

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/334637911>

# CAPÍTULO 19. Bosques y Selvas

Chapter · July 2019

CITATIONS  
0

READS  
303

12 authors, including:



**Bernardus H J de Jong**  
El Colegio de la Frontera Sur  
141 PUBLICATIONS 4,964 CITATIONS

SEE PROFILE



**Fernando Paz Pellat**  
Colegio de Postgraduados  
203 PUBLICATIONS 794 CITATIONS

SEE PROFILE



**Fabiola Rojas-García**  
Colegio de Postgraduados  
40 PUBLICATIONS 195 CITATIONS

SEE PROFILE



**Deb Raj Aryal**  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología  
34 PUBLICATIONS 159 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



We are preparing the REDD+ state strategy for Chiapas, Mexico [View project](#)



A REDD+ FOR CHIAPAS [View project](#)

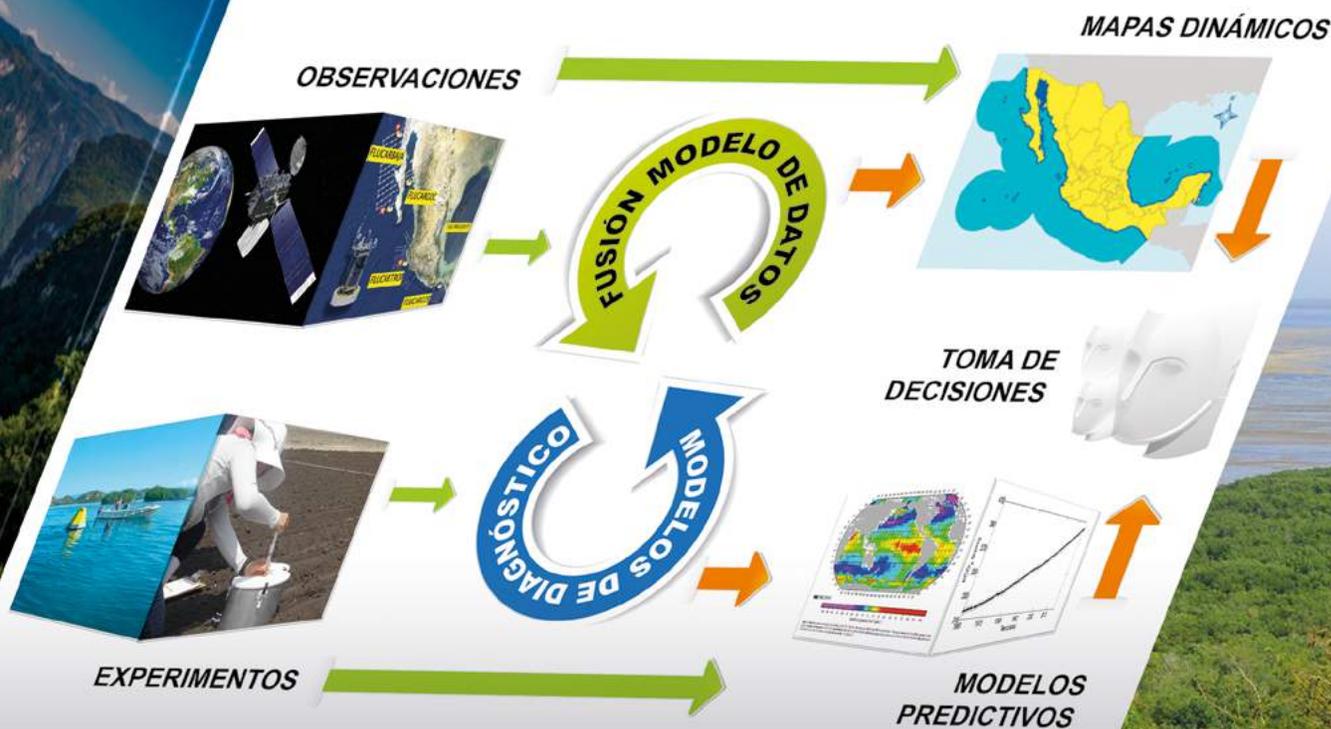
# Estado del Ciclo del Carbono en México

## Agenda Azul y Verde

### PRIMER REPORTE

**Editores**

Fernando Paz Pellat  
J. Martín Hernández Ayón  
Ramón Sosa Ávalos  
Alma S. Velázquez Rodríguez







Programa Mexicano del Carbono

---

RED TEMÁTICA DEL **CONACYT**

## FORMA DE CITAR

Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez. (Editores). 2019. Estado del Ciclo del Carbono: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. ISBN: EN TRÁMITE. 716 p.

Programa Mexicano del Carbono A.C.  
Calle Chiconautla No. 8 Interior A  
Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56230  
Texcoco, Estado de México, México

---

[www.pmcarbono.org](http://www.pmcarbono.org)

Esta obra fue elaborada por el Programa Mexicano del Carbono (PMC).

Se prohíbe la reproducción parcial o total de esta obra, por cualquier medio.

# Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde

**Fernando Paz Pellat**  
**J. Martín Hernández Ayón**  
**Ramón Sosa Ávalos**  
**Alma S. Velázquez Rodríguez**  
Editores

Programa Mexicano del Carbono

Junio 2019



## PRESENTACIÓN

La síntesis ***Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde, es el Primer Reporte*** que representa una contribución significativa a la difusión del conocimiento del ciclo del carbono en México y su efecto en el cambio climático. Esta obra, realizada por numerosos especialistas, constituye un reflejo del estado del conocimiento actual del ciclo del carbono y sus interacciones, en los ecosistemas acuáticos y terrestres. La información que contiene, se fundamenta en el análisis de diversas bases de datos sólidamente respaldadas por artículos científicos, capítulos de libros, libros, memorias de eventos académicos, reportes técnicos y literatura gris (tesis de licenciatura y posgrado, información no publicada). Se presenta la variabilidad espacial y temporal del ciclo del carbono y sus flujos, en los distintos ecosistemas del país, lo que exhorta al lector a instituir un criterio sobre el estado del conocimiento del ciclo del carbono, así como a apropiarse de lo que falta por hacer en pro del conocimiento integral de este ciclo, a diferentes escalas.

El Programa Mexicano del Carbono (PMC), desde sus inicios ha establecido mecanismos para coordinar, a nivel nacional, los esfuerzos de investigación relacionados con el ciclo del carbono en México. Uno de los objetivos del PMC es generar conocimiento oportuno y sistemático de los flujos y reservorios dentro del ciclo del carbono en los ecosistemas acuáticos (agenda azul), terrestres (agenda verde), además de las áreas de atmósfera, dimensión social y bioenergía, que será de vital importancia para definir las estrategias y políticas públicas que deberán implementarse, en México, en relación con la mitigación y adaptación ante los impactos del cambio climático en los ecosistemas.

La presente obra fue coordinada por el PMC y la Red Temática Programa Mexicano del Carbono y podrá ser consultada por la comunidad científica, tomadores de decisiones y sociedad en general, para utilizarla como base en el diseño de estrategias de planeación y políticas públicas, enfocadas a atender los problemas detectados dentro del ciclo del carbono y su relación con el cambio climático en México. Asimismo, a partir de su análisis, se podrán plantear nuevas investigaciones encaminadas a mejorar el entendimiento del ciclo del carbono en los distintos almacenes (agua, tierra y atmósfera), anticipar escenarios, a mediano y largo plazo, sobre el comportamiento de dicho ciclo ante futuras intervenciones, plantear estrategias para llenar los vacíos de información detectados, e intensificar esfuerzos para generar conocimiento en las regiones menos estudiadas del país.

Esperamos que el ***Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde***, represente para el lector interesado, una referencia sobre las distintas temáticas que involucra el tema del carbono en México y marque un parteaguas en la investigación científica que sobre el tema se desarrolla en el país.

*Los Editores*



# Contenido

<b>ECOSISTEMAS MARINOS</b>		<b>1</b>
1	Almacenes y flujos en ecosistemas marinos <i>Coordinadores: Cecilia Chapa Balcorta, Ramón Sosa Ávalos, José Martín Hernández Ayón</i>	3
2	Producción primaria del fitoplancton en los ecosistemas marinos <i>Coordinador: Ramón Sosa Ávalos</i>	24
3	Producción exportada en ecosistemas marinos <i>Coordinador: Fernando Aguirre Bahena</i>	47
4	Acidificación de los mares mexicanos <i>Coordinador: José Martín Hernández Ayón</i>	65
5	Zona del mínimo de oxígeno en el Pacífico mexicano <i>Coordinador: Helmut Maske</i>	86
6	Bosques de macroalgas en arrecifes templados <i>Coordinadores: Rodrigo Beas Luna, Julio Lorda, Luis Malpica Cruz, Gabriela Montaña Moctezuma, José Alberto Zepeda Domínguez, Juan G. Vaca Rodríguez, Alicia Abadía Cardoso</i>	103
<b>ECOSISTEMAS COSTEROS</b>		<b>125</b>
7	Arrecifes y comunidades coralinas <i>Coordinadores: Carlos Orión Norzagaray López, Luis Eduardo Calderón Aguilera</i>	127
8	Pastos marinos <i>Coordinador: Jorge A. Herrera Silveira</i>	150
9	Ambientes costeros hipersalinos <i>Coordinador: Jacob. A. Valdivieso Ojeda</i>	178
10	Lagunas costeras <i>Coordinador: Jorge A. Herrera Silveira</i>	192
11	Flujos en lagunas costeras: bahía de San Quintín <i>Coordinadores: Ma. del Carmen Ávila López y José Martín Hernández Ayón</i>	207

12	Almacenes y flujos en lagunas costeras: laguna Celestún	224
	Coordinador: <i>Jorge A. Herrera Silveira</i>	
13	Manglares	240
	Coordinador: <i>Jorge A. Herrera Silveira</i>	
	<b>ECOSISTEMAS ACUÁTICOS TERRESTRES</b>	<b>260</b>
14	Flujos laterales tierra-océano	263
	Coordinadores: <i>Fernando Paz Pellat, Víctor Salas Aguilar</i>	
15	Ecosistemas acuáticos epicontinentales	285
	Coordinador: <i>Javier Alcocer</i>	
16	Humedales de agua dulce	314
	Coordinadora: <i>María Elizabeth Hernández Alarcón</i>	
17	Ecosistemas ribereños	328
	Coordinadores: <i>Gerardo Cruz Flores, Eloísa A. Guerra Hernández</i>	
	<b>ECOSISTEMAS TERRESTRES</b>	<b>350</b>
18	Matorrales y pastizales	353
	Coordinadores: <i>Oscar Briones, Yareni Perroni</i>	
19	Bosques y selvas	386
	Coordinadores: <i>Ben de Jong, Fernando Paz Pellat</i>	
20	Suelos	436
	Coordinadores: <i>Fernando Paz Pellat, Alma S. Velázquez Rodríguez</i>	
21	Agricultura	469
	Coordinador: <i>Marcos Casiano Domínguez</i>	
22	Ganadería	492
	Coordinadores: <i>Octavio Alonso Castelán Ortega, Juan Carlos Ku Vera</i>	
23	Dinámica del uso del suelo y vegetación	529
	Coordinador: <i>Fernando Paz Pellat</i>	



24	Escenarios asociados al ciclo del carbono y sus interacciones: estado de Chiapas	573
	Coordinadores: <i>Sara Covaleda Ocón, Fernando Paz Pellat</i>	

## ATMÓSFERA 603

25	Flujos verticales de carbono en ecosistemas terrestres	605
	Coordinadores: <i>Josué Delgado Balbuena, Enrico A. Yépez, Fernando Paz Pellat, Gregorio Ángeles Pérez, María Susana Alvarado Barrientos, Stephen H. Bullock, Alejandro E. Castellanos, Tulio Arredondo, Bernardo Figueroa Espinoza, Jaime Garatuzza Payán, Eugenia González del Castillo, Enrique González Sosa, Yolanda Maya Delgado, Julio C. Rodríguez, Rodrigo Vargas, Enrique R. Vivoni, Christopher J. Watts</i>	

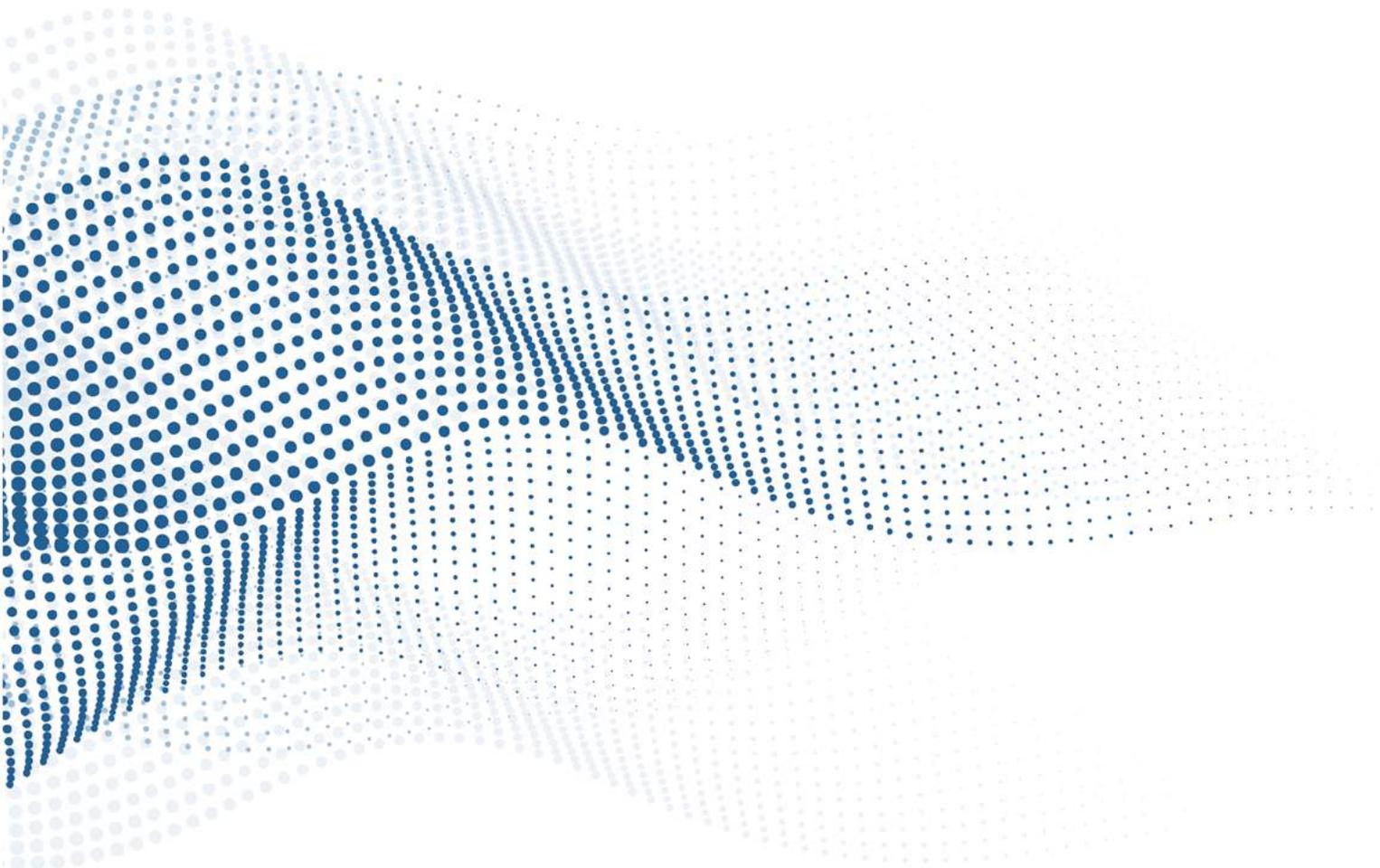
## BIOENERGÍA 626

26	Bioenergía	629
	Coordinadores: <i>René David Martínez Bravo, Omar Masera Cerutti</i>	

## DIMENSIÓN SOCIAL 658

27	Dimensión social en ecosistemas marinos y costeros	661
	Coordinadora: <i>María Esther Cruz Colín</i>	
28	Dimensión social en ecosistemas terrestres	687
	Coordinadores: <i>Fernando Paz Pellat, Gontrán Villalobos Sánchez, Mariela Fuentes Ponce y Sara Covaleda Ocón</i>	

# ECOSISTEMAS TERRESTRES





## Capítulo 19

# BOSQUES Y SELVAS

### Coordinadores

**Ben de Jong<sup>1</sup> y Fernando Paz-Pellat<sup>2</sup>**

### Colaboradores

**Fabiola Rojas-García<sup>3</sup>, Deb Raj Aryal<sup>4</sup>, Omar Masera-Cerutti<sup>5</sup>, René D. Martínez-Bravo<sup>5</sup>,  
Víctor Salas-Aguilar<sup>6</sup>, Marcos Casiano-Domínguez<sup>7</sup>, Sara Covalada-Ocón<sup>8</sup>,  
Jorge D. Etchevers-Barra<sup>9</sup>, Alma Velázquez-Rodríguez<sup>10</sup> y Rodrigo Vargas<sup>11</sup>**

<sup>1</sup>Unidad Campeche, El Colegio de la Frontera Sur, Campeche, Campeche, México.

<sup>2</sup>GRENASER, Colegio de Postgraduados *campus* Montecillo, Montecillo, Estado de México, México.

<sup>3</sup>Postgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados, *campus* Montecillo, Montecillo, Estado de México, México.

<sup>4</sup>Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad Autónoma Chiapas, Villaflores, Chiapas, México.

<sup>5</sup>Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, *campus* Morelia, UNAM, Morelia, Michoacán, México.

<sup>6</sup>Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

<sup>7</sup>Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, SLP, México.

<sup>8</sup>Kibeltik Clima y Medio Ambiente, A.C., San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México.

<sup>9</sup>Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental, Colegio de Postgraduados, *campus* Montecillo, Montecillo, Estado de México.

<sup>10</sup>Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México, El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, México.

<sup>11</sup>Department of Plant and Soil Sciences, University of Delaware, Newark, DE, USA.

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas terrestres, particularmente los bosques, tienen grandes almacenes de carbono (C) en la biomasa aérea y subterránea (Ruesch y Gibbs, 2008; Carré *et al.*, 2010; Pan *et al.*, 2011), por lo que sus cambios repercuten en las emisiones de gases efecto invernadero y el papel que estos ecosistemas tienen en los balances globales (Brown y Lugo, 1982), particularmente los asociados a la deforestación (Pan *et al.*, 2011; Houghton *et al.*, 2012). Los bosques, además de los humedales, son tipos de vegetación que tienen los mayores almacenes de carbono de los ecosistemas terrestres en sus distintos componentes (Brown y Lugo, 1982; Pacala *et al.*, 2007; Pan *et al.*, 2011), por lo que es importante su análisis con relación al cambio climático (IPCC, 2013). El término bosques incluye a las selvas (bosques tropicales), por lo que se usará, en lo sucesivo, como sinónimo de bosques y selvas, a menos que se especifique lo contrario.

Los bosques utilizan la radiación solar para crecer y mantenerse, transformándola en energía química a través del proceso de fotosíntesis (Chapin *et al.*, 2011), por lo que la tasa de captura de la radiación

está codicionada por el medio (Clark *et al.*, 1998; de Castilho *et al.*, 2000). Para poder estimar el contenido de carbono, es necesario conocer la biomasa de los árboles (Brown *et al.*, 1989; Peterson *et al.*, 2012), comprender el ciclo de nutrientes (Hughes *et al.*, 1999; Augusto *et al.*, 2000) y, en lo general, los ciclos biogeoquímicos asociados (Schlesinger, 1997).

La realización de inventarios nacionales de GEI (INEGEI), con base en los términos de las guías del IPCC (1996), requiere el análisis de los almacenes y flujos de GEI por sectores. Los bosques se incluyen en el sector de Uso del Suelo, Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura o forestería (USCUSS). El cambio de uso del suelo (CUS) en los ecosistemas terrestres constituye una de las principales fuentes de emisión a nivel global (Houghton, 2003; Archard *et al.*, 2004; Houghton *et al.*, 2012; FAO e ITPS, 2015), con valores que oscilan entre el 12 y el 20% de las emisiones totales (Houghton *et al.*, 2012). Éste porcentaje ha disminuido con el tiempo, principalmente a causa del incremento en las emisiones provenientes de los combustibles fósiles. Actualmente, las guías y directrices del IPCC (2003 y 2006) definen al sector en forma integrada con la agricultura (incluye la ganadería), como Agricultura, Forestería y Otros

Usos del Suelo (AFOUS).

Los bosques han tenido un papel preponderante en las negociaciones de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), durante la última década debido a la adopción inicial del mecanismo REDD, que evolucionó a REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación evitada + conservación e incremento de los almacenes de carbono y manejo forestal sustentable), el cual plantea incentivos financieros para evitar la deforestación y degradación forestal (Gibbs *et al.*, 2007; Kohl *et al.*, 2009). El ímpetu en la implementación de REDD+ ha generado numerosas discusiones sobre su práctica y métodos de aplicación. El concepto de bosque requiere de una definición clara para poder caracterizar la deforestación (cambio de bosque a no bosque) y degradación forestal (Sasaki y Putz, 2009; Putz y Redford, 2010; Morales-Barquero *et al.*, 2014). En términos de los diferentes métodos de monitoreo, reporte y verificación (MRV) establecidos para REDD+ (inventarios forestales y sensores remotos; Birdsey *et al.*, 2013), la degradación forestal (bosque que permanece como bosque; cambio de bosque sin

degradación a bosque degradado) es importante de considerar, aunque difícil de implementar (Vargas *et al.*, 2013; Morales-Barquero *et al.*, 2014).

Uno de los problemas críticos en la implementación de REDD+ es la incertidumbre asociada a los almacenes y emisiones GEI (Pelletier *et al.*, 2010 y 2013; Sheng, 2017), por lo que su caracterización reviste gran importancia. Los errores de estimación de la biomasa en los inventarios forestales son, principalmente, función de errores de muestreo, de medición, de selección del modelo de estimación, de estimación de los parámetros del modelo y, de representatividad espacial (Parresol, 1999; Chave *et al.*, 2004; Pelletier *et al.*, 2010; Molto *et al.*, 2013; Temesgen *et al.*, 2015).

### BASES PARA LOS ANÁLISIS

#### Tipos de bosques y selvas

El análisis de los almacenes de carbono de los bosques y selvas de México, se basa en la clasificación de usos del suelo y vegetación (USyV) del INEGI (1980), Cuadro 1.

Cuadro 1. Tipos y características de bosques y selvas.

Grupos de Vegetación / Agroecosistemas	Tipo de Vegetación	Intervalo de Alturas (m)	Clave	Sucesión*		
				A	a	h
Bosque de Coníferas	Bosque de Ayarín	15-40	BS	1	1	1
	Bosque de Cedro	15-35	BB	1	1	1
	Bosque de Oyamel	15-30	BA	1	1	1
	Bosque de Pino	15-30	BP	1	1	1
	Bosque de Pino-Encino	8-35	BPQ	1	1	1
	Bosque de Táscate	8-15	BJ	1	1	1
Bosque de Encino	Bosque de Encino	4-30	BQ	1	1	1
	Bosque de Encino-Pino	8-35	BQP	1	1	1
Bosque Mesófilo de Montaña	Bosque Mesófilo de Montaña	10-25	BM	1	1	1
Selva Perennifolia	Selva Alta Perennifolia	> 30	SAP	1	1	1
	Selva Alta Subperennifolia	> 30	SAQ	1	1	1
	Selva Mediana Perennifolia	20-30	SMP	1	1	1

**Cuadro 1. Tipos y características de bosques y selvas. (Continuación).**

Grupos de Vegetación / Agroecosistemas	Tipo de Vegetación	Intervalo de Alturas (m)	Clave	Sucesión*		
				A	a	h
Selva Perennifolia	Selva Mediana Subperennifolia	25-30	SMQ	1	1	1
	Selva Baja Perennifolia	4-15	SBP	1	1	1
	Selva Baja Subperennifolia	4-15	SBPQ	1	1	1
Selva Subcaducifolia	Selva Mediana Subcaducifolia	15-30	SMS	1	1	1
	Selva Baja Subcaducifolia	4-15	SBS	1	1	1
Selva Caducifolia	Selva Mediana Caducifolia	15-20	SMC	1	1	1
	Selva Baja Caducifolia	4-15	SBC	1	1	1
Selva Espinosa	Selva Baja Espinosa Caducifolia	8-10	SBK	1	1	1
	Selva Baja Espinosa Subperennifolia	5-11	SBQ	1	1	1
	Mezquital Tropical	5-10	MKE	1	1	1
Vegetación Hidrófila	Selva de Galería	7	SG	1	1	1
	Bosque de Galería	4-30	BG	1	1	1
Vegetación Inducida	Bosque Inducido		BI	0	0	0
Agroecosistemas	Bosque Cultivado		BC	0	0	0

\* En sucesión: A = arbóreo, a = arbustivo, h = herbáceo; con 0 si no aplica y 1 cuando aplica.

El INEGI utiliza el concepto de sucesión de la vegetación en dos clases: primaria y secundaria. La vegetación primaria es aquella sin perturbaciones, que se encuentra en su condición original. La vegetación secundaria (VS), por otra parte, se refiere a vegetación que ha sufrido perturbaciones antrópicas o naturales, por lo que su estructura o composición ha experimentado cambios. De acuerdo con el concepto de sucesión vegetal, el INEGI define tres estados en función de la predominancia de los estratos: 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).

El sistema de clasificación del INEGI, define a la clase bosques (bosques y selvas) como vegetación arbórea de una altura mínima de 4 m a madurez y una cobertura aérea mínima del 10%. FAO usa una definición

similar, pero con una altura mínima de 5 m (FAO, 2010). Adicionalmente al criterio de altura y cobertura aérea, se debe definir la unidad mínima de mapeo (UMM), la cual FAO establece en 0.5 ha (FAO, 2010) e INEGI en 50 ha, en forma nominal, para la escala 1:250 000 (INEGI, 1997), aun cuando las UMM son generalmente menores en los tipos de vegetación con áreas promedio de cientos de hectáreas (de Jong *et al.*, 2018). Las alturas de las selvas se definen como: alta (mayor de 30 m), mediana (mayor a 15 m a 30 m) y baja (de 4 a 15 m).

#### Almacenes y flujos de carbono en los bosques

Los almacenes de carbono en los bosques, definidos por IPCC (2003 y 2006) corresponden a la biomasa aérea, a la biomasa subterránea viva y muerta, al material leñoso caído sobre la superficie, al mantillo y al suelo, Figura 1.

# ALMACENES DE CARBONO

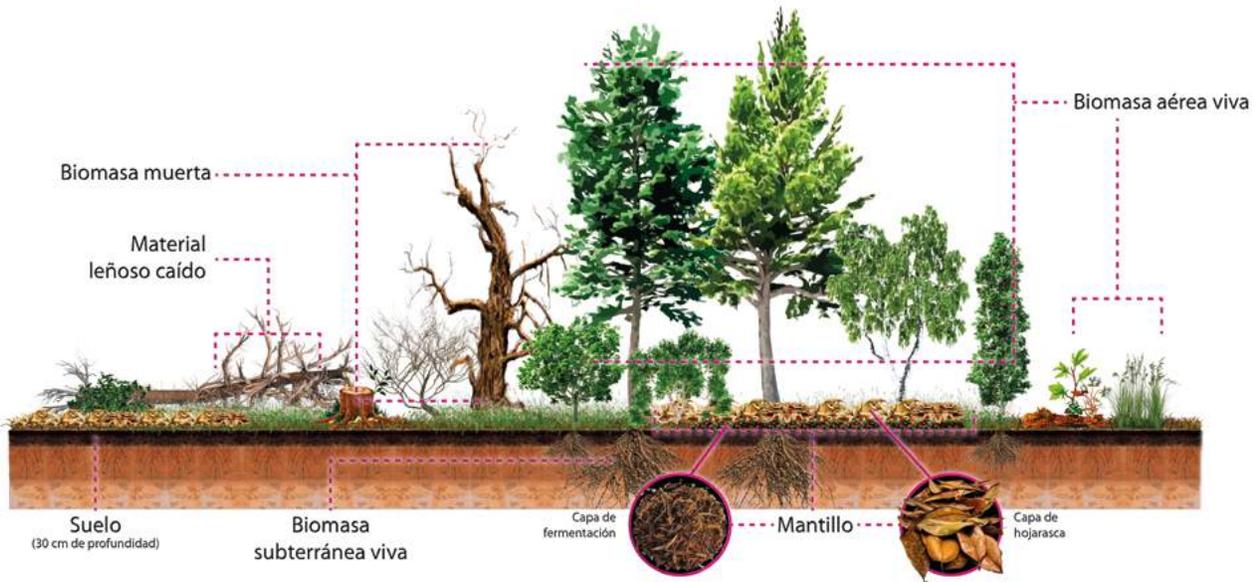


Figura 1. Almacenes de carbono en los bosques. Fuente: Casiano *et al.* (2018).

La Figura 2 describe las transferencias y flujos entre los distintos almacenes de los bosques: biomasa arriba del suelo (a.d.s.), raíces, mantillo, materia muerta (material leñoso caído), suelo y productos maderables.

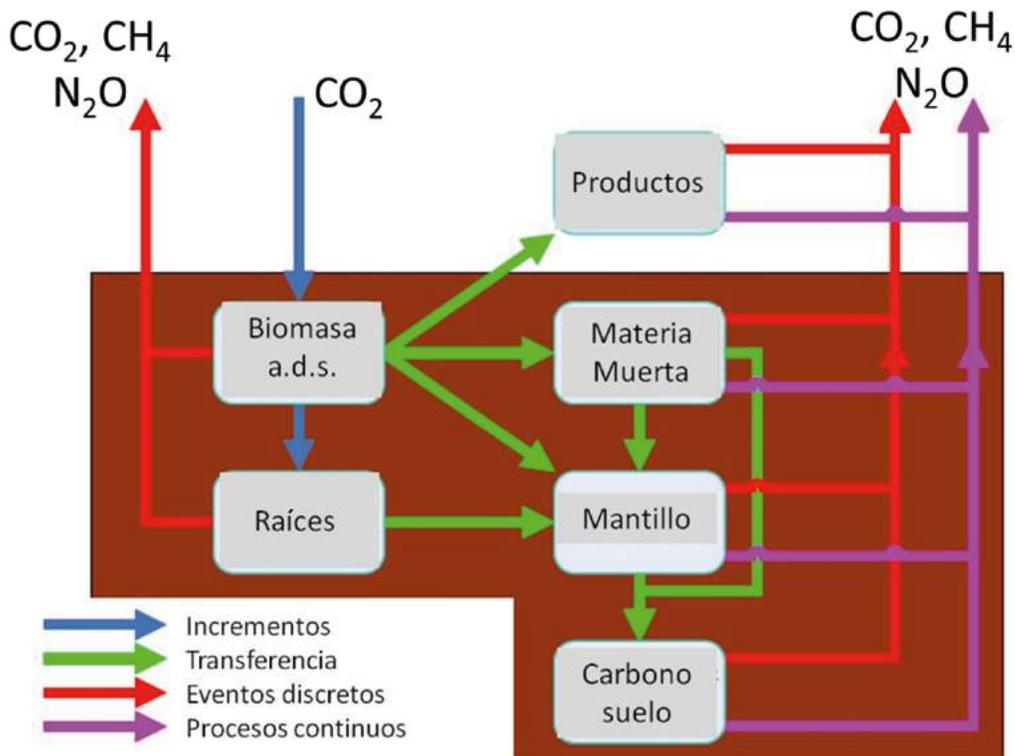


Figura 2. Transferencias y flujos entre los almacenes de carbono de los bosques.



En México se realizó un inventario nacional forestal en el periodo 1992-1994 (SARH, 1994), el cual sirvió de base a de Jong *et al.* (2006 y 2010) para el INEGEI de la Tercera Comunicación de México ante la CMNUCC. A partir de 2004, la Comisión Nacional Forestal implementó el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) a partir del uso de conglomerados, con cuatro sitios de muestreo de 400 m<sup>2</sup> para levantar información dasométrica, más otras variables (CONAFOR, 2004). Para el INFyS del primer ciclo de medición, con ciclos programados con duración de 5 años, se registraron alrededor de 22 000 conglomerados distribuidos en todo el país, con diferentes espaciamientos entre ellos, de acuerdo con los grupos de vegetación del INEGI (CONAFOR, 2004; de Jong *et al.*, 2018). En este primer ciclo solo se midieron variables asociadas con la biomasa aérea viva y muerta (tocones, árboles muertos en pie; aunque en los toconos no se midió su altura y diámetro). La información dasométrica obtenida en el primer ciclo se utilizó para generar el cuarto INEGEI (de Jong *et al.*, 2009) de la Cuarta Comunicación de México ante a CMNUCC y la evaluación de los recursos forestales FAO FRA 2010 de México (CONAFOR, 2010).

El segundo ciclo de medición inició en el 2009 (CONAFOR, 2009), se incluyeron los almacenes de material leñoso caído (cama de combustibles), mantillo y suelo, además de la biomasa aérea viva y muerta, por lo que por primera vez se obtuvieron datos completos de los almacenes definidos por el IPCC para los inventarios nacionales de GEI. Actualmente se está en el tercer ciclo de medición, aun cuando los datos todavía no están disponibles.

### Estudios locales o regionales de almacenes de carbono

Durante las dos últimas décadas en México se han realizado estudios de los almacenes de carbono, principalmente biomasa y suelos. Dichos estudios, en la mayoría de los casos, se desarrollan a partir de cronosecuencias para aproximar la dinámica del carbono con datos de bosques degradados en sucesión (ver Caja 1) y bosques intactos. La recuperación de bosques

secundarios o degradados es una fuente importante de recuperación de carbono aéreo, que puede compensar las pérdidas por deforestación (Chazdon *et al.*, 2016).

La dinámica del carbono producto de cambios en el uso del suelo se ha estudiado en bosques tropicales caducifolios (Hughes *et al.*, 1999; Kauffman *et al.*, 2003 y 2009; Urquiza-Haas *et al.*, 2007; Eaton y Lawrence, 2008; Vargas *et al.*, 2009; Jaramillo *et al.*, 2011; Mora *et al.*, 2017), bosques tropicales perennifolios y subperennifolios (Williams, 1983; Hughes *et al.*, 2000; Jaramillo *et al.*, 2003a y b; Read y Lawrence, 2003; Kauffman *et al.*, 2009; Orihuela-Belmonte *et al.*, 2013; Hernandez-Stedanoni *et al.*, 2011; Aryal *et al.*, 2014) y bosques templados (Masera *et al.*, 1997b; Ordoñez *et al.*, 2001; van Breugel *et al.*, 2006; de Jong *et al.*, 2007; Figueroa *et al.*, 2010; Mendoza-Ponce y Galicia, 2010; Chávez-Galicia *et al.*, 2015; Aguilar *et al.*, 2016), entre otros. Por otra parte, Casiano-Domínguez *et al.* (2018) realizaron un meta-análisis de cronosecuencias en relación con la biomasa aérea; Urquiza-Hass *et al.* (2007) y Vargas *et al.* (2008), entre otros, analizaron los cambios en el carbono de los almacenes de bosques, producto de cronosecuencias después de incendios y, Vargas (2012) se centró en el impacto de los huracanes en la producción primaria de los bosques.

La recuperación de los bosques secundarios después de un evento de perturbación, de acuerdo con los estudios de cronosecuencias (*i.e.* Hughes *et al.*, 1999; Hughes *et al.*, 2000; Vargas *et al.*, 2008; Orihuela-Belmonte *et al.*, 2013; Aryal *et al.*, 2017; Casiano *et al.*, 2018), requiere entre 45 y 125 años, para regresar a almacenes de carbono de la biomasa aérea similares a los de los bosques primarios o intactos.

Los sistemas agroforestales cultivados e inducidos (SAF), tienen múltiples servicios ambientales (Beer *et al.*, 2003) y pueden comportarse como sumideros de carbono (Dixon, 1995), por lo que es importante considerarlos al analizar los bosques. Los sistemas agroforestales se han estudiado ampliamente en México, tanto en relación con sus almacenes de carbono, como por su dinámica (Roncal *et al.*, 2008; Soto-Pinto *et al.*, 2010; Espinoza *et al.*, 2012; Soto y Armijo, 2014; Masuhara *et al.*, 2015).

### Caja 1. Cronosecuencias y sucesión de la vegetación

El uso de cronosecuencias permite el estudio sucesional de la vegetación cuando existe evidencia de que los sitios de bosque secundario, con diferentes edades, siguen la misma trayectoria; es decir, existe un supuesto importante que cumplir, el cual establece que todos los sitios que conforman la cronosecuencia deben diferir solamente en la edad (Figura C1.1). La violación a los supuestos implícitos en el uso de cronosecuencias limita su correcta aplicación, aun cuando en la mayoría de los estudios se ha pasado por alto dicha restricción (Chazdon *et al.*, 2007).

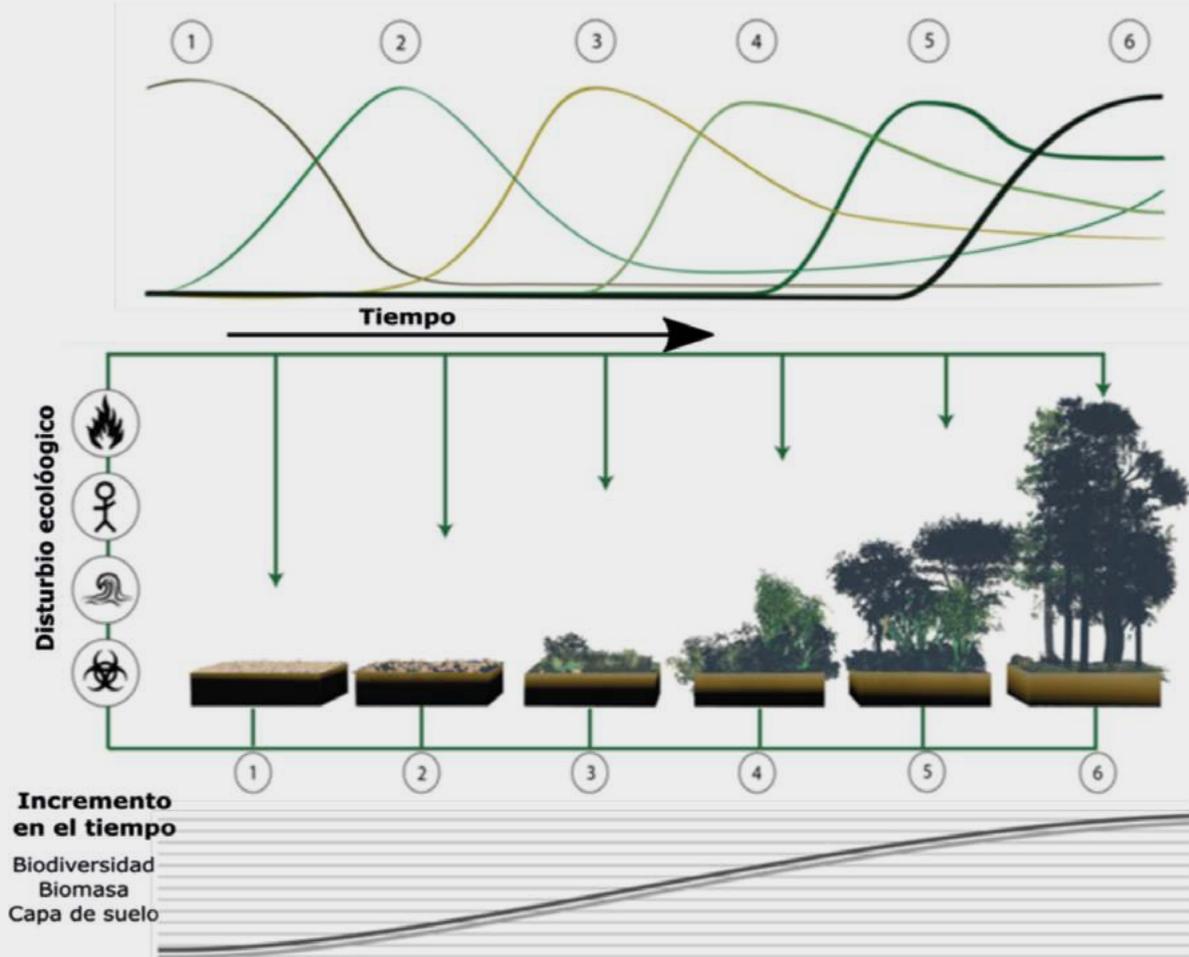


Figura C1.1. Sucesión de la vegetación en seis etapas cronológicas: (1) roca intemperizada, (2) musgo y hierbas anuales, (3) pastos perennes, (4) arbustivas leñosas, (5) árboles de rápido crecimiento, (6) bosque clímax. Fuente: Casiano *et al.* (2018).

La degradación de los bosques, producto de perturbaciones humanas o naturales, reduce la biomasa aérea (Urquiiza-Haas *et al.*, 2007; de Jong, 2013). El INFyS de la CONAFOR colecta información sobre agentes de perturbación con diferentes niveles de intensidad, por lo que de Jong (2013) analizó estos datos y encontró que, a medida que se incrementa el número de agentes, así como las intensidades, la biomasa aérea de los bosques se reduce.

### Escenarios de opciones de mitigación

El Plan Científico del Programa Mexicano del Carbono (PMC, 2008) plantea la generación de escenarios de mitigación (modelos predictivos) como una herramienta para el diseño de políticas públicas, ver Caja 2. La generación de escenarios de opciones de mitigación permite evaluar el impacto y costos asociados a la implementación de programas enfocados a políticas públicas.

## Caja 2. Plan Científico del Programa Mexicano del Carbono

La Figura C2.1. muestra en forma esquemática los elementos del Plan Científico del Programa Mexicano del Carbono, en donde la generación de escenarios (modelos predictivos) es un factor crítico para los tomadores de decisiones, en la evaluación del impacto de las políticas públicas.



Figura C2.1. Elementos del Plan Científico del Programa Mexicano del Carbono. Fuente: adaptado de PMC (2008).

Los escenarios de opciones de mitigación en México se plantearon usando casos de estudio (Masera *et al.*, 1995 y 1997a), regiones o paisajes forestales (de Jong *et al.*, 1999 y 2005), bosques templados (de Jong *et al.*, 2007), bosques templados y tropicales o sector forestal (Masera *et al.*, 1997b; Sheinbaum y Masera, 2000). Las opciones de mitigación se analizaron en función de costos y barreras para su implementación (Sheinbaum y Masera, 2000; Masera *et al.*, 2001). Los resultados muestran que el manejo de los bosques y los usos energéticos de la biomasa, son las mejores opciones para establecer acciones de intervención. En lo general, los escenarios construidos tienen niveles de incertidumbre altos que requieren de un análisis más profundo para determinar sus fuentes (de Jong, 2001).

Mendoza-Ponce *et al.* (2018) analizaron escenarios con las trayectorias de cambio definidas en el IPCC (representative concentration pathways, shared

socioeconomic pathways), para estimar las emisiones de cambio de uso del suelo e identificar los usos del suelo más vulnerables.

### Modelación de la dinámica del carbono forestal

Los modelos de procesos biogeoquímicos se han utilizado en México para definir tendencias en las emisiones y capturas de GEI (Pacala *et al.*, 2007; Hayes *et al.*, 2012; King *et al.*, 2012; Jang *et al.*, 2014; Murray *et al.*, 2016; Quijas *et al.*, 2018), con un éxito relativo. Los resultados muestran que México constituye tanto un sumidero (Hayes *et al.*, 2012; King *et al.*, 2012; Jang *et al.*, 2014), como una fuente de GEI (Pacala *et al.*, 2007; Murray *et al.*, 2016), resultados que deben tomarse con cautela, dadas las aproximaciones gruesas de modelación utilizadas, así como los insumos y resolución espacial de los modelos.

Los enfoques híbridos de modelos de proceso y empíricos han dado, en lo general, mejores resultados en

su implementación en México, dados los relativamente bajos requerimientos de parametrización. El modelo CO2FIX (Masera *et al.*, 2003), en sus diferentes versiones, se ha utilizado para modelar procesos y estimar emisiones de GEI (de Jong *et al.*, 2007; Álvarez y Rubio, 2012) con buenos resultados; este modelo utiliza una formulación empírica para el crecimiento de la biomasa forestal. Está también el CBM-CFS3 (Kurz *et al.*, 2009), que se ha usado enfoques en México para aproximar la dinámica de los distintos almacenes de carbono (Figura 2) de los ecosistemas forestales (Tinoco *et al.*, 2012; Kurz *et al.*, 2016; Olguín *et al.*, 2012 y 2018). Otro esquema utilizado en ambientes forestales es el DNDC (Li *et al.*, 2000; Stange *et al.*, 2000), cuya implementación fue exitosa para modelar la dinámica de la biomasa forestal en bosques tropicales secos en la Península de Yucatán, en un área con mediciones extensivas para parametrizarlo (Dai *et al.*, 2014).

Adicionalmente, se han generado aproximaciones a la modelación empírica de la biomasa aérea bajo manejo forestal, a través del análisis estadístico con variables relacionadas con el manejo forestal, estructura de los

rodiales, topografía y clima (Soriano-Luna *et al.*, 2018).

Con el conocimiento de las limitaciones de información disponible en México, en los últimos años el Programa Mexicano del Carbono (PMC) ha impulsado nuevos de parametrización de modelos que requieran el mínimo de datos, que además estén disponibles a escala nacional. En respuesta, se desarrolló el modelo de estados y transiciones (METs), Figura 3 (Covaleda *et al.*, 2012a y 2013; Paz *et al.*, 2012a; Paz y Covaleda, 2014), ver Caja 3. Tal como se muestra en la Figura 3, los METs son modelos conceptuales simples, de análisis de cambios de uso del suelo y vegetación (transiciones entre estados), que involucran acciones de manejo dentro de un estado y que, además de información de la dinámica del carbono, contienen información económica-financiera, socioeconómica, crediticia, limitaciones y barreras de implementación por tipo de productor, seguridad alimentaria, más otros factores (Paz *et al.*, 2012a), lo que ha favorecido su uso en la generación de escenarios de planeación e intervención (Covaleda *et al.*, 2012b, 2015, 2017 y 2018; Paz *et al.*, 2012a; Reyes *et al.*, 2012; Casiano y Paz, 2015).

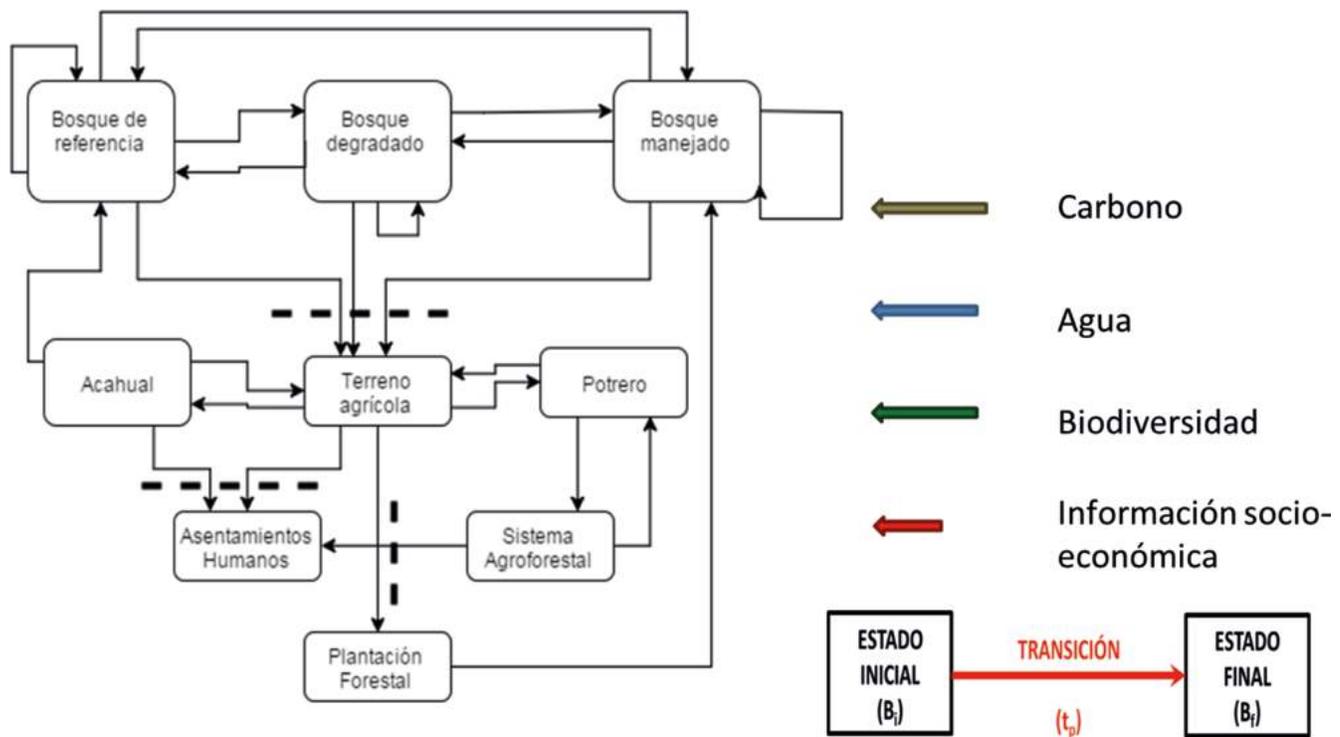


Figura 3. Modelo conceptual de estados y transiciones de bosques tropicales, que muestra almacenes (cajas) y flujos (flechas) de carbono. Las líneas punteadas indican umbrales prácticamente irreversibles en los usos del suelo y vegetación. Los flujos son de carbono, agua, biodiversidad e información socio-económica.

Uno de los problemas más críticos en la implementación de modelos a escala local es que la información de uso del suelo y vegetación (USyV) disponible en México está a escala 1:250 000, además de que incluye clases de USyV que resultan muy difíciles de mapear en actividades productivas de cambios o de manejo a nivel local. Los mapas de USyV a escala 1:250 000 los generó el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para diferentes años base: Serie 1, año 1985 (INEGI, 1985) – de acuerdo con Mas *et al.* (2004) el año base debe ser 1976, que es el promedio de los años de las fotografías aéreas que se usaron; 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). Las series de mapas de USyV, desafortunadamente, no tienen asociadas incertidumbres en la asignación de las clases, por lo que es necesario considerar que los errores son despreciables (Couturier y Mas, 2009; Couturier *et al.*, 2012).

### Caja 3. Modelo de estados y transiciones (MET)

La Figura C3.1 muestra en forma esquemática un modelo genérico para el sureste de México, con los almacenes de carbono de la biomasa aérea y suelo definidos.

## METs asociados a carbono

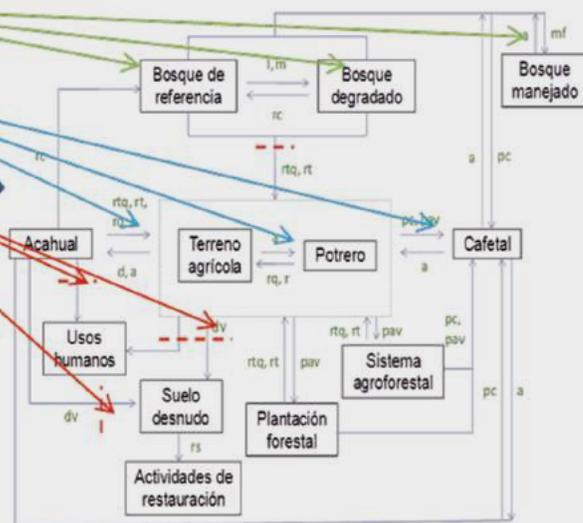
Elementos del modelo:

- **Estados:** Usos del suelo/tipos de vegetación (cuadros)
- **Transiciones:** Travectorias de cambio entre estados (flechas)
- **Umbrales:** Puntos que señalan transiciones en las que volver al estado inicial requiere de acciones de restauración (líneas rojas discontinuas)

Estado	Biomasa (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Desviación estándar	Suelo (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Desviación estándar
BR	137.2	51.0	179.4	101.9
Bd	87.34	33.1	134.0	65.9
BM	77.6	29.5	125.1	58.8
A	51.7	12.5	109.8	13.6
AT	4.7	3.3	75.2	21.46
AP	2.03	2.3	47.6	24.9
P	3.22	2.8	84.0	26.2
SA	14.3	1.9	89.5	19.0
PFo	50.5	19.8	76.2	20.1
C	37.9	15.3	89.0	30.2
UH	0.0	0.0	54.5	2.8

BR: Bosque de referencia; Bd: Bosque degradado; BM: Bosque manejado; A: Acahual; AT: Agricultura temporal; AP: Agricultura permanente P: Potrero; SA: Sistema agroforestal; PFo: Plantación forestal; C: Cafetal; UH: Usos humanos

### MET genérico para Sureste (simplificado)



Los estados (usos del suelo/tipos de vegetación) pueden relacionarse con los SE, como el carbono.

Figura C3.1. Modelo de estados y transiciones genérico para el sureste de México y su parametrización. Los bosques de referencia son bosques primarios *sensu* INEGI. Cada cambio de estado tiene un tiempo de transición, no especificado en la figura.

En la Caja 4 se muestra un ejemplo (Paz, 2014) de la incertidumbre asociada al mapeo de actividades locales a las clases de USyV del INEGI. Destaca la necesidad de desarrollar un nuevo sistema de clasificación de los usos del suelo y vegetación, que

considere las actividades productivas y de manejo del territorio nacional, para poder contemplar esquemas de agregación de abajo hacia arriba, que reflejen la realidad de lo que ocurre a escala local en México.

### Caja 4. Incertidumbre al escalar clases locales de USyV

Para comprender el impacto del mapeo de USyV locales en relación con las clases definidas en los mapas de USyV del INEGI, es conveniente analizar el ejemplo discutido por Paz (2014). Tomando como referencia el uso del suelo de la Serie 4 del INEGI, con año base 2007, el Cuadro C4.1 muestra las densidades de carbono para el bosque mesófilo de montaña primario (BM) en la Región de las Montañas del Norte en Chiapas. Adicionalmente a los factores de emisión (densidades de carbono), el Cuadro C4.1 destaca el costo del cambio del estado inicial (BM) al final, asociado a diferentes METs. La descripción de los estados finales para los METs de deforestación y degradación forestal se señala en el Cuadro C4.2 y refleja actividades locales específicas de los usos del suelo (actividades) a partir del BM. Los datos de carbono son de la biomasa viva y suelo.

**Cuadro C4.1. Almacenes y costos de oportunidad del Estado Final de cambio de un Bosque Mesófilo (BM)**

Edo. Final	(t CO <sub>2</sub> ) ha <sup>-1</sup>	USD \$ (t CO <sub>2</sub> ) <sup>-1</sup>	Edo. Final	(t CO <sub>2</sub> ) ha <sup>-1</sup>	USD \$ (t CO <sub>2</sub> ) <sup>-1</sup>
<b>Deforestación</b>					
Ah-templ	927.38	5.35	Ah-templ	927.38	5.35
AI-MF-templ	945.46	4.47	AI-MF-templ	945.46	4.47
AP-MF	1291.69	3.84	AP-MF	1291.69	3.84
ATA-MF-templ	862.68	6.3	ATA-MF-templ	862.68	6.3
AR	1227.16	3.01	AR	1227.16	3.01
Ty-templ	761.05	2.06	Ty-templ	761.05	2.06
PFr-templ	865.7	11.05	PFr-templ	865.7	11.05
P-templ	1259.27	6.78	P-templ	1259.27	6.78
PA-templ	1124.02	8.73	PA-templ	1124.02	8.73
PCV-templ	943.45	10.4	PCV-templ	943.45	10.4
<b>Degradación forestal</b>					
BMd-l	450.34	8.03	BMd-l	450.34	8.03
BMd-m	450.34	38.36	BMd-m	450.34	38.36
BMd-p	450.34	18.97	BMd-p	450.34	18.97
CN	924.19	3.25	CN	924.19	3.25
CC	825.82	3.21	CC	825.82	3.21
CO	682.07	5.27	CO	682.07	5.27

**Cuadro C4.2 Descripción de las claves de USyV definidas en el Cuadro C4.1**

Clave	Descripción
BM	Bosque mesófilo de montaña
BMd-l	Bosque mesófilo de montaña degradado para leña
BMd-m	Bosque mesófilo de montaña degradado para madera
BMd-p	Bosque mesófilo de montaña degradado por pastoreo
Ah-templ	Acahual herbáceo templado
AI-MF-templ	Agricultura itinerante maíz-frijol en zona templada



**Caja 4. Incertidumbre al escalar clases locales de USyV. (Continuación).**

Clave	Descripción
AP-MF	Agricultura permanente maíz-frijol
AR	Agricultura comercial de riego
Ty-templ	Taungya templada
PFR-templ	Plantación de frutales templada
P-templ	Pastizal tradicional en zona templada
PA-templ	Pastizal con árboles en zona templada
PCV-templ	Pastizal con cercos vivos en zona templada
CN	Café natural
CC	Café convencional
CO	Café orgánico

A partir del Cuadro C4.1, se tiene que para las actividades de deforestación (cambio de BM a un uso no forestal), los cambios de BM como estado inicial, a un uso no forestal, van de 862.7 a 1259.3 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. Los costos de oportunidad van de 2.1 a 11.1 USD \$ (t CO<sub>2</sub>)<sup>-1</sup>, todo lo cual muestra variaciones de 500%. El uso de la clase genérica BM de los mapas de uso del suelo y vegetación del INEGI muestra un intervalo amplio de valores de factores de emisión y costos de oportunidad asociados. Aun con el uso de un nivel inferior de caracterización de la vegetación, las diferencias se mantienen. Esto es intrínseco a la caracterización genérica y no asociada a actividades locales de la clasificación del INEGI. En el caso de la degradación forestal (el estado final es BM secundario), Cuadro C4.1, los factores de emisión van de 450.3 a 924.2 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, aun cuando los costos de oportunidad van de 3.3 a 38.4 USD \$ (t CO<sub>2</sub>)<sup>-1</sup>, un amplio intervalo de variación.

**Causas y factores asociados a la deforestación**

La deforestación y degradación forestal, se han enfatizado como factores críticos para revertir las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) del sector uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (USCUSS) a través de posibles mecanismos de incentivos financieros como REDD+. El análisis de los motores y causas subyacentes de la deforestación (Geist y Lambin, 2002) han servido para focalizar acciones que incidan sobre los factores que provocan este proceso. La idea central de este enfoque consiste en identificar y cuantificar el impacto de variables biofísicas, políticas, socioeconómicas, etc. para generar acciones de intervención susceptibles de modificar los valores esperados de las variables. Los enfoques usados son diferentes y, dependientes, de la información disponible.

En México, los enfoques de regresión regional de variables con la deforestación se han utilizado con relativo éxito (Barbier y Burgess, 1996; Deininger y Minten, 1999), así como los de regresión espacial (Deininger y Minten, 2002). Estos métodos utilizan datos a escala regional, o en términos espacialmente explícitos,

para formular modelos explicativos de las causas de la deforestación.

El uso de modelos econométricos o de análisis multivariado estadístico, con diferentes niveles de sofisticación, es práctica común en los enfoques de explicación de la deforestación (Kaimowitz y Angelsen, 1998; Angelsen y Kaimowitz, 1999), a través de numerosas variables o factores. A partir de los mapas de USyV del INEGI se ha llevado a cabo el análisis de los cambios temporales, con la finalidad de caracterizar la deforestación y degradación forestal (Mas *et al.*, 2004; Rosete-Vergés *et al.*, 2014; Torres-Rojo *et al.*, 2016; Mendoza-Ponce *et al.*, 2018) y poder correlacionarlos con variables explicativas disponibles en forma espacial en México (Torres-Rojo *et al.*, 2016; Mendoza-Ponce *et al.*, 2018)

Aun cuando abunda en la literatura mundial el desarrollo de modelos *explicativos* de la deforestación, permanece el problema de variables que *enmascaran* estas explicaciones. Esto implica que, aún si se quitan las variables clave (*i.e.* acceso a los bosques) de los modelos, resulta difícil saber qué factor es realmente válido en términos estadísticos. Estos efectos *residuales*,

una vez que se retiran las variables explicativas altamente significativas (y obligadas), resultan pobres en términos de explicar los factores y causas subyacentes de la deforestación.

En el caso de Chiapas, Castillo-Santiago *et al.* (2007) desarrollaron un modelo de probabilidad de deforestación en los Altos, Las Cañadas y las partes bajas de la Selva, mismo que utilizaron de Jong *et al.* (2005) para estimar emisiones asociadas, en función de factores de predisposición o accesibilidad (pendientes, distancia a agricultura o caminos, tipo de tenencia de la tierra) y factores de presión (densidad poblacional y pobreza- índice de escasés). En lo general, los resultados de estos autores muestran que los factores de accesibilidad son los que explican la deforestación y los otros factores tienen niveles pobres de estimación. Aunque estos resultados resultan interesantes por sí mismos, las implicaciones lógicas son bastantes simples: si no hay acceso a los bosques, entonces no pueden ser deforestados. La política pública lógica es no desarrollar infraestructura pública para no generar acceso a los bosques, con sus implicaciones de falta desarrollo humano y socioeconómico (versión occidental).

Para comprender causas imputables al comportamiento de las sociedades humanas y que puedan generar modelos y explicaciones útiles en relación a políticas públicas, en lo siguiente se revisan dos enfoques, relativamente diferentes, para determinar la probabilidad de deforestación en términos espacialmente explícitos en el estado de Chiapas, México.

Castillo *et al.* (2010), en un reporte preparado para Conservación Internacional (CI) desarrollaron un modelo explicativo de la deforestación en Chiapas usando variables asociadas a zonas socioeconómicas, zonas ecológicas (climáticas), tipos de bosques (perturbados y conservados) y accesibilidad (pendiente del terreno,

distancia a caminos, distancia a poblados, distancia a zonas agrícolas o distancia a zonas previamente transformadas), en donde la zonificación y el tipo de bosque fueron las variables de mayor significancia. La Figura 4 muestra las probabilidades de deforestación del modelo de CI, en términos de clases probabilísticas. Para la determinación de las deforestaciones se usaron las Series 2, 3 y 4 del INEGI, escala 1:250 000. El modelo de Castillo *et al.* (2010) es puramente probabilístico y refleja, dejando fijos los factores de zonificación utilizados, que la accesibilidad define el riesgo de deforestación. Esto es, a escala municipal (por ejemplo), el efecto de los factores de accesibilidad determina fuertemente las probabilidades de deforestación, ya que las zonificaciones tienen bajo impacto en términos de territorios locales o regionales.

En una visión de construcción de escenarios futuros de emisiones GEI, los planes de creación de nueva infraestructura de caminos, expansión de la frontera agropecuaria o de tendencias de cambios de usos del suelo definen los riesgos de deforestación, independiente de acciones de gobernanza local o regional de las comunidades y propietarios forestales. La modelación de patrones de usos del suelo y sus cambios asociados, en la perspectiva de accesibilidad y otras causas, genera pocos incentivos de intervención para modificar patrones de conducta o de intereses de las comunidades, ya que los factores de acceso se consideran críticos y las acciones de los seres humanos no se analizan. Esto constituye un problema de uso de información y no de la metodología, por lo que resulta en un reduccionismo obligado. El reto es considerar otros factores más de conducta o actitud de los seres humanos que conforman las comunidades, bajo la consideración de variables disponibles de tipo indirecto, generalmente poco útiles en términos explicativos.

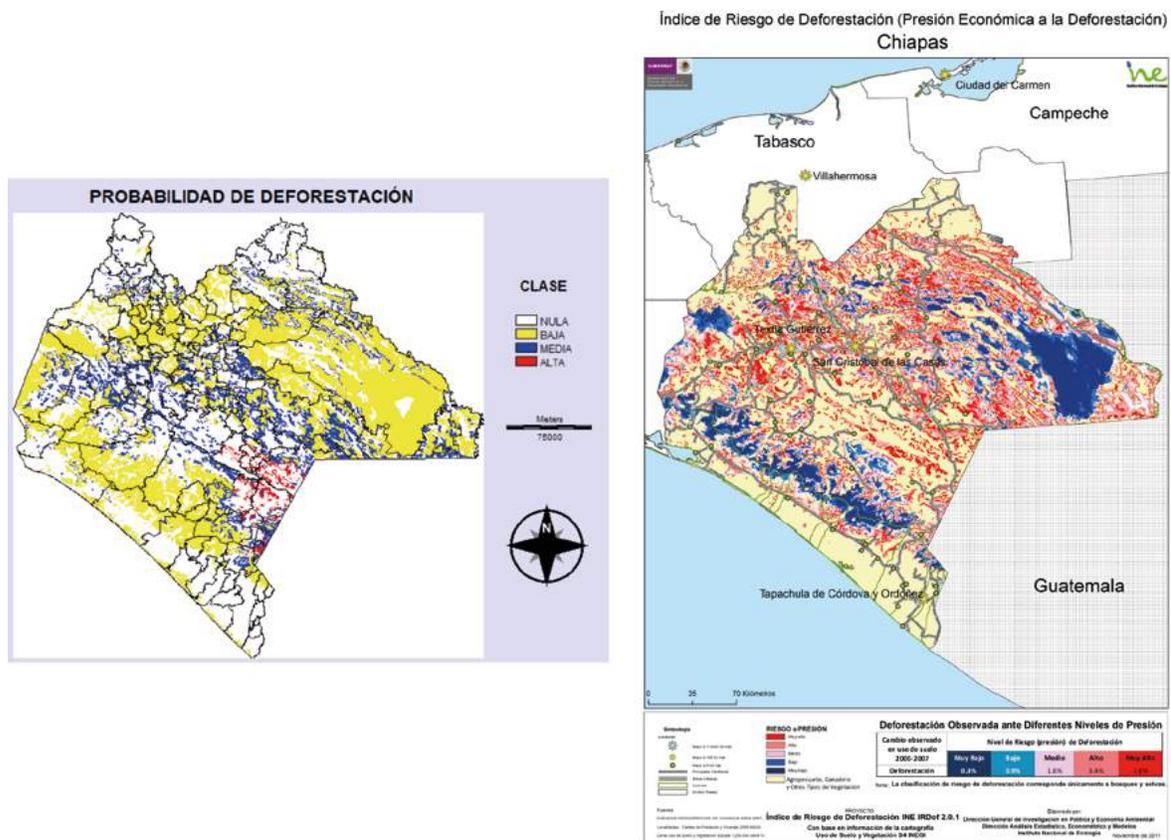


Figura 4. Clases de probabilidad de deforestación en Chiapas. A la izquierda los resultados del modelo de Castillo *et al.* (2010), con las clases de probabilidad: Nula = 0.0, Baja = 0.0-0.2, Media = 0.2-0.4, Alta = 0.4-0.6. A la derecha los resultados del modelo del INE (2011a).

El Instituto Nacional de Ecología, INE, (actualmente INECC) desarrolló un modelo de probabilidades (índices) de deforestación, fundamentado en que la motivación de los cambios del uso del suelo es dedicar la tierra a la actividad que genera mejores ingresos a los productores y utiliza la distancia a los mercados para evaluar la presión económica. El modelo del INE (2011b) utiliza variables relativamente similares a las del modelo de CI, pero adiciona la variable *Nivel de Marginación*, para caracterizar la vulnerabilidad de los productores. Adicionalmente, el modelo del INECC considera las variables: *Rendimiento del Maíz*, *Precio del Maíz Blanco* y *Precio del Ganado en Pie*, para

caracterizar los mercados. Al igual que en el modelo de CI, el modelo del INECC se parametriza a través de técnicas estadísticas multivariadas, con las bases de datos (especialmente explícitas) disponibles en México. En la Figura 4 se muestra el mapa de las clases de probabilidad de deforestación del modelo del INE para Chiapas (INE, 2011a).

En la Caja 5 se muestra un análisis de las probabilidades de deforestación del modelo de CI y del modelo del INECC que muestra que, a pesar de sus diferencias conceptuales, los resultados son similares, producto de que la variable accesibilidad predomina en las estimaciones.

**Caja 5. Accesibilidad a los bosques como condicionante de la deforestación**

El uso de los municipios de Chiapas como un nivel de agregación espacial suficiente para reducir los efectos de regionalizaciones y tipos de bosques, es posible analizar en forma indirecta los efectos de las variables de acceso en términos explicativos del riesgo de deforestación. La Figura C5.1 muestra las superficies municipales en riesgo de deforestación (probabilidad de deforestación mayor que cero), en donde se observa que ambos modelos generan valores similares entre sí.

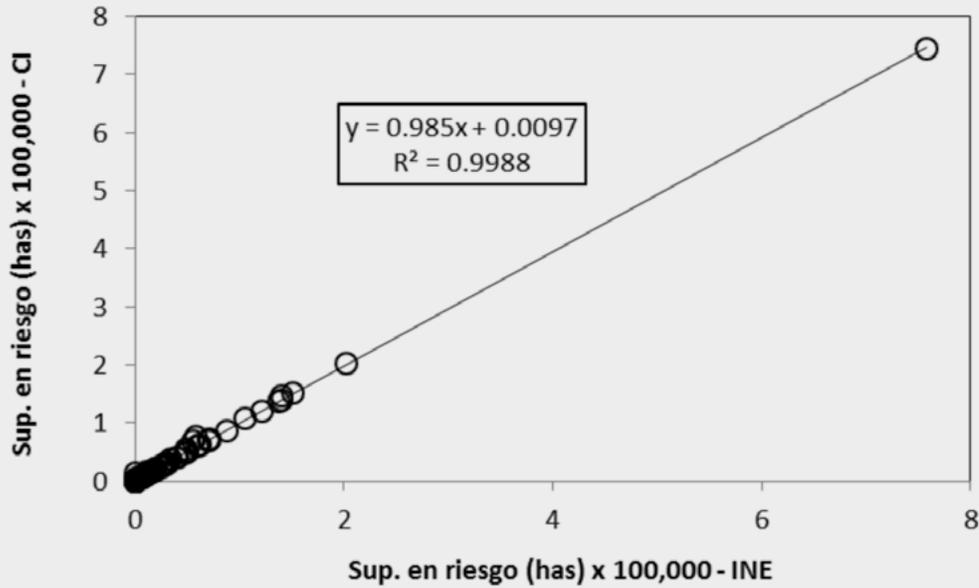


Figura C5.1. Comparativo entre las superficies en riesgo de deforestación del modelo de CI y del INECC

La situación de superficies en riesgo de deforestación similares entre ambos modelos obedece a que los bosques en los municipios tienen factores de accesibilidad similares y a que las otras variables explicativas solo ponderan las probabilidades de deforestación, tal como se puede inferir de la Figura C5.2.

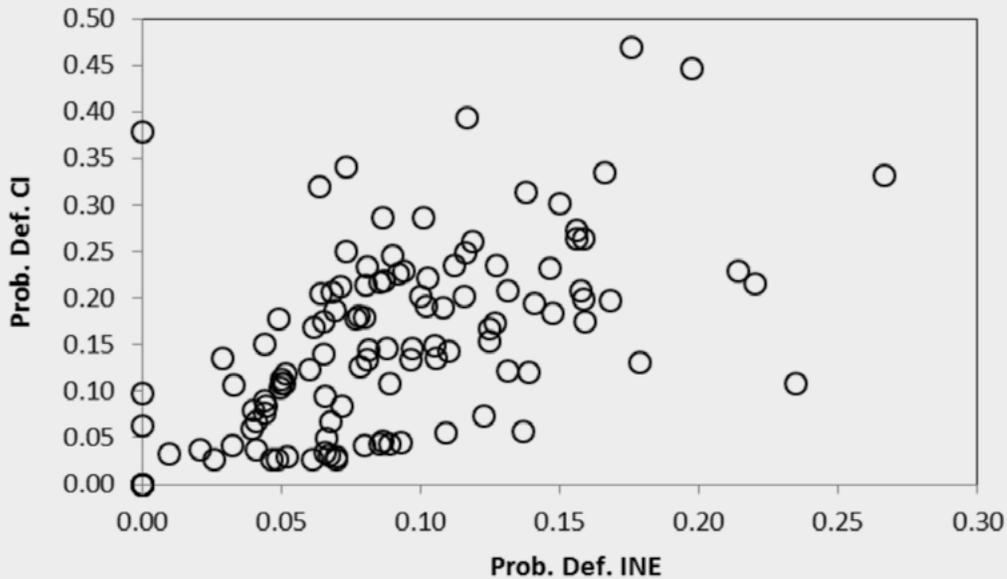


Figura C5.2. Comparativo de las probabilidades de deforestación del modelo de CI y del INECC.

**Caja 5. Accesibilidad a los bosques como condicionante de la deforestación. (Continuación).**

Las diferencias en las probabilidades de deforestación, entre ambos modelos, se manifiesta en el promedio esperado de superficie deforestada, en donde: promedio esperado = probabilidad de deforestación x superficie. La Figura C5.3 muestra el comparativo de estas superficies entre ambos modelos y como los factores de accesibilidad inducen las correlaciones.

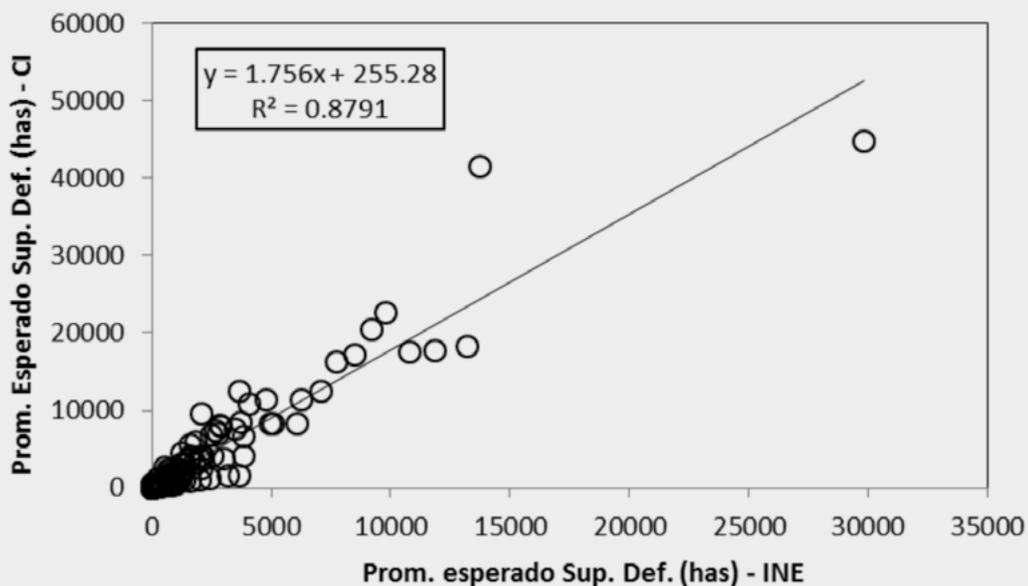


Figura C5.3. Comparativo del promedio esperado de superficies deforestadas del modelo de CI y del INECC.

**Inventarios nacionales de emisiones de gases efecto invernadero y fuentes/sumideros de carbono**

México, como parte de los compromisos a nivel de país ha generado seis comunicaciones, con sus respectivos inventarios nacionales de GEI (INEGEI), además de dos informes bienales de actualización. Los primeros dos INEGEI se realizaron con valores por defecto de factores de emisión y estadísticas nacionales de las clases de uso del suelo y vegetación (de Jong, 2012), por lo que no se discutirán. El tercer INEGEI (de Jong *et al.*, 2006 y 2010) se elaboró mediante el uso de las guías y directrices 1996 del IPCC (1996) y, el cuarto (de Jong *et al.*, 2009), con las del 2003 y 2006 del IPCC (2003 y 2006). El quinto INEGEI (Ordoñez *et al.*, 2012) utilizó las guías y directrices del IPCC de 1996, sin generar información nueva en relación al cuarto INEGEI, además de que presenta errores metodológicos, por lo que no se discutirá. El primer informe bienal de actualización (INECC y SEMARNAT, 2015), así

como el sexto INEGEI y el segundo informe bienal de actualización (INECC y SEMARNAT, 2018), presentan una modificación radical en el sector forestal, en donde éstos se consideran como sumideros de carbono y no fuentes, con un estimado de -138.5 Mt CO<sub>2</sub> (sumidero) en 2015 en la subcategoría del Sector ASOUS (IPCC, 2003 y 2006) *Tierras forestales que permanecen como tales*. No obstante, la consideración de que el sector forestal en México es un sumidero ha generado polémica y se plantea que el mecanismo REDD+ debe reconsiderarse para esta situación, en relación a los incentivos financieros y políticas asociadas (Skutsch *et al.*, 2016 y 2017), con intentos de explicar los resultados con escalas locales y regionales (Skutsch *et al.*, 2018). Tal como se discute en la sección siguiente, un análisis detallado de la evidencia experimental asociada a los INFyS muestra que es resultado es de errores de tipo metodológico, sin soporte con datos de campo (mismos datos que se usaron para la estimación de este aparente sumidero), por lo que estas fuentes de información no se considerarán en la discusión.

Los análisis de las emisiones de GEI del sector USCUS (y ASOUS, sin considerar la categoría Agricultura) muestran que el porcentaje de emisiones, con relación al total, se ha reducido en los últimos años de 30% (primer INEGEI) a 4.6% (primer informe bienal de actualización, sin considerar el sumidero de la subcategoría *Tierras forestales que permanecen como tales*) (Saynes *et al.*, 2016); aunque esta reducción

en el impacto del sector en el total nacional refleja más la tendencia de incrementos en las emisiones de combustibles fósiles en el país.

El tercer y cuarto INEGEI se consideran como de los más confiables, aunque se utilizaron guías y directrices diferentes a las del IPCC, por lo que resulta difícil de comparar. La Caja 6 analiza las diferencias entre las guías del IPCC de 1996 y 2003/2006 (de Jong, 2012).

### Caja 6. Diferencias entre los INEGEI de acuerdo con las guías IPCC de 1996 y 2003/2006

Las principales diferencias entre las guías y directrices del IPCC de 1996 y 2003/2006 son en relación a la forma de reportar emisiones del cambio de uso del suelo y de flujos del carbono orgánico en los suelos. En el IPCC de 1996, Figura C6.1, los estimados de flujos se derivan de los cambios en tierras bosques, praderas y tierras abandonadas, mientras que en el IPCC de 2003/2006, Figura C6.2, los flujos provienen de cambios en hasta seis categorías de clases de uso del suelo: tierras forestales, tierras agrícolas, praderas, humedales, asentamientos humanos u otras tierras. En el IPCC de 1996, los flujos se calculan de cambios de bosques y praderas a otros usos del suelo, mientras que en el IPCC de 2003/2006 los flujos se calculan con base en los cambios de la clase de uso del suelo original, a la clase actual que se reporta. Con relación a los flujos del carbono orgánico de los suelos, en el IPCC de 1996 se trata en forma separada y en el IPCC de 2003/2006 se reporta para cada categoría de cambio de uso del suelo.

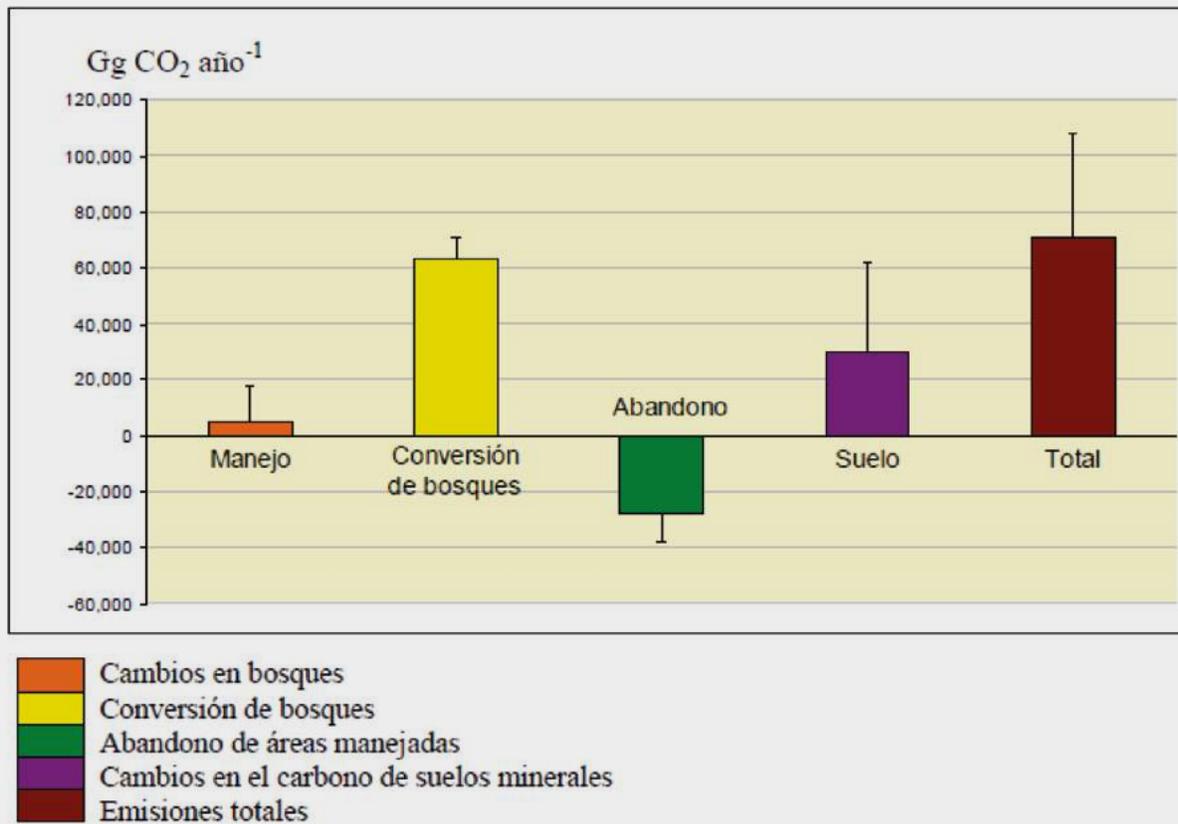


Figura C6.1. Resumen de las emisiones GEI y sus incertidumbres, en los sectores del primer INEGEI.

**Caja 6. Diferencias entre los INEGEI de acuerdo con las guías IPCC de 1996 y 2003/2006. (Continuación).**

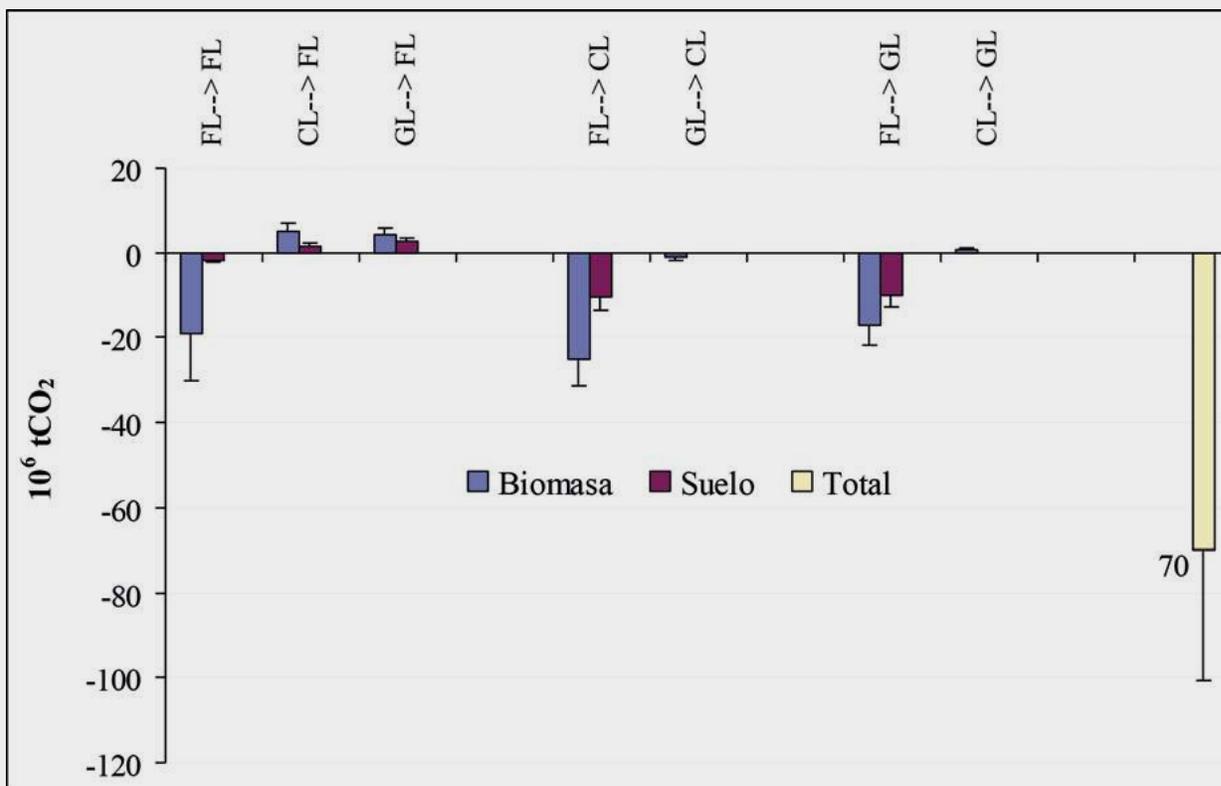


Figura C6.2. Flujos netos de CO<sub>2</sub> por pérdida de biomasa y COS de suelo para 2006 del segundo INEGEI, en las categorías Tierras Forestales (FL), Tierras Agrícolas (CL) y Praderas (GL) y nivel de incertidumbre en cada categoría y total de emisiones de CO<sub>2</sub> en Mt CO<sub>2</sub>.

**Factores de emisión para los usos del suelo y vegetación sensu INEGI**

En el segundo INEGEI (de Jong *et al.*, 2009) se utilizó la información del INFyS de la CONAFOR del primer ciclo de medición (2004-2007) para estimar las densidades de carbono o factores de emisión para las clases de uso del suelo y vegetación del INEGI.

En la Figura 5 se muestra la localización de los sitios de muestreo de 400 m<sup>2</sup> de los bosques y selvas (Cuadro 1), los cuales se analizaron por de Jong *et al.* (2018) para establecer una base de datos de estimaciones de la biomasa aérea y subterránea, viva y muerta, a nivel sitios de muestreo, la cual está disponible para el público en general.

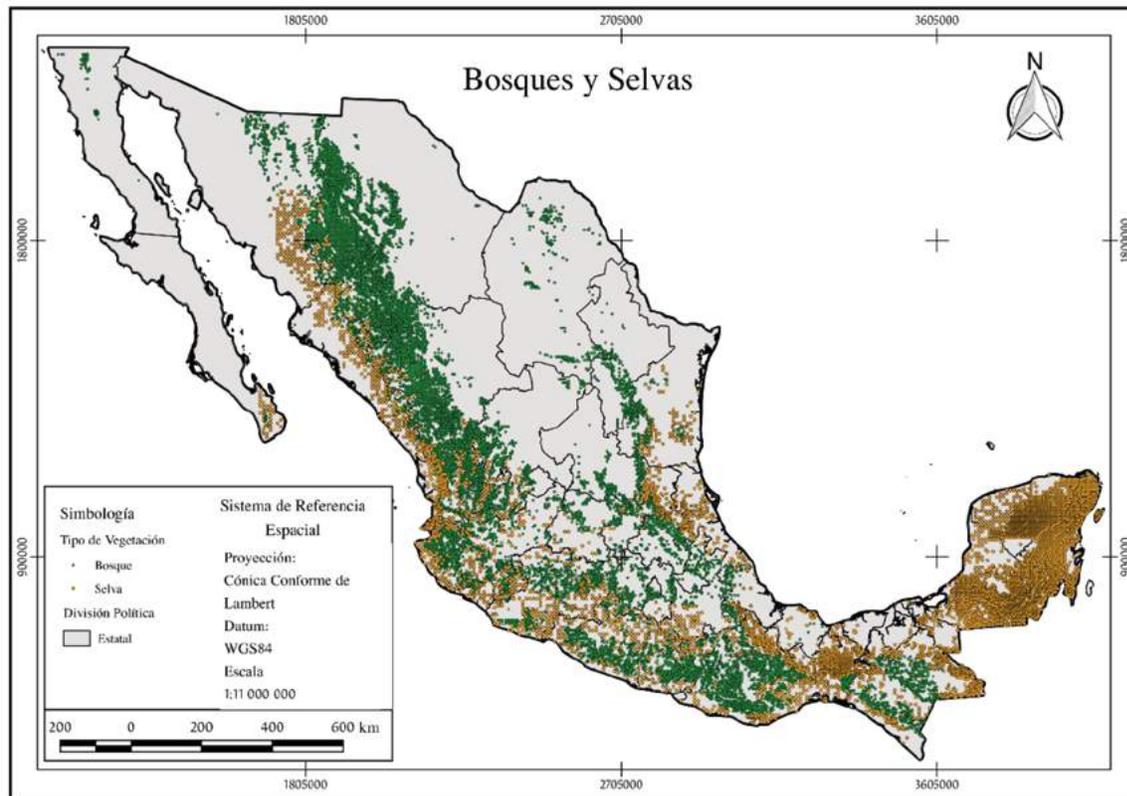


Figura 5. Distribución geográfica de los sitios de muestreo de bosques y selvas del INFyS, ciclo 2004-2007.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### Inventarios nacionales de carbono en la biomasa de la vegetación

La Figura 6 muestra un mapa de uso del suelo y vegetación (USyV), insumo básico en la generación de inventarios de carbono en México (de Jong *et al.*, 2006, 2009 y 2010), el cual presenta los datos de actividad del Sector USCUS o ASOUS. La estimación de los almacenes de carbono en las clases de USyV se realiza al asignar densidades de carbono a los polígonos de cada clase; la asignación se hace, generalmente, mediante criterios de cercanía de las muestras de carbono, cuando no existe datos en un polígono, para una clase de USyV (*i.e.* Wilson *et al.*, 2013).

La Figura 7 muestra el almacén de carbono de la biomasa aérea y subterránea, viva y muerta, que se genera al imputar datos de carbono al mapa de la Figura 6. En cada polígono se analizó el número de sitios de muestreo disponibles del INFyS y se calculó su promedio para asignar el contenido de carbono. En caso de no tener sitios de muestreo, el valor del contenido de carbono del polígono se asignó con base en el polígono más cercano con datos, para la misma clase de USyV. Cuando no hay información disponible, la asignación se hace usando el contenido de carbono del grupo de vegetación, agroecosistema u otro rasgo en el estado, de tal manera que todos los polígonos de las clases de USyV cuentan con contenidos de carbono asociados (promedio y desviación estándar).



Figura 6. Distribución de las clases de USyV de la Serie 3 del INEGI.

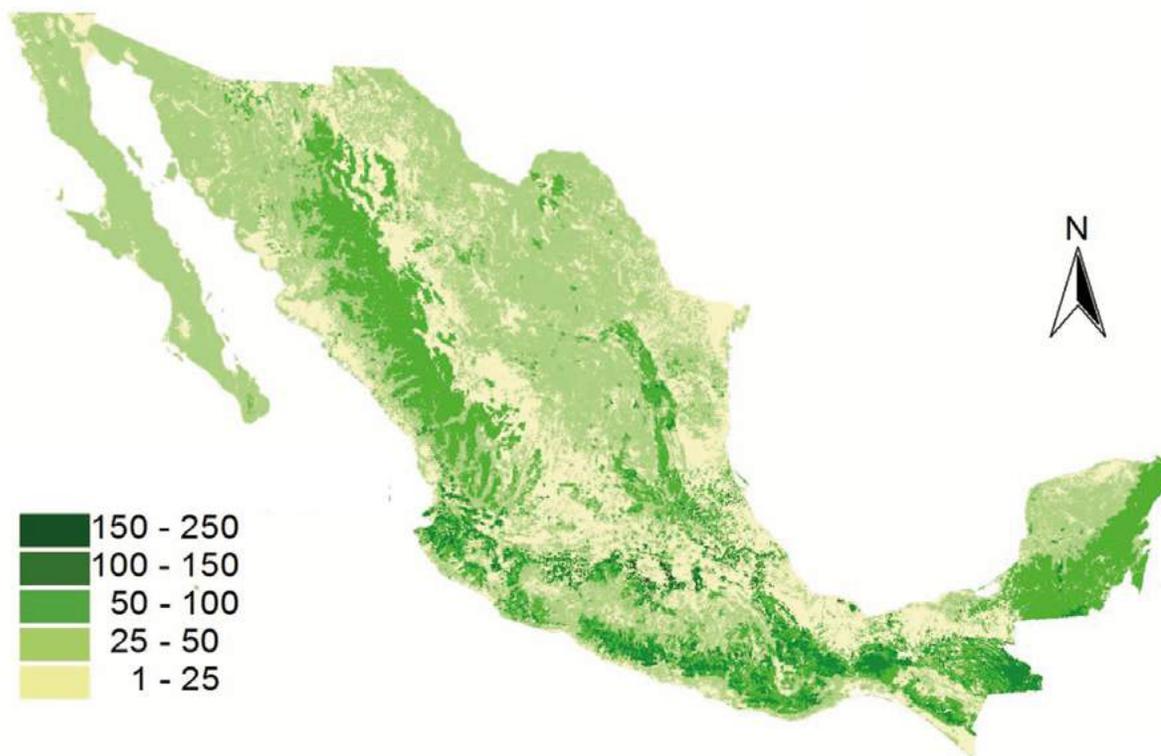


Figura 7. Distribución del carbono ( $Mg\ ha^{-1}$ ) de la biomasa aérea y subterránea, viva y muerta.

La distribución del carbono en la biomasa de la Figura 7 refleja la configuración espacial del mapa de USyV (datos de actividad) y la incertidumbre (desviación estándar), pero solo considera las densidades de carbono (factores de emisión), dado que los mapas de USyV del INEGI no tienen medidas de error asociadas.

### Densidades de carbono de la biomasa en bosques y selvas

Los datos de los sitios de muestreo definidos en la Figura 5, son la base para que de Jong *et al.* (2018) estimaran las estadísticas de la biomasa aérea y subterránea, viva y muerta, de las clases de bosques y selvas *sensu* INEGI, mismas que se muestran en el Cuadro 2. Estos datos se usaron en el cuarto inventario nacional de emisiones de GEI (de Jong *et al.*, 2009). La biomasa subterránea se estimó a través de la relación alométrica propuesta por Cairns *et al.* (1997). Las variaciones en el contenido de materia seca (M.S.) que se observan, son producto de la variabilidad natural y de errores en la asignación de clases de USyV en campo, lo cual se refleja en valores mínimos extremos que difícilmente pueden considerarse como asociados a las clases de USyV. Como primera aproximación, los datos de M.S. pueden convertirse en contenido de carbono al multiplicarlos por el factor de conversión 0.5 (IPCC, 2006; de Jong *et al.*, 2009).

El bosque mesófilo de montaña y las selvas altas son las clases que tienen mayor biomasa, reflejando bosques altos y densos; esto sin considerar la vegetación hidrófila (*i.e.* manglares, popales, tulares, etc.). Es importante señalar que las estadísticas del Cuadro 2 incluyen a los bosques de galería.

### Almacenes de carbono de los bosques y selvas

A partir del 2009, el INFyS de la CONAFOR (2009) consideró datos de los almacenes del mantillo (capa de hojarasca y de fermentación), material leñoso caído (cama de combustibles) y suelo, en forma adicional a la biomasa viva y muerta. La Figura 8 muestra las estimaciones de todos los almacenes definidos por el IPCC (2003 y 2006) para los inventarios nacionales de emisiones de GEI, con los datos del remuestreo del 2009 del INFyS.

La clase de vegetación con mayor contenido de carbono fue la de los manglares (VM), tal como se muestra en la Figura 8, en donde se observa, además, que el mayor almacén de esta clase es el suelo.

El almacén de la biomasa y del suelo son los de mayor contenido de carbono, por lo que la considerar al menos estos almacenes, pueden constituir una aproximación razonable en los inventarios nacionales de emisiones GEI, tal como lo demostraron de Jong *et al.* (2006, 2009 y 2010), de Jong *et al.* (2009) y Flores-Garnica *et al.* (2018) presentan compilaciones de datos sobre el mantillo y material leñoso caído.



Cuadro 2. Estadísticas de la biomasa (Mg M.S. ha<sup>-1</sup>) de las clases de bosques y selvas sensu INEGI, en donde M.S. se refiere a la materia seca.

Clase USyV	Tipo de Vegetación	Sucesión	No. Sitios	Biomasa Aérea			Biomasa Subterránea			Biomasa total					
				Mín.	Prom.	Desv. Est.	Máx.	Mín.	Prom.	Desv. Est.	Máx.	Mín.	Prom.	Desv. Est.	Máx.
BA	Bosque de Oyamel	Primaria	178	0.69	207.32	166.37	920.17	0.25	37.33	27.16	144.24	0.94	244.65	193.49	1064.41
BA/VS	Bosque de Oyamel	Secundaria	71	0.95	178.21	190.90	1108.04	0.33	32.22	30.36	169.97	1.28	210.43	221.19	1278.02
BB	Bosque de Cedro	Primaria	20	2.65	42.85	41.21	128.71	0.82	9.17	8.06	25.37	3.48	52.02	49.26	154.07
BB/VS	Bosque de Cedro	Secundaria	8	25.85	61.02	47.57	169.57	6.14	12.83	8.66	32.36	31.99	73.86	56.23	201.94
BJ	Bosque de Tásate	Primaria	281	0.19	31.45	44.68	351.29	0.08	6.80	8.41	61.60	0.26	38.25	53.08	412.89
BJ/VS	Bosque de Tásate	Secundaria	202	0.07	23.70	28.61	175.78	0.03	5.35	5.73	33.41	0.11	29.05	34.33	209.19
BM	Bosque Mesófilo de Montaña	Primaria	731	0.48	135.15	152.30	1293.75	0.18	25.10	24.99	194.91	0.66	160.25	177.24	1488.67
BM/VS	Bosque Mesófilo de Montaña	Secundaria	933	0.38	80.79	102.50	766.42	0.15	15.77	17.62	122.72	0.53	96.55	120.08	889.15
BP	Bosque de Pino	Primaria	3705	0.00	63.98	77.22	886.74	0.00	12.93	13.54	139.60	0.00	76.91	90.71	1026.34
BP/VS	Bosque de Pino	Secundaria	2109	0.00	59.30	72.04	615.85	0.00	12.05	12.84	101.16	0.00	71.35	84.85	717.01
BPQ	Bosque de Pino-Encino	Primaria	7535	0.09	78.28	70.60	1006.40	0.04	15.79	12.40	156.12	0.13	94.07	82.97	1162.52
BPQ/VS	Bosque de Pino-Encino	Secundaria	2956	0.01	80.57	84.94	709.35	0.01	16.01	14.79	114.61	0.01	96.57	99.70	823.97
BQ	Bosque de Encino	Primaria	8970	0.00	48.08	48.78	510.35	0.00	10.17	9.05	85.68	0.00	58.25	57.82	596.03
BQ/VS	Bosque de Encino	Secundaria	7706	0.00	49.29	55.28	560.58	0.00	10.30	10.16	93.09	0.00	59.59	65.42	653.67
BQP	Bosque de Encino-Pino	Primaria	4846	0.11	71.10	67.22	751.91	0.05	14.46	11.93	120.67	0.16	85.56	79.12	872.57
BQP/VS	Bosque de Encino-Pino	Secundaria	2172	0.09	74.03	74.40	661.04	0.04	14.89	13.18	107.69	0.13	88.91	87.56	768.73
BS	Bosque de Ayarín	Primaria	20	4.92	142.26	122.33	417.27	1.42	26.64	21.01	71.72	6.34	168.90	143.31	488.98
BS/VS	Bosque de Ayarín	Secundaria	17	0.76	98.99	100.60	309.55	0.27	19.08	17.84	55.08	1.03	118.07	118.41	364.63
SAP	Selva Alta Perennifolia	Primaria	800	0.33	114.65	143.84	1194.69	0.13	21.61	23.50	181.67	0.46	136.26	167.28	1376.36
SAP/VS	Selva Alta Perennifolia	Secundaria	2437	0.03	61.23	98.04	1124.65	0.02	12.19	16.51	172.22	0.05	73.42	114.49	1296.87
SAQ	Selva Alta Subperennifolia	Primaria	59	10.48	166.14	99.23	497.28	2.77	31.20	16.68	83.74	13.25	197.34	115.90	581.01

**Cuadro 2. Estadísticas de la biomasa (Mg M.S. ha<sup>-1</sup>) de las clases de bosques y selvas sensu INEGI, en donde M.S. se refiere a la materia seca. (Continuación).**

Clase USyV	Tipo de Vegetación	Sucesión	No. Sitios	Biomasa Aérea			Biomasa Subterránea			Biomasa total					
				Mín.	Prom.	Desv. Est. Máx.	Mín.	Prom.	Desv. Est. Máx.	Mín.	Prom.	Desv. Est. Máx.			
SAQ/VS	Selva Alta Subperennifolia	Secundaria	154	0.07	113.76	192.10	1760.77	0.03	21.16	29.28	255.93	0.10	134.93	221.26	2016.70
SBC	Selva Baja Caducifolia	Primaria	3712	0.00	42.93	42.57	787.13	0.00	9.25	7.86	125.65	0.00	52.18	50.40	912.78
SBC/VS	Selva Baja Caducifolia	Secundaria	2751	0.00	30.97	30.50	323.62	0.00	6.88	6.03	57.29	0.00	37.85	36.52	380.91
SBK	Selva Baja Espinosa Caducifolia	Primaria	106	0.01	12.23	11.57	42.94	0.01	3.03	2.61	9.62	0.01	15.26	14.18	52.56
SBK/VS	Selva Baja Espinosa Caducifolia	Secundaria	161	0.03	11.28	13.61	80.70	0.02	2.79	2.95	16.79	0.05	14.07	16.55	97.49
SBP/VS	Selva Baja Perennifolia	Secundaria	3	22.82	32.65	16.85	52.11	5.50	7.48	3.40	11.41	28.32	40.13	20.25	63.52
SBQ	Selva Baja Subperennifolia	Primaria	246	0.07	87.03	69.76	552.86	0.03	17.47	12.12	91.96	0.10	104.51	81.85	644.82
SBQ/VS	Selva Baja Subperennifolia	Secundaria	315	0.42	79.30	44.03	221.19	0.16	16.24	8.18	40.93	0.58	95.54	52.20	262.13
SBS	Selva Baja Subcaducifolia	Primaria	28	2.62	44.30	29.71	106.03	0.81	9.65	5.88	21.37	3.44	53.94	35.58	127.41
SBS/VS	Selva Baja Subcaducifolia	Secundaria	56	0.94	58.42	39.43	159.16	0.33	12.31	7.55	30.60	1.27	70.73	46.97	189.76
SMC	Selva Mediana Caducifolia	Primaria	9	5.59	56.82	30.78	99.79	1.59	12.12	6.02	20.26	7.18	68.94	36.79	120.04
SMC/VS	Selva Mediana Caducifolia	Secundaria	31	0.03	32.31	20.98	83.29	0.02	7.28	4.39	17.27	0.05	39.60	25.36	100.56
SMQ	Selva Mediana Subperennifolia	Primaria	2467	0.03	99.34	60.00	418.71	0.02	19.79	10.71	71.93	0.05	119.13	70.70	490.65
SMQ/VS	Selva Mediana Subperennifolia	Secundaria	5914	0.03	95.42	66.07	645.23	0.02	18.99	11.79	105.41	0.05	114.40	77.83	750.64
SMS	Selva Mediana Subcaducifolia	Primaria	809	0.07	89.10	79.47	871.28	0.03	17.74	13.65	137.45	0.10	106.84	93.10	1008.73



**Cuadro 2. Estadísticas de la biomasa (Mg M.S. ha<sup>-1</sup>) de las clases de bosques y selvas sensu INEGI, en donde M.S. se refiere a la materia seca. (Continuación).**

Clase USyV	Tipo de Vegetación	Sucesión	No. Sitios	Biomasa Aérea			Biomasa Subterránea			Biomasa total				
				Prom.	Desv. Est.	Máx.	Mín.	Máx.	Desv. Est.	Prom.	Desv. Est.	Máx.		
SMS/VS	Selva Mediana Subcaducifolia	Secundaria	5659	65.08	46.29	441.24	0.02	13.53	8.60	75.34	0.05	78.61	54.87	516.58
MK	Mezquital	Primaria	92	4.86	8.20	35.69	0.00	1.26	1.93	8.17	0.00	6.12	10.13	43.86
MK/VS	Mezquital	Secundaria	12	2.91	2.80	8.12	0.02	0.85	0.76	2.21	0.06	3.76	3.56	10.33
MKE	Mezquital Tropical	Primaria	36	4.30	6.40	26.57	0.00	1.15	1.55	6.29	0.00	5.45	7.95	32.86
MKE/VS	Mezquital Tropical	Secundaria	9	1.13	0.04	1.18	0.39	0.40	0.01	0.40	1.51	1.55	0.06	1.59
BG	Bosque de Galería	Primaria	12	29.63	37.22	101.23	0.00	6.39	7.61	20.52	0.01	36.02	44.82	121.75
VPN	Palmar Natural	Primaria	19	51.39	37.66	116.14	0.19	10.93	7.38	23.17	0.71	62.32	45.03	139.31
VPN/VS	Palmar Natural	Secundaria	4	3.12	0.99	4.21	0.62	0.95	0.27	1.24	2.57	4.07	1.26	5.44
BC	Bosque Cultivado	Primaria	34	101.79	80.16	273.62	0.27	19.87	14.50	49.39	1.03	121.66	94.65	323.01
BI	Bosque Inducido	Primaria	9	3.55	3.86	7.89	0.19	1.02	1.02	2.15	0.71	4.57	4.87	10.04

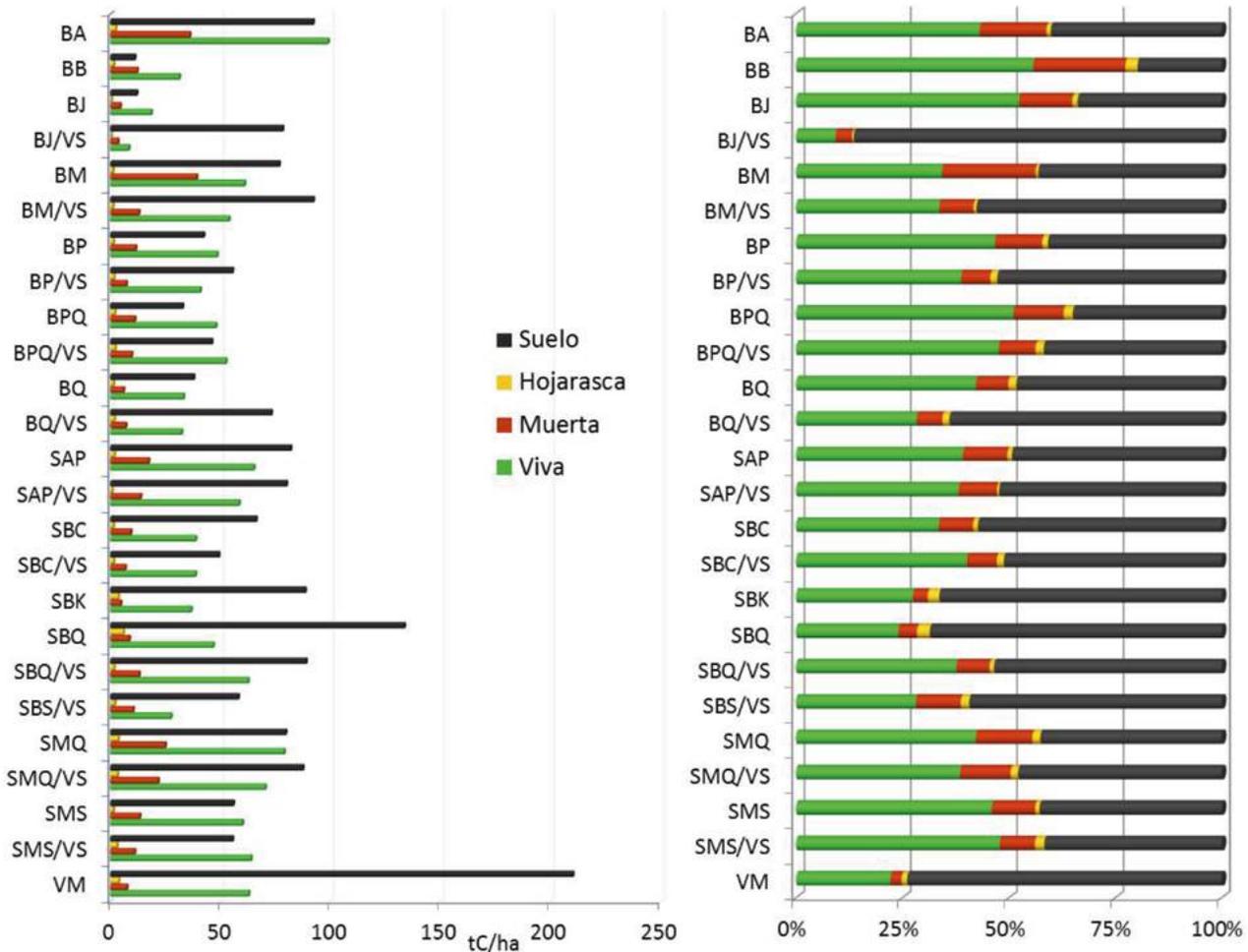


Figura 9. Estimación de los almacenes de carbono ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ) en las clases de vegetación *sensu* INEGI (ver Cuadro 1 para claves), usando datos del primer remuestreo del 2009 del INFyS.

En lo siguiente, las estimaciones de la biomasa aérea, viva y muerta, de los bosques y selvas de México se realizaron con los sitios de muestreo del primer (2004-2007) y segundo ciclo (2009-2012) del INFyS de la CONAFOR. Para la estimación de la biomasa aérea se utilizó la base de ecuaciones alométricas nacionales desarrollada por Rojas-García *et al.* (2015).

### Variabilidad de la biomasa aérea en bosques

La variabilidad de los bosques en México plantea grandes retos en la estimación de inventarios de carbono. La Figura 9 muestra estimaciones del

promedio, e intervalo de confianza al 95%, de la biomasa aérea (viva y muerta) en los diferentes tipos de bosques (Cuadro 1), en donde se observa que algunos bosques tienen alta variabilidad, muchas veces asociada al número de sitios de muestreo del INFyS que se analizaron.

La Figura 10 muestra las estimaciones de la biomasa aérea de los bosques de encino (BQ) y encino-pino (BQP) a nivel nacional. Se observan grandes diferencias con respecto a la variabilidad espacial de los bosques, misma que debe considerarse al realizar inventarios estatales del almacén de la biomasa aérea (viva y muerta).

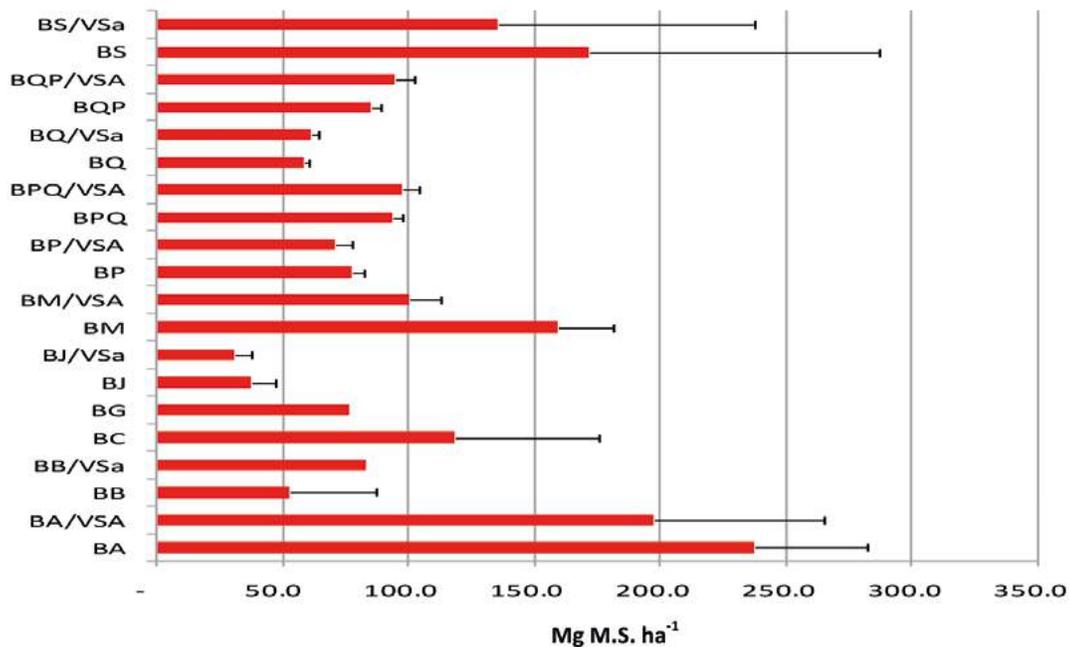


Figura 9. Almacén de la biomasa aérea, viva y muerta, de los bosques de México.

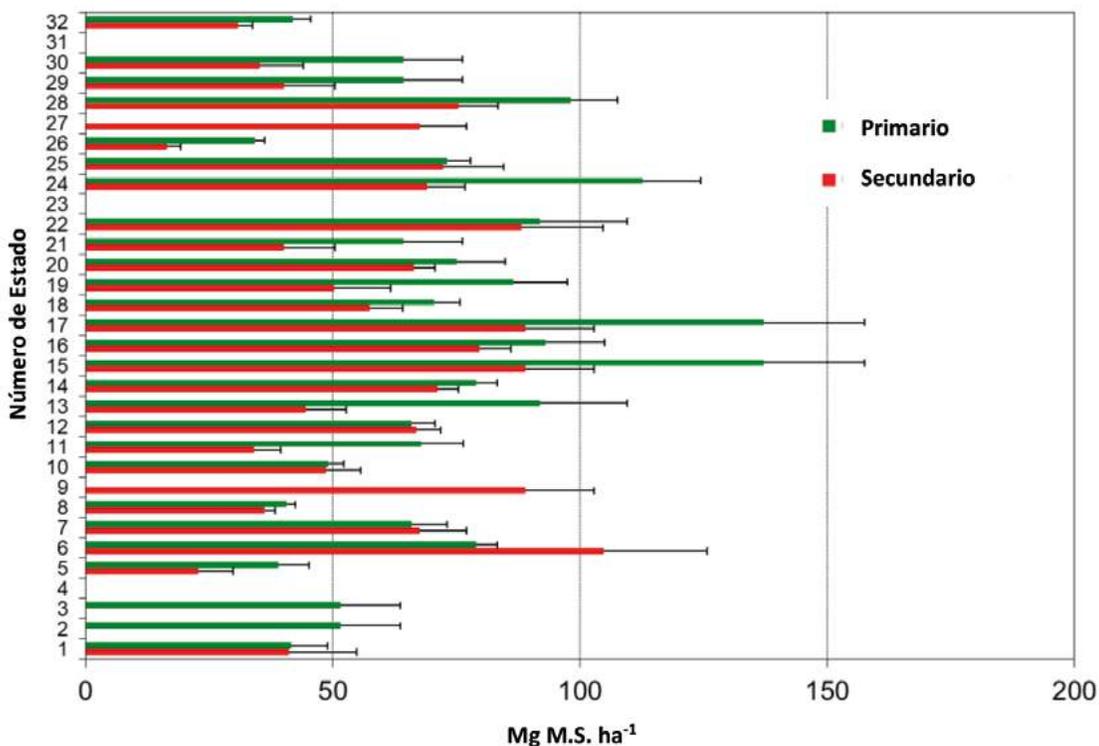


Figura 10. Biomasa aérea, viva y muerta, de los bosques de encino y encino-pino en los estados del país: 1=Ags, 2=BC, 3=BCS, 4=Camp, 5=Chis, 6=Chih, 7=Coah, 8=Col, 9=CDMX, 10=Dgo, 11=Gto, 12=Gro, 13=Hgo, 14=Jal, 15=Mich, 16=Mor, 17=Mex, 18=Nay, 19=NL, 20=Oax, 21=Pue, 22=Qro, 23=QRoo, 24=SLP, 25=Sin, 26=Son, 27=Tab, 28=Tamps, 29=Tlax, 30=Ver, 31=Yuc, 32=Zac.

### Almacenes e incremento de la biomasa aérea de los bosques de pino y encino y efecto de la precipitación

El análisis de los patrones de los almacenes y tasas de incremento de la biomasa aérea en los bosques y selvas de México, involucró el uso de un mapa nacional de clases de precipitación, ver Caja 7.

#### Caja 7. Mapa nacional de precipitación

La Figura C7.1 muestra un mapa de la distribución de clases de precipitación. El mapa, a una resolución espacial de 250 m x 250 m, se generó con una versión previa de la base de datos climática de Salas-Aguilar y Paz-Pellat (2018).

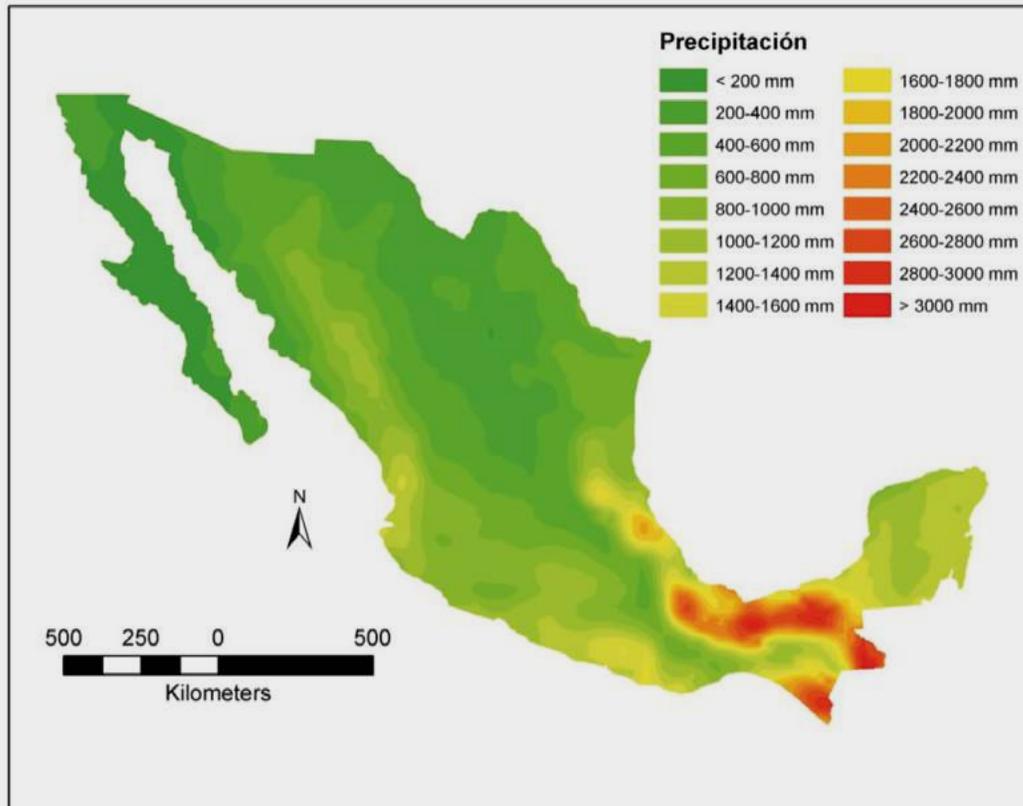


Figura C7.1. Mapa nacional de clases de precipitación en México

La Figura 11 muestra la relación entre las clases de vegetación y los almacenes de la biomasa aérea, para los bosques de pino y encino; destaca que la precipitación es un factor crítico en la biomasa aérea acumulada total, por lo que es una variable que debe considerarse en los modelos de la dinámica de la biomasa aérea.

Relaciones similares a las de la Figura 11 se presentan para los bosques de pino-encino y encino-pino, así como para otros tipos de bosques y selvas.

La Figura 12 muestra la relación entre el incremento medio anual en el diámetro a la altura de pecho o normal (DN) y las clases de precipitación. Los incrementos se determinaron de los datos de las muestras de anillos de crecimiento del INFyS. Se observa que, por arriba de los 1200 mm, la tasa de incremento se reduce.

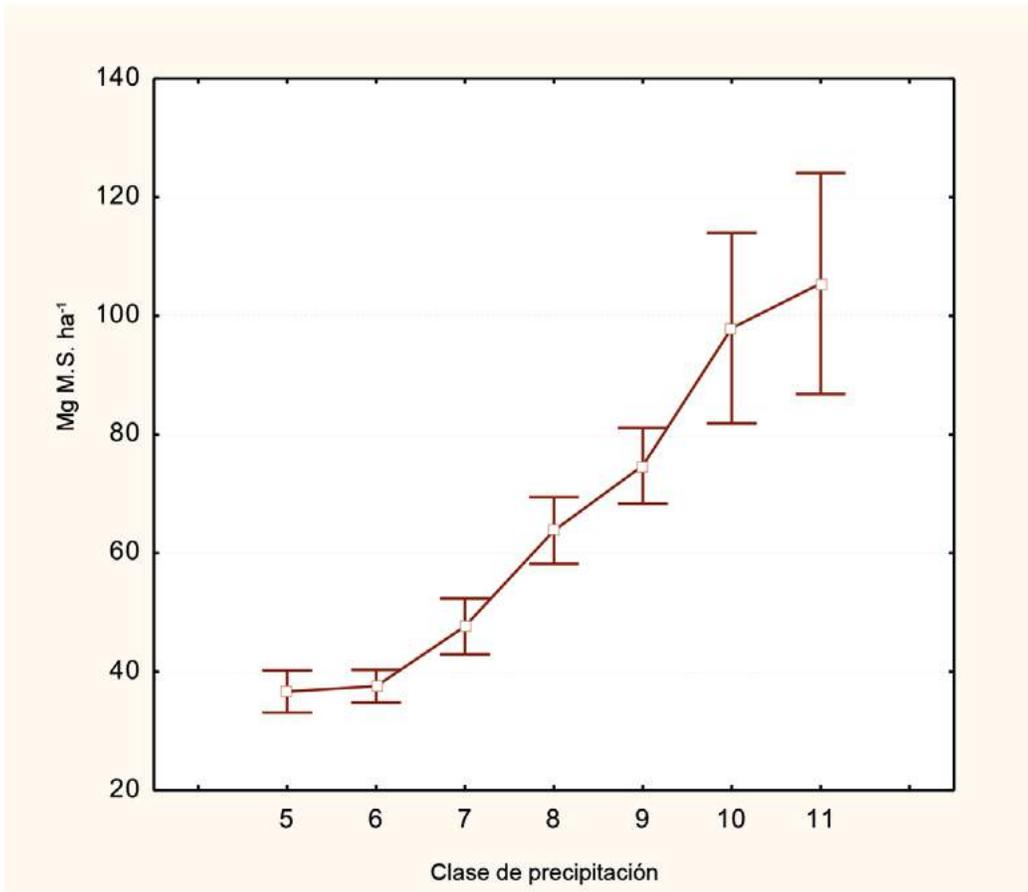
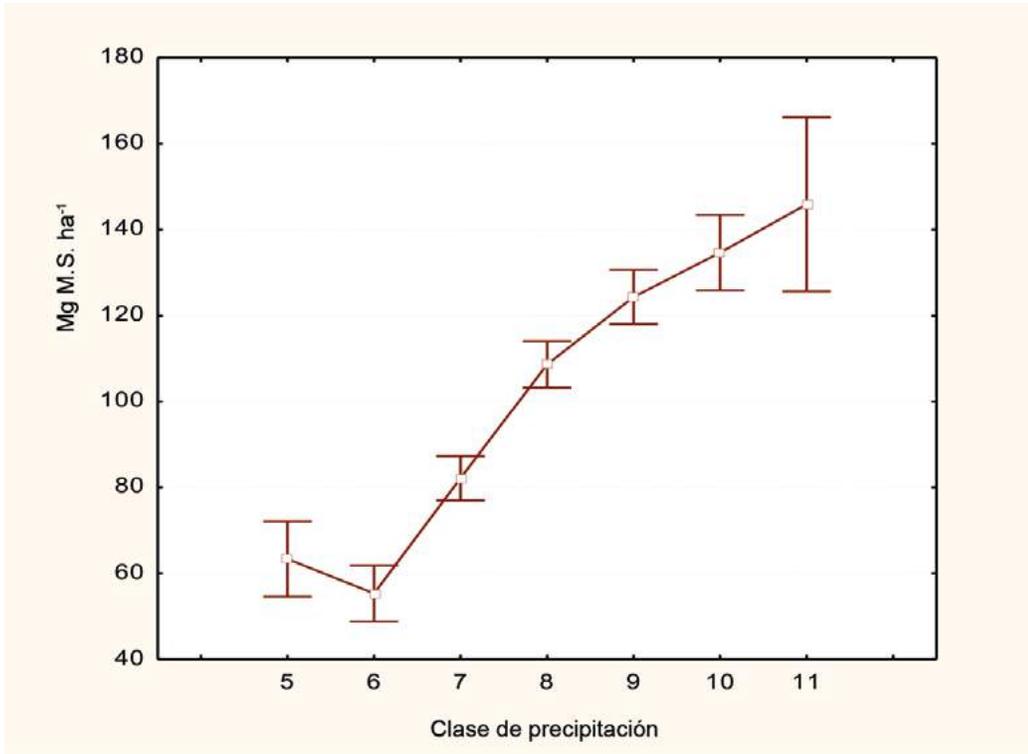


Figura 11. Relación entre la biomasa aérea de los bosques de pino (arriba) y de encino (abajo), con las clases de precipitación: 5 = 400-500 mm, 6 = 500-600 mm, 7 = 600-800 mm, 8 = 800-1000 mm, 9 = 1000-1200 mm, 10 = 1200-1500, 11 = 1500-1800 mm.

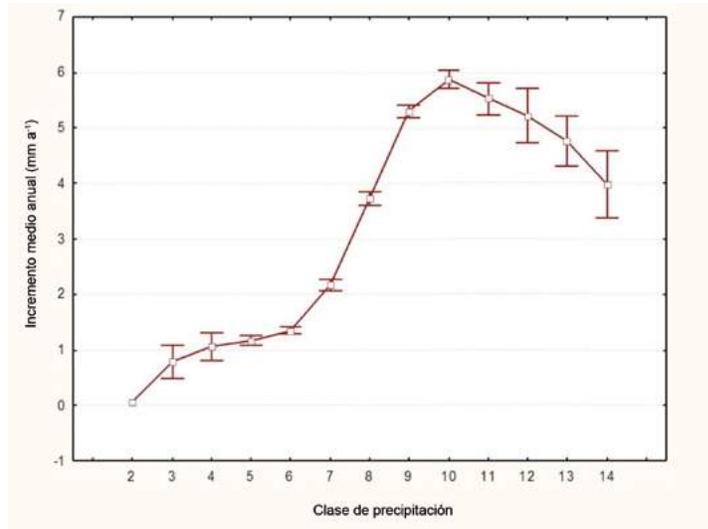


Figura 12. Relación entre el incremento medio anual del diámetro normal de arboles de pino con las clases de precipitación: 2=100-200 mm, 3=200-300 mm, 4=300-400 mm, 5=400-500 mm, 6=500-600 mm, 7=600-800 mm, 8=800-1000 mm, 9=1000-1200 mm, 10=1200-1500, 11=1500-1800 mm, 12=1800-2000 mm, 13=2000-2500, 14=2500-3000 mm.

### Incremento medio anual de la biomasa aérea de bosques y selvas y su relación con la precipitación

Para estimar el incremento medio anual promedio (todos los arboles) de la biomasa aérea de los bosques y selvas de los conglomerados (4 sitios de 400 m<sup>2</sup>) del INFyS de la CONAFOR, se estimó la tasa de incremento (DN/Edad) de las especies arbóreas estratificados por clase de DN, tipo de bosque y selva, así como la clase de precipitación. La Figura 13 muestra las tasas de incremento medio anual de la

biomasa en bosques y selvas. En la Caja 8 se muestra el incremento medio anual de la biomasa aérea para los bosques y selvas del país, en relación con las clases de precipitación, además de un mapa nacional de tasas de incremento para todos los tipos de vegetación.

En lo general, los resultados muestran una alta dependencia de las tasas de crecimiento de la biomasa aérea de los bosques y selvas del país con la precipitación promedio anual, por lo que esta relación puede usarse para parametrizar modelos, particularmente los modelos de estados y transiciones.

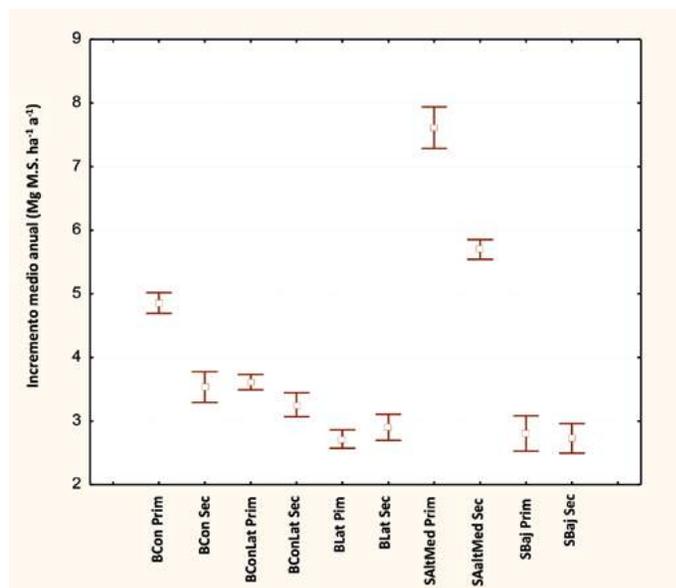


Figura 13. Tasa incremento medio anual de la biomasa aérea en bosques y selvas: BCon = Bosque de coníferas, BLat = Bosque de latifoliadas, BConLat = Bosque de coníferas-latifoliadas, SAM = Selva alta y mediana, SB = Selva baja o seca, Prim = Sucesión primaria, Sec = Sucesión secundaria.

### Caja 8. Tasas de incremento medio anual de la biomasa aérea

La Figura C8.1 muestra la tasa de incremento medio anual para los bosques y selvas del país. La Figura C8.1 presenta el mapa nacional de la tasa de incremento para la vegetación de México.

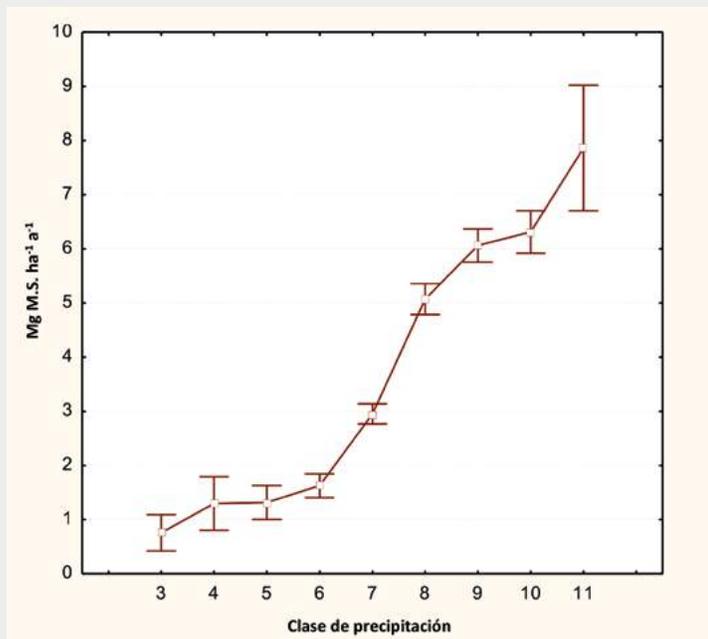


Figura C8.1. Tasa de incremento medio anual de la biomasa aérea por clases de precipitación: 3 = 200-300 mm, 4 = 300-400 mm, 5 = 400-500 mm, 6 = 500-600 mm, 7 = 600-800 mm, 8 = 800-1000 mm, 9 = 1000-1200 mm, 10 = 1200-1500, 11 = 1500-1800 mm.

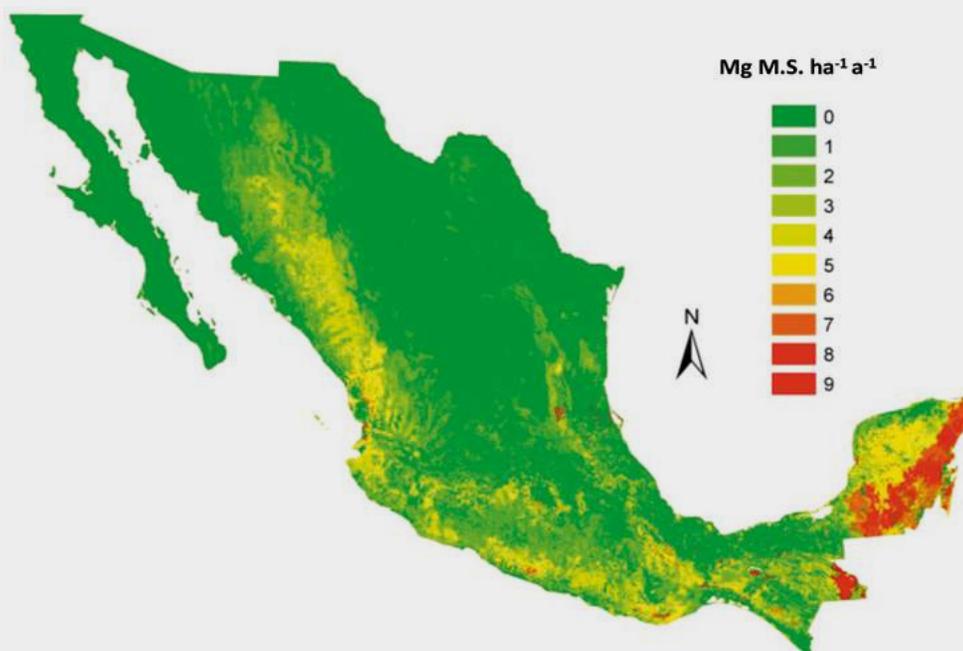


Figura C8.2. Mapa nacional de tasa de incremento medio anual de la biomasa aérea.

### Ganancias/pérdidas de biomasa aérea de los bosques y selvas entre el ciclo 2004-2007 y el ciclo 2009-2012

Para clarificar la discusión respecto a que el sector forestal de México es un sumidero de carbono, particularmente al considerar a los Bosques que permanecen como tales (INECC y SEMARNAT, 2015) y evitar hipótesis relativas a generación de mapas basados en polígonos de clases de vegetación o el uso de ecuaciones alométricas, se analizaron los ciclo 2004-2007 y 2009-2012 del INFyS de la CONAFOR a nivel de

árbol por árbol y sitio de muestreo de los conglomerados. La variable que se utilizó fue el diámetro normal (DN), medido directamente en campo y altamente correlacionado con la biomasa aérea (Brown *et al.*, 1989; Brown, 1997; Chave *et al.*, 2005; Vargas *et al.*, 2017a). La Figura 14 muestra la distribución de ganancias y pérdidas a nivel de país; se puede observar un predominio de las pérdidas. En la Figura 15 se muestra la misma información de la Figura 15, pero con asignación de los muestreos de campo a polígonos de los mapas de clases de vegetación *sensu* INEGI, como se observa, el patrón de la Figura 14 se mantiene.

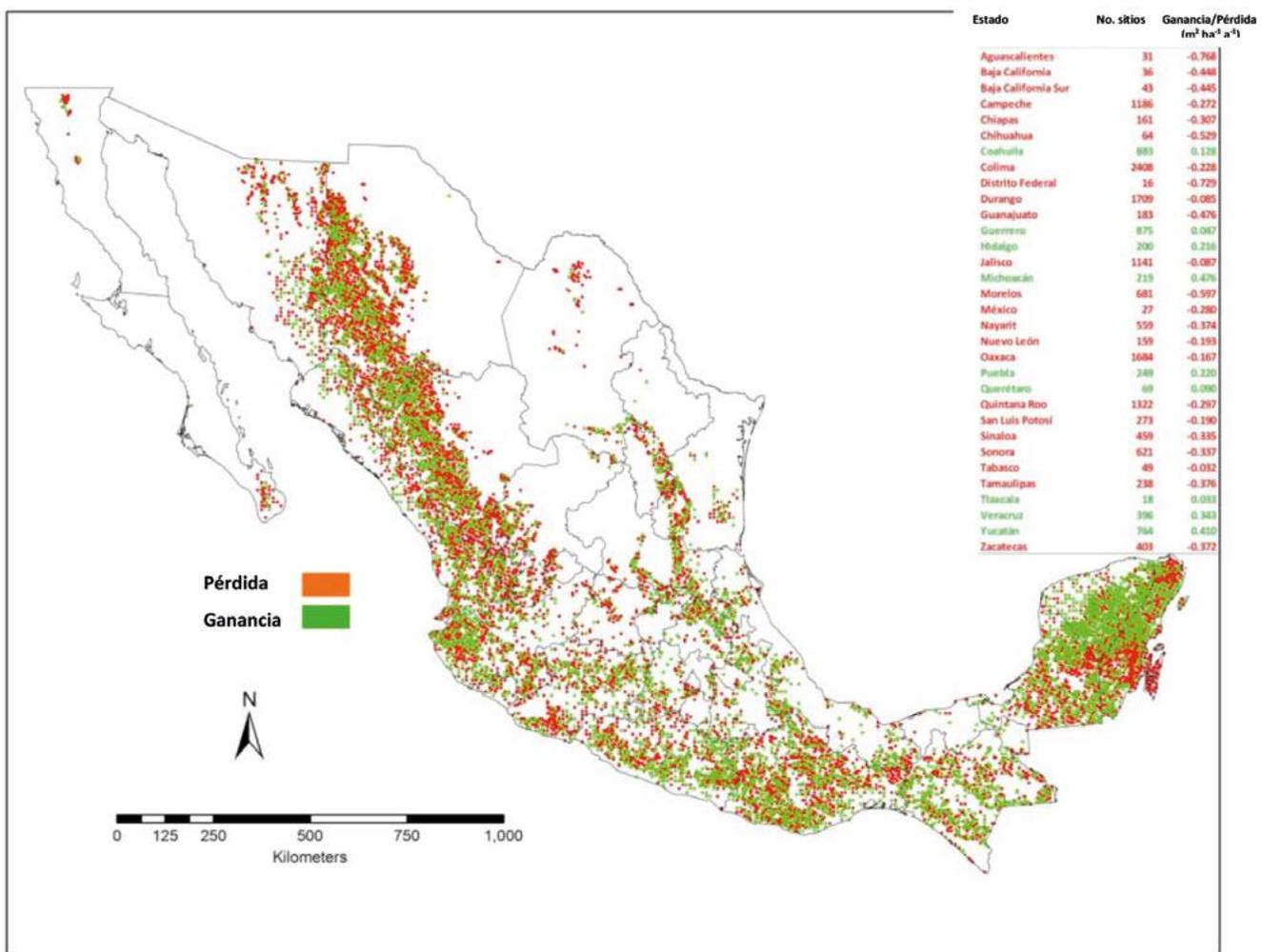


Figura 14. Ganancias y pérdidas anuales de la biomasa aérea arbórea entre el ciclo 2004-2007 y el ciclo 2009-2012 del INFyS de la CONAFOR, para los sitios de muestreo de los conglomerados (bosques que permanecen como tales).

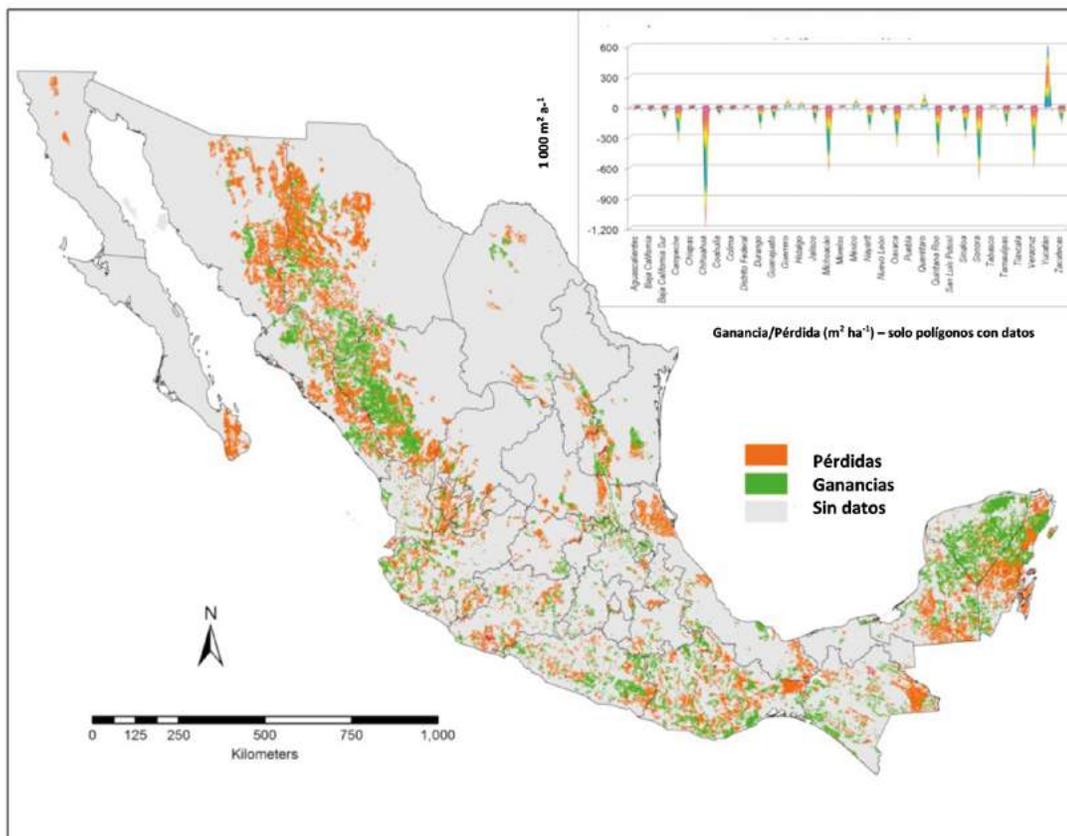


Figura 15. Ganancias y pérdidas anuales de la biomasa aérea arbórea entre el ciclo 2004-2007 y el ciclo 2009-2012 del INFyS de la CONAFOR, para los polígonos clases de vegetación *sensu* INEGI de los sitios de muestreo de los conglomerados (bosques que permanecen como tales).

En la Figura 16 se muestran los promedios e intervalos de confianza al 95%, de los cambios anuales de la biomasa aérea entre los dos ciclos del INFyS. La biomasa aérea se estimó de la base de ecuaciones alométricas de Rojas-García *et al.* (2015). En esta figura se observa que prácticamente todas las clases de bosques y selvas redujeron su biomasa; con excepción

de las selvas medianas, cuyo error de estimación es grande.

Adicionalmente, en la Caja 9 se muestran los cambios anuales de la biomasa aérea entre los dos ciclos analizados del INFyS a nivel de los estados del país; se presentan ganancias y pérdidas de biomasa, con dominio de las últimas.

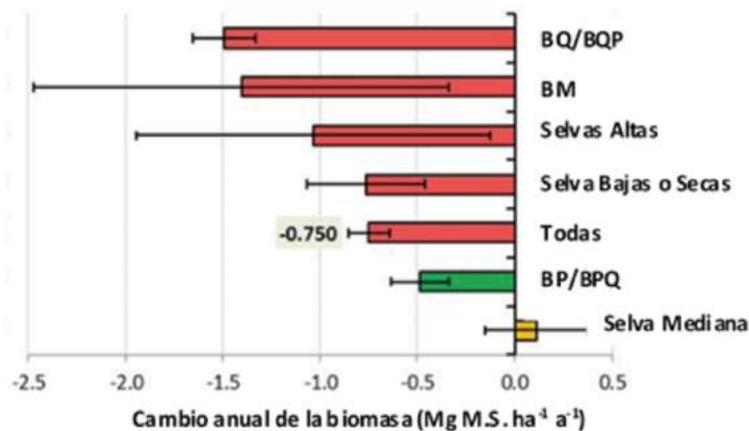


Figura 16. Ganancias y pérdidas anuales de la biomasa aérea arbórea entre el ciclo 2004-2007 y el ciclo 2009-2012 del INFyS de la CONAFOR, para los bosques y selvas (bosques que permanecen como tales).

La Figura 17 muestra los promedios, e intervalos de confianza al 95%, de los almacenes de la biomasa aérea entre los ciclos del INFyS para las clases de bosques y selvas *sensu* INEGI.

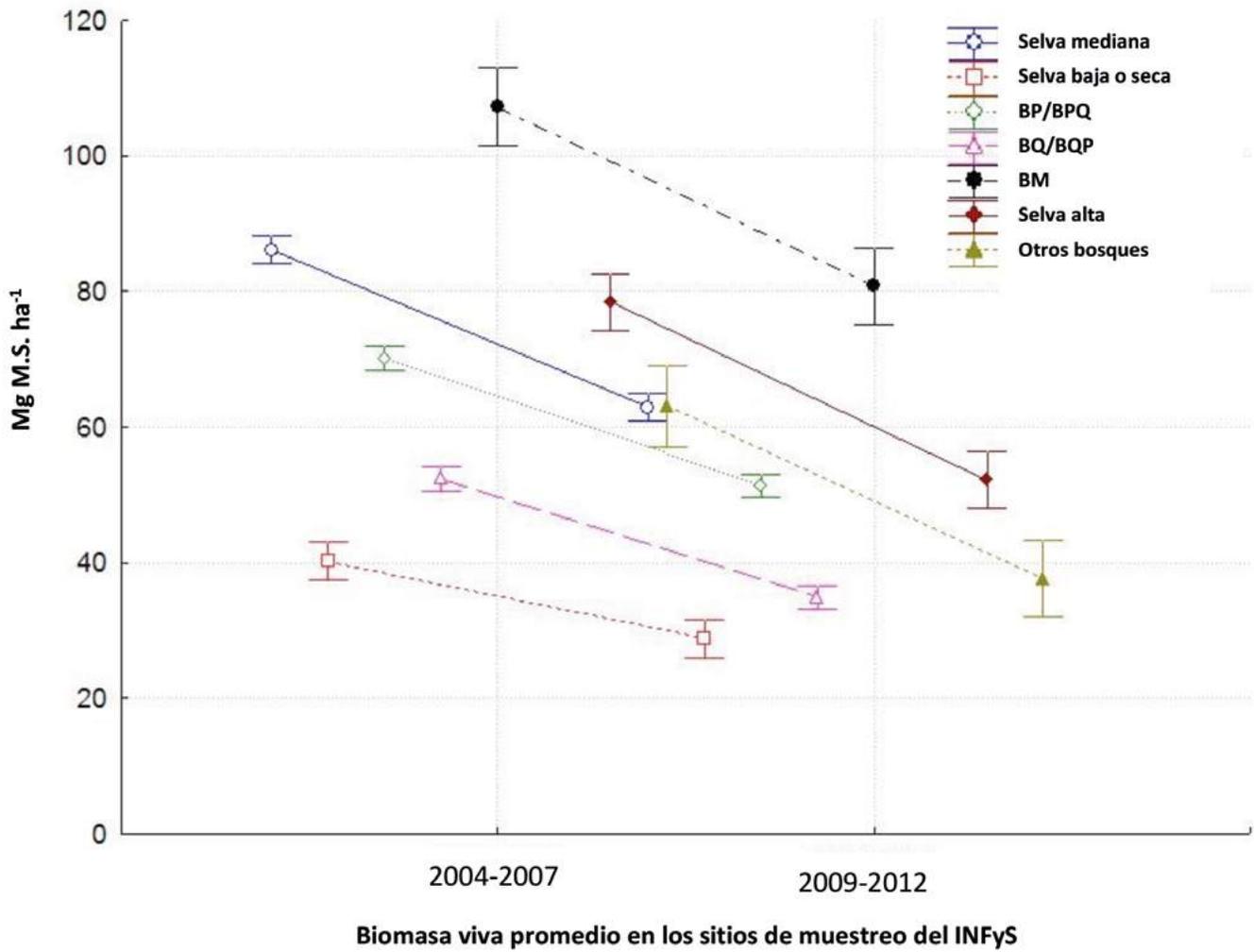


Figura 17. Almacenes de la biomasa aérea entre los dos ciclos del INFyS para los bosques y selvas del país.



### Caja 9. Tasas de incremento medio anual de la biomasa aérea por estado del país

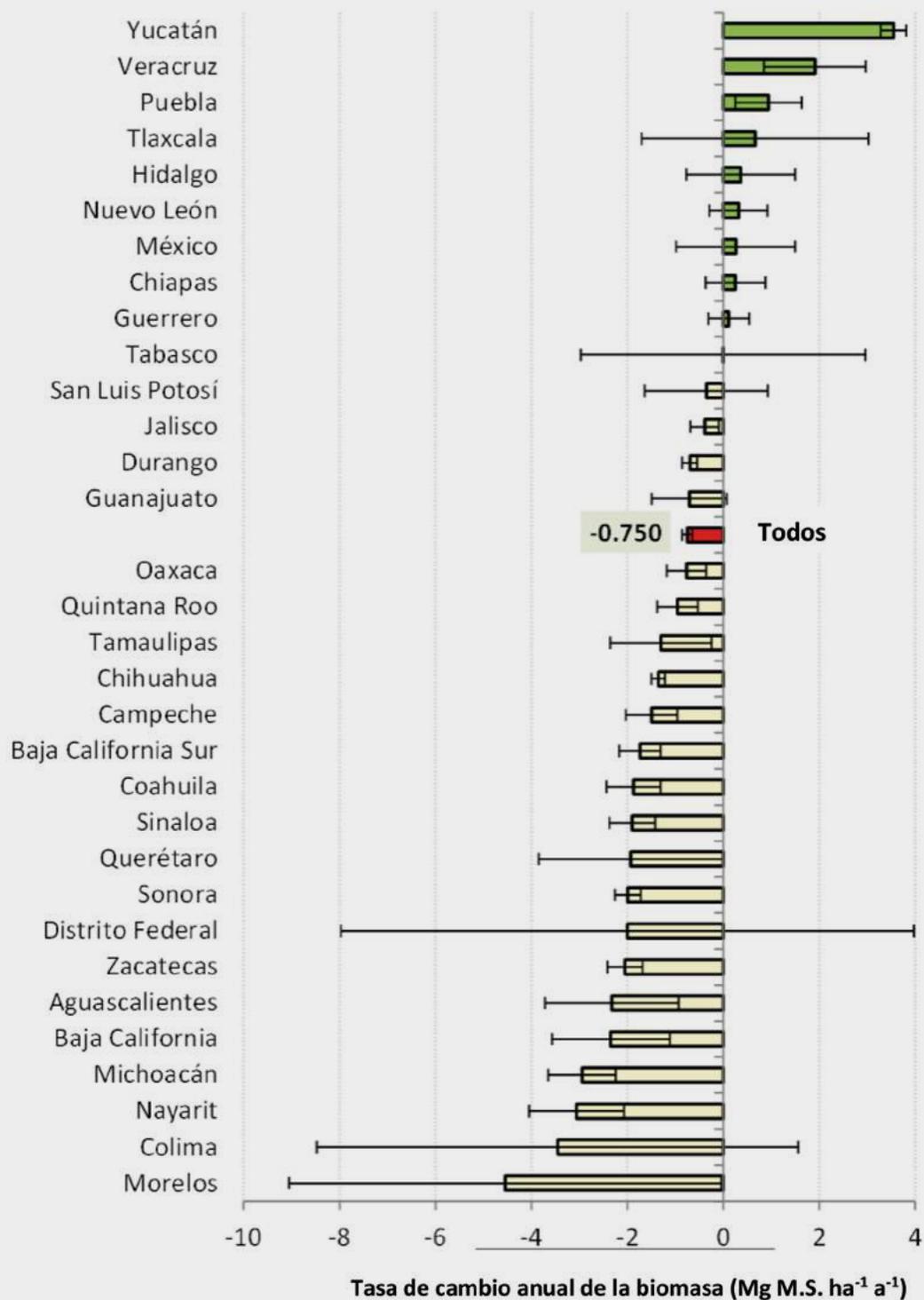


Figura C9.1. Tasa de incremento medio anual de la biomasa aérea de los bosques y selvas, entre los ciclos 2004-2007 y 2009-2012, para los estados del país.

De la evidencia que se presenta, es posible concluir que el sector forestal de México sigue siendo una fuente de emisiones GEI y no un sumidero, como se ha presentado (INECC y SEMARNAT, 2015).

**Potencial de ganancias en la biomasa aérea de las selvas de México**

El análisis del potencial de remoción de carbono de las selvas altas y medianas, precisó la estratificación de la biomasa presente en los conglomerados medidos en el ciclo 2004-2007 del INFyS, en sucesión primaria

(intacto) y secundaria (degradado), así como para cada estrato. Se estimó la biomasa aérea en el cuartil inferior (25% de los conglomerados con la biomasa más baja), en los cuartiles medianos (50% de los conglomerados con la biomasa mediana) y el cuartil superior (25% de la biomasa más alta), Figura 19. La diferencia entre las clases primarias del cuartil superior (líneas negras horizontales en la Figura 18), para cada clase de precipitación analizada y los cuartiles mediano e inferior, define el potencial de incremento de la biomasa aérea en cada estrato.

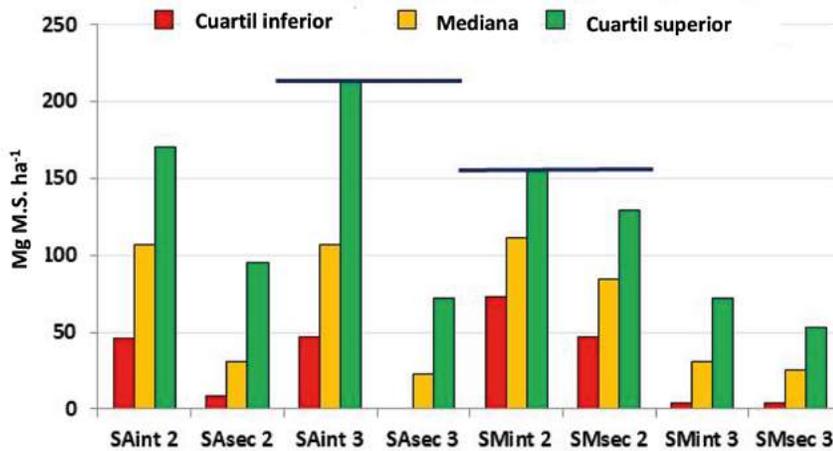


Figura 18. Potencial de remoción de carbono para las selvas altas (SAint = intacta o primaria y SAsec = degradada o secundaria y medianas (SMint = intacta o primaria y SMsec = degradada o secundaria) de México, para las clases de precipitación 2 (800-1500 mm) y 3 (≥ 1500 mm). Las líneas horizontales definen el incremento máximo potencial.

A partir de las tasas de incremento estimadas para las selvas altas y medianas, se calculó el tiempo necesario para recuperar la biomasa de los conglomerados de los diferentes cuartiles que se muestran en la Figura 19. En

la Figura 20 se muestran los tiempos de recuperación. Para pasar del cuartil inferior al superior se requiere entre 50-75 años y, de los cuartiles medianos al superior, entre 25 y 35 años.

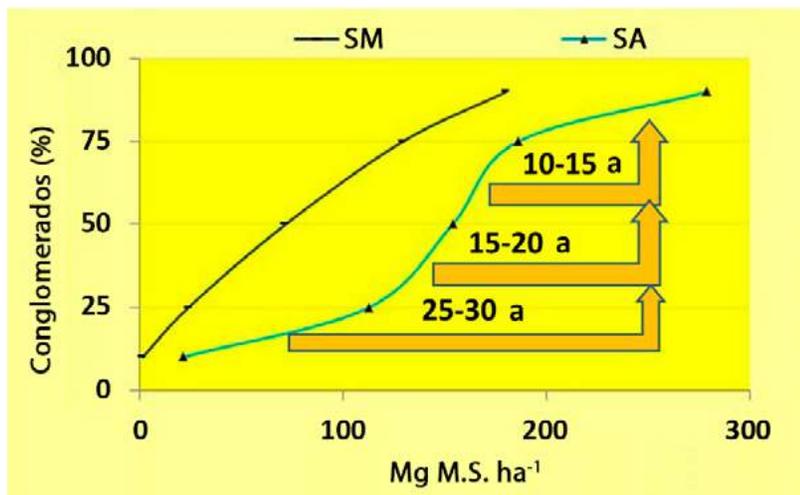


Figura 19. Tiempos de recuperación hacia los cuartiles superiores de las selvas altas (SA) y medianas (SM) analizadas en la Figura 18.

### Almacenes y escenarios multi-escala del sector forestal: hacia la implementación de enfoques de *abajo hacia arriba*

En el mecanismo REDD+ de la CMNUCC, los posibles pagos por deforestación y degradación forestal evitada (REDD+) requieren de la evaluación nacional de fuentes y sumideros de carbono. Actualmente, en México, la información de datos de actividad son los mapas de USyV del INEGI a escala 1:250 000, por lo que resulta sumamente difícil evaluar las acciones locales, dada la escala nacional. En esta perspectiva se argumenta que las reducciones de emisiones de REDD+ tienen que manejarse por la CONAFOR, al no identificar a quienes las realizaron (Balderas y Skutsch, 2012). Este enfoque de centralización de las acciones

en la gobernanza de REDD+ ha sido la política federal (Libert y Trench, 2016; Libert-Amico *et al.*, 2018).

En la Figura 20 se muestra que las acciones de REDD+, para ser mapeadas y recompensadas por acciones locales, requieren de un enfoque de *abajo hacia arriba* en su contabilidad. Los enfoques de *arriba hacia abajo* (*i.e.* mapas de USyV nacionales) están limitados y no permiten establecer una relación entre incentivos y personas o comunidades que realizan acciones REDD+ a nivel de proyectos.

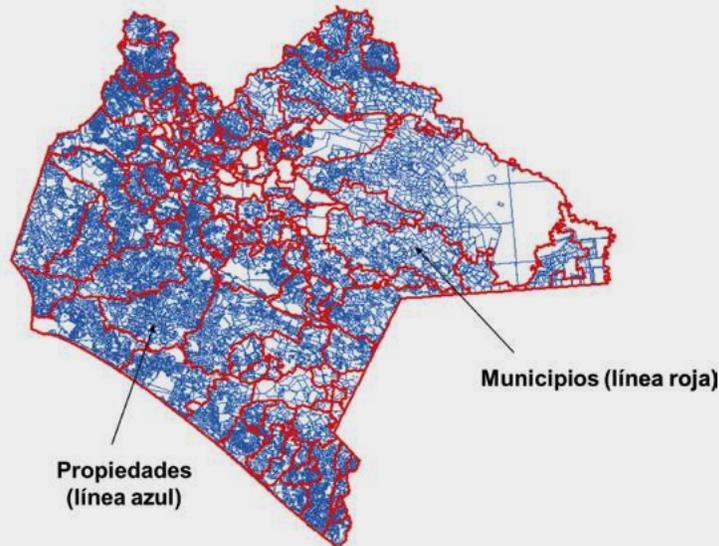
Para una armonización de escalas de contabilidad y de distribución de beneficios, se requiere escalar los almacenes y flujos de carbono desde el nivel de predios (parcelas en los ejidos y comunidades) hacia nuevos niveles de agregación (*i.e.* áreas geoestadísticas básicas, municipios, regiones, estados, país), ver Caja 10.



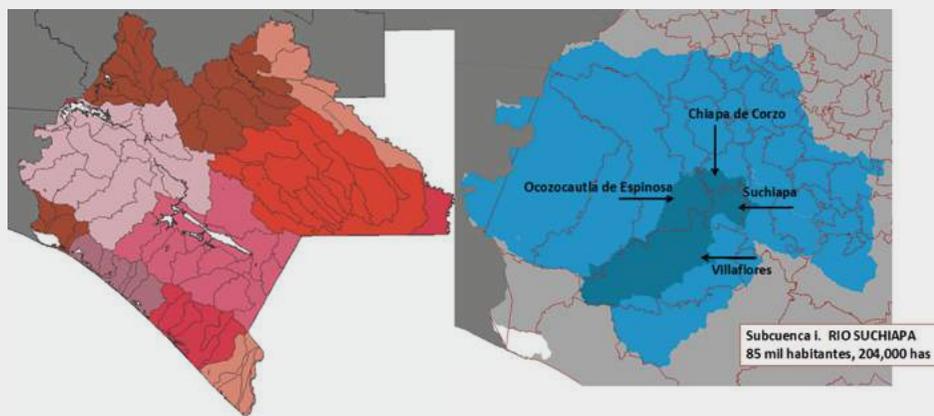
Figura 20. Enfoques de *abajo hacia arriba* y de *arriba hacia abajo* en la implementación de REDD+.

**Caja 10. Escenarios multi-escala en la implementación de REDD+**

La Figura C10.1 muestra la relación entre propiedades y la escala municipal para el estado de Chiapas, para integrar acciones multi-escala en la implementación de REDD+. Los niveles de agregación superiores a los predios o propiedades permiten integrar diferentes mandatos y visiones en el manejo territorial. Por ejemplo, la integración de acciones y políticas públicas municipales y del manejo del agua en subcuencas, resulta en límites problemáticos, Figura C10.2, pero estos se reducen fuertemente al usar la escala de propiedades.



**Figura C10.1. Relación entre propiedades y municipios en el estado de Chiapas.**



**Figura C10.2. Relación entre subcuencas hidrológicas y municipios, con énfasis en el problema de límites.**

Con base en información de sensores remotos, mapas de USyV 1:250 000 del INEGI y propios, escala 1:10 000 (Paz *et al.*, 2012b), más información de muestreos de campo, se obtuvo la Figura 21, que muestra los almacenes de carbono (biomasa aérea y subterránea y suelo) a escala de predios, municipios, subcuencas y estado, para el análisis de la evolución temporal del carbono en el estado de Chiapas. Este ejercicio multi-escala de *abajo hacia arriba* evita los problemas de contabilidad y los armoniza entre las diferentes escalas, lo que permite mapear acciones

locales hacia otros niveles de administración y toma de decisiones.

**Integración de escalas administrativas para generación de escenarios**

Bajo el supuesto de la generación de mapas de USyV a escala 1:50 000, al menos, el sistema de clasificación del INEGI puede usarse para generar escenarios asociados a los METs (Casiano y Paz, 2017). Los METs, de manera esquemática, pueden



abordar el cambio de uso de suelo (CUS) a cualquier nivel de organización de la vegetación y, por tanto, a diferentes escalas: Entidad de Vegetación (EV), Grupo de Vegetación (GV) y Tipo de Vegetación (TV). Las interacciones pueden ocurrir a nivel de EV, al interior de éstas pueden ocurrir interacciones como fases de la vegetación (Primaria y Secundaria); la vegetación secundaria, a su vez, interactúa como

tipos de vegetación secundaria Arbórea, Arbustiva, o Herbácea que detallan las rutas de la degradación o incremento de la vegetación al interior de cada EV, tal como se muestra en la Figura 22. La Caja 11 muestra diferentes niveles de anidación (carbono y costos de implementación) para el CUS a nivel local, armonizado a la escala municipal, donde existe información estadística histórica a nivel nacional.

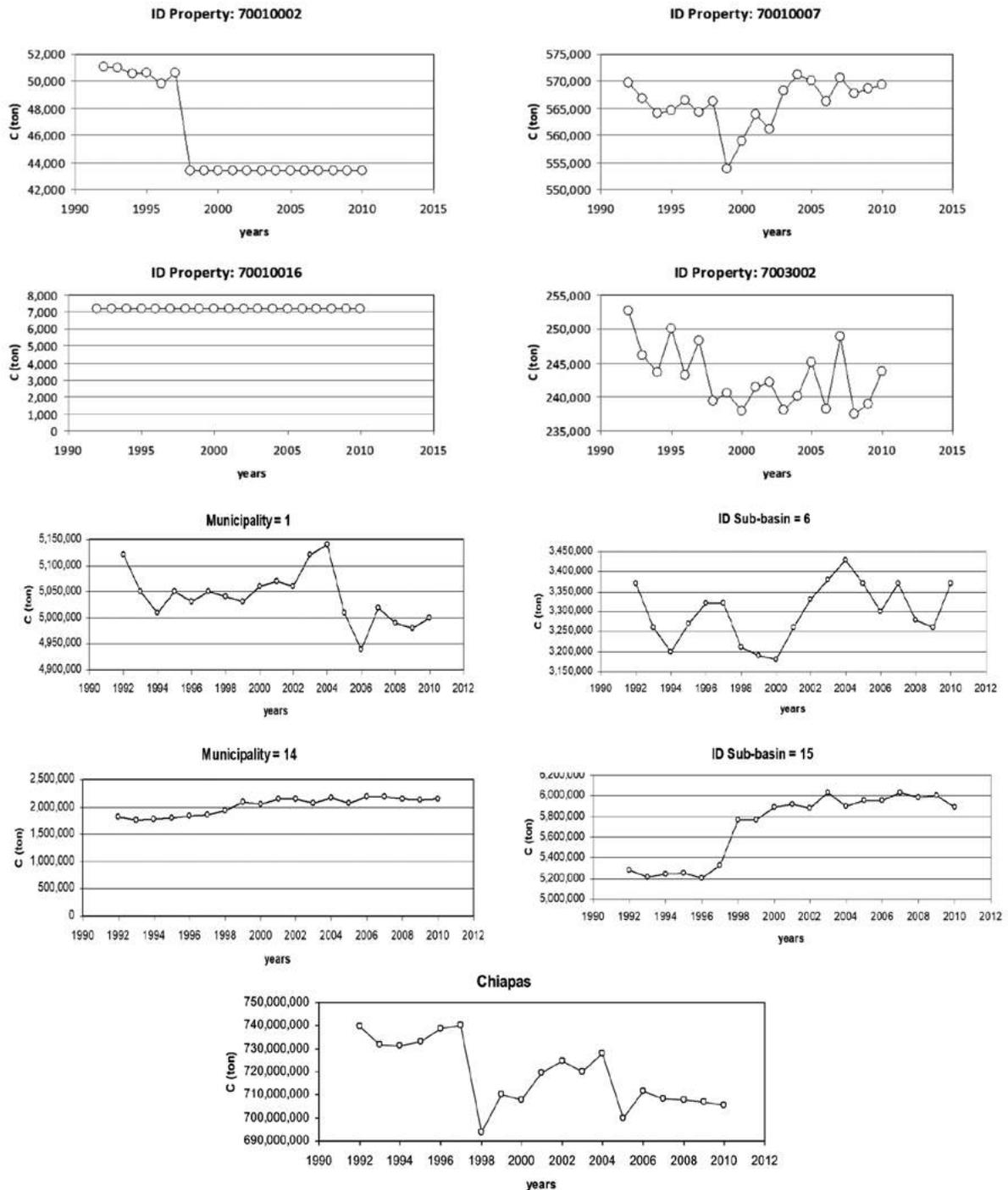


Figura 21. Evolución temporal del carbono a escala de propiedades, municipios, subcuencas y estado.

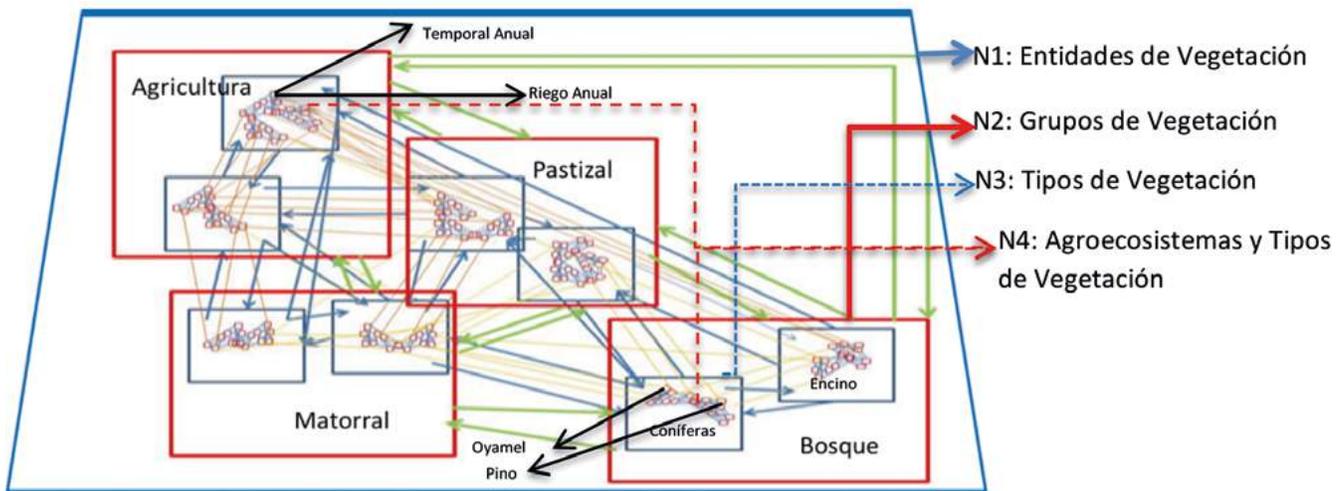
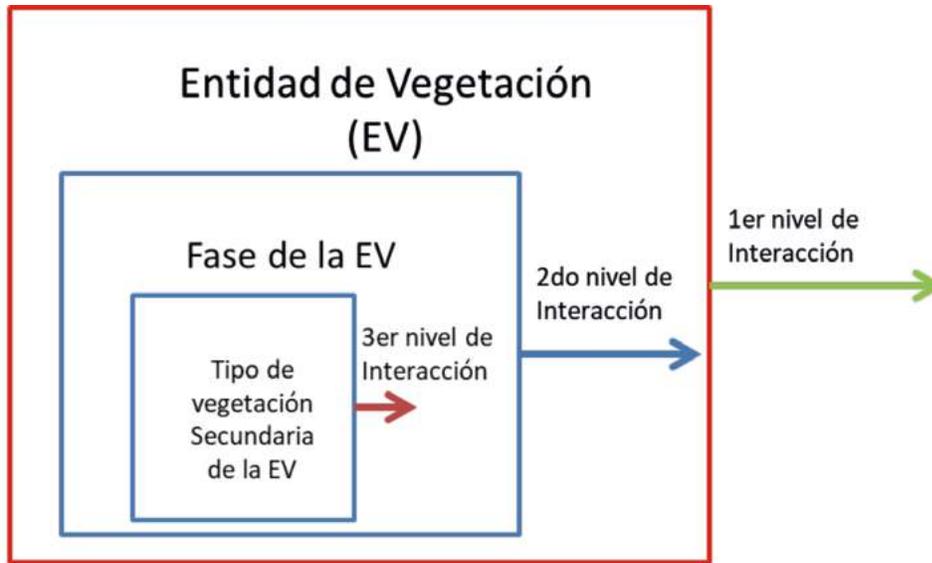


Figura 22. Integración de escalas y usos del suelo y vegetación de la clasificación del INEGI.

**Manejo y monitoreo forestal comunitario: hacia RETUS, más allá de REDD+**

El manejo forestal comunitario ha creado una importante tradición en México (Bray *et al.*, 2003; Chapela, 2015), a lo largo de las últimas décadas, permitiendo que las comunidades forestales definan sus sistemas de gobernanza y manejo. Aun cuando la versión territorial forestal plantea un manejo sostenible, el hecho de considerar solo a los bosques limita sus

alcances, ya que en el territorio coexisten las causas de la deforestación y degradación forestal (*i.e.* agricultura y ganadería, más otros usos). El enfoque del mecanismo REDD+ está orientado al sector forestal, con una visión fragmentada del territorio. El concepto de Reducción de Emisiones de Todos los Usos del Suelo, RETUS (Paz, 2012) presenta al territorio completo como el objetivo de la reducción de emisiones GEI e integra al sector agropecuario con el forestal para el desarrollo de acciones y programas conjuntos de desarrollo.

### Caja 11. Niveles de anidación y clases de USyV

La Figura C11.1 muestra cinco niveles de anidación de escalas y clases de USyV usando el sistema de clasificación del INEGI, para la asignación de almacenes de carbono y costos de implementación asociados a proyectos.

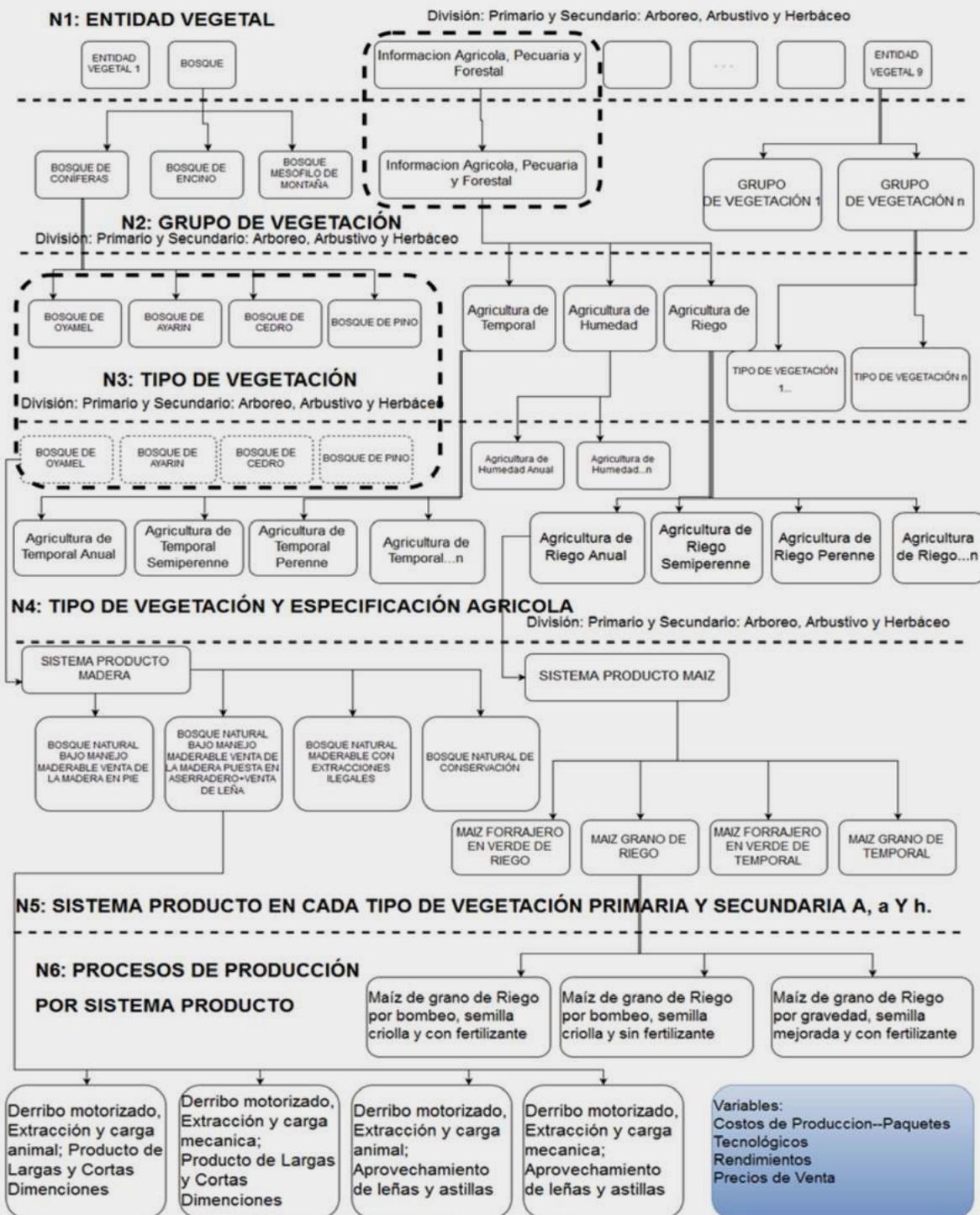


Figura C11.1. Niveles de anidación del sistema de clasificación del INEGI. Fuente: Casiano y Paz (2017).

En el desarrollo de la estrategia nacional de REDD+ en México (CONAFOR, 2017) se considera al territorio, conceptualmente, como orientado al desarrollo rural sustentable, al integrar todos los usos

del suelo, aun cuando no es claro cómo implementar esta estrategia, dada la persistencia en políticas sectoriales descoordinadas, ver Caja 12.

### Caja 12. Manejo integrado del territorio y REDD+

La Figura C12.1 muestra un cartel usado por la CONAFOR para definir su estrategia de manejo integrado del territorio para la implementación de REDD+ en México.



Figura C12.1. Cartel de la CONAFOR sobre el manejo integrado del territorio para REDD+.



La inclusión de la participación de los dueños o poseedores de los predios (propiedad privada, comunidades y ejidos) en la implementación de REDD+ con un enfoque de abajo hacia arriba y, la introducción de todos los usos del suelo de su territorio, es importante al considerar opciones de actividades locales acordes a los objetivos de los dueños o poseedores (Kragten *et al.*, 2001), para evitar contradicciones socioambientales (Soto-Pinto y Jiménez-Ferrer, 2018).

La componente del monitoreo, reporte y verificación (MRV) de REDD+ propone que el monitoreo forestal comunitario puede generar resultados técnicos comparables a los inventarios forestales ejecutados por profesionales, pero a un menor costo y con participación de las comunidades, con la correspondiente apropiación del mecanismo (Skutsch, 2011).

El uso de monitores comunitarios y esquemas de fusión de información y conservación de la incertidumbre (Paz *et al.*, 2012c), se propone para monitoreos e inventarios de carbono en una estrategia de calibración de información para propagar la incertidumbre considerando las diferentes fuentes de datos (Paz y de Jong, 2012a). En esta perspectiva, los inventarios forestales dinámicos a través de cronosecuencias (Paz y de Jong, 2012b) permite que en una sola visita se puedan obtener datos para modelar la dinámica del carbono (Paz *et al.*, 2012b). El Programa Mexicano del Carbono ha implementado estos conceptos al integrar mediciones cuantitativas y semicuantitativas en los inventarios de carbono, para determinar las incertidumbres entre diferentes fuentes de información (PMC, 2011a y b), fomentando la participación de monitores comunitarios en los inventarios.

## SIGUIENTES PASOS

De las discusiones previas respecto a los bosques y selvas de México y sus almacenes y flujos de carbono, resalta la necesidad de acciones orientadas a incrementar el conocimiento e implementar acciones y programas de políticas públicas:

- Es necesaria una mayor coordinación entre las instituciones gubernamentales y el sector científico-académico, para homologar criterios y procedimientos relacionados con las bases de datos disponibles (de Jong, 2012), de manera tal que se reduzcan o eliminen las principales barreras para hacer interoperables los datos y

el conocimiento relacionado con el ciclo del carbono (Vargas *et al.*, 2017b).

- La interoperabilidad, incluye la armonización de los diferentes diseños de muestreos de campo y protocolos de laboratorio utilizados por la comunidad científica y la sociedad civil, sin dejar de lado su compatibilidad con los esfuerzos federales (*i.e.* INFyS de la CONAFOR), para poder integrar bases de datos con estándares comunes.
- Es necesario el desarrollo de datos de actividad (*i.e.* mapas de USyV) a escalas adecuadas, que reflejen la realidad de las acciones locales y su integración con los niveles de la administración pública. En esta perspectiva, es urgente una revisión de los sistemas de clasificación de los usos del suelo y la vegetación, para su aplicación en los inventarios de carbono.
- La integración de todos los almacenes recomendados por el IPCC (*i.e.* biomasa aérea, biomasa subterránea, material leñoso caído, mantillo y suelo) en los nuevos inventarios de carbono debe ser prioritaria en el futuro, para tener una visión integral del manejo y los cambios de uso del suelo.
- La síntesis y modelación en la generación de escenarios de opciones de intervención debe implementarse y fomentarse, de modo tal que se cuente con los elementos necesarios para orientar la toma de decisiones hacia acciones y programas de políticas públicas.
- Las estimaciones de inventarios de carbono deberán caracterizar sus incertidumbres en forma correcta, para poder propagarlas al integrar los factores de las estimaciones que se realicen.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los bosques y selvas de México contienen los mayores almacenes de carbono de la biomasa aérea y son de alto interés para focalizar acciones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el país, particularmente bajo el mecanismo REDD+.

Aun cuando los inventarios recientes de emisiones GEI del sector forestal señalan que éste constituye un sumidero de carbono, los análisis y evidencia presentada en el actual documento, muestran que

continúa comportándose como una fuente importante de emisiones, por lo que es necesario reconsiderar las estrategias de conservación e incremento de los almacenes con enfoques de desarrollo rural sustentable, basado en acciones locales.

México cuenta con información nacional de los diferentes almacenes de los bosques y selvas, pero requiere de esfuerzos integrados y coordinados para generar conocimiento y sintetizarlo en modelos para la generación de escenarios de opciones de manejo e intervención en el sector.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la CONAFOR e INECC su apoyo en la disponibilidad de los datos nacionales utilizados para el desarrollo de este capítulo.

## LITERATURA CITADA

- Achard, G., H.D. Eva, P. Mayaux, H. J. Stibig and A. Belward. 2004. Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. *Global Biogeochemical Cycles* 18:1-11.
- Álvarez, S. y A. Rubio. 2012. Línea base de carbono en bosque mixto de pino-encino de la Sierra Juárez (Oaxaca, México). Aplicación del modelo CO2FIX V.3.2. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. doi:105154/r.chscfa.2012.01.005.
- Angelsen, A., and D. Kaimowitz. 1999. Rethinking the causes of deforestation: lessons from economic models. *The World Bank Research Observer* 14:73-98.
- Aryal, D.A., B.H.J. de Jong, S. Ochoa-Gaona, L. Esparza-Olguin and J. Mendoza-Vega. 2014. Carbon stocks and changes in tropical secondary forests of southern Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 195:220-230.
- Augusto, L., J. Ranger, Q. Ponette and M. Rapp. 2000. Relationship between forest tree species stand production and stand nutrient amount. *Annals of Forest Science* 57:313-324.
- Balderas-Torres, A. and M. Skutsch. 2012. Splitting the difference: a proposal for benefit sharing in reducing emissions from reforestation and forest degradation (REDD+). *Forests* 3:137-154.
- Barbier, E.J. and J.C. Burgess. 1996. Economic analysis of deforestation in Mexico. *Environment and Development Economics* 1: 203-239.
- Beer, J., C.A. Harvey, M. Ibrahim, J.M. Harmand, E. Somarriba-Chávez y F. Jiménez-Otárola. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas* 10:80-87.
- Birdsey, R., G. Angeles P., W. A. Kurz, A. Lister, M. Olguin, Y. Pan, C. Wayson, B. Wilson and K. Johnson. 2013. Approaches to monitoring changes in carbon stocks for REDD+. *Carbon Management* 4:519-537.
- Bray, D. B., L. Merino, P. Negreros, G. Segura, J. M. Torres and H. F. Vester. 2003. Mexico's community-managed forests as a global model for sustainable landscapes. *Conservation Biology* 17:672-677.
- Brown, S., A. J. R. Gillespie and A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35:881-902.
- Brown, S. and A.E. Lugo. 1982. The storage and production of organic matter in the tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica* 14:161-187.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass change of tropical forests, a primer. *Forest Resources Assessment Publication*. Forestry Papers 134. FAO. Rome 134 p.
- Cairns, M.A., E.H. Helmer and S. Brown. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111:1-11.
- Carré, F., R. Hiederer, V. Blujdea and R. Koeble. 2010. Background guide for the calculation of land carbon stocks in the biofuels sustainability scheme drawing on the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. EUR 24573 EN. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg 109 p.
- Casiano, M. y F. Paz. 2015. Modelos de estados y transiciones: una herramienta para el manejo sustentable de recursos naturales asociados a contenidos de carbono. *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 pp. 629-639.*
- Casiano, M. y F. Paz. 2017. Estructura anidada para la estimación de costos de oportunidad para REDD+ y RETUS. *Elementos para Políticas Públicas* 1:41-62.
- Casiano, M., F. Paz-Pellat, M. Rojo-Martínez, S. Covaleda-Ocón y D.R. Aryal. 2018. El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera y Bosques* doi:10.21829/myb.2018.2401894.
- Castillo, M. A., B. de Jong, V. Maldonado, F. Rojas, M. Olguin, V. de la Cruz, F. Paz y G. Jiménez. 2010. Modelo de deforestación para el estado de Chiapas. [http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc\\_socios.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/biblioteca/doc_socios.php) (Consulta: diciembre 3, 2017).
- Castillo-Santiago, M.A., A. Hellier, R. Tipper and B.H.J. de Jong. 2007. Carbon emissions from land-use change: an analysis of causal factors in Chiapas, Mexico. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12:1213-1235.
- Chapela, F. 2015. The challenge of crafting institutions for the commons: the case of community forestry support programs



- in Mexico 2003-2008. *Journal of Agricultural Science and Technology* 5:347-356.
- Chapin, S., P. Manson and H. Mooney. 2011. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer Science and Business Media Inc. New York, NY, USA.
- Chave, J., C. Andalo, S. Brown, M. A. Cairns, J. Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J. P. Lescuré, B. W. Nelson, H. Ogawa, H. Puig, B. Riéra, T. Yamakura. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145:87-99.
- Chave, J., R. Condit, S. Aguilar, A. Hernandez, S. Lao and R. Perez. 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 35: 409-420.
- Chávez A. G., G. Ángeles, M. Pérez, A. López, E. García y C. Wayson. 2016. Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 22:23-36.
- Chazdon, R.L., E.N. Broadbent, D.M.A. Rozendaal, F. Bongers, A.M.A. Zambrano, T.M. Aide, P. Balvanera, J.M. Becknell, V. Boukili, P.H.S. Brancalion, D. Craven, J.S. Almeida-Cortez, G.A.L. Cabral, B. de Jong, J.S. Denslow, D.H. Dent, S.J. Dewalt, J.M. Dupuy, S.M. Durán, M.M. Espirito-Santo, M.C. Fandino, R.G. César, J.S. Hall, J.L. Hernández-Stefanoni, C.C. Jakovac, A.B. Junqueira, D. Kennard, S.G. Letcher, M. Lohbeck, M. Martínez-Ramos, P. Massoca, J.A. Meave, R. Mesquita, F. Mora, R. Muñoz, R. Muscarella, Y.R.F. Nunes, S. Ochoa-Gaona, E. Orihuela-Belmonte, M. Peña-Claros, E.A. Pérez-García, D. Piotto, J.S. Powers, J. Rodríguez-Velazquez, I. Eunice Romero-Pérez, J. Ruíz, J.G. Saldarriaga, A. Sanchez-Azofeifa, N.B. Schwartz, M.K. Steininger, N.G. Swenson, M. Uriarte, M. van Breugel, H. van der Wal, M.D.M. Veloso, H. Vester, I.C.G. Vieira, T.V. Bentos, G.B. Williamson and I. Poorter. 2016. carbon sequestration potential of second growth forest regeneration in the latin american tropics. *Sci. Adv.* doi:10.1126/sciadv.1501639.
- Chazdon, R. L., S.G. Letcher, M. van Breugel, M. Martínez-Ramos, F. Bongers and B. Finegan. 2007. Rates of change in tree communities of secondary neotropical forests following major disturbances. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 326:273-289.
- Clark, D.B., D.A. Clark and J.M. Read. 1998. Edaphic variation and the mesoscale distribution of tree species. *Forest Ecology and Management* 86:101-112.
- 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 confinable es una tasa de deforestación? ¿Como 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. *In: P. Sndarshana, N. Nageswara-Rao and J.R. Soneti (eds), Tropical Forests* pp. 269-296 doi: 10.5772/31523.
- Covaleda, S., F. Paz y B. de Jong. 2012a. Modelo genérico de estados y transiciones para los cambios en los almacenes de carbono en ecosistemas templados de Chiapas. *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 del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.* pp. 374-381.
- Covaleda, S., F. Paz y B. de Jong. 2012b. Modelos de estados y transiciones: una herramienta para la planificación de estrategias REDD+. *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 del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.* pp.752-758.
- Covaleda, C., F. Paz y B. de Jong. 2013. Parametrización de modelos de estados y transiciones para el carbono y caracterización de la incertidumbre. *En: F. Paz, M. Bazan y V. Saynes (eds.) Dinámica del Carbono en el Suelo 2012. Serie Avances Temáticos del Ciclo del Carbono y sus Interacciones. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.* pp. 85-91.
- Covaleda, S., F. Paz, A. Ranero y T. Ramos. 2015. Desarrollo de escenarios de mitigación para intervención con políticas públicas asociadas a REDD+ y RETUS en Chiapas. *En: Paz, F., J. C. Wong y R. Torres A. (eds.) Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015. Texcoco, Estado de México, México* pp. 574-778
- Covaleda, 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.
- Covaleda, 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.
- Dai, Z., R.A. Birdsey, K.D. Johnson, J.M. Dupuy, J.L. Hernandez-Stefanoni and K. Richardson. 2014. Modeling carbon

- stocks in secondary tropical dry forest in the Yucatan peninsula, Mexico. *Water Air Soil Pollut.* doi:10.1007/s11270-014-1925-x
- de Castilho, C.V., W.E. Magnusson, R. Nazare, O. Araújo, R.C.C. Luizao, F. Luizao, A.P. Lima and N. Higuchi. 2006. Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian forest: effects of soils and topography. *Forest Ecology and Management* 234:85-96.
- de Jong, B.H.J., 2001. Uncertainties in estimating the potential for carbon mitigation of forest management. *Forest Ecology and Management* 154:85-104.
- de Jong, B.H.J. 2012. Step-wise approach to improving greenhouse gas inventories. In: B. Mora, M. Herold, V. De Sy, A. Wijaya, L. Verchot and J. Penman (eds.). *Capacity Development in National Forest Monitoring: Experiences and Progress for REDD+*. Joint Report by CIFOR and GOF-C-Gold, Bogor, Indonesia pp. 47-52.
- de Jong, B. 2013. Spatial distribution of biomass and links to reported disturbances in tropical lowland forests of southern Mexico. *Carbon Management* 4:601-615.
- 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.H.J., M.E. Cairns, P.K. Haggerty, N. Ramírez-Marcial, S. Ochoa-Gaona, J. Mendoza-Vega, M. González-Espinosa and I. March-Mifsut. 1999. Land use change and carbon flux between 1970s and 1990s in central highlands of Chiapas, Mexico. *Environmental Management* 23:373-385.
- de Jong, B.H.J., A. Hellier, M.A. Castillo-Santiago and R. Tipper. 2005. Application of the 'Climafor' approach to estimate baseline carbon emissions of a forest conservation project in the Selva Lacandona, Chiapas, Mexico. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 10:265-278.
- de Jong, B., O. Masera, R.D. Martínez, F. Paz, M. Olguin, C. Anaya, C. Balbontín, 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.J., O. Masera, M. Olguin and R. Martinez. 2007. Greenhouse gas mitigation potential of combining management and bioenergy substitution: a case study from Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management* 242:398-411.
- de Jong, B.H.J., S. Ochoa-Gaona, M.A. Castillo-Santiago, N. Ramírez-Marcial and M. Cairns. 2000. Land-use/land-cover change and carbon flux in the Selva Lacandona, Mexico. *Ambio* 29:504-511.
- 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. Olguín, 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.
- Deiningner, K. and B. Minten. 1999. Poverty, policies, and deforestation: the case of Mexico. *Research Project on Social and Environmental Consequences of Growth-Oriented Policies. Economic Development and Cultural Change* 47:313-344.
- Deiningner, K., and B. Minten. 2002. Determinants of forest cover and the economics of protections: an application to Mexico. *American Journal of Agricultural Economics* 84 943-960.
- Dixon, R. 1995. Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gas? *Agroforestry Systems* 31:99-116.
- Eaton J. M. and D. Lawrence. 2008. Loss of carbon sequestration potential after several decades of shifting cultivation in the Southern Yucatan. *Forest Ecology and Management* doi:10.1016/j.foreco.2008.10.019.
- Espinoza D. W., L. Krishnamurthy, A.A Vázquez y R.A. Torres. 2012. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18: 57-70.
- FAO. 2010. *Global Forest Resources Assessment 2010*. UN Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.
- FAO and ITPS. 2015. *Status of the World's Soil Resources (SWR) – Main Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy.
- Figuroa, N.C., G. Angeles, A. Velázquez, y H. de los Santos. 2010. Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula Schltdl. et Cham.* en Zacualtipán, Hidalgo. *Rev. Mex. Cien. For.* 1:105-112.
- Flores-Garnica, J.G., J.C. Wong-González y F. Paz-Pellat. Camas de combustibles forestales y carbono en México. *Madera y Bosques* doi:10.21829/myb.2018.2401893
- Galicía L., Saynes V. y Campo J. 2015. Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Botanical Sciences* 93: 473-484.
- Geist, H.J., and E.F. Lambin. 2002. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *Bioscience* 52:143-150.
- Gibbs, H.K., S. Brown, H.O. Niles and J.A. Foley. 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environ. Res. Lett.* 2:1-13.



- Hayes, D.J., D.P. Turner, G. Stinson, A.D. McGuire, Y. Wei, T.O. West, L.S. Heath, B. Dejong, B.G. Mcconkey, R.A. Birdsey, W.A. Kurz, A.R. Jacobson, D.N. Huntzinger, Y. Pan, W. Mac Post and R.B. Cook. 2012. Reconciling estimates of the contemporary North American carbon balance among terrestrial biosphere models, atmospheric inversions, and a new approach for estimating net ecosystem exchange from inventory-based data. *Global Change Biology* 18:1282–1299.
- Hernandez-Stefanoni, J.L., J.M. Dupuy, F. Tun-Dzul and F. May-Pat. 2011. Influence of landscape structure and stand age on species density and biomass of a tropical dry forest across spatial scales. *Landscape ecology* 26:355-370.
- Houghton, R.A. 2003. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in the land use and land management 1850-2000. *Tellus* 55B:378-390.
- 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.
- Hughes, R. F., J. B. Kauffman and V. Jaramillo. 1999. Biomass, carbon, and nutrient dynamic of secondary forests in humid tropical region of México. *Ecology* 80:1892-1907.
- Hughes, R. F., J. B. Kauffman and V. Jaramillo. 2000. Ecosystem scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico. *Ecological Applications* 10:515-527.
- INE. 2011a. Índice de riesgo de deforestación (Presión Económica a la Deforestación) IRDef 2.0.1. Dirección de Análisis Estadístico, Econométrico y Modelos. Dirección General de Investigación en Política y Economía Ambiental. Instituto Nacional de Ecología. En línea: <http://www.ine.gob.mx/irdef> (fecha de consulta: 22/03/2012).
- INE. 2011b. Índice de riesgo de deforestación. Nota metodológica. Dirección de Análisis Estadístico, Econométrico y Modelos. Dirección General de Investigación en Política y Economía Ambiental. Instituto Nacional de Ecología. En línea: <http://www.ine.gob.mx/irdef> (fecha de consulta: 22/03/2012).
- INECC y SEMARNAT. 2015. Primer informe bienal de actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. INECC / SEMARNAT. Mexico 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, Mexico 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. 1997. Base de datos geográficos. Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación (vectorial). Escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags. 56 p.
- 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. Edited by Jim Penman, Michael Gytarsky, Taka Hiraishi, Thelma Krug, Dina Kruger, Riitta Pipatti, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kiyoto Tanabe and Fabian Wagner. 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. In: H.S. Eggleston, 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.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *In*: T.F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- Jang, Y. W., I. S. Park, S. Ha, S. H. Jang, K. W. Chubg, G. Lee, W. H. Kim and Y. J. Choi. 2014. Preliminary analysis of the development of the Carbon Tracker system in Latin America and the Caribbean. *Atmósfera* 27:61-76.
- Jaramillo V. J., Ahedo H. R. y Kauffman J. B. 2003a. Root biomass and carbon in a tropical evergreen forest of Mexico: changes with secondary succession and forest conversion to pasture. *Journal of Tropical Ecology* 19:457-464.
- Jaramillo V. J., J.B. Kauffman, R.L. Rentería, D.L. Cummings and L.J. Ellingson. 2003b. Biomass, carbon, and nitrogen pools in Mexican tropical dry forest landscapes. *Ecosystems* 6: 609-629.
- Jaramillo, V.J., A. Martínez-Yrizar and R.L. Sanford. 2011. Primary productivity and biogeochemistry of seasonally dry tropical forests. *In*: R. Dirzo, H.S. Young, H.A. Mooney and G. Ceballos (eds.). *Seasonally Dry Tropical Forests. Ecology and Conservation*. Island Press pp. 109-128.
- Kaimowitz, D., and A. Angelsen. 1998. Economic models of tropical deforestation: a review. Center for International Forestry Research. Bogor, Indonesia 140 p.
- Kauffman, J.B., R.F. Hughes and C. Heider. 2009. Carbon pool and biomass dynamics associated with deforestation, land use, and agricultural abandonment in the neotropics. *Ecological Applications* 19:1211-1222.
- Kauffman, J.B., M.D. Steele, D.L. Cummings and V.J. Jaramillo. 2003. Biomass dynamics associated with deforestation, fire, and conversion to cattle pasture in a Mexican tropical dry forest. *Forest Ecology and Management* 176:1-12.
- King, A. W., R. J. Andres, K. J. Davis, M. Hafer, D. J. Hayes, D. N. Huntzinger, B. de Jong, W. A. Kurz, A. D. McGuire, R. Vargas, Y. Wei, T. O. West and C. W. Woodall. 2015. North America's net terrestrial CO<sub>2</sub> exchange with the atmosphere 1990-2009. *Biogeosciences* 12:399-414.
- Kohl, M., T. Baldauf, D. Plugge and J. Krug. Reduced emissions from deforestation and forest degradation (REDD): A climate change mitigation strategy on a critical track. *Carbon Balance Management* doi: 10.1186/1750-0680-4-10
- Kragten, M., T.P. Tomich, S. Vostl and J. Gockowki. 2001. Evaluating land use systems from a socio-economic perspective. ASB Lecture Note 8. International Centre for Research in Agroforestry, Southeast Asian Regional Research Programme. Bogor, Indonesia.
- Kurz, W., C. Dymond, T. White, G. Stinton, C. Shaw, G. Rampley, C. Smyth, B. Simpson, E. Neilson, J. Trofymow and J. Metsaranta. 2009. CBM-CFS3: A model of carbon dynamics in forestry and land use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling* 220:480-504.
- Kurz, W.A., R. A. Birdsey, V. S. Mascorro, D. Greenberg, Z. Dai, M. Olguin and R. Colditz. 2016. Integrated Modeling and Assessment of North American Forest Carbon Dynamics Technical Report: Tools for monitoring, reporting and projecting forest greenhouse gas emissions and removals. Commission for Environmental Cooperation, Montreal, Canada.
- Li, C., J. Aber, F. Stang, K. Butter-Bahl and H. Papen. 2000. A process-oriented model of N<sub>2</sub>O and NO emissions from forest soils. 1. Model development. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 105:4369-4384.
- Libert, A. y T. Trench. 2016. Bosques y suelos en el contexto de REDD+: entre gobierno y gobernanza en México. *Terra Latinoamericana* 34:113-124.
- Libert-Amico, A., T. Trench, A. Rodríguez y P. Martínez, 2018. Experiencias de gobernanza multinivel en México: innovación para la reducción de emisiones en ecosistemas terrestres. *Maderas y Bosques* doi:10.21829/myb.2018.2401909.
- Mas, J.F., A. Velázquez, J.R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, C. Alcántara, G. Bocco, R. Castro, T. Fernández and A. Pérez-Vega. 2004. Assessing land use/cover changes: a nationwide multivariate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5:249-261.
- Masera, O., M.R. Bellon and G. Segura. 1997a. Forestry options for sequestering carbon in Mexico: comparative economic analysis of three case studies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 27: S227-S244.
- Masera, O., M.R. Bellon and G. Segura. 1995. Forest management options for sequestering carbon in Mexico. *Biomass and Bioenergy* 8:357-367.
- Masera O., A.D. Cerón and B. Ordoñez. 2001. Forestry mitigation options for Mexico: Synergies between national sustainable development priorities and global concerns. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 6:291-312.
- Masera, O.R, J.F. Garza-Caligaris, M. Kanninen, T. Karjalainen, J. Liski, G.J. Nabuurs, A. Pussinen, B.H.J. de Jong and G.M.J. Mohren. 2003. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO<sub>2</sub>FIX V.2 approach. *Ecological Modelling* 164:177-199.
- Masera, O. R., M. J. Ordoñez, and R. Dirzo. 1997b. Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35:265-295.
- Masuhara, A., E. Valdés, J. Pérez, D. Gutiérrez, V.J. Cutberto, P.E. Salcedo, H.M. de J. Juárez y G.A. Merino. 2015. Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología* 4:66-93.



- Mendoza-Ponce, A., R. Corona-Núñez, F. Kraxner, S. Leduc and P. Patrizio. 2018. Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico. *Global Environmental Change* 53:12-23
- Mendoza P. A. y Galicia L. 2010. Aboveground and belowground biomass and carbon pools in highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry* 83:497-506.
- Molto, Q., V. Rossi and L. Blanc. 2013. Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution* 4:175-183.
- Mora, F., V.J. Jaramillo, R. Bhaskar, M. Gavito, H. Siddique, J.E.K. Byrnes and P. Balbanera. Carbon accumulation in neotropical dry secondary forests: the roles of forest age and tree dominance and diversity. *Ecosystems* doi:10.1007/s10021-017-0168-2.
- Morales-Barquero, L., M. Skutsch, E.J. Gardel-Peláez, A. Ghilardi, C. Kleinn and J.R. Healey. 2014. Operationalizing the definition of forest degradation for REDD+, with application to Mexico. *Forests* 5:1653-1681.
- Murray, G. M., P. Friedlingstein, S. Sitch, V. J. Jaramillo, F. Munguia, A. Anav, Y. Liu, A. Arneeth, A. Arvanitis, A. Harper, A. Jain, E. Kato, C. Koven, B. Poulter, B. D. Stocker, A. Wiltshire, S. Zaehle and N. Zeng. 2016. The carbon cycle in Mexico: past, present and future of C stocks and fluxes. *Biogeosciences* 13:223-238.
- Olguin, M., W. Kurz, B. de Jong, F. Paz, G. Ángeles, C. Zermeño y R. Flores. 2012. Hacia el uso del modelo CBM-FS3 a escala nacional en México: proyecto piloto Chiapas. *En: F. Paz y R. Cuevas (eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Texcoco, Estado de México, México. pp. 108-115.*
- Olguin, M., C. Wayson, M. Fellows, R. Birdsey, C. Smith, M. Magnan, A.J. Dugan, V.S. Mascorro, A. Alanis, E. Serrano and W.A. Kurz. 2018. Applying a systems approach to assess carbon emission reductions from climate change mitigation in Mexico's forest sector. *Environmental Research Letters* doi:10.1088/1748-9326/aaaa03.
- Ordoñez, J.A., B.H.J. de Jong y O. Masera. 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques* 7:27-47.
- Ordoñez, J.A.B., T. Hernández, A. Galicia, I.E. Jiménez, A. Núñez, J.D. León, C. Tapia, J.F. Torres, M. Hernández, M.J. Ordoñez, F.A. González, J.A. Carrera, L.E. Piña, R. Gómez, H. Cervantes y G.E. Álvarez. 2012. Actualización del Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero 1990-2010, para el Sector Uso de Suelo, Cambio en el Uso de Suelo y Silvicultura. Reporte preparado para INECC-PNUD. D.F., México 227 p.
- Orihuela-Belmonte, D.E., B.H.J. de Jong, J. Mendoza-Vega, J. Van der Wal, F. Paz-Pellat, L. Soto-Pinto and A. Flamenco-Sandoval. 2013. Carbon stocks and accumulation rates in tropical secondary forests at the scale of community, landscape and forest type. *Agric. Ecosyst. Environ.* 171:72-84.
- Pacala, S., Birdsey, R., Bridgman, S., Conant, R., Davis, K., Houghton, R., Jenkins, J., Johnston, M., Marland, G., and Paustian, K.: 2007. The North American carbon budget past and present, in: *The First State of the Carbon Cycle Report (SOCCR): The North American Carbon Budget and Implications for the Global Carbon Cycle, A Report by the U. S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Climatic Data Center, Asheville, NC, USA. pp. 29-36.*
- Pan, Y., R.A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P.E. Kauppi, W.A. Kurz, O.L. Phillips, A. Shvidenko, S.L. Lewis, J.G. Canadell, P. Ciais, R.B. Jackson, S.W. Pacala, A.D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch and D. Hayes. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333:988-993.
- Parresol, B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45:573-593.
- 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). *En: F. Paz 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. pp. 693-699.*
- Paz, F. 2014. ¿Es suficiente evaluar "datos de actividad x factores de emisión = emisiones" en mecanismos tipo REDD+ o RETUS? *En: F. Paz 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. pp. 526-532.*
- Paz, F. y S. Covalada. 2014. Modelos de estados y transiciones (METs) compuestos para la modelación anual de la dinámica de carbono. *En: F. Paz 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. pp: 301-307.*
- 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](http://www.pmc carbono.org/pmc/proyectos/CI_Factibilidad_REDD+.php) (Consulta: agosto 30, 2016).
- Paz, F., C. Cruz y J. Argumedo. 2012b. Elementos temáticos para la caracterización del carbono a escala local en Chiapas, Jalisco y la región del Cutzamala. *En: F. Paz 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 del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. pp. 288-295.*

- Paz, F., C. Cruz y B. de Jong. 2012c. Piloto REDD+ en Chiapas usando estrategias integrales de bajo costo de inventarios de carbono en ecosistemas terrestres. *En*: F. Paz 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 del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. pp. 60-68.
- Paz, F. y B. de Jong. 2012a. Desarrollo de una estrategia de mapeo del carbono en ecosistemas terrestres usando la información cuantitativa y semi-cuantitativa en campo bajo el principio de conservación de la incertidumbre. *En*: F. Paz 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 del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. pp. 275-281.
- Paz, F. y B. de Jong. 2012b. Inventarios dinámicos del carbono en ecosistemas terrestres cambiando espacio por tiempo: cronosecuencias. *En*: F. Paz 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 del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. pp. 281-287.
- Paz, F., B. de Jong y M.A. Castillo. 2014. Causas de la deforestación en México: acceso y gobernanza. *En*: F. Paz-Pellat y J. Wong-González (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. pp. 507-515.
- Paz, F., B. de Jong, S. Covalada, M.G. Morales, I. Amezcua, J.C. Gómez, M.M. Torres y A. Vargas. 2012c. Monitoreo forestal comunitario en la Sierra Madre de Chiapas. *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 del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. pp. 759-766.
- Pelletier, J., D. Martin and C. Potvin. 2013. REDD+ emissions estimation and reporting: dealing with uncertainty. *Environ. Res. Lett.* doi:10.1088/1748-9326/8/3/034009
- Pelletier, J., K. R. Kirby and C. Potvin. 2010. Significance of carbon stock uncertainties on emission reductions from deforestation and forest degradation in developing countries. *Forest Policy and Economics* doi: 10.1016/j.forpol.2010.05.005.
- Peterson, H. S. Holm, G. Stahl, D. Alger, J. Fridman, A. Lehtonen and A. Makipaa. 2012. Individual tree biomass equations of biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study. *Forest Ecology and Management* 270:78-84.
- PMC. 2008. Plan Científico del Programa Mexicano del Carbono. A. Muhlia-Melo y F. García-Oliva (eds.) 19 p. Disponible en: [http://www.pmc carbono.org/pmc/documentos/plan\\_cientifico.php](http://www.pmc carbono.org/pmc/documentos/plan_cientifico.php).
- PMC. 2011a. Manual de criterios para la selección de las parcelas de muestreo cuantitativas y semicuantitativas. Inventario Forestal Estatal Cuantitativo, Vegetación Hidrófila. Manual de Referencia (Versión 1.31). Coordinación: F. Paz, Colaboradores: M. Casiano, C.O. Cruz, J. Argumedo, B. de Jong, R. Flores y S. Ochoa. Texcoco, Estado de México, México 60 p. <http://pmc carbono.org/pmc/publicaciones/manuales.php> (Consulta: diciembre 4, 2017).
- PMC. 2011b. Muestreo semicuantitativo. Inventario Forestal Estatal Cuantitativo, Bosques y Selvas. Manual de Referencia (Versión 2.1). Coordinación: Fernando Paz, Colaboradores: Marcos Casiano, Carlos O. Cruz, Jesús Argumedo, Ben de Jong, R. Flores y S. Ochoa. Texcoco, Estado de México, México 49 p. <http://pmc carbono.org/pmc/publicaciones/manuales.php> (Consulta: diciembre 4, 2017).
- Putz, F.E. and K.H. Redford. 2010. The importance of defining “forest”: tropical forest degradation, deforestation, long-term phase shifts, and further transitions. *Biotropica* 42:10-20.
- Quijas, S., A. Noit, K. Thonickle, G. Murray-Totarolo, T. Mwampamba, M. Skuth, M. Simoes, N. Ascarrunz, M. Peña-Claros, L. Jones, E. Arets, V.J. Jaramillo, E. Lazos, M. Toledo, L.G. Martorano, R. Ferraz and P. Balvanera. 2018. Modelling carbon stock and carbon sequestration ecosystem services for policy design: a comprehensive approach using dynamic vegetation model. *Ecosystems and People* 15:42-60
- Read, L. and D. Lawrence. 2003. Recovery of biomass following cultivation in dry tropical forests of the Yucatan. *Ecological Applications* 13:85-97.
- Reyes, M., S. Covalada, M.J. Pérez y F. Paz. 2012. Ordenamientos territoriales e intervenciones a escala local en Chiapas en REDD+: carbono, costos de oportunidad y modelos de estados y transiciones. *En*: F. Paz 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 del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. pp: 699-703.
- Rojas-García, F., B. H. J. de Jong, P. Martínez Z. and F. Paz P. 2015. Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science* 72:835-864.
- Roncal G. S., Soto P. L., Castellanos A. J., Ramírez M. N. y De Jong B. 2008. Sistemas agroforestales y almacenamiento de Carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interacción* 33:200-206.
- Rosete-Vergés, F.A., J.L. Pérez-Damián, M. Villalobos-Delgado, E.N. Bavarro-Salas, E. Salinas-Chávez y R. Remond-Noa. 2014. El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques* 20:21-35.
- Ruesch, A. and H. Gibbs. 2008. New global biomass carbon map for the year 2000 based on IPCC tier-1 methodology. *Carbon*



- Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, TN. USA.
- Salas-Aguilar, V.M. y F. Paz-Pellat. 2018. Desarrollo de una base de datos climática nacional anual, 1989-2012: resolución 250 m. Elementos para Políticas Públicas 2:19-32.
- SARH. 1994. Inventario Nacional Forestal Periódico. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. D.F., México 81 p.
- Sasaki, N. abd F.E. Putz. 2009. Critical need for new definitions of “forest” and “forest degradation” in global climate change agreements. *Conserv. Lett.* 2:226-232.
- Saynes-Santillán, V., J.D. Etchevers-Barra, F. Paz-Pellat y L.O. Alvarado -Cárdenas. 2016. Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana* 34:83-96.
- Sheinbaum, C. and O.R. Maser. 2000. Mitigating carbon emissions while advancing national development priorities. The case of México. *Climatic Change* 47:259-282.
- Schlesinger, W.H. 1997. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. Academic Press. Chicago, Illinois, USA
- Sheng, J. 2017. Effect of uncertainties in estimated carbon reduction from deforestation and forest degradation on required incentive payments in developing countries. *Sustainability* doi: 10.3390/su9091608.
- Skutsch, M. (ed.). 2011. *Community forest monitoring for the carbon market: opportunities under REDD*. Earthscan. London 186 p.
- Skutsch, M., A. Borrego y M. Salinas. 2018. Explaining the Mexican sink. En: F. Paz, A. Velázquez y M. Rojo (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2018*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. pp. 156-162.
- Skutsch, M., J. Paneque-Gálvez, A. Ghilardi, A. Balderas-Torres, J. Morfín-Rios, J.M. Michel-Fuentes, O. Carrillo and D. Ross. 2017. Adapting REDD+ policy to sink conditions. *Forest Policy and Economics* 80:160-166.
- Skutsch, M., J. Paneque-Gálvez, A. Ghilardi, J. Morfín-Rios, J.M. Michel-Fuentes y O. Carrillo. 2016. Re-thinking REDD+ for Mexican sink. En: F. Paz y R. Torres (eds.). *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. pp. 134-145.
- Soriano-Luna, M.A., G. Ángeles-Pérez, M. Guevara, R. Birdsey, Y. Pan, H. Vauquera-Huerta, J.R. Valdez-Lazalde, K.D. Johnston and R. Vargas. 2018. Determinants of above-ground biomass and its spatial variability in a temperate forest managed for timber production. *Forests* doi:10.3390/f9080490.
- Soto P. L. y F.C. Armijo. 2014. Changes in Agroecosystem Structure and Function Along a Chronosequence of Taungya System in Chiapas, Mexico. *Journal of Agricultural Science* 6:43-57.
- Soto-Pinto, L., M. Anzueto, J. Mendoza, G. Jimenez-Ferrer and B. de Jong. 2010. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforest Syst.* 78:39-51.
- Soto-Pinto, L. y G. Jimenez-Ferrer. 2018. Contradicciones socioambientales en los procesos de mitigación asociados al ciclo del carbono en sistemas agroforestales. *Madera y Bosques* doi:10.21829/myb.2018.2401887.
- Stange, F., K. Butterbachl, H. Papen, S. Zechmeister-Boltensternm C. Li and J. Aber. 2000. A process-oriented model of N2O and NO emissions from forest soils. *Journal of geophysical Research* 105:4385-4398.
- Temesgen, H. D. Affleck, K. Poudel, A. Gray and J. Sessions. 2015. A review of the challenges and opportunities in estimating above ground forest biomass using tree-level models. *Scandinavian Journal of Forest Research* 30: 326-335.
- Tinoco, J. A., J. Etchevers, F. Paz and M. Olguin. 2012. Uso del modelo CBM-FS3 para la simulación de la dinámica del carbono en la Sierra Mazateca de Oaxaca. En: F. Paz 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 del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. pp. 448-453.
- Torres-Rojo, J.M., O.S. Magaña-Torres y F. Moreno-Sánchez. 2016. Predicción del cambio de uso/cobertura arbolada en México a través de probabilidades de transición. *Agrociencia* 50:769-785.
- Urquiza-Haas, T., Dolman, P.M. and C.A. Peres. 2007. Regional scale variation in forest structure and biomass in the Yucatan Peninsula, Mexico: effects of forest disturbance. *For. Ecol. Manag.* 247:80-90.
- van Breugel, M., M. Martínez-Ramos y F. Bongers. 2006. Community dynamics during early secondary forest succession in Mexican tropical rain forests. *Journal of Tropical Ecology*, 22: 663-674.
- Vargas, R. 2012. How a hurricane disturbance influences extreme CO2 fluxes and variance in a tropical forest. *Environmental Research Letters* doi:10.1088/1748-9326/7/3/035704.
- Vargas, B., C. A. Lopez, J. J. Corral, J. O. Lopez, C. G. Aguirre and J. G. Alvarez. 2017a. Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North-Western Mexico. *Forests* doi: 10.3390/f8080269.
- Vargas, R., D. Alcaraz-Segura, R. Birdsey, N. A. Brunsell, C. O. Cruz-Gaistardo, B. de Jong, J. Etchevers, M. Guevara, D. J. Hayes, K. Johnson, H. W. Loescher, F. Paz, Y. Ryu, Z. Sanchez-Mejia and K. P. Toledo-Gutierrez. 2017b. Enhancing interoperability to facilitate implementation of REDD+: case study of Mexico. *Carbon Management* 8:57-65.
- Vargas, R., M.F. Allen and E.B. Allen. 2008. Biomass and carbon accumulation in a fire chronosequence of a seasonally dry tropical forest. *Global Change Biology* 14:109-124.

- Vargas R., Allen E. B. y Allen M. F. 2009. Effects of Vegetation Thinning on Above- and Belowground Carbon in a Seasonally Dry Tropical Forest in Mexico. *Biotropica* 41:302-311.
- Vargas, R., F. Paz and B. de Jong. 2013. Quantification of forest degradation and belowground carbon dynamics: ongoing challenges for monitoring, reporting and verification activities for REDD+. *Carbon Management* 4:579-582.
- Williams L. G. 1983. Biomass and Nutrient Content in Two Successional Stages of Tropical Wet Forest in Uxpanapa, Mexico. *Biotropica* 15:275-284.
- Wilson, B.T., C.W. Woodall and D.M. Griffith. 2013. Imputing forest carbon stock estimates from inventory plots to a nationally continuous coverage. *Carbon Balance and Management* doi:10.1186/1750-0680-8-1.