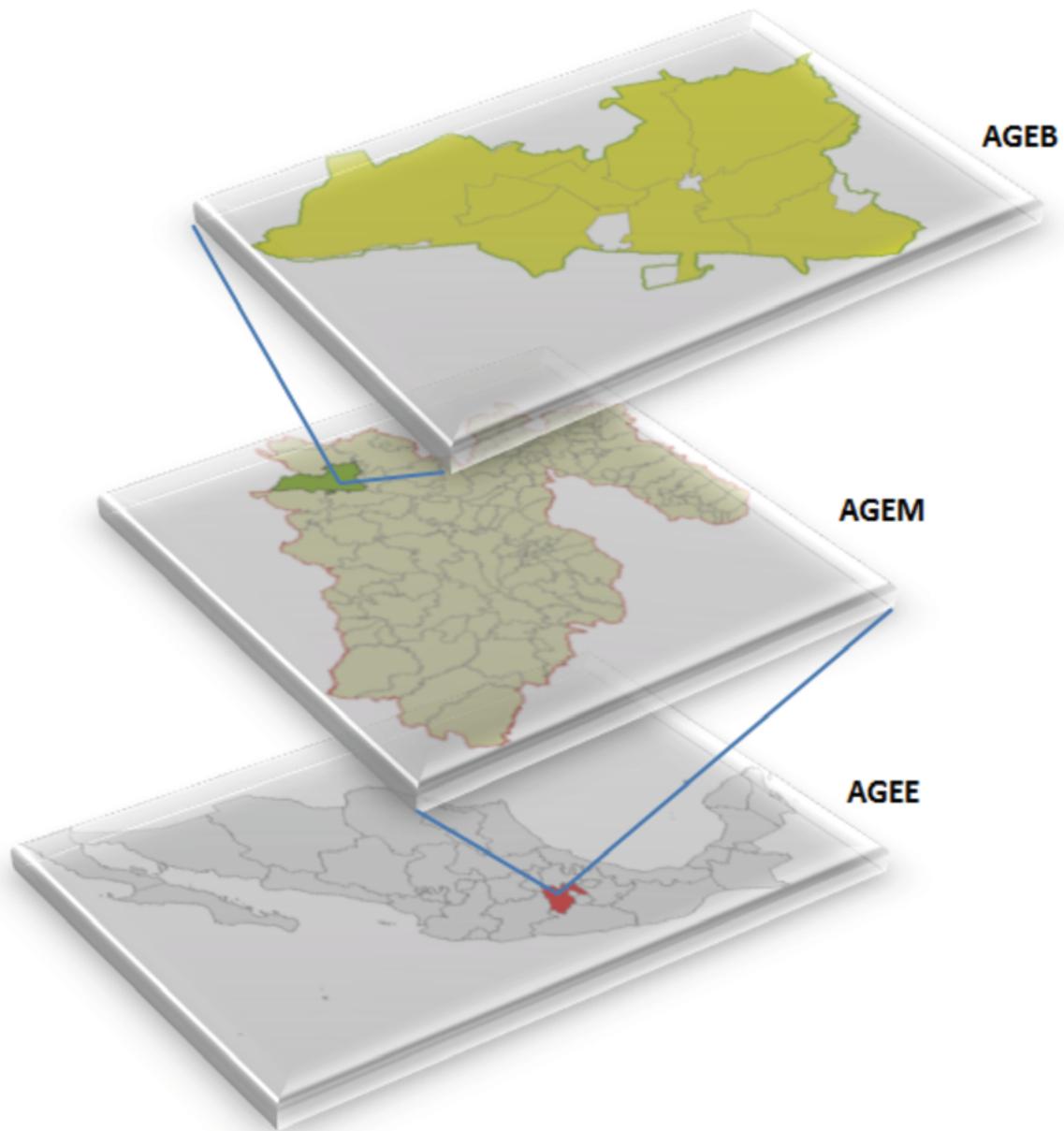


Figura 2. Áreas geoestadísticas (INEGI) en México y su anidamiento.

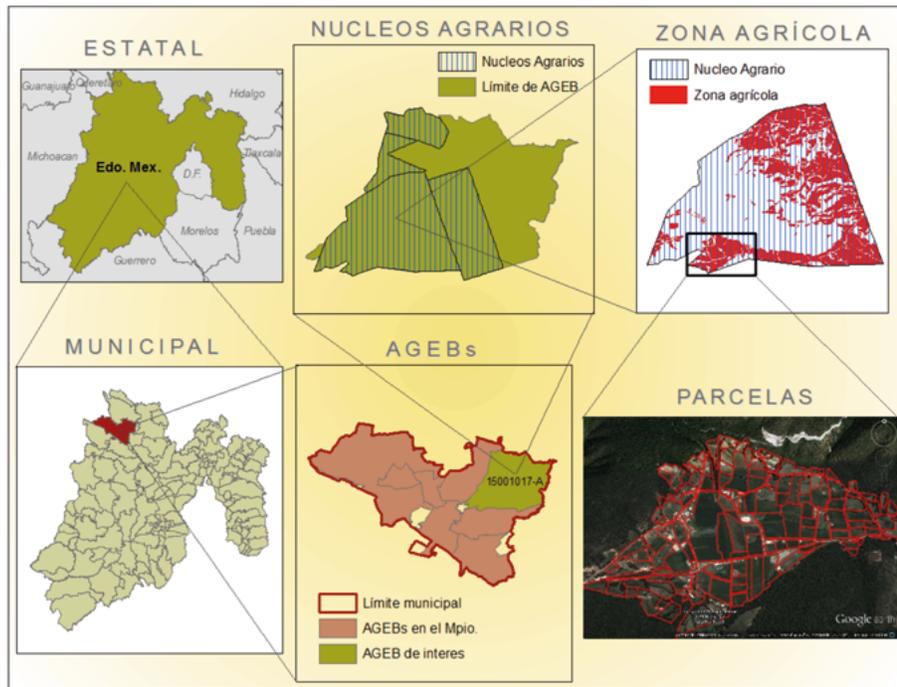


Figura 3. Análisis territorial multiescala en el Estado de México.

Generación de mapas de USyV en el Estado de México

Para contar con mapas de USyV del Estado de México a escala 1:50 000, para su comparación con los generados por el INEGI a escala 1:250 000, se generaron ejercicios bajo los siguientes criterios (PMC, 2015): (a) se utilizaron las mismas clases de USyV del INEGI, para que los mapas fueran interoperables; (b) se utilizaron los mismos insumos (imágenes satelitales) usados por el INEGI; (c) se siguieron los mismos protocolos y procedimientos usados por el INEGI; y, (d) los mapas del INEGI 1:250 000 fueron usados como base para agregar o desagregar polígonos de clases,

en función de una mayor resolución de visualización, respetando las poligonales originales del INEGI.

La clasificación taxonómica del INEGI se muestra en la Figura 4 y en el Anexo A se presentan las definiciones de las clases del INEGI, así como sus claves de identificación.

Cambios de uso del suelo y permanencia de las clases de USyV

Para analizar los cambios de uso del suelo (e.g. deforestación), se revisaron y agruparon en categorías las clases de USyV, de acuerdo con el proceso de la Figura 4.

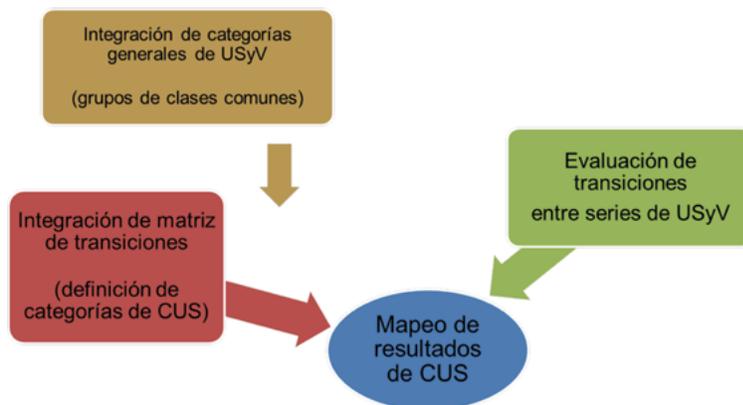


Figura 4. Proceso de integración de clases, primer proceso, de USyV en actividades y análisis de CUS.

Las 112 clases de USyV (mapas de USyV con clases nuevas), producto de los análisis de los mapas del INEGI fueron agrupadas en categorías generales (Cuadro 1), para su análisis posterior.

Cuadro 1. Agrupación de clases de USyV del INEGI en categorías generales.

Categoría	Clases USyV del INEGI (ver Anexo A)
Actividad agrícola	TP, TAS, TAP, TA, TSP, TS, RP, RAS, RAP, RA, RSP, RS, HP, HAS, HAP, HA, HSP, HS
Actividad pecuaria	PC
Actividad forestal	BC
Actividad acuícola	ACUI
Bosque primario	Bosques (<i>e.g.</i> BA)
Bosque secundario 1 (sucesión herbácea)	<i>e.g.</i> VSh/BA
Bosque secundario 2 (sucesión arbustiva)	<i>e.g.</i> VSa/BA
Bosque Secundario 3 (sucesión arbórea)	<i>e.g.</i> VSA/BA
Pastos	VSa/PN, VSh/PN, PH, VSa/PH, VSh/PH, PY, VSa/PY, VSh/PY, VW, VSa/VW, VSh/VW, VS, VSA/VS, VSa/VS, VSh/VS, PN
Otra vegetación	VD, Vsa/VD, VSh/VD, VH, Vsa/VH, VSh/VH, VY, Vsa/VY, VSh/VY
Matorral	MDM, VSa/MDM, VSh/MDM, MDR, Vsa/MDR, VSh/MDR, MC, VSa/MC, VSh/MC, MSC, VSa/MSC, VSh/MSC, MSCC, VSa/MSCC, VSh/MSCC, MSN, VSa/MSN, VSh/MSN, MRC, VSa/MRC, VSh/MRC
Otros	ADV, H2O, AH, ZU

Para generar categorías de cambio de uso del suelo, éstas se definieron en función de la matriz de transición entre dos fechas de los mapas de USyV (ver Cuadro 2). Las categorías de CUS permiten

analizar cambios con una visión de todos los usos del suelo (Paz, 2012), para definir fronteras de acción de los diferentes sectores (forestal, agrícola, pecuario, urbano, etc.) del gobierno federal.

Cuadro 2. Categorías de cambio de uso del suelo, definidas por una matriz de transición entre dos fechas de mapas de USyV.

ESTADO INICIAL	ESTADO FINAL											
	BOSQUE PRIMARIO	BOSQUE SECUNDARIO 1	BOSQUE SECUNDARIO 2	BOSQUE SECUNDARIO 3	OTRA VEGETACIÓN	MATORRAL	PASTOS	ACTIVIDAD AGRÍCOLA	ACTIVIDAD PECUARIA	ACTIVIDAD FORESTAL	ACTIVIDAD ACUICOLA	OTROS
BOSQUE PRIMARIO	conservación del bosque	deforestación	degradación	degradación	deforestación	deforestación	deforestación	deforestación por agricultura	deforestación por ganadería	deforestación	deforestación	deforestación
BOSQUE SECUNDARIO 1	no permitido	conservación del bosque	regeneración	regeneración	deforestación	deforestación	deforestación	deforestación por agricultura	deforestación por ganadería	manejo forestal	deforestación	deforestación
BOSQUE SECUNDARIO 2	no permitido	degradación	conservación del bosque	regeneración	deforestación	deforestación	deforestación	deforestación por agricultura	deforestación por ganadería	manejo forestal	deforestación	deforestación
BOSQUE SECUNDARIO 3	regeneración	degradación	degradación	conservación del bosque	deforestación	deforestación	deforestación	deforestación por agricultura	deforestación por ganadería	manejo forestal	deforestación	deforestación
OTRA VEGETACIÓN	regeneración	regeneración	regeneración	no permitido	permanencia otra vegetación	cambio vegetación	cambio vegetación	cambio veg. por agricultura	cambio veg. por ganadería	cambio veg. por manejo forestal	cambio veg. por acu.	eliminación cubierta veg.
MATORRAL	no permitido	regeneración	regeneración	no permitido	cambio vegetación	permanencia otra vegetación	cambio vegetación	cambio veg. por agricultura	cambio veg. por ganadería	cambio veg. por manejo forestal	cambio veg. por acu.	eliminación cubierta veg.
PASTOS	no permitido	regeneración	regeneración	no permitido	forestación	forestación	permanencia otra vegetación	cambio de uso	manejo de pastizales	cambio de uso	cambio veg. por acu.	eliminación cubierta veg.
ACTIVIDAD AGRÍCOLA	no permitido	regeneración	regeneración	no permitido	forestación	forestación	forestación	permanencia de uso	cambio de uso	cambio de uso	no permitido	cambio de uso
ACTIVIDAD PECUARIA	no permitido	regeneración	regeneración	no permitido	forestación	forestación	abandono de pastizales	cambio de uso	permanencia de uso	cambio de uso	no permitido	cambio de uso
ACTIVIDAD FORESTAL	no permitido	regeneración	regeneración	no permitido	forestación	forestación	forestación	cambio de uso	cambio de uso	permanencia de uso	no permitido	cambio de uso
ACTIVIDAD ACUICOLA	no permitido	no permitido	no permitido	no permitido	no permitido	no permitido	permanencia de uso	cambio de uso				
OTROS	no permitido	regeneración	regeneración	no permitido	forestación	forestación	forestación	cambio de uso	cambio de uso	cambio de uso	cambio de uso	permanencia de uso

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del cambio de escala en las clases de USyV (escala 1:50 000 del PMC vs escala

1:250 000 del INEGI) se visualizan al comparar la Figura 5 con la Figura 6. Es clara la mayor fragmentación de los polígonos de USyV al cambiar la escala a 1:50 000, que representa de manera más realista los territorios.

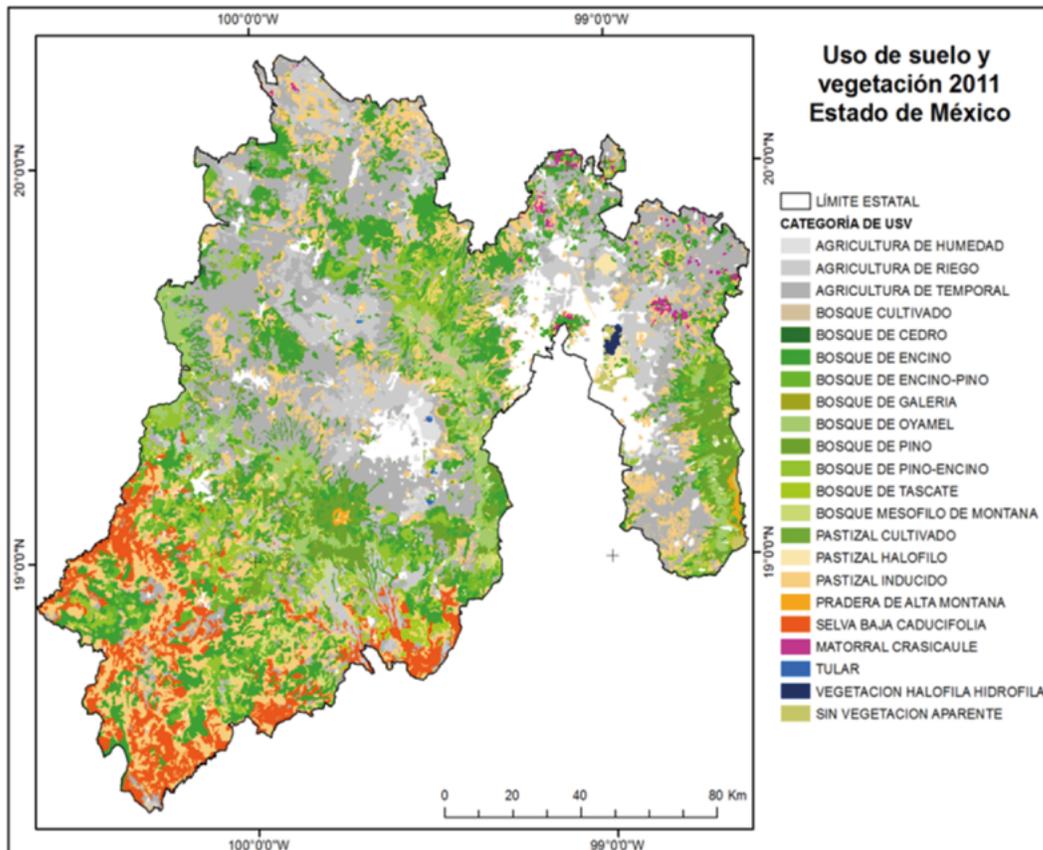


Figura 5. Mapa de USyV del 2011 a escala 1:50 000.

Las diferencias entre los dos mapas realizados con diferentes escalas plantean elevados niveles de incertidumbres de las estimaciones de la emisión de gases efecto invernadero a nivel estatal y en la planeación de acciones de intervención de políticas

públicas, por lo que las discusiones de objetivos y metas de las NDC y mecanismos como REDD+, están sesgados y no consideran las acciones locales, que es donde se dan los cambios en el manejo de los territorios del país.

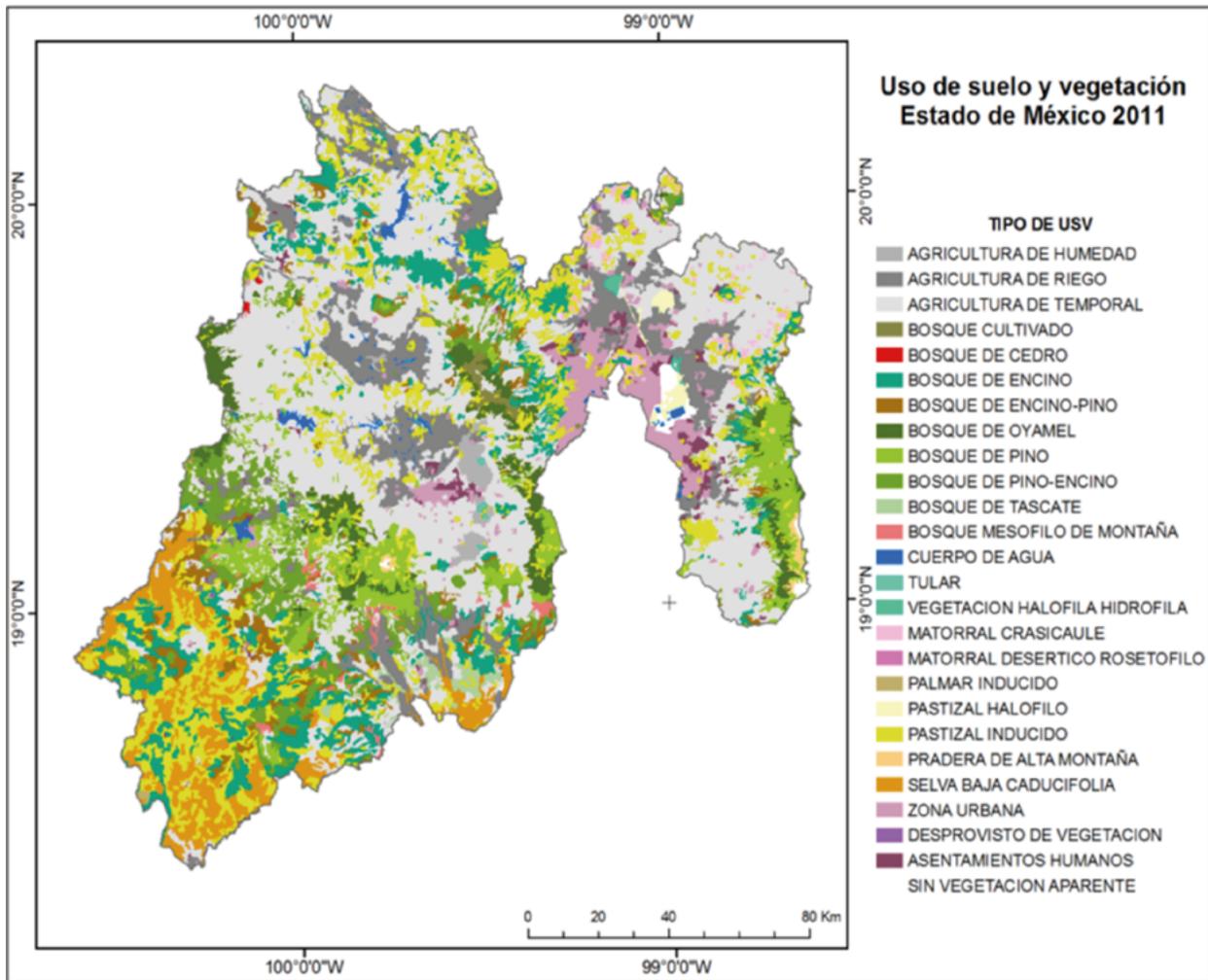


Figura 6. Mapa de USyV del 2011 a escala 1:250 000

El análisis de las categorías de cambios de uso del suelo se muestra en la Figura 7 (escala 1:50 000 del PMC) y la Figura 8 (escala 1:250 000 del INEGI), que al igual que las clases de USyV presenta diferencias contrastantes entre las escalas revisadas.

Las emisiones asociadas a los mapas de categorías de cambio de uso del suelo entre dos fechas dadas, revelan situaciones no consideradas en los mapas disponibles en México y abonan a las sub o sobre estimaciones de los informes de México ante la CMNUCC.

En el Cuadro 3 se muestran las superficies de las categorías de cambio de uso del suelo consideradas

para el periodo 2007-2011. Cuando se comparan los mapas en las Figuras 7 y 8, resultan diferencias en deforestación cercanas al 100 % (subestimaciones), lo que implica que cualquier programa orientado a los mercados del carbono tiene una incertidumbre mayor a la requerida, haciéndolo inviable.

En lo particular, las diferentes categorías del CUS del Cuadro 3, muestran subestimaciones, debido a que existen superficies que no consideran cambios observables que son evidentes cuando se emplean mapas con resolución local.

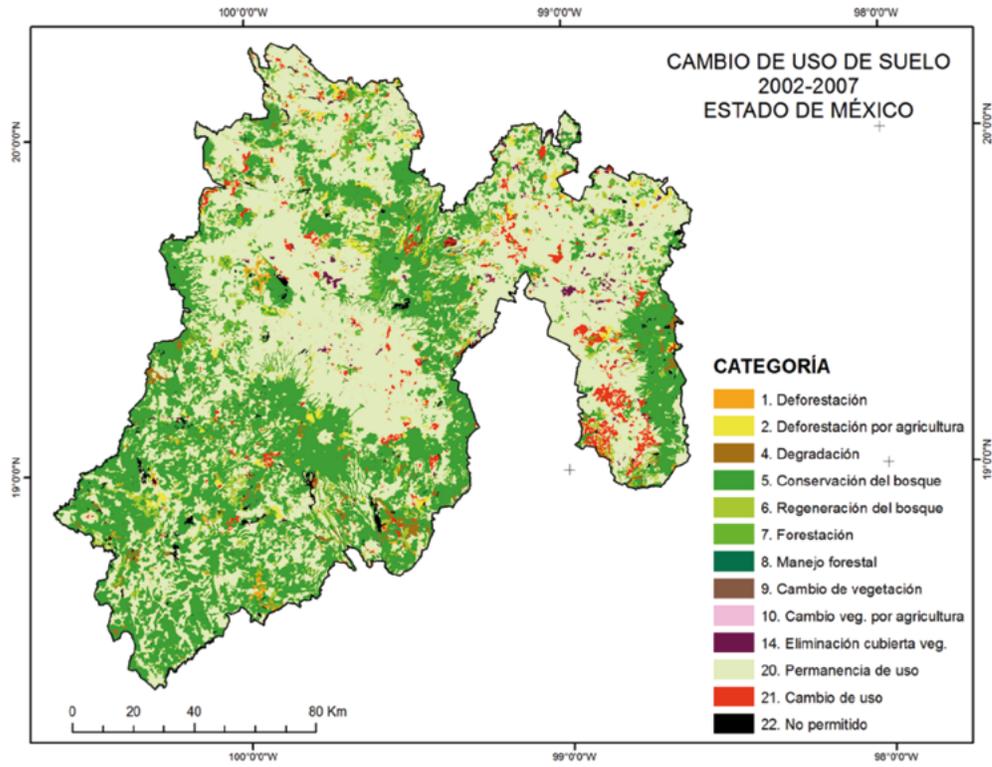


Figura 7. Mapa de categorías de cambios de uso del suelo entre 2002-2007, a escala 1:50 000.

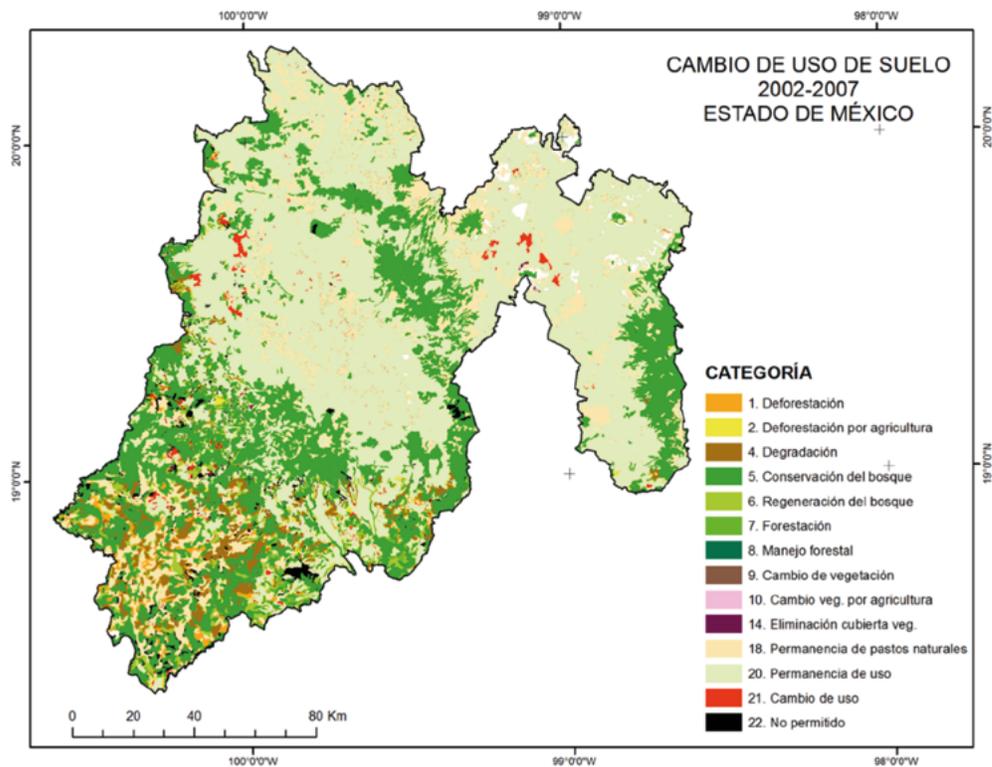


Figura 8. Mapa de categorías de cambios de uso del suelo entre 2002-2007, a escala 1:250 000

Cuadro 3. Cambios en las superficies de las categorías de uso del suelo 2007-2011.

Categoría Cambio de Uso del Suelo	2007-2011		Diferencia (INEGI-PMC)
	PMC (ha)	INEGI (ha)	
Deforestación	60116	31786	-28330
Deforestación por agricultura	27806	24758	-3048
Degradación forestal	70931	65844	-5087
Conservación del bosque	693998	587360	-106638
Regeneración del bosque	65859	46396	-19463
Forestación	26277	8176	-18101
Manejo forestal	1108		-1108
Cambio de vegetación	1083	102	-981
Eliminación cubierta vegetal	7436	1533	-5903
Permanencia de uso	1170269	1102600	-67669
Cambio de uso	48370	21592	-26778

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los análisis y resultados mostrados en este trabajo plantean la necesidad urgente de generar productos cartográficos realistas de los usos del suelo y vegetación que consideren, primera aproximación, la escala local de interés donde las acciones de mitigación de gases y compuestos efecto invernadero se dan.

En lo general, es necesario plantear pasos de desarrollo en forma transicional hasta lograr la meta de estimar emisiones con baja incertidumbre y representación espacial adecuada: (a) generación de mapas de USyV nacionales a escala 1:50 000, con la misma metodología usada por el INEGI para los de escala 1:250 000, para que sean interoperables e iniciar una transición hacia nuevos productos cartográficos; (b) cuantificar las incertidumbre asociada a los mapas de USyV para poder considerar los errores de estimación de los datos de actividad en los informes de emisiones de gases y compuestos efecto invernadero; y, (c) desarrollar un sistema de clasificación alternativo orientado a las necesidades de información en el combate al cambio climático.

La principal contribución de la primera acción propuesta será evaluar los avances en relación con las metas asociadas a los NDC del Sector AFOLU (tasa

cero de deforestación y mejoría de los pastizales – línea base considerada), a partir de la generación de insumos para la revisión de los Planes de Acción ante el Cambio Climático a escala municipal y estatal. Ello permitirá contar con elementos de evaluación de un sistema de gobernanza multinivel. Los productos de esta acción constituirán la base para la nueva generación de datos de actividad de los INEGyCEI para las comunicaciones nacionales y reportes bienales ante la CMNUCC, además de que serán elementos para el desarrollo de agendas conjuntas entre la SEMARNAT y la SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural), basados en información realista del estado de los recursos del uso del suelo y vegetación del país. Se espera que, con los insumos generados, se elaboren las líneas base para el desarrollo de políticas públicas en Ecosistemas Terrestres (pastizales, matorrales, bosques y selva), Ecosistemas Costeros (manglares) y Acuáticos Costeros (humedales de agua dulce, ecosistemas ribereños, entre otros). El monitoreo de la frontera agropecuaria de México, permitirá contar con elementos para orientar las políticas públicas asociadas a actividades productivas y su impacto en las metas de mitigación de gases efecto invernadero, así como para el seguimiento de los avances en el cumplimiento de las metas de los NDC y otros compromisos y políticas públicas nacionales.

Con relación a la cuantificación de la incertidumbre de los mapas de USyV, es necesario desarrollar una base de datos de campo a nivel nacional, para ejercicios de estimación de errores con metodologías estandarizadas para tal fin. Algunas bases de datos (de Jong *et al.*, 2018 y 2019a; Paz-Pellat *et al.*, 2019a; Paz-Pellat y Ortiz-Solorio, 2018) ya están disponibles para realizar esta tarea, para contar con mapas con ejercicios de validación (Mas y Fernández, 2004; Couturier y Mas, 2009; Mas *et al.*, 2009; Couturier *et al.*, 2012).

Finalmente, es necesario desarrollar un nuevo sistema de clasificación del uso del suelo y vegetación para México, orientado a acciones de mitigación y adaptación al cambio climático, que vaya más allá de ejercicios de agrupamientos de las clases de USyV del INEGI (Couturier y Mas, 2009; Couturier *et al.*, 2012; Gebhardt *et al.*, 2014 y 2015). La nueva clasificación debe considerar en forma explícita las limitaciones de los insumos (sensores remotos) utilizados, además, la separabilidad de clases basadas en las estimaciones de los almacenes de carbono (de Jong *et al.*, 2018 y 2019a; Paz-Pellat *et al.*, 2019a; Paz-Pellat y Ortiz-Solorio, 2018).

Las estimaciones actuales de los almacenes de carbono y flujos de CO₂ de los ecosistemas terrestres y sus componentes (*e.g.* de Jong *et al.*, 2019b; Herrera-Silveira *et al.*, 2019; Paz-Pellat *et al.*, 2019b) muestran alta incertidumbre y baja confiabilidad, por que de acuerdo a los análisis realizados es crítico implementar una estrategia que reduzca los errores de estimación de los mapas de uso del suelo y vegetación.

LITERATURA CITADA

- CONAFOR. 2004. Manual y Procedimientos para el Muestreo de Campo. Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2004-2009. Comisión Nacional Forestal. Guadalajara, Jalisco, México. 97 p.
- CONAFOR. 2009. Manual y Procedimientos para el Muestreo de Campo (Re-Muestreo 2009). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Comisión Nacional Forestal. Guadalajara, Jalisco, México. 140 p.
- CONAFOR. 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe Nacional México. FAO. Roma, Italia. 98 p.
- CONAFOR. 2017. Estrategia Nacional para REDD+. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco. <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/bycc/redd-en-mexico/estrategia-nacional-redd-enaredd/> (Consulta: noviembre 12, 2017).
- Couturier, S. y J. F. Mas. 2009. ¿Que tan confiable es una tasa de deforestación? ¿Cómo evaluar nuestros mapas con rigor estadístico? *Investigación Ambiental* 1:117-135.
- Couturier, S., J. M. Nuñez and M. Kolb. 2012. Measuring tropical deforestation with error margin: a method for REDD monitoring in south-eastern Mexico. pp. 269-296. In: Sndarshana, P., N. Nageswara-Rao and J. R. Soneti (eds.). *Tropical Forests*. DOI: 10.5772/31523.
- Covalada, S., F. Paz y A. Ranero. 2016. Carbono edáfico en Chiapas: Planteamiento de políticas públicas de mitigación de emisiones. *Terra Latinoamericana* 34:7-112.
- Covalada, S., F. Paz y A. Ranero. 2017. Propuesta de escenarios de intervención para REDD+ y RETUS a nivel regional, en el estado de Chiapas, México. *Elementos para Políticas Públicas* 1:25-40.
- Covalada, S., F. Paz y A. Ranero. 2018. Escenarios de mitigación en el sector rural de Chiapas utilizando modelos de estados y transiciones. *Madera y Bosques*. DOI:10.21829/myb.2018.2401897.
- Covalada-Ocón, S., F. Paz-Pellat, A. Ranero-Puig, M. I. Marín-Sosa, M. Casiano-Domínguez, B. de Jong, J. D. Etchevers-Barra y A. Velázquez-Rodríguez. 2019. Capítulo 24: Escenarios asociados al ciclo del carbono y sus interacciones: estado de Chiapas. pp. 573-602. En: Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez (eds.). *Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono*. Texcoco, Estado de México. ISBN 978-607-96490-7-4.
- de Jong, B., C. Anaya, O. Masera, M. Olguin, F. Paz, J. Etchevers, R. Martínez, G. Guerrero and C. Balbontin. 2010. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecology and Management* 260:1689-1701.
- de Jong, B., O. Masera, R. D. Martínez, F. Paz, M. Olguin, C. Anaya, C. Balbontin, M. Motolinia y G. Guerrero. 2006. Inventario nacional de emisiones de gases invernadero 1993-2002. Uso del suelo, cambio de uso del suelo y bosques. Reporte preparado para el Instituto Nacional de Ecología. D. F., México. 78 p.
- de Jong, B., M. Olguin, F. Rojas, V. Maldonado, F. Paz, J. Etchevers, C. O. Cruz y J. A. Argumedo. 2009. Inventario nacional de emisiones de gases invernadero 1990-2006. Uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura. Reporte preparado para el Instituto Nacional de Ecología. D. F., México. 119 p.
- de Jong, B., M. Olguin, F. Rojas, V. Maldonado y F. Paz. 2018. Base de datos de la biomasa de los sitios del inventario nacional forestal y de suelos del ciclo 2004-2007. *Elementos para Políticas Públicas* 2:69-84.
- de Jong, B., M. Olguin, F. Rojas, V. Maldonado y F. Paz. 2019a. Base de datos de la biomasa de los sitios del inventario nacional forestal periódico, ciclo 1992-1994. *Elementos para Políticas Públicas* 3:57-69.
- de Jong, B., F. Paz-Pellat, F. Rojas-García, D. R. Aryal, O. Masera-Cerutti, R. D. Martínez-Bravo, V. Salas-Aguilar, M. Ca-

- siano-Domínguez, S. Covalada-Ocón, J. D. Etchevers-Barra, A. Velázquez-Rodríguez y R. Vargas. 2019b. Capítulo 19: Bosques y selvas. pp. 386-435. En: Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez (eds.). Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México. ISBN 978-607-96490-7-4.
- Di Gregorio, A. and J. Latham. 2003. Africover Land Cover Classification and Mapping Project. pp. 236–254. *In*: Gebhardt, S., P. Maeda, T. Wehrmann, J. Argumedo and M. Schmidt. 2015. A proper land cover and forest type classification scheme for Mexico. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40:383-390.
- Gebhardt, S., T. Wehrmann, M. A. Muñoz, P. Maeda, J. Bishop, M. Schramm, R. Kopeinig, O. Cartus, J. Kellndorfer, R. Ressler, L. A. Santos and M. Schmidt. 2014. MAD-MEX: Automatic wall-to-wall land cover monitoring for the Mexican REDD-MRV program using all Landsat data. *Remote Sensing* 6:3923-3943.
- Gobierno de la República. 2015. Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional de México. México.
- Herrera-Silveira, J. A., A. Camacho-Rico, S. G. Cinco-Castro. M. Pech-Cárdenas, J. Caamal-Sosa, L. Carrillo-Baeza, E. Pech-Poot, K. Zenteno-Díaz, J. Erosa-Angulo, E. Us-Balam, O. Pérez-Martínez, I. Osorio-Moreno, C. Teutli-Hernández, B. de Jong, A. Velázquez-Rodríguez y F. Paz-Pellat. 2019. Capítulo 13: Manglares. pp. 240-259. En: Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez (eds.). Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México. ISBN 978-607-96490-7-4.
- INECC y SEMARNAT. 2015. Primer informe bienal de actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. INECC / SEMARNAT. México. 287 p.
- INECC y SEMARNAT. 2018. Sexta comunicación nacional y segundo informe bienal de actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC / SEMARNAT. CDMX, México. 757 p.
- INEGI. 1980. Sistema de Clasificación de Tipos de Agricultura y Tipos de Vegetación de México para la Carta de Uso del Suelo y Vegetación del INEGI, escala 1: 125 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Ags., México.
- INEGI. 1985. Conjunto Nacional de Información de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, Serie I. Dirección General de Geografía. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Ags., México.
- INEGI. 2002. Conjunto Nacional de Información de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, Serie II. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Ags., México.
- INEGI. 2005a. Conjunto Nacional de Información de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, Serie III. Dirección General de Geografía. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Ags., México.
- INEGI. 2005b. Guía para la Interpretación de Cartografía Uso del Suelo y Vegetación, escala 1: 250 000, Serie I y II. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Ags., México.
- INEGI. 2009. Guía para la Interpretación de Cartografía Uso del Suelo y Vegetación, escala 1: 250 000, Serie III. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Ags., México.
- INEGI. 2010. Conjunto Nacional de Información de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, Serie IV. Dirección General de Geografía. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Ags., México.
- INEGI. 2012. Guía para la Interpretación de Cartografía Uso del Suelo y Vegetación, escala 1: 250 000, Serie IV. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Ags., México.
- INEGI. 2013. Conjunto Nacional de Información de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, Serie V. Dirección General de Geografía. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Ags., México.
- INEGI. 2014. Guía para la Interpretación de Cartografía Uso del Suelo y Vegetación, escala 1: 250 000, Serie V. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Ags., México.
- INEGI. 2017a. Conjunto Nacional de Información de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, Serie VI. Dirección General de Geografía. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Ags., México.
- INEGI. 2017b. Guía para la Interpretación de Cartografía Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, Serie VI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Ags., México.
- IPCC. 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2. Land Use Change and Forestry. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Penman, J., M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe and F. Wagner (eds.). Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC.
- IPCC. 2006. Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Eggleston, H. S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan.
- Mas, J. F. y T. Fernández. 2003. Una evaluación cuantitativa de los errores en el monitoreo de los cambios de cobertura por comparación de mapas. *Invest. Geog* 51. ISSN2448-7279.

- Mas, J. F., A. Velázquez y S. Couturier. 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación Ambiental* 1:23-39.
- Paz, F. 2012. Una visión integral de territorio y su planeación ante el cambio climático: RETUS (Reducción de Emisiones de Todos los Usos del Suelo). pp. 693-699. En: Paz, F. y R. Cuevas (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano. Texcoco, Estado de México, México.
- Paz, F. 2015. ¿Es suficiente evaluar “datos de actividad x factores de emisión = emisiones” en mecanismos tipo REDD+ o RETUS? pp. 526-532. En: Paz, F. y J. Wong (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.
- Paz-Pellat, F. y C. A. Ortiz-Solorio. 2019. Base de datos de la evaluación de la degradación de los suelos en México. *Elementos para Políticas Públicas* 3:51-56.
- Paz-Pellat, F. y A. S. Velázquez-Rodríguez. 2018. Base de datos de perfiles de suelos en México. *Elementos para Políticas Públicas* 2:210-235.
- Paz-Pellat, F., V. M. Romero-Benítez, J. A. Argumedo-Espinoza, M. Bolaños-González, B. de Jong, J. C. de la Cruz-Cabrera y A. Velázquez-Rodríguez. 2019a. Capítulo 23: Dinámica del uso del suelo y vegetación. pp. 529-572. En: Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez (eds.). *Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde*. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México. ISBN 978-607-96490-7-4.
- Paz, F., V. M. Romero, J. Argumedo y J. C. Cabrera. 2018. Base de datos vectoriales multi-temporales de mapas de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 de México. *Elementos para Políticas Públicas* 2:125-146.
- Paz-Pellat, F., A. S. Velázquez-Rodríguez, J. D. Etchevers-Barra, C. I. Hidalgo-Moreno, M. Bolaños-González, B. de Jong, S. Covalada-Ocón, M. Fuentes-Ponce, G. Vela-Correa, F. García-Oliva, Mario Guevara y R. Vargas. 2019b. Capítulo 20: Suelos. pp. 436-468. En: Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez (eds.). *Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde*. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México. ISBN 978-607-96490-7-4.
- Paz, F., S. Covalada, A. Ranero, X. Ugarte, E. Esquivel, M. I. Marín, R. Cuevas, B. de Jong y J. D. Etchevers. 2012a. Estudio de Factibilidad para el mecanismo REDD+ en Chiapas. Recuperado de: http://www.pmc carbono.org/pmc/proyectos/CI_Factibilidad_REDD+.php (Consulta: agosto 30, 2016).
- Paz, F., V. M. Romero, J. Argumedo y J. C. Cabrera. 2018. Base de datos vectoriales multi-temporales de mapas de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 de México. *Elementos para Políticas Públicas* 2:125-146.
- PMC. 2015. Desarrollo de productos cartográficos de uso del suelo y cobertura 1:50 000 armonizados a los productos nacionales 1:250 000. Estudio de Factibilidad Técnica para el Pago de Bonos de Carbono en el Estado de México (RETUS con BASES EDOMEX). Coordinador: Fernando Paz-Pellat. Colaboradores: Ana L. Aguilar-García y Ma. I. Marín-Sosas. Texcoco, Estado de México. 40 p.
- PMC. 2016. Descripción de Claves de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250 000. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.
- PMC. 2017a. Mapas de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250 000. Metodología de Trabajo, Series 2.5, 6 y 6.5. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.
- PMC. 2017b. Diccionario de Datos para las Clases de Uso del Suelo y Vegetación para las Series 2, 2.5, 3, 4, 5, 6 y 6.5. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.

ANEXO A

En el Cuadro A1 se muestran las clases de los mapas de USyV, junto con los intervalos de alturas de las clases de vegetación y el tipo de sucesión aplicable a las clases. El INEGI define las clases de vegetación en dos categorías: primaria y secundaria. La vegetación primaria no ha sufrido perturbaciones y se encuentra en su condición original. La vegetación

secundaria se refiere a vegetación que ha sufrido perturbaciones, antrópicas o naturales, por lo que su estructura o composición ha experimentado cambios. En el concepto de sucesión vegetal, el INEGI define tres etapas: vegetación herbácea (letra h), vegetación arbustiva (letra a) y vegetación arbórea (letra A). Las letras que describen el estado de la sucesión se asocian al término VS (*i.e.* VSA, VSa, VSh), que significa Vegetación Secundaria.

Cuadro A1. Tipos de vegetación y clases de uso del suelo del INEGI y sus agrupaciones, incluidas las categorías de FAO FRA 2010, con sus características. En Sucesión, A=arbóreo, a=arbustivo y h=herbáceo; con 0 si aplica y 1 cuando aplica.

Grupos de Vegetación / Agroecosistemas / Otros	Tipo de Vegetación / Clases de Uso del Suelo	Categorías FAO FRA 2010	Intervalo de Alturas (m)	Clave	Sucesión		
					A	a	h
Bosque de Coníferas	Bosque de Ayarín	Bosques	15-40	BS	1	1	1
	Bosque de Cedro	Bosques	15-35	BB	1	1	1
	Bosque de Oyamel	Bosques	15-30	BA	1	1	1
	Bosque de Pino	Bosques	15-30	BP	1	1	1
	Bosque de Pino-Encino	Bosques	8-35	BPQ	1	1	1
	Bosque de Táscate	Bosques	8-15	BJ	1	1	1
	Matorral de Coníferas	Otras tierras boscosas	1-5	MJ	0	1	1
Bosque de Encino	Bosque de Encino	Bosques	4-30	BQ	1	1	1
	Bosque de Encino-Pino	Bosques	8-35	BQP	1	1	1
Bosque Mesófilo de Montaña	Bosque Mesófilo de Montaña	Bosques	10-25	BM	1	1	1
Selva Perennifolia	Selva Alta Perennifolia	Bosques	> 30	SAP	1	1	1
	Selva Alta Subperennifolia	Bosques	> 30	SAQ	1	1	1
	Selva Mediana Perennifolia	Bosques	20-30	SMP	1	1	1
	Selva Mediana Subperennifolia	Bosques	25-30	SMQ	1	1	1
	Selva Baja Perennifolia	Bosques	4-15	SBP	1	1	1
	Selva Baja Subperennifolia	Bosques	4-15	SBPQ	1	1	1

Cuadro A1. Tipos de vegetación y clases de uso del suelo del INEGI y sus agrupaciones, incluidas las categorías de FAO FRA 2010, con sus características. En Sucesión, A=arbóreo, a=arbusitivo y h=herbáceo; con 0 si aplica y 1 cuando aplica. (Continuación).

Grupos de Vegetación / Agroecosistemas / Otros	Tipo de Vegetación / Clases de Uso del Suelo	Categorías FAO FRA 2010	Intervalo de Alturas (m)	Clave	Sucesión		
					A	a	h
Selva Subcaducifolia	Selva Mediana Subcaducifolia	Bosques	15-30	SMS	1	1	1
	Selva Baja Subcaducifolia	Bosques	4-15	SBS	1	1	1
Selva Caducifolia	Selva Mediana Caducifolia	Bosques	15-20	SMC	1	1	1
	Selva Baja Caducifolia	Bosques	4-15	SBC	1	1	1
	Matorral Subtropical	Bosques	2-4	MST	1	1	1
Selva Espinosa	Selva Baja Espinosa Caducifolia	Bosques	8-10	SBK	1	1	1
	Selva Baja Espinosa Subperennifolia	Bosques	5-11	SBQ	1	1	1
	Mezquital Tropical	Bosques	5-10	MKE	1	1	1
Pastizal	Pastizal Natural	Otras tierras	0.2-0.7	PN	0	1	1
	Pastizal Halófilo	Otras tierras	0.4-0.7	PH	0	1	1
	Pastizal Gipsófilo	Otras tierras		PY	0	1	1
	Pradera de Alta Montaña	Otras tierras	< 1	VW	0	1	1
	Sabana	Otras tierras	3-6 (arbóreo)	VS	1	1	1
Matorral Xerófilo	Vegetación de Desiertos Arenosos	Otras tierras		VD	0	1	1
	Vegetación Gipsófila	Otras tierras		VY	0	1	1
	Vegetación Halófila	Otras tierras		VH	0	1	1
	Matorral Desértico Micrófilo	Otras tierras	0.5-1.5	MDM	0	1	1
	Matorral Desértico Rosetófilo	Otras tierras	0.5-0.7	MDR	0	1	1
	Matorral Crasicaule	Otras tierras	2-4	MC	1	1	1
	Matorral Sarcocaulo	Otras tierras boscosas		MSC	0	1	1

Cuadro A1. Tipos de vegetación y clases de uso del suelo del INEGI y sus agrupaciones, incluidas las categorías de FAO FRA 2010, con sus características. En Sucesión, A=arbóreo, a=arbovistivo y h=herbáceo; con 0 si aplica y 1 cuando aplica. (Continuación).

Grupos de Vegetación / Agroecosistemas / Otros	Tipo de Vegetación / Clases de Uso del Suelo	Categorías FAO FRA 2010	Intervalo de Alturas (m)	Clave	Sucesión		
					A	a	h
	Matorral Sarcocrasicaule	Otras tierras boscosas		MSCC	0	1	1
	Matorral Sarcocrasicaule de Neblina	Otras tierras boscosas		MSN	0	1	1
	Matorral Rosetófilo Costero	Otras tierras	0.2-0.4	MRC	0	1	1
	Matorral Espinoso Tamaulipeco	Otras tierras boscosas	1.5-2	MET	1	1	1
	Matorral Submontano	Otras tierras boscosas	2.5-5	MSM	1	1	1
	Chaparral	Otras tierras boscosas	1-4	ML	0	1	1
	Mezquital	Otras tierras boscosas		MKX	0	1	1
Vegetación Hidrófila	Selva de Galería	Bosques	7	SG	1	1	1
	Bosque de Galería	Bosques	4-30	BG	1	1	1
	Vegetación de Galería	Otras tierras	1-2	VG	0	1	1
	Manglar	Bosques	1-30	VM	1	1	1
	Popal	Otras tierras	1-2	VA	0	0	0
	Tular	Otras tierras	0.8-2.5	VT	0	0	0
	Vegetación de Petén	Bosques	8-12	VPT	1	1	1
	Vegetación Halófila-Hidrófila	Otras tierras		VHH	0	1	1
Otros Tipos de Vegetación	Mezquital	Bosques	5-20	MK	1	1	1
	Vegetación de Dunas Costeras	Otras tierras		VU	0	1	1
	Palmar Natural	Bosques	5-30	VP	1	1	1
Vegetación Inducida	Pastizal Inducido	Otras tierras		PI	0	0	0
	Sabanoide	Otras tierras		VSI	0	0	0
	Palmar Inducido	Otras tierras		VPI	0	0	0
	Bosque Inducido	Bosques		BI	0	0	0

Cuadro A1. Tipos de vegetación y clases de uso del suelo del INEGI y sus agrupaciones, incluidas las categorías de FAO FRA 2010, con sus características. En Sucesión, A=arbóreo, a=arbustivo y h=herbáceo; con 0 si aplica y 1 cuando aplica. (Continuación).

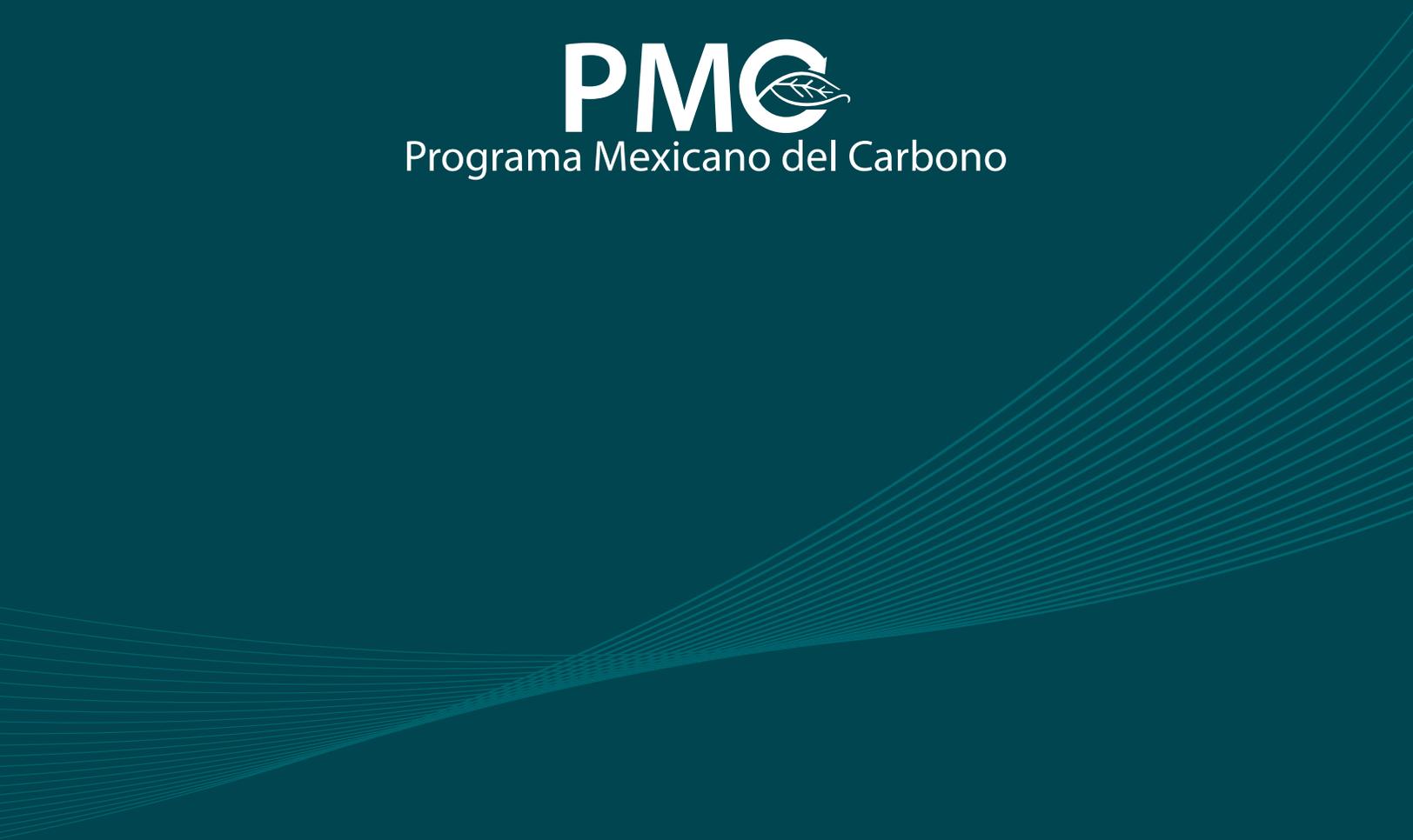
Grupos de Vegetación / Agroecosistemas / Otros	Tipo de Vegetación / Clases de Uso del Suelo	Categorías FAO FRA 2010	Intervalo de Alturas (m)	Clave	Sucesión		
					A	a	h
Agroecosistemas	Acuícola	Otras tierras		ACUI	0	0	0
	Agricultura de Humedad	Otras tierras		HA	0	0	0
	Agricultura de Riego	Otras tierras		RA	0	0	0
	Agricultura de Temporal	Otras tierras		TA	0	0	0
	Bosque Cultivado	Bosques		BC	0	0	0
	Pastizal Cultivado	Otras tierras		PC	0	0	0
	Desprovisto de vegetación	Otras tierras		ADV	0	0	0
Otros Rasgos	Asentamientos Humanos	Otras tierras		AH	0	0	0
	Cuerpos de Agua	Agua		H2O	0	0	0
	País Extranjero	Otras tierras		P/E	0	0	0
	Zona Urbana	Otras tierras		ZU	0	0	0
	Sin Vegetación Aparente	Otras tierras		DV	0	0	0

Con relación a las alturas de la vegetación, el INEGI utiliza los términos que se definen en el Cuadro A2. El tipo de vegetación bosque/selva se refiere a vegetación

arbórea con un mínimo de 4 m de altura y una cobertura aérea del 10% o mayor, en donde el mínimo define si la clase es vegetación o no (Cuadro A1).

Cuadro A2. Clases de altura del INEGI.

Tipo vegetación	Término	Altura (m)
Arbóreo	Alto	> 30
	Mediano	$15 \leq \text{Altura} \leq 30$
	Bajo	$4 \leq \text{Altura} \leq 15$
Arbustivo	Ninguno	< 4
Herbáceo	Ninguno	< 2



PMC
Programa Mexicano del Carbono