



Elementos para Políticas Públicas

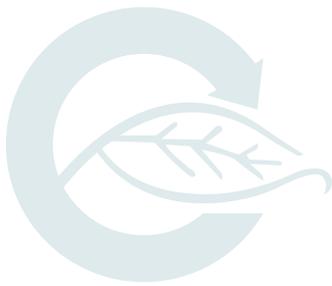
Volumen 3 • Número 1 • enero-abril de 2019

Ciclo del Carbono y sus Interacciones



Programa Mexicano del Carbono

RED TEMÁTICA DEL CONACYT



Elementos para **Políticas Públicas**

Volumen 3 • Número 1 • Enero - Abril de 2019

Ciclo del Carbono y sus Interacciones



Programa Mexicano del Carbono

RED TEMÁTICA DEL **CONACYT**

ELEMENTOS PARA POLÍTICAS PÚBLICAS. Volumen 3, No. 1, enero - abril de 2019. Es una publicación cuatrimestral editada por el Programa Mexicano del Carbono, A.C. (PMC), Calle Chiconautla No. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56225 Texcoco, Estado de México, México. Tel. +52 (595) 951•2182, www.pmc carbono.org, coordinacion_general@pmc carbono.org. Editor responsable: Alma S. Velázquez Rodríguez. RESERVAS DE DERECHOS AL USO EXCLUSIVO No. 04-2015-120910081700-203, ISSN 2448-5578. Ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número: Alma S. Velázquez Rodríguez, Calle Chiconautla No. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56225 Texcoco, Estado de México, México, fecha de última modificación, Junio de 2019.

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

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



Elementos para **Políticas Públicas**

Comité Editorial

Dra. Alma Velázquez Rodríguez

EDITORA EN JEFE

Dr. Fernando Paz Pellat

CO-EDITOR

Ing. Marlén Rojo Martínez

EDITOR DE ESTILO

C.G. Oscar Velázquez Rodríguez

EDITOR DE MAQUETACIÓN

Coordinación Editorial

Alma Velázquez

COORDINADOR DEL PROCESO DE ARBITRAJE

Oscar Velázquez

COORDINADOR DE DISEÑO

Antoine Libert

CORRECCIÓN DE TEXTOS EN INGLÉS

Cristopher Escalera

WEB MASTER Y SOPORTE TÉCNICO

Consejo Editorial

Dr. Ben de Jong

El Colegio de la Frontera Sur, México.

Dr. Felipe García Oliva

Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Dra. Georgina C. Sandoval Fabián

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

Dr. Guillermo Jiménez Ferrer

El Colegio de la Frontera Sur, México.

Dr. J. Martín Hernández Ayón

Universidad Autónoma de Baja California, México.

Dr. Jaime Garatuza Payán

Instituto Tecnológico de Sonora, México.

Dr. Jorge D. Etchevers Barra

Colegio de Postgraduados, México.

Dr. Jorge Herrera Silveira

Instituto Politécnico Nacional, México.

Dra. Leticia Merino Pérez

Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Dra. Mariela Fuentes Ponce

Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Consejo Editorial

Dr. Mario G. Manzano Camarillo

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México.

Dr. Omar R. Masera Cerutti

Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Dr. Oscar L. Briones Villarreal

Instituto de Ecología, A.C., México.

Dr. Ramón Sosa Ávalos

Universidad de Colima, México.

Dr. Tulio Arredondo Moreno

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

Dr. Christian Prat

Institut de Recherche pour le Développement, Francia.

Dr. Juan F. Gallardo Lancho

Consejo Superior de Investigación Científica, España.

Dr. Rodrigo Vargas

University of Delaware, U.S.A.

Dr. Werner Kurz

Canadian Forest Service, Canadá.

Índice de Autores

Alejandro Adrián Hernández Sánchez

Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz, México.

Alma Bella López López

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Ben de Jong

El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Tabasco y Campeche.

Villahermosa, Tabasco y Campeche, Campeche, México.

Carlos Alberto Ortiz Solorio

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

Carlos Castillejos Cruz

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Claudia Isabel Hidalgo Moreno

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

Eloísa A. Guerra Hernández

Postgrado en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ciudad de México, México.

Fabiola Rojas García

El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Tabasco y Campeche.

Villahermosa, Tabasco y Campeche, Campeche, México.

Fernando Paz Pellat

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

Gerardo Cruz Flores

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Inyasid Santiago Aguilar
Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Jorge Dionisio Etchevers Barra
Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México.

Juan Carlos Sandoval Aparicio
Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México.

Juan Manuel Valderrábano Gómez
Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.

Julio César de la Cruz Cabrera
Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México.

Luis Samuel Campos Lince
Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Marcela Olguin Álvarez
El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Tabasco y Campeche.
Villahermosa, Tabasco y Campeche, Campeche, México.

María Elizabeth Hernández Alarcón
Instituto de Ecología A.C. Xalapa, Veracruz, México.

Mayra Mendoza Cariño
Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
Postgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
Ciudad de México, México.

Vanessa Maldonado Montero
El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Tabasco y Campeche.
Villahermosa, Tabasco y Campeche, Campeche, México.

Víctor Manuel Salas Aguilar
Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
Chihuahua, Chihuahua, México.

Editorial

Es una satisfacción para el Programa Mexicano del Carbono, presentar al público el primer número del volumen 3, de Elementos para Políticas Públicas. Acorde con el propósito del PMC, de documentar las bases de datos nacionales, en este número se presentan seis artículos, en los que especialistas de diferentes áreas sintetizan, analizan y discuten, bajo una visión rigurosamente científica, bases de datos que hasta el momento habían sido de uso limitado.

Confiamos en que este compendio, al igual que los anteriores, sea de utilidad para todos los interesados en contribuir con el conocimiento de los ecosistemas de México y constituya un incentivo para dar continuidad a los ejercicios de síntesis y modelación de la dinámica del carbono y sus interacciones.

Acorde con la política del Programa Mexicano del Carbono sobre el acceso libre a las bases de datos asociadas al ciclo del carbono y sus interacciones en los ecosistemas de México, las bases de datos de este número se encuentran disponibles en http://pmccarbono.org/pmc/bases_datos/.

Los invitamos a hacer un uso intensivo del material que aquí se ofrece, así como de todos los insumos que el PMC pone a su disposición.

Contenido

Base de datos rasterizados multi-temporales de mapas de uso del suelo y vegetación de México escala 1:250 000 <i>Fernando Paz Pellat, Julio César de la Cruz Cabrera</i>	1
Base de datos de contenido de carbono en ecosistemas ribereños: cuenca alta y media de la Reserva de la Biósfera los Volcanes <i>Gerardo Cruz Flores, Eloísa A. Guerra Hernández, Juan Manuel Valderrábano Gómez, Alma Bella López López, Inyasid Santiago Aguilar, Carlos Castillejos Cruz, Luis Samuel Campos Lince, Jorge D. Etchevers Barra, Claudia Hidalgo Moreno, Juan Carlos Sandoval Aparicio, Mayra Mendoza Cariño</i>	13
Base de datos de almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce de México <i>María Elizabeth Hernández Alarcón, Fernando Paz Pellat, Alejandro Adrián Hernández Sánchez</i>	33
Base de datos de volúmenes de agua y sedimento en subcuencas costeras de México <i>Fernando Paz Pellat, Víctor Salas Aguilar</i>	41
Base de datos de la evaluación de la degradación de los suelos en México <i>Fernando Paz Pellat, Carlos A. Ortiz Solorio</i>	51
Base de datos de la biomasa de los sitios del inventario nacional forestal periódico, ciclo 1992-1994 <i>Ben de Jong, Marcela Olguín Álvarez, Fabiola Rojas García, Vanessa Maldonado Montero, Fernando Paz Pellat</i>	57

BASE DE DATOS RASTERIZADOS MULTI-TEMPORALES DE MAPAS DE USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN DE MÉXICO ESCALA 1:250 000

MULTI-TEMPORAL RASTER DATABASE OF LAND USE AND VEGETATION MAPS FROM MEXICO SCALE 1:250 000

Fernando Paz-Pellat^{1†} y Julio Cesar de la Cruz-Cabrera²

¹GRENASER, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, CP 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México.

²Programa Mexicano del Carbono, Calle Chiconautla No. 8-A, Col. Lomas de Cristo, C.P. 56225, Texcoco, Estado de México.

[†]Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

RESUMEN

En México y otros países, los mapas de uso del suelo y vegetación (USyV) son insumos críticos para el análisis de la distribución espacial de los ecosistemas terrestres y otros objetos, además de servir de cimiento para el análisis de los cambios temporales. A partir de una base nacional de datos vectoriales de mapas de USyV del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y del Programa Mexicano del Carbono (PMC) para los años base: 1993, 1999, 2002, 2007, 2011, 2014 y 2016, documentada y abierta al público, en este trabajo se fundamenta su rasterización en una malla nacional estandarizada, con resolución espacial de 250 m x 250 m, que es la referencia nacional para otros productos nacionales. La base de datos en formato raster puede usarse para análisis a nivel de píxeles individuales, permitiendo contar con información detallada de los cambios en las clases de USyV en el espacio y tiempo.

Palabras clave: *USyV; INEGI; PMC; malla nacional; resolución espacial 250 m.*

ABSTRACT

In Mexico and other countries, land use and vegetation maps (LUV) are critical inputs for the analysis of the spatial distribution of terrestrial ecosystems, and other objects; besides being the basis for the analysis of temporal changes. Based on a national database of LUV maps of the National Institute of Statistics and Geography (INEGI) and the Mexican Carbon Program (PMC), both documented and open to the public, for the base years: 1993, 1999, 2002, 2007, 2011, 2014 and 2016, in this work their rasterization is documented in a standardized national grid, with a spatial resolution of 250 m x 250 m, which is the national reference for other national products. The database in raster format can be used for analysis at the individual pixel level, allowing to have detailed information about the changes in the US and V classes in space and time.

Key words: *LUV; INEGI; PMC; national grid; 250 m spatial resolution.*

INTRODUCCIÓN

Los mapas de uso del suelo y vegetación (USyV), en formato vectorial, permiten el análisis de los patrones espaciales y temporales de los ecosistemas terrestres. Esta información es importante para definir áreas prioritarias de focalización de intervenciones de políticas públicas, en función de los niveles de perturbación de las coberturas terrestres.

En México, para definir tasas de cambio de la vegetación en los ecosistemas terrestres, el análisis de mapas de USyV se ha realizado con diferentes insumos (Mas *et al.*, 2004; Velázquez *et al.*, 2010). Uno de los más utilizados son los mapas de USyV del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) escala 1:250 000 (*i.e.* INEGI, 2017a y b), que se basan en un sistema de clasificación nacional de tipos de vegetación y agricultura, además de otros rasgos definidos en la clasificación (INEGI, 1985). Los mapas de USyV se utilizan, también, como datos de actividad para estimar emisiones de gases de efecto invernadero en el país (de Jong *et al.*, 2010).

El Programa Mexicano del Carbono (PMC) realiza esfuerzos constantes para documentar bases de datos nacionales orientadas hacia la síntesis del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México, así como insumos para ejercicios de modelación nacional. Al respecto, la base de datos de geomorfometría (Salas y Paz, 2017), la climática (Salas y Paz, 2018) y la de índices de vegetación espectrales (Paz *et al.*, 2018a), son ejemplos de la generación de insumos estandarizados con fines de interoperabilidad

a escala de país (Vargas *et al.*, 2017). Estas bases están rasterizadas en una malla nacional de dimensiones 250 m x 250 m, de tal manera que cada píxel en el país tiene asociada información específica.

Con relación a los mapas nacionales vectoriales de USyV, Paz *et al.* (2018b) documentaron una serie temporal generada por el INEGI y el PMC, con años base: 1993, 1999, 2002, 2007, 2011, 2014 y 2016, poniéndolas a disposición del público en general, en formato vectorial. Como complemento a estos mapas, en este trabajo se presenta una base de datos rasterizada a escala de píxeles, de 250 m x 250 m con cobertura nacional, de los mapas de USyV. La base de datos que se generó, constituye un insumo importante para modelar y sintetizar los cambios de uso del suelo y evaluar ganancias o pérdidas de carbono en las diferentes clases de USyV.

MATERIALES Y MÉTODOS

Malla nacional de los mapas rasterizados de USyV

La información rasterizada de los mapas de USyV está georeferenciada a una matriz terrestre, la cual contiene la base histórica de los USyV de cada una de las series discutidas por Paz *et al.* (2018b). El ráster de píxel con resolución espacial de 250 m x 250 m usa la proyección Cónica Conforme de Lambert (CCL), datum WGS 84 y esferoide GRS 80 (muy similar al datum ITRF 92 usado por el INEGI), de acuerdo con la definición adoptada por el INEGI, Cuadro 1.

Cuadro 1. Definición de la Proyección Cónica Conforme de Lambert.

Concepto	Valor
Paralelo Estándar 1	17.5°
Paralelo Estándar 2	29.5°
Longitud del Meridiano Central	-102.00°
Latitud del Origen de la Proyección	12.00°
Falso Este	2500 000
Falso Norte	0
Unidades	m

El sistema de la malla usa una matriz espacial de referencia con tamaño unitario (píxel) de 1000 m x 1000 m, lo que genera una malla de 3012 columnas por 2031 renglones, que permite realizar una cobertura

total de la superficie del país. La Figura 1 muestra la disposición del arreglo matricial. La malla nacional se planeó en términos multi-escala, para poder integrar productos a diferentes resoluciones espaciales.



Figura 1. Arreglo matricial de referencia usado para representar el territorio mexicano.

Para el caso de la resolución espacial 250 m, la malla nacional tiene como origen la esquina superior izquierda, cuyas coordenadas son 880 000 en el eje X y 2 380 000 en el eje Y, de acuerdo con el sistema de proyección Cónica Conforme de Lambert. Cada celda o píxel, al interior del marco nacional, se identifica mediante un código numérico de 10 dígitos (denominado ID_PÍXEL), que se construye de la siguiente forma:

$$\text{ID_PÍXEL} = \text{HHHHHCCCCC} \quad (1)$$

donde:

ID_PÍXEL: es el identificador numérico del píxel (10 dígitos)

HHHHH: es el número de hilera en la que se ubica el píxel (contado a partir de la esquina superior izquierda del marco nacional). Este valor se compone de cinco dígitos. Cuando el número de hilera contiene menos de cinco dígitos se agregan ceros al inicio.

CCCCC: es el número de columna en la que se ubica el píxel (contado a partir de la esquina superior izquierda del marco nacional). Este valor se compone de cinco dígitos. Cuando el número de columna contiene un número menor, se agregan ceros al inicio.

Los valores de hilera y columna se calculan de:

$$\text{HHHHH} = \frac{2,380,000 - Y_{CCL}}{250} \quad (2)$$

$$CCCCC = \frac{X_{CCL} - 880,000}{250} \quad (3)$$

donde X_{CCL} y Y_{CCL} corresponden a la coordenada de la esquina superior-izquierda del píxel.

Cabe mencionar que en ambas cadenas puede haber valores que contengan ceros a la izquierda (por ejemplo “00125”), en estos casos se deben depreciar o eliminar los ceros y sólo utilizar las cifras sobrantes en la ecuación de la cadena.

Para calcular las coordenadas del centroide se aplican las siguientes ecuaciones:

$$X = (880\ 000 + 250C) + 125 \quad (4)$$

$$Y = (2\ 380\ 000 - 250H) - 125 \quad (5)$$

donde:

X= Coordenada del centroide en eje X

Y= Coordenada del centroide en eje Y

C=Valor de columna

H= Valor de hilera

Codificación de las clases de USyV

Las clases de USyV se codificaron mediante 11 dígitos con la siguiente nomenclatura:

ABBCCDDEEFF

donde:

A contiene el código asociado a la información reportada en el campo **TIP_INFO** (tipo de información), el cual distingue las categorías del Cuadro 2.

Cuadro 2. Codificación de los tipos de información.

Clave TIP_INFO	TIP_INFO
1	Agrícola-pecuaria-forestal
2	Ecológica-florística-fisonómica
3	Complementaria

BB contiene la información integrada en el campo **AGECOSIS**, (aplicable a la categoría AGRICOLA-PECUARIA-FORESTAL), Cuadro 3 y, en el campo **TIP_ECOV** (aplicable al resto de categorías TIP_INFO), Cuadro 4.

Cuadro 3. Descripción del campo AGECOSIS (aplicable a la categoría TIP_INFO = 1).

Clave AGECOSIS	AGECOSIS
01	Agrícola
02	Pecuario
03	Forestal
04	Acuícola

Cuadro 4. Descripción del campo TIP_ECOV (aplicable a las categorías TIP_INFO = 2 y 3).

Clave TIP_ECOV	TIP_ECOV
00	No aplicable
01	Bosque de coníferas
02	Bosque de encino
03	Bosque mesófilo de montaña
04	Selva perennifolia
05	Selva subcaducifolia
06	Selva caducifolia
07	Selva espinosa
08	Pastizal
09	Matorral xerófilo
10	Vegetación hidrófila
11	Especial (otros tipos)
12	Sin vegetación aparente
13	Vegetación inducida

CC contiene la información integrada en los campos **TIPAGES** y **TIP_VEG** (Cuadros 5 y 6).

Cuadro 5. Descripción del campo TIPAGES (aplicable a la categoría TIP_INFO = 1).

AGECOSIS	Clave TIPAGES	TIPAGES
Acuícola	01	Acuícola
Agrícola	01	Agricultura de temporal
Agrícola	02	Agricultura de riego
Agrícola	03	Agricultura de humedad
Forestal	01	Bosque cultivado
Pecuario	01	Pastizal cultivado

Cuadro 6. Descripción del campo TIP_VEG (aplicable a las categorías TIP_INFO = 2 y 3).

TIP_ECOV	Clave TIP_VEG	TIP_VEG
Bosque de coníferas	01	Bosque de ayarín
	02	Bosque de cedro
	03	Bosque de oyamel
	04	Bosque de pino
	05	Bosque de pino-encino
	06	Bosque de táscate
	07	Matorral de coníferas

TIP_ECOV	Clave TIP_VEG	TIP_VEG	
Bosque de encino	01	Bosque de encino	
	02	Bosque de encino-pino	
Bosque mesófilo de montana	01	Bosque mesófilo de montana	
	01	Bosque de mezquite	
Especial (otros tipos)	02	Vegetación de dunas costeras	
	03	Palmar natural	
	01	Vegetación de desiertos arenosos	
	02	Vegetación halófila xerófila	
	03	Vegetación gipsófila	
	04	Matorral desértico micrófilo	
	05	Matorral desértico rosetófilo	
	06	Matorral crasicale	
	07	Matorral sarcocale	
	Matorral xerófilo	08	Matorral sarco-crasicale
		09	Matorral sarco-crasicale de neblina
		10	Matorral rosetófilo costero
		11	Matorral espinoso tamaulipeco
		12	Matorral submontano
13		Chaparral	
14		Mezquital desértico	
No aplicable	00	No aplicable	
	01	Pastizal natural	
Pastizal	02	Pastizal halófilo	
	03	Pastizal gipsófilo	
	04	Pradera de alta montaña	
	07	Sabana	
	01	Selva mediana caducifolia	
Selva caducifolia	02	Selva baja caducifolia	
	03	Matorral subtropical	
	01	Selva baja espinosa caducifolia	
Selva espinosa	02	Selva baja espinosa subperennifolia	
	03	Mezquital tropical	

Continuación Cuadro 6...

TIP_ECOV	Clave TIP_VEG	TIP_VEG	
Selva perennifolia	01	Selva alta perennifolia	
	02	Selva alta subperennifolia	
	03	Selva mediana perennifolia	
	04	Selva mediana subperennifolia	
	05	Selva baja perennifolia	
	06	Selva baja subperennifolia	
Selva subcaducifolia	01	Selva mediana subcaducifolia	
	02	Selva baja subcaducifolia	
Sin vegetación aparente	01	Sin vegetación aparente	
	01	Selva de galería	
	02	Bosque de galería	
	03	Manglar	
	05	Vegetación de galería	
	06	Popal	
	07	Tular	
	08	Vegetación de petén	
	09	Vegetación halófila hidrófila	
	Vegetación inducida	01	Palmar inducido
		02	Pastizal inducido
		03	Sabanoide
		04	Bosque inducido

DD contiene la información integrada en los campos **TIP_PLAN** y **DES_VEG** (Cuadros 7 y 8).

Cuadro 7. Descripción del campo TIP_PLAN (aplicable a la categoría TIP_INFO = 1).

Clave TIP_PLAN	TIP_PLAN
01	Plantación agrícola
03	Plantación forestal
04	Ninguno

Cuadro 8. Descripción del campo DES_VEG (aplicable a las categorías TIP_INFO = 2 y 3).

Clave DESVEG	DESVEG
00	No aplicable
01	Primario
02	Secundario
03	No disponible

EE contiene la información integrada en los campos **TIP_CUL1** y **FASE_VS** (Cuadros 9 y 10).

Cuadro 9. Descripción del campo TIP_CUL1 (aplicable a la categoría TIP_INFO = 1).

Clave TIP_CUL1	TIP_CUL1
00	No aplicable
01	Anual
02	Semipermanente
03	Permanente

Cuadro 10. Descripción del campo FASE_VS (aplicable a las categorías TIP_INFO = 2 y 3).

Clave FASE_VS	FASE_VS
00	No aplicable
03	No disponible
04	Ninguno
05	Arbórea
06	Arbustiva
07	Herbácea

FF contiene la información integrada en los campos **TIP_CUL2** y **OTROS** (Cuadros 11 y 12).

Cuadro 11. Descripción del campo TIP_CUL2 (aplicable a la categoría TIP_INFO = 1).

Clave TIP_CUL2	TIP_CUL2
00	No aplicable
02	Semipermanente
03	Permanente
04	Ninguno

Cuadro 12. Descripción del campo OTROS (aplicable a las categorías TIP_INFO = 2 y 3).

Clave OTROS	OTROS
00	No aplicable
30	Desprovisto de vegetación
31	Cuerpo de agua
32	Asentamientos humanos
33	Zona urbana
34	País extranjero

Proceso de rasterizado a nivel de píxeles

Las series de mapas de USyV del INEGI y PMC, en formato vectorial, contienen el campo CVE_UNION, el cual contiene las clases que se discuten en la sección anterior y que se codificaron de acuerdo con los cuadros 1 a 12.

Al usar la malla nacional con resolución espacial de 250 m x 250 m, la intersección de cada píxel con los mapas de USyV se revisó y codificó con la información

de la clase de USyV interceptada, para el caso de que solo existiera una clase cubriendo el píxel. En el caso de píxeles interceptando más de una clase de USyV, Cuadro 13, se guardó la información de la clase de USyV y la superficie de intersección de dicha clase en el píxel. El número máximo de clases interceptadas en un píxel que se almacenó fue cuatro, lo que permitió preservar la información al asignar información vectorial a un producto rasterizado.

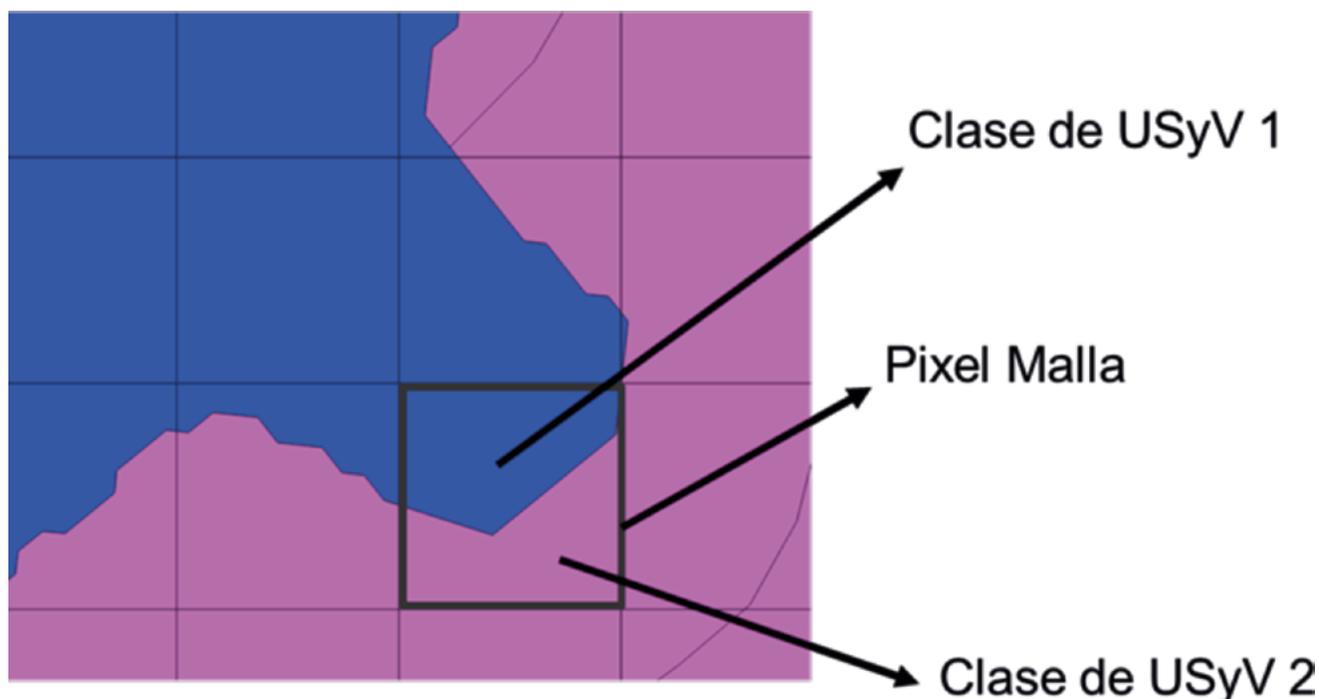


Figura 2. Ejemplo de píxel de la malla nacional interceptando dos clases de USyV.

RESULTADOS

En el Cuadro 13 se muestran los campos de las bases de datos multi-temporales en formato ráster (píxeles de 250 m x 250 m). Estas bases se generaron a

nivel de los estados de la República Mexicana; para el caso de píxeles compartidos entre estados, se asignaron por regla de mayoría simple, usando las superficies interceptando cada estado.

Cuadro 13. Campos y su contenido, de la base de datos ráster de USyV generados.

Campo	Contenido
x_ccl	Valor de coordenada en el Eje X correspondiente a la esquina superior izquierda
y_ccl	Valor de coordenada en el Eje Y correspondiente a la esquina superior izquierda
x_cent	Valor de coordenada en el Eje X correspondiente al centro del píxel
y_cent	Valor de coordenada en el Eje Y correspondiente al centro del píxel
id_píxel	ID del Píxel MODIS

Campo	Contenido
code25021	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 2 (periodo 1993) a escala 1:250 000 que ocupa la mayor superficie dentro del píxel
psup25021	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25021
code25022	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 2 (periodo 1993) a escala 1:250 000 que ocupa la segunda mayor superficie dentro del píxel
psup25022	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25022
code25023	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 2 (periodo 1993) a escala 1:250 000 que ocupa la tercer mayor superficie dentro del píxel
psup25023	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25023
code25024	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 2 (periodo 1993) a escala 1:250 000 que ocupa la cuarta mayor superficie dentro del píxel
psup25024	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25024
code250251	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 2.5 (periodo 1999) a escala 1:250 000 que ocupa la mayor superficie dentro del píxel
psup250251	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25021
code250252	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 2.5 (periodo 1999) a escala 1:250 000 que ocupa la segunda mayor superficie dentro del píxel
psup250252	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25022
code250253	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 2.5 (periodo 1999) a escala 1:250 000 que ocupa la tercer mayor superficie dentro del píxel
psup250253	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25023
code250254	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 2.5 (periodo 1999) a escala 1:250 000 que ocupa la cuarta mayor superficie dentro del píxel
psup250254	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25024
code25031	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 3 (periodo 2002) a escala 1:250 000 que ocupa la mayor superficie dentro del píxel
psup25031	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25021
code25032	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 3 (periodo 2002) a escala 1:250 000 que ocupa la segunda mayor superficie dentro del píxel
psup25032	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25022
code25033	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 3 (periodo 2002) a escala 1:250 000 que ocupa la tercer mayor superficie dentro del píxel
psup25033	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25023
code25034	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 3 (periodo 2002) a escala 1:250 000 que ocupa la cuarta mayor superficie dentro del píxel
psup25034	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25024
code25041	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 4 (periodo 2007) a escala 1:250 000 que ocupa la mayor superficie dentro del píxel
psup25041	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25021

Continuación Cuadro 13...

Campo	Contenido
code25042	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 4 (periodo 2007) a escala 1:250 000 que ocupa la segunda mayor superficie dentro del píxel
psup25042	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25022
code25043	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 4 (periodo 2007) a escala 1:250 000 que ocupa la tercer mayor superficie dentro del píxel
psup25043	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25023
code25044	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 4 (periodo 2007) a escala 1:250 000 que ocupa la cuarta mayor superficie dentro del píxel
psup25044	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25024
code25051	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 5 (periodo 2011) a escala 1:250 000 que ocupa la mayor superficie dentro del píxel
psup25051	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25021
code25052	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 5 (periodo 2011) a escala 1:250 000 que ocupa la segunda mayor superficie dentro del píxel
psup25052	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25022
code25053	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 5 (periodo 2011) a escala 1:250 000 que ocupa la tercer mayor superficie dentro del píxel
psup25053	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25023
code25054	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 5 (periodo 2011) a escala 1:250 000 que ocupa la cuarta mayor superficie dentro del píxel
psup25054	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25024
code25061	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 6 (periodo 2014) a escala 1:250 000 que ocupa la mayor superficie dentro del píxel
psup25061	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25021
code25062	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 6 (periodo 2014) a escala 1:250 000 que ocupa la segunda mayor superficie dentro del píxel
psup25062	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25022
code25063	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 6 (periodo 2014) a escala 1:250 000 que ocupa la tercer mayor superficie dentro del píxel
psup25063	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25023
code25064	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 6 (periodo 2014) a escala 1:250 000 que ocupa la cuarta mayor superficie dentro del píxel
psup25064	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25024
code250651	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 6.5 (periodo 2016) a escala 1:250 000 que ocupa la mayor superficie dentro del píxel
psup250651	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25021
code250652	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 6.5 (periodo 2016) a escala 1:250 000 que ocupa la segunda mayor superficie dentro del píxel
psup250652	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25022

Campo	Contenido
code250653	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 6.5 (periodo 2016) a escala 1:250 000 que ocupa la tercer mayor superficie dentro del píxel
psup250653	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25023
code250654	Código de 11 dígitos para la clase de uso de suelo y vegetación de la serie 6.5 (periodo 2016) a escala 1:250 000 que ocupa la cuarta mayor superficie dentro del píxel
psup250654	Porcentaje relativo a la superficie que ocupa la clase codificada en code25024

COMENTARIOS FINALES

La base de datos que se generó en formato ráster, faculta el análisis temporal a nivel de píxeles individuales, de los cambios en las clases de USyV. Este tipo de análisis permite estudiar cambios en los ecosistemas terrestres, así como la consistencia de la información que se genera, al analizar las alteraciones de USyV a nivel píxel. Los análisis espaciales y temporales de los ecosistemas terrestres y otros objetos, a escala 1: 250 000, permite evaluar sus patrones para asociarlos a pérdidas o ganancias en el contenido de carbono a nivel de píxeles individuales, al analizar los cambios de uso del suelo y vegetación.

BASE DE DATOS

En seguimiento a la política del Programa Mexicano del Carbono de libre acceso a las bases de datos asociadas al ciclo del carbono y sus interacciones, así como en soporte de las síntesis nacionales del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres y acuáticos, la base de datos de este trabajo está disponible en http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/.

LITERATURA CITADA

- 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.
- 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. 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.
- 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 multirate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5:249-261.
- Paz, F., E. Castillo, J. C. Cabrera y E. Medrano. 2018a. Base de datos nacional de índices de vegetación: resolución espacial de 250 m y resolución temporal de 10 días. *Elementos para Políticas Públicas* 2:68-80.
- Paz, F., V. M. Romero, J. Argumedo y J. C. Cabrera. 2018b. Base de datos vectoriales multi-temporales de mapas de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 de México. *Elementos para Políticas Públicas* 2:45-67.
- Salas, V. M. y F. Paz. 2017. Desarrollo de una base de datos geomorfométrica nacional. *Elementos para Políticas Públicas* 1:15-24.
- Salas, V. M. y F. Paz. 2018. Desarrollo de una base de datos climática nacional anual, 1989-2012: resolución 250 m. *Elementos para Políticas Públicas* 2:1-13.
- 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. Loesch, F. Paz, Y. Ryu, Z. Sánchez-Mejía and K. P. Toledo-Gutiérrez. 2017. Enhancing interoperability to facilitate implementation of REDD+: case study of Mexico. *Carbon Management* 8:57-65.
- Velázquez, A., J. F. Mas, G. Bocco and J. L. Palacio-Prieto. 2010. Mapping land cover changes in Mexico, 1976-2000 and applications for guiding environmental management policy. *Singapore Journal of Tropical Geography* 31:152-162.

BASE DE DATOS DE CONTENIDO DE CARBONO EN ECOSISTEMAS RIBEREÑOS: CUENCA ALTA Y MEDIA DE LA RESERVA DE LA BIÓSFERA LOS VOLCANES

DATABASE OF CARBON CONTENTS IN RIPARIAN ECOSYSTEMS: HIGH AND MIDDLE BASIN OF THE VOLCANOES BIOSPHERE RESERVE

Gerardo Cruz-Flores^{1†}, Eloísa A. Guerra-Hernández², Juan Manuel Valderrábano-Gómez¹, Alma Bella López-López¹, Inyasid Santiago-Aguilar¹, Carlos Castillejos-Cruz^{1,2}, Luis Samuel Campos-Lince¹, Jorge D. Etchevers-Barra³, Claudia Hidalgo-Moreno³, Juan Carlos Sandoval-Aparicio³ y Mayra Mendoza-Cariño¹

¹ Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. Batalla 5 de mayo s/n Esquina Fuerte de Loreto, Col. Ejército de Oriente, Alcaldía Iztapalapa, CP 09230, CD MX. México.

² Postgrado en Geografía UNAM, Unidad de Posgrado CU, CP.04510, CDMX Tel. 56230700 ext.39165.

³ Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México.

† Autor para correspondencia: edaynuve@gmail.com, edaynuve@unam.mx

RESUMEN

La Reserva de la Biosfera los Volcanes (RBLV) reconocida como *fábrica de agua*. Además de almacenar agua en sus suelos, vierte sus excedentes a arroyos de las Cuencas de México y del alto Balsas, en donde destacan los ecosistemas ribereños, entre otros biotopos, por exuberantes, diversos en comunidades vegetales y en especies perennifolias, que favorecen la retención de carbono y reducen el CO₂ atmosférico, como una más de sus funciones ambientales. Aunque los hábitats ribereños están entre los ecosistemas más degradados ante la expansión de actividades antrópicas, lamentablemente se tienen muy pocos estudios sobre superficies ribereñas a cuidar o restaurar, dinámica de sus componentes y conocimiento de los almacenes y flujos de carbono entre sus compartimentos. El objetivo de este trabajo fue elaborar una base de datos sobre almacenes de carbono en los compartimentos terrestres (suelo, mantillo, vegetación) y acuáticos (sedimento, carbono orgánico particulado y carbono mineral), de ecosistemas ribereños de la RBLV. Respecto al cálculo de las superficies ribereñas, por ejemplo, si se asumen buffers de diez metros a ambos lados de todas las corrientes que presenta la Red Hidrográfica Nacional escala 1:50 000 (INEGI), se estima una cobertura de 1 266 158 ha de áreas ribereñas, pero las superficies resultantes no abarcan la totalidad de las riberas pues buffers de ancho fijo, no emulan a los corredores ribereños naturales por su escasa relación funcional con la variación natural del curso de agua. La base de datos sobre contenidos de carbono en compartimentos de ecosistemas ribereños se elaboró a partir de trabajos de investigación presentados en artículos de revistas científicas, libros, capítulos de libro, memorias de resúmenes en extenso y tesis de grado y posgrado. Se confirma que el suelo tiene el primer lugar en contenido de carbono y, la vegetación, el segundo. La capa de hojarasca adquiere importancia en bosques caducifolios y en presencia de vegetación secundaria. Los contenidos de carbono orgánico particulado y carbonatos, en arroyos de cuencas medias, aumentan con la recepción de sedimento y escurrimientos provenientes de suelos dedicados a actividades agropecuarias.

Palabras clave: *ecosistema ribereño; faja de amortiguamiento; almacenes de carbono.*

ABSTRACT

Volcanoes Biosphere Reserve (RBLV) recognized as a “water factory” in addition to storing water in its soils, drains surplus water to streams to Mexico Basin’s and to Alto-Balsas basin’s where riparian ecosystems stand out from others ecosystems, by exuberant, diverse in plant communities and in evergreen species that favor to increase in carbon retention, contributing to reduce concentration of atmospheric CO₂ as one of its environmental functions. Although riparian habitats are among most degraded ecosystems faced with expansion of anthropogenic activities, unfortunately there are very few studies on: riparian surfaces to be taken care of or restored, dynamics of their components and scarce knowledge of stores and carbon fluxes between their compartments. Aim of this work was to develop a database on carbon stores in terrestrial (soil, mulch, vegetation) and aquatic compartments (sediment, particulate organic carbon and mineral carbon) of riparian ecosystems of RBLV. Regarding the calculation of riparian surfaces, for example, if ten-meter buffers are assumed on both sides of all the currents presented by the National Hydrographic Network scale 1:50,000 (INEGI), a coverage of 1,266,158 ha of riparian areas is estimated but resulting surfaces do not cover whole of riverbanks, since fixed width buffers do not emulate natural river corridors due to their scarce functional relationship with natural variation of watercourse. Database on carbon contents in compartments of riparian ecosystems was elaborated from research papers presented in scientific journal articles, books, book chapters, extensive abstracts reports and graduate and postgraduate theses. It is confirmed that soil has higher carbon contents and vegetation second place. Litter layer acquires importance in deciduous forests and in presence of secondary vegetation. Contents of particulate organic carbon and carbonates in streams in middle basins increase with reception of sediment and runoff from soils dedicated to agricultural activities.

Key words: *riparian ecosystem; buffer zone; carbon stores.*

INTRODUCCIÓN

En las toposecuencias de las casi 700 cuencas hidrográficas del país, se suceden bio-secuencias climáticas dependientes de la altitud. En sus redes fluvialesse encuentran ecosistemas ribereños (Cecon, 2003), caracterizados por diferentes regímenes térmicos y de humedad del suelo, así como condiciones biogeoquímicas particulares (Weltzin y McPherson, 1999; Lazdinis y Angelstam, 2005 Beumer *et al.*, 2008). Debido a la captación de una parte de la radiación solar por el estrato arbóreo y, la disminución de la evapotranspiración de arbustivas y herbáceas, las comunidades vegetales riparias presentan exuberancia (mayor altura y densidad de vegetación) y mayor diversidad de especies siempre verdes, que su entorno, lo que representa, ecológicamente, una mayor productividad primaria. En consecuencia, en los ecosistemas riparios se presentan altas tasas de acumulación y retención de carbono, que incrementa su contenido en los diferentes almacenes. El *secuestro* de carbono contribuye a reducir las concentraciones del CO₂ atmosférico (IPCC, 1996; Torres y Guevara, 2002; IPCC, 1996;

Lal, 2008;) y mitigar los efectos del cambio climático, por tratarse de uno de los principales gases de efecto invernadero o GEI (Balbontín *et al.*, 2009).

La expansión de actividades agrícolas hacia los suelos fértiles de las zonas de ribera, la sobre extracción de agua y desvío de cauces, el saqueo de plantas medicinales, alimenticias u ornamentales y/o la tala o sobre extracción de madera, hacen que los hábitats ribereños ya no presenten vegetación original y estén entre los ecosistemas más transformados de México (Gerritsen *et al.*, 2005; Nessimian *et al.*, 2008). Los recursos naturales propios de los ambientes ribereños presentan una severa y acelerada degradación por contaminación (López-Hernández *et al.*, 2007), hiper eutrofización (Garrido *et al.*, 2010), disminución de la calidad del agua, pérdidas de caudal, pérdida de belleza escénica y de biodiversidad (Mendoza *et al.*, 2014).

Un tema de gran interés en el estudio general de los sistemas ribereños es el ancho de la faja de amortiguamiento que, junto con los datos de extensión de los ambientes fluviales, determinan la superficie total de estos ecosistemas (Meli *et al.*, 2017). En un ejercicio sustentado en la Ley General de Aguas Nacionales (LAN), si se asumen buffers de 5 m a ambos lados de

todas las corrientes que presenta la Red Hidrográfica escala 1:50 000 del país (INEGI), se estima una cobertura de 633 079 ha de áreas ribereñas, pero si se establecen áreas de amplitud de hasta 10 m, se obtienen 1 265 842 ha de amortiguamiento del espacio fluvial. Aun así, los límites que resultan pueden no abarcar la totalidad de las riberas, ya que los buffers de ancho fijo no emulan a los corredores ribereños naturales porque no tienen una relación funcional con el curso de agua que varía naturalmente, esto ocasiona que gran parte de las llanuras de inundación queden fuera de los límites de protección; áreas evidentemente inundables que quedan propensas a urbanizarse (Ilhardt *et al.*, 2000; Skally y Sagor, 2001, Aunan *et al.*, 2005).

Ante las razones ecológicas, económicas y legales expuestas, si se considera que el suelo ribereño y la vegetación riparia son los principales almacenes de carbono en estos ecosistemas y, con la finalidad de poner en un contexto de síntesis, a nivel nacional, el conocimiento de los procesos de captura y almacenamiento de carbono en los ecosistemas ribereños, se planteó el objetivo de elaborar una base de datos sobre almacenamiento de carbono en los compartimentos terrestres y acuáticos del ecosistema ribereño, a partir de distintos documentos como artículos, memorias de resúmenes en extenso y tesis.

MATERIALES Y MÉTODOS

Búsqueda bibliográfica de artículos, libros, capítulos de libro, tesis y reportes

Se realizó una búsqueda en artículos de revistas científicas en libros, informes técnicos y de servicio social memorias en extenso, tesis de grado y de posgrado relacionados con el estudio de los ecosistemas ribereños principalmente en las bases de datos del Sistema de Información Científica Redalyc (Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal), Universidad Autónoma del Estado de México), <http://www.redalyc.org>; MundoGEO#Connect Latin America (ES) <http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F?RN=651236803>; Google académico, [https://scholar.google.com.mx/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=sistemas+ribereños+carbono&btnG=](https://scholar.google.com.mx/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=sistemas+ribereños+carbono&btnG=;); ScienceDirect, <https://www.sciencedirect.com/BibliotecaCOLPOS>, <http://www.biblio.colpos.mx/portal/>; Scientific Electronic Library Online (<http://www.scielo.org.mx/scielo.php?lng=es>). Los términos de búsqueda fueron productividad primaria en

ecosistemas riparios o bosques de galería, secuestro de carbono, ecosistemas ribereños, suelos ribereños, propiedades fisicoquímicas del agua en arroyos de montaña.

Para ubicar en el contexto nacional la importancia del conocimiento de los ecosistemas ribereños y, con el objetivo de tener un instrumento para su diagnóstico integral, que contribuya a llenar el vacío que de este tema se tiene en la literatura nacional, se presenta la propuesta metodológica descrita detalladamente en los siguientes párrafos y se complementa con la iniciativa de definir, con bases científicas y legales, el ancho de la franja de amortiguamiento de estos ecosistemas ribereños (Mendoza *et al.*, 2014) en el contexto de la nueva Ley General de Aguas de México.

La selección de sitios incluye lugares representativos para la investigación y se ha seguido un patrón cuidadoso de revisiones bibliográficas y cartográficas con la finalidad de dar respuesta a varias de las siguientes preguntas de investigación; ¿Es el contenido de carbono orgánico del suelo y el contenido de este elemento en los diferentes compartimentos de los ecosistemas ribereños, indicadores de sustentabilidad o de calidad del suelo?, ¿Cómo se relaciona el contenido de carbono orgánico de los suelos ribereños con su fertilidad natural y el suministro de N, P y S?, ¿Existen variaciones en las propiedades físico-químicas del agua y en sus contenidos de carbono orgánico particulado y, de carbonatos, a lo largo de sistemas fluviales permanentes que estén asociada a cambios de uso de suelo?

Determinación de almacenamientos de carbono en vegetación aérea

En los diversos trabajos consultados y reportados en este avance se sigue el criterio de trazar, a ambos lados del arroyo o río, transectos de 25, 30 y 50 m de longitud con amplitudes variables de 1, 3, 5, 7 o 10 m de ancho, como franja de amortiguación ribereña, por lo que resultan superficies de diagnóstico y muestreo que oscilan desde 50 m² hasta 1000 m² en los diversos estudios. La cuantificación de carbono almacenado en biomasa aérea del estrato arbóreo se hizo a partir de cuadrantes de 30 m largo × 20 m de ancho (rectángulo aproximado de 600 m²) o de 25 m largo × 10 m de ancho, para determinar la densidad arbórea con la totalidad de los árboles de cada cuadrante, previo registró de altura, perímetro y diámetro normal (1.30 m). La densidad básica de madera (DBM) de

cada especie arbórea se midió mediante el máximo contenido de humedad (Smith, 1954), el volumen del fuste con valores del perímetro a la altura del pecho y altura del árbol (González, 2008), la determinación de la biomasa seca (Bs) a partir del volumen de fuste con la técnica de Torres y Guevara (2002), aplicable tanto a especies de bosques de coníferas como caducifolios

(Cuadro 1, estimadores de BS) calculando Bs con un modelo elemental simple (Castañeda *et al.*, 2012). En el seguimiento del cálculo de la biomasa total, se incorpora la relación de la biomasa del fuste con la de copa y las raíces mediante un factor de expansión de biomasa (FEB) Silva-Arredondo, S. y J. de J. Nívar-Cháidez. (2009) y Brown (1997).

Cuadro 1. Estimadores para obtener la biomasa seca a partir del volumen del fuste

Tipo de bosque	b_1	b_0	r^2
Coníferas	723.579	-175.492	0.994
Latifoliadas	506.523	0.17	0.969

Fuente: Estimadores usados por Torres y Guevara (2002) quienes indican el siguiente modelo: Peso seco (kg) = $b_0 + b_1$ volumen total árbol (m³).

Al final, la estimación de carbono almacenado se realizó a partir de la biomasa total del árbol, multiplicada por 0.5 que corresponde a la fracción de carbono reportada por el IPCC (1996), $CBV = Bt \times fC$, dónde: CBV = carbono de biomasa vegetal; Bt = biomasa total del árbol (fuste + factor de expansión) y fC = fracción de carbono (0.5). Para la determinación de carbono en biomasa vegetal de los estratos herbáceo y arbustivo, se delimitaron superficies de 0.0625 m², 1 m² y 2 m², haciendo cortes de toda la biomasa a nivel del suelo, se cuantificó el peso fresco. Para los pastizales de alta montaña, se contaron los macollos de los zacatonales y se cortaron algunos de ellos, también a nivel de suelo. Cuando fue posible, todo el material vegetal, o una alícuota del total si era poco manejable, se mantuvo entre 60 y 75°C hasta alcanzar peso constante y se determinó el contenido de carbono almacenado mediante el factor de conversión de 58%, aunado a los cálculos referidos a la superficie del cuadrante y de la unidad ambiental referida.

Determinación de carbono en agua y sedimento

Cuando se incluye al subsistema acuático, el diagnóstico y muestreo se realiza mensualmente o, al menos, estacionalmente. Se realiza la descripción ecológica relacionada con las propiedades fisicoquímicas del agua, además de las determinaciones del contenido de carbono, para conocer la variación espacio-temporal que influye en el equilibrio entre cantidad y calidad de agua y disponibilidad de nutrientes, que influyen en la productividad primaria de la vegetación riparia y las funciones ecológicas de los ecosistemas ribereños. Para determinar el carbono

orgánico particulado (COP), se empleó una oxidación con dicromato, de acuerdo con el Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis, (Parsons *et al.*, 1984). En la caracterización física y química del agua se determinaron: alcalinidad por el método de los indicadores (APHA, AWWA y WPCF, 1992), dureza de calcio por el método complejométrico y, dureza total, con el método titulométrico (APHA-AWWA y WPCF, 1992).

En su recorrido cuenca abajo, los arroyos transportan residuos como hojarasca y detritus diversos, por ello, en cada sitio estudiado se colectaron de cuatro a seis muestras de sedimento a lo largo del transecto del arroyo estudiado, que se secaron a temperatura ambiente, tamizaron (malla de 2 mm) y almacenaron en frascos etiquetados con datos de sitio y fecha. Se determinó carbono orgánico a por el método de Walkley y Black (1934).

Determinación de carbono en los suelos ribereños y en mantillo

Una vez delimitados los transectos y cuadrantes con colecta de suelo, se estableció un método de elección de muestras, número y profundidad deseada, así como para el estudio del efecto de la exposición a la radiación solar. Cuando el objetivo del trabajo lo requirió, se tomaron muestras compuestas que fueron procesadas con secado al aire, tamizado y almacenadas para su procesamiento. Para realizar el análisis y la descripción de propiedades del suelo y cuantificar el carbono orgánico, se analizaron muestras colectadas hasta -20 cm de profundidad y se analizaron con los métodos

reportados en Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research (Robertson *et al.*, 1999) y en la NOM-021-SEMARNAT 2000 (SEMARNAT, 2002).

Determinación de los contenidos de carbono de biomasa microbiana (CBM)

Se tomaron las muestras de suelo con espesor de -10 cm, mismas que se trasladaron al laboratorio en condiciones frigoríficas. El procesamiento se realizó con el método de fumigación-incubación y la determinación estequiométrica del CO₂ desprendido (Powlson *et al.*, 1987; Shan-Min *et al.*, 1987; Schlesinger, 2005).

Toma de muestra de mantillo o litter

Las determinaciones de contenidos de carbono en mantillo se realizaron por duplicado o triplicado, utilizando para su colecta, cuadros de madera (25 cm × 25 cm, 50 cm × 50 cm y hasta 100 cm × 100 cm). Las muestras se mantuvieron en una estufa a 60°C hasta alcanzar el peso constante y se estimó el contenido de carbono a partir del peso seco, con uso del factor de conversión (58%).

Desarrollos estadísticos

Los análisis estadísticos siempre obedecen al diseño espacio-temporal de muestreo, número de muestras, de sitios y de variables y, desde luego, al objetivo de estudio. Sin embargo, generalmente, el análisis multivariado es de los más recurrentes en los trabajos que se consultaron y destacan análisis de correlaciones múltiples, de componentes principales y análisis de conglomerados y de discriminantes. Cuando las bases de datos se ajustan a los criterios de homocedasticidad, por ejemplo, se puede proceder a realizar análisis de varianza con el modelo lineal generalizado y pruebas de Tukey para la comparación de los promedios por altitud, por uso de suelo o tipo de vegetación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de literatura

El estudio de ecosistemas ribereños o de sus elementos bióticos o abióticos, generalmente se enfoca solo hacia alguno de sus subsistemas, por ejemplo Camacho-Rico *et al.* (2006), estudiaron en la barranca del Río Tembembe, Morelos, México la estructura y

composición de la vegetación ribereña; recientemente, en el estado de Puebla, Aguilar-Luna (2018) describe la estructura y diversidad de la vegetación arbórea de un bosque de galería, mientras que en Jalisco, en la Sierra de Quila, Santiago-Pérez *et al.* (2014) describieron la estructura del bosque templado de galería.

En el sureste del país, Moreno-Jiménez *et al.* (2017) han descrito para el río Tacotalpa, Tabasco, México, la relación de la vegetación ribereña con las propiedades del suelo en un afluente de este río. En la región de la selva lacandona Marinidou *et al.* (2013), incluyendo en su estudio ambientes riparios, proponen métodos para evaluar servicios ambientales de los árboles de pequeñas granjas inmersas en la selva lacandona, análogo a lo propuesto por Lamprecht (1990). En la reserva de la biosfera El Triunfo, en el estado de Chiapas, Salinas-Rodríguez y Ramírez-Marcial (2010) realizaron estudio en dos ríos para realizar actividades tendientes a su restauración ecológica; en el sur del Estado de Chiapas, Meli *et al.* (2017), señalan aspectos críticos para la restauración exitosa de bosques ribereños del trópico húmedo de México. Otro estudio en esta entidad, es el de Llaven-Macías (2013), quien enunció un listado de las especies de mamíferos de ambientes ribereños en la cuenca media del río Grijalva.

En ecosistemas ribereños de ambientes semiáridos del noroeste de Sonora, Méndez-Estrella *et al.* (2017) han realizado estudios interesantes relacionados con cambios en el almacenamiento de carbono y productividad de la vegetación. Treviño *et al.* (2001), en dos ríos del centro sur de Nuevo León, estudiaron la distribución y estructura de los bosques de galería. Villanueva-Díaz *et al.* (2013) en el estado de Durango, han estudiado en poblaciones de *Taxodium mucronatum* Ten. (Sabino), su respuesta hidrológica en los bosques de galería del Río San Pedro-Mezquital pues, aunque crece en la orilla de algunos ríos, es muy tolerante a las prolongadas sequías que sufren por varios meses. También en el norte del país, pero en el estado de Tamaulipas. Guerra *et al.* (2016), en el Río San Juan, han descrito comunidades de insectos y peces ligados a especies arbóreas riparias.

Otras investigaciones que señalan la importancia del tema son las realizadas por Sandoval-Aparicio (2018) donde se propone como herramienta a los sistemas de información geográfica para la gestión de riberas. Norman *et al.* (2014), a partir de series de imágenes Landsat Thematic Mapper (TM) multitemporales determinaron el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para analizar los cambios en la

vegetación ribereña relacionados con los esfuerzos de restauración de cuencas hidrográficas en las Tierras Altas de México. En su trabajo sobre aplicaciones de los sistemas de información en el estudio de sistemas ribereños, Valderrábano (2017) señala que el NDVI aumenta a medida que se incrementa la cantidad de biomasa verde y esta aseveración se confirman con el estudio de Jarchow *et al.* (2017), quienes muestran que alterar regímenes de inundación natural y el ciclo de sedimentos generados por construcción de presas o desviaciones de los cauces de los ríos, influyen sobre el NDVI y la evapotranspiración en el corredor ribereño del delta del río Colorado en México. Finalmente, Franklin *et al.* (2006) analizan los cambios sobre la estructura de los pastizales naturales en sonora, México, por la introducción de *Pennisetum ciliare*.

Análisis de contenidos de carbono

En los trabajos revisados se establece que, previo a la cuantificación de carbono, se realiza un estudio cartográfico, recorridos de campo, caracterización geomorfológica, edáfica e hidro-ecológica de los sitios, ya sea en catenas de suelos, en secuencias bioclimáticas o en gradientes altitudinales (Sarr *et al.*, 2011; Galicia *et al.*, 2016). Se diseña y ejecuta el

muestreo. Se seleccionan archivos de datos de análisis biológicos, químicos y físicos de sitios previamente estudiados. Se determinan densidad, estructura y composición de la vegetación riparia e índices de calidad de vegetación y se analiza mediante sistemas de información geográfica con fines de supervisión, verificación y contraste de la información espacial reportada con aquella obtenida de análisis de laboratorio. Para colecta, prensado, herborización y nomenclatura de las especies, se siguen los criterios establecidos por Castillejos (2017), Heynes-Silerio *et al.* (2017) y Mora-Olivo y Villaseñor (2007).

Para este avance de investigación sobre los contenidos de carbono en ecosistemas ribereños del país, se ha realizado hasta el momento una amplia revisión de trabajos realizados sobre métodos de diagnóstico, ancho de la franja de amortiguamiento, estimación de contenidos de carbono en sus distintos compartimentos, influencia del contenido de carbono en la disponibilidad de otros nutrientes esenciales, en la calidad del suelo y del agua. El gráfico de la Figura 1 muestra los tipos de trabajo que se revisaron para presentar en este documento el aún precario conocimiento de estos ecosistemas tan valiosos para la sociedad.

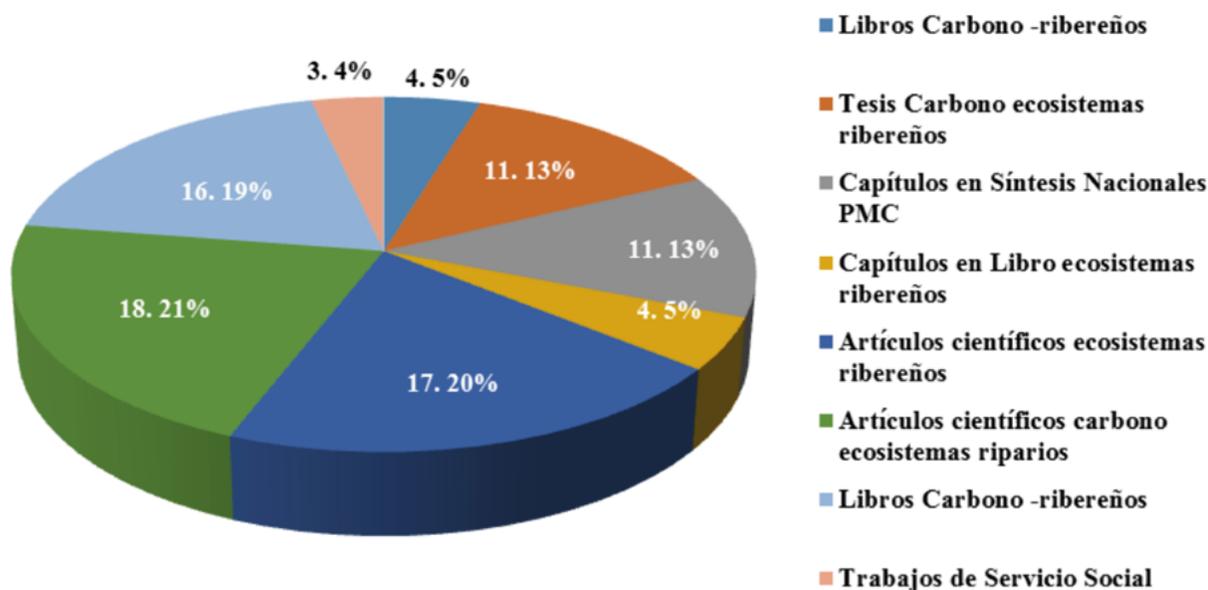


Figura 1. Trabajos de investigación utilizados para la revisión del estado del carbono en ecosistemas ribereños de montaña alta y cuenca media.

El número de sitios reportados en esta base de datos es superior al centenar y, para determinación y comparación de los contenidos de carbono, los lugares se eligieron siguiendo criterios de comparación de variaciones en altitud, exposición geográfica, ancho de franja de amortiguación, tipo de vegetación y uso de suelo. El análisis de los trabajos revisados muestra la necesidad de contar con instrumentos particulares adecuados para planear y conducir investigaciones sobre ecosistemas ribereños por las peculiaridades que presentan.

Después de la búsqueda y selección de información publicada sobre los contenidos de carbono en los ecosistemas ribereños, se puede afirmar que sobre los distintos componentes de la estructura y dinámica de los ecosistemas ribereños hay existencia pero insuficiente de listados florísticos de vegetación riparia e higrófila y sobre la composición y estructura de estas comunidades (Treviño *et al.*, 2001; Camacho-Rico *et al.*, 2006; Salinas-Rodríguez y Ramírez-Marcial,

2010; Villanueva-Díaz *et al.*, 2013 y Santiago-Pérez *et al.*, 2014). La descripción de los suelos en sistemas riparios es muy escasa también y se ve más limitada porque no relaciona el suelo con la vegetación o con las condiciones hidrológicas de los ambientes ribereños (Moreno-Jiménez *et al.*, 2017). El estudio de la biodiversidad de macroinvertebrados acuáticos, o el de las propiedades fisicoquímicas e hidrológicas del agua en los cauces ribereños, son temas poco más desarrollados, pero aún insuficientes y escasos y desde luego el tema fundamental de este documento que son los contenidos de carbono son insuficientes (Méndez-Estrella *et al.*, 2017 y Meli *et al.*, 2017).

Del compendio de trabajos realizados por los autores del presente trabajo, se hizo la revisión y selección de algunos de los sitios ribereños estudiados que tuvieran en común la cuantificación de carbono en, al menos, dos o tres de los compartimentos del ecosistema. Estos sitios se muestran en el mapa de la Figura 2.

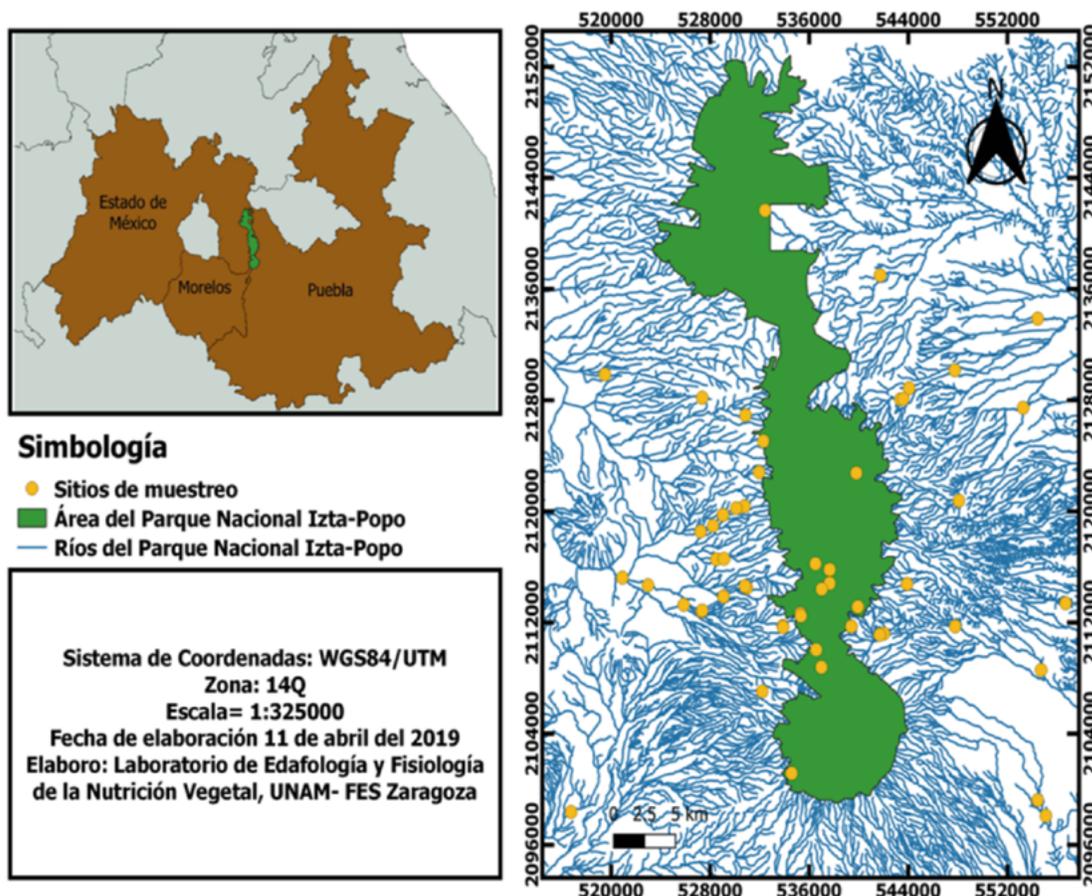


Figura 2. Se muestran algunos de los diferentes sitios de estudio de los ecosistemas ribereños en las cabeceras y parte media de las Cuencas del alto Balsas y de la Cuenca de México.

En todos los casos los sitios estudiados están sobre arroyos y ríos de régimen permanente.

En la descripción de contenidos de carbono que se han cuantificado en diferentes subsistemas o compartimentos de ecosistemas ribereños, se presentan dos secuencias bioclimáticas definidas por la altitud, en las dos vertientes que tiene el sistema montañoso de la

región de los volcanes Iztaccíhuatl-Popocatépetl; una en la Cuenca de México, que va de los 2000 m hasta los 3900 m, aproximadamente y, la otra, en la Cuenca del alto Balsas, de 2000 a poco más de 4000 m (Figura 3 y Cuadro 2).



Figura 3. Se muestran los diferentes sitios de estudio con diferencia en piso altitudinal, tipo de vegetación y uso de suelo Tomado de Domínguez (2019). Mayores dimensiones en anexo 1.

Cuadro 2. Contenido de carbono orgánico particulado (COP), carbono inorgánico en agua de arroyos permanentes y, porcentajes de carbono orgánico del suelo (COS), de sistemas ribereños de cabecera de cuenca y cuenca media.

Localidad	Uso de Suelo	Cuenca	Altitud _m_	Alcalinidad	Dureza total mg L ⁻¹	Carbono orgánico particulado	Carbono Orgánico del suelo g kg ⁻¹
Nepantla	Urbano	1	1987	280.80	1334.13	1038.54	25.2
Ayapango	Urbano	1	2433	228.00	1294.89	1067.39	36.8
Tezahuac	Agropecuario	1	2518	39.83	89.24	126.51	20.6
Tepetol Cascada	Recreativo-Forestal	1	2780	18.40	81.11	1067.39	44.4
Axochiapa	Forestal perturbado	1	2805	74.09	85.21	107.97	57.7
Alcalicavivero	Agrícola-forestal	1	2823	21.60	40.20		49.0
Palomas	Recreativo-Forestal	1	2949	25.96	81.94	628.52	27.4

Continuación Cuadro 2...

Localidad	Uso de Suelo	Cuenca	Altitud _m_	Alcalinidad	Dureza total mg L ⁻¹	Carbono orgánico particulado	Carbono Orgánico del suelo g kg ⁻¹
Tepinoco	Forestal perturbado	1	3034	48.71	57.87	87.53	37.4
Cañada Tesanto	Forestal	1	3116	32.00	286.45	500.04	21.7
Potrero	Forestal perturbado	1	3347	46.10	51.13	114.71	33.3
Nexcolango	Forestal	1	3489	12.00	57.88	.	52.2
Palo rechino	Forestal perturbado	1	3642	33.72	157.35	182.71	65.5
Amalacaxco	Forestal	1	3651	31.48	68.15	82.66	78.8
Doña Blanca 2	Pastizal montano	1	3816	21.58	54.03	.	73.3
Barrio San Juan Tochimilco	Urbano	2	2076	98.42	662.29	.	14.0
Atlimeyaya Junto al Restaurante	Agropecuario	2	2199	102.85	.	.	27.4
San Rafael Tlanalapan (río)	Urbano	2	2272	192.80	505.52	.	45.7
San Felipe Teotlalcingo (manantial)	Agropecuario	2	2386	48.62	41.71	.	7.3
Río Alseseca Calpan (río contaminado)	Urbano	2	2412	83.69	402.58	.	26.0
Ixoalco 2	Recreativo-Forestal	2	2504	72.68	231.95	.	17.8
Xopallican 2 (después del estanque)	Agropecuario	2	2545	46.02	304.37	.	29.2
Atzomaco (manantial)	Forestal perturbado	2	2744	49.16	142.51	.	43.0
Manantial Arriba del Pozo San Juan Tlale	Agrícola - Forestal	2	2746	30.69	54.05	.	26.2

Continuación Cuadro 2...

Localidad	Uso de Suelo	Cuenca	Altitud _m_	Alcalinidad	Dureza total mg L ⁻¹	Carbono orgánico particulado	Carbono Orgánico del suelo g kg ⁻¹
Río Frío II	Agrícola-Forestal	2	2996	49.03	42.44	.	47.0
Río Frío	Forestal perturbado	2	3074	53.56	32.03	.	48.0
Apatlaco 4 (Parque Ecoturístico)	Recreativo-forestal	2	3571	85.96	670.83	.	22.1
El Corral	Forestal perturbado	2	3601	34.81	14.41	.	35.2
Apatlaco 3 (Cascada)	Forestal	2	3635	71.70	115.24	.	22.1
Cascada Ranita	Pastizal montano	2	3883	19.77	19.69	.	49.5
Pilares	Pastizal montano	2	4054	25.61	26.33	.	23.8

El Número de cuenca en la columna representa 1 a la Cuenca de México y el 2 a la cuenca del alto Balsas. Cuadro completo en Anexo 1 de base de datos.

Los valores del Cuadro 2 muestran que el COP se incrementa conforme disminuye la altitud, lo cual está influenciado por el conjunto de actividades agropecuarias, industriales y por la presión del aumento de la población en zonas de cuenca media. Los valores de COP, solo una o dos decenas de mg L⁻¹ de zonas altas, aumenta hasta más de 1300 mg L⁻¹ en las zonas de alto impacto ambiental por actividades antrópicas (Ayala, 2011; Guerra *et al.*, 2012).

Los gráficos que se muestran en la Figura 4, generados con datos de otros trabajos (Escobedo-Urías, *et al.*, 2007; Cortés y Vega, 2013), indican variaciones estacionales donde los contenidos de COP son mayores en estiaje respecto a época lluviosa; a menor velocidad de corriente mayores contenidos de COP en el agua.

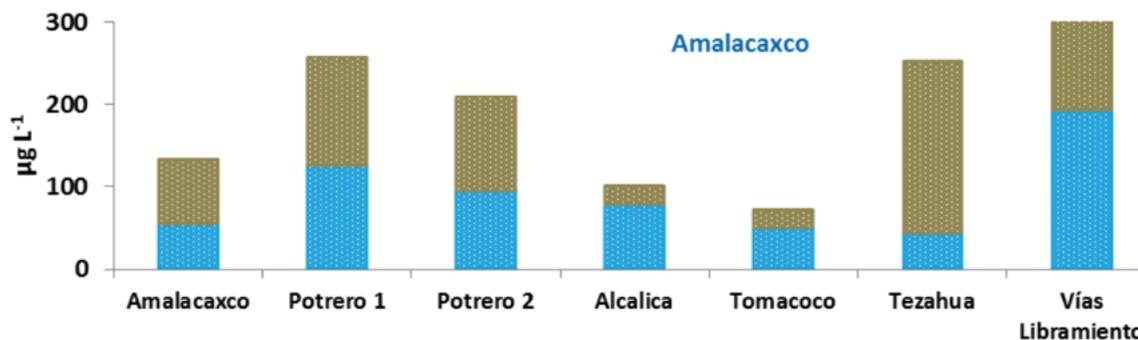


Figura 4. Carbono orgánico particulado (COP) acumulado en lluvia y estiaje en dos afluentes de la cuenca de México. En ambos casos los sitios se ubican en orden descendente en altitud.

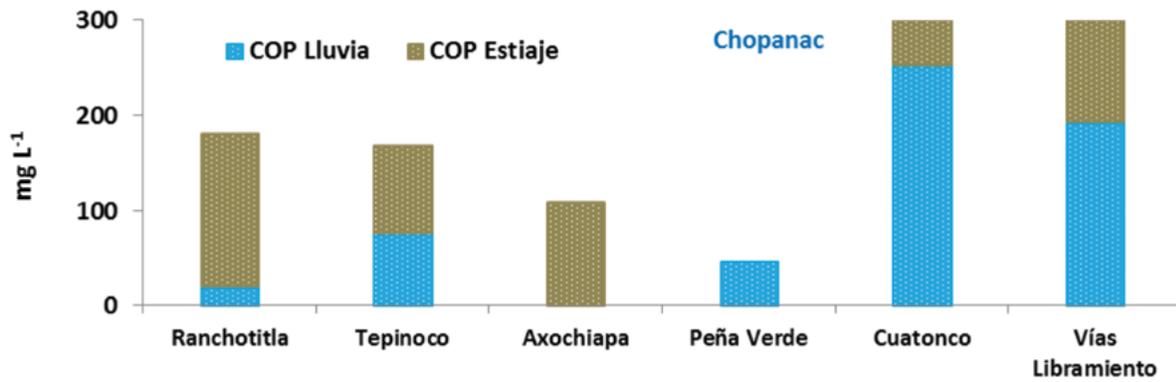


Figura 4. Carbono orgánico particulado (COP) acumulado en lluvia y estiaje en dos afluentes de la cuenca de México. (Continuación). En ambos casos los sitios se ubican en orden descendente en altitud.

De las variables ambientales de la cuenca, que pueden influir en mayor medida en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas fluviales, está la geología y el clima. Según Toro *et al.* (2002), la composición química del agua de los ríos está determinada por la geología de la cuenca, la solubilidad de las rocas, los tipos de suelos, la vegetación terrestre, la cantidad y composición de la precipitación caída en la cuenca, la evaporación, los procesos biológicos y, finalmente, la contaminación o

vertidos de origen humano. Con referencia al carbono inorgánico en las aguas de los arroyos, representado por los carbonatos de la alcalinidad y dureza total, es notorio que conforme el agua de los arroyos recorre bancos ribereños ya erosionados río abajo, las sales retiradas de los suelos se solubilizan y acumulan poco a poco para elevar los contenidos de carbonatos del agua en zonas bajas (Ayala, 2011; Cortés y Vega, 2013) incrementado también la conductividad eléctrica del agua (Cuadro 3).

Cuadro 3. Contenido de carbonatos en agua y de carbono orgánico del suelo (COS) de ecosistemas ribereños distribuidos entre 1987 – 4058 m de altitud.

Tipo de vegetación y Altitud	Tipos de suelo dominantes ^r		Agua	Suelo	
			CaCO ₃	COS	CE
			mg L ⁻¹	g kg ⁻¹	dS m ⁻¹
Pastizal montano 3832-4058 m	Regosol dístico-Litosol-Andosol mólico	Promedio	22.6	46.4	0.1
		Máximo	45.6	133.7	0.17
		Mínimo	8.0	177	0.05
Bosque de pino/ Pastizal montano 3520-3871 m	Cambisol eútrico-Andosol mólico-Litosol; Regosol dístico-Litosol-Andosol mólico	Promedio	32.2	64	0.3
		Máximo	103.0	155.	0.4
		Mínimo	9.2	16.0	0.2
Bosque de pino 2889 – 3745 m	Cambisol eútrico-Andosol mólico-Litosol; Regosol dístico-Litosol-Andosol mólico	Promedio	39.4	6.5	0.09
		Máximo	206.0	84.6	0.23
		Mínimo	8.56	30.2	0.06
Bosque mixto 2504 – 3571 m	Cambisol eútrico-Andosol mólico-Litosol; Regosol dístico-Litosol-Andosol mólico; Regosol eútrico-Andosol ótrico-Andosol mólico	Promedio	39.9	44	0.07
		Máximo	299.6	140.0	0.12
		Mínimo	4.0	5.4	0.03

Tipo de vegetación y Altitud	Tipos de suelo dominantes [†]		Agua	Suelo	
			CaCO ₃	COS	CE
			mg L ⁻¹	g kg ⁻¹	dS m ⁻¹
Agrícola 2095 – 2720 m	Cambisol eútrico-Andosol mólico-Litosol	Promedio	71.9	34.7	0.3
		Máximo	259.56	103.5	0.7
		Mínimo	10.8	0.4	0.03
Urbana 1987 – 2463 m	Regosol eútrico-Andosol ócrico-Andosol mólico; Cambisol eútrico-Andosol mólico-Litosol	Promedio	155.3	21	0.5
		Máximo	472.9	46.4	1.1
		Mínimo	35.02	7.4	0.2
Total 1987 – 4058 m		Promedio	55.10	42.4	
		Máximo	472.94	155.8	
		Mínimo	4.00	0.4	

[†]Suelos dominantes que reporta INEGI en sus cartas edafológicas E14B41 y E14B52.

El contenido de COS, siempre está ligado a otros nutrimentos esenciales para las plantas (Goel *et al.*, 2005; Granados *et al.*, 2006; Pan *et al.*, 2011; Mascot, 2013; Wagai *et al.*, 2015; Gallardo, 2016; Cruz, 2017; Kimura *et al.*, 2017). En un estudio que relaciona el contenido de COS con los de azufre y

fósforo extractables, así como con las concentraciones de fósforo y azufre en tejido foliar de especies riparias arbóreas y arbustivas, Martínez (2012) y Mascot (2013) encontraron que cuando el uso de suelo pasa de forestal a agrícola, el COS disminuye en más de 76% al disminuir de 95 a 21-22 mg kg⁻¹ (Cuadro 4).

Cuadro 4. Contenidos de COS en suelos ribereños y su relación con fósforo y azufre extractables y en tejido foliar de especies ribereñas.

Sitio	Altitud m	US	COS g kg ⁻¹	Azufre- foliar	Fósforo- foliar	S- Extractable mg kg ⁻¹	P- Extractable mg kg ⁻¹
				%			
Amalacaxco	3722	F	95	Ph. - 0.015	Ph. - 0.24	0.23	0.28
Potrero A	3347	F	28	Ar. - 0.016	Ar. - 0.17	0.24	0.26
Potrero B	3300	F	36	Es. - 0.020 Eg. - 0.013	Es. - 0.58 Eg. - 0.27	0.21	0.34
Apozonalco	2684	F, R	45	Ax. - 0.053 Cs. - 0.052 Qc. - 0.043	Ax. - 0.19 Cs. - 0.11 Qc. - 0.12	0.22	0.32
Tomacoco	2545	F, A	38	Gl. - 0.068 Bc. - 0.060 Cp. - 0.083	Gl. - 0.14 Bc. - 0.30 Cp. - 0.14	N/D	0.21

Continuación Cuadro 4...

Sitio	Altitud	US	COS	Azufre- foliar	Fósforo- foliar	S- Extractable	P- Extractable
	m			g kg ⁻¹	%		
Tezahuac	2517	A	21	<i>Cm.</i> - 0.047	<i>Cm.</i> - 0.12	0.18	0.68
				<i>Ps.</i> - 0.047	<i>Ps.</i> - 0.27		
Libramiento	2453	U, A	22	<i>Bc.</i> - 0.040	<i>Bc.</i> - 0.33	0.23	0.51
				<i>As.</i> - 0.037	<i>As.</i> - 0.33		

US = Uso de suelo, F: Forestal, R: Recreativo, A: Agrícola, U: Urbano.

Muestras foliares de Ph=*Pinus hartwegii*, Ar=*Abies religiosa*, E=*Eupatorium sp.*, Eg=*Eupatorium glabratum*, Ax=*Arbutus xalapensis*, Cs=*Cupressus sp.*, Qc=*Quercus crassipes*, Gl=*Garrya laurifolia*, Bc=*Buddleia cordata*, Cp=*Crataegus pubescens*, Cm=*Crataegus mexicana*, Ps=*Prunus sp.*, As=*Alnus sp.*

Las muestras se tomaron de los ápices de ramas orientadas a los cuatro puntos cardinales.
Valores promedio obtenidos de suelos colectados en franjas de amortiguamiento de 1 y 5 m.

La disminución de carbono, no refleja la sobre extracción de S y P que hacen algunas especies de frutales ante la aplicación de fertilizantes químicos. Se deduce que el conocimiento del estado nutrimental de especies riparias en bosques de galería insuficiente. Los resultados muestran que S y P extractables tienen valores muy semejantes a lo largo del gradiente de 2400 a 3700 m, estabilidad que puede interpretarse por los efectos amortiguadores que tienen estos ambientes para las especies riparias (Martínez, 2012).

Uno de los componentes poco atendido y estudiado, quizá por la dificultad de su colecta es la capa de

fermentación pues es una fracción de materia orgánica que está inmediatamente bajo la capa de mantillo que presenta a lo largo del año diferente estado de degradación pues varía con la naturaleza del material orgánico depositado en el suelo y su descomposición tiene diferente velocidad según la estación del año (Martínez, 2012; Mascot, 2013 y Pérez, 2017). El Cuadro 5 muestra un mayor contenido de carbono en la capa de fermentación, respecto al observado en el suelo, incluso, el contenido de carbono por unidad de masa se duplica, aun cuando la capa de fermentación es muy baja.

Cuadro 5 Contenido de materia orgánica y carbono orgánico en suelos ribereños y en la capa de fermentación, en ambientes riparios con diferente uso de suelo.

Uso de suelo		MOS	MO _{-CF}	COS	CO _{-CF}	C:N _{-S}	C:N _{-CF}
		%		g kg ⁻¹			
Urbano, Agrícola y Pecuario	Promedio	3.4	10.8	18	26	14.2	6.9
	Desv. Est.	2.1	9.8	12	23	10.4	2.7
	Intervalo	0.8-6.2	4.3-29	4-34	10-70	3-35.0	5.1-8.9
Acuícola y Forestal	Promedio	8.6	15.9	47	38	31.7	11.4
	Desv. Est.	3.1	9.0	17	22	13.6	4.6
	Intervalo	5.4-15.4	6.3-34.7	29-83	15-83	13.5-50.8	5.4-16.2
Ecoturístico y Forestal	Promedio	7.8	15.9	42	40	15.0	12.2
	Desv. Est.	3.7	8.3	20	20	4.7	5.3

Continuación Cuadro 5...

Uso de suelo		MOS	MO _{-CF}	COS	CO _{-CF}	C:N _{-S}	C:N _{-CF}
		%		g kg ⁻¹			
	Intervalo	3-13	4.4-25	17-70	11-60	12-18	6.8-17.2
Forestal	Promedio	5.7	20.6	31	50	14.1	13.5
	Desv. Est.	2.2	9.8	12	24	4.7	3.3
	Intervalo	4.3-8.3	7.8-27.9	23-45	19-67	10.7-16	9.4-16.4

MOS= materia orgánica del suelo, MO_{-CF}= materia orgánica de la capa de fermentación, COS= carbono orgánico del suelo, CO_{-CF}= carbono orgánico de la capa de fermentación, C:N_{-S}= relación carbono nitrógeno del suelo, C:N_{-CF}= carbono orgánico de la capa de fermentación.

El contenido de COS entre 30 y 50 g kg⁻¹ en suelos ribereños inmersos en ecosistemas forestales, disminuye hasta menos de 20 g kg⁻¹ en suelos ribereños ubicados en ambientes agropecuarios y urbanos, tal como lo citan Sparovek *et al.* (2003). El contenido de carbono orgánico en la capa de fermentación mostró un comportamiento muy similar al que se observa en el suelo ribereño de áreas forestales.

Un diagnóstico más completo sobre el contenido de carbono en diferentes compartimentos de los ecosistemas ribereños de un sistema fluvial de régimen permanente, se muestra en los Cuadros 6a, 6b y 6c. Se puede observar el contenido de carbono en parte aérea y radical de la vegetación riparia (tanto de las especies arbóreas como arbustivas), el COS, el carbono de la capa de fermentación, el mantillo y la vegetación herbácea, así como el contenido de carbono

inorgánico y orgánico particulado del agua y orgánico del sedimento fluvial de los mismos ecosistemas.

El Cuadro 6a muestra que el contenido de carbono en vegetación arbórea y en sitios forestales conservados supera las 170 Mg C ha⁻¹ y, en áreas de aprovechamiento, no alcanza 30 Mg C ha⁻¹. En el estrato arbustivo la tendencia es similar, con menor contenido de carbono. El Cuadro 6b indica que, en los buffers de amortiguamiento de 1 y 5 m, el contenido de COS en capa de fermentación y en vegetación arbórea no muestran grandes diferencias, pero en mantillo las diferencias en el contenido de carbono son significativas, lo que coincide con lo expuesto por Polyakov *et al.* (2005) y Osman (2013). El contenido de COP del sedimento y de los carbonatos del agua, aumenta al disminuir la altitud y muestra mayor presión en bosques sometidos a manejo intensivo (Cuadro 6c).

Cuadro 6a. Contenido de carbono en vegetación arbórea y arbustiva en diversos sitios ribereño en bosque de coníferas con diferente estado de conservación y manejo.

Sitio y uso de suelo	Altitud	Biomasa				Carbono total
		Arbórea		Arbustiva		
		Parte aérea	Radical ^r	Parte aérea	Radical ^r	
	m	Mg C ha				
Ranchotitla.... Fc	3224	172.04 a	34.42 a	1.0 a	1.04 a	2066.4
Tepinoco Fm	3028	26.55 c	5.31 b	0.06 d	0.15 c	318.8
Axochiapa Fc	2760	161.44 a	32.29 a	0.63 b	0.40 b	1938.3
Peña Verde Fc	2752	154.53 b	30.91 a	0.10 c	0.10 c	1854.6
CuatoncoFm	2752	20.48 c	4.10 b	0.15 c	0.14 c	246.1
Hda. Panoaya. T	2563	-	-	-	-	-
Media		127.11	25.43	0.47	0.37	
Desv. Est.		76.45	15.29	0.41	0.39	

^rEstimado en función de las relaciones (parte aérea/raíz) en plantaciones de bosques templados de coníferas (Mokany *et al.*, 2006). Letras diferentes dentro de columna representan diferencias significativas Tukey (p ≤ 0.05). Fc = Forestal conservado, Fm = Forestal manejado, T = Turístico. Fuente. Cruz *et al.*, 2012; Escalante y González, 2013; Cruz *et al.*, 2014.

Cuadro 6b. Contenido de carbono orgánico almacenado en buffers de 1 y 5 m en el sistema fluvial Chopanac en bosque de coníferas con diferente estado de conservación y manejo.

Sitio	Amplitud m	COS	CO _{-CF}	CO _{-M}	CO _{-VA}
		Media ± Desv. Est.	Media ± Desv. Est.	Media ± Desv. Est.	Media ± Desv. Est.
		Mg Carbono ha ⁻¹			
Ranchotitla	1	Nd	9.3 ± 5.7	7.8 ± 0.4	Nd
	5	125.41 ± 6.2	6.5 ± 2.26	22.8 ± 26.3	0.55 ± 1.17
Tepinoco	1	100.27 ± 39.74	1.39 ± 0.01	2.2 ± 1.1	Nd
	5	113.25 ± 55.19	3.14 ± 3.29	19.3 ± 2.8	0.12 ± 0.12
Axochiapa	1	88.61 ± 17.96	4.77 ± 1.54	3.1 ± 1.5	1.07 ± 1.05
	5	108.33 ± 30.18	4.73 ± 0.47	3.5 ± 1.3	0.4 ± 0.26
Peña Verde	1	57.55 ± 19.18	2.88 ± 1.14	9.8 ± 8.2	0.1 ± 0.05
	5	87.06 ± 11.7	3.08 ± 1.23	17.7 ± 6.1	0.09 ± 0.1
Cuatonco	1	105.84 ± 18.64	2.33 ± 1.09	9.6 ± 9.2	0.21 ± 0.14
	5	66.17 ± 3.03	1.59 ± 1.39	3.5 ± 3.5	0.07 ± 0.04
Hda. Panoaya	1	109.08 ± 16.13	1.79 ± 0.30	2.4 ± 2.4	Nd
	5	100.9 ± 22.58	1.71 ± 0.58	2.7 ± 1.8	Nd

COS = Carbono Orgánico del Suelo capa superficial (-20 cm), CO_{-CF} = Carbono en capa de fermentación, CO_{-M} = Carbono en mantillo, CO_{-VA} = Carbono en vegetación arbustiva y herbáceas parte aérea y raíz.

*Nd= No determinado (No se obtuvo muestra del primer metro por su relieve, talud muy inclinado).

Fuente: Cruz *et al.*, 2012; Escalante y González, 2013; Cruz *et al.*, 2014.

Cuadro 6c. Contenidos de carbonatos en agua y carbono orgánico en sedimento y orgánico particulado en el sistema fluvial Chopanac en bosque de coníferas con diferente estado de conservación y manejo.

Localidad	Velocidad de Caudal		Gasto de Corriente		Contenido de carbono		Carbono Orgánico Particulado		
	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Sedimento	Alcalinidad	Lluvia	Estiaje	Promedio
	m s ⁻¹		m ³ s ⁻¹		%	mg L ⁻¹	µg C L ⁻¹		
Ranchotitla	0.003	0.003	0.299	0.391	1.3	3.4	20.1	161.2	90.6
Tepinoco	0.002	0.004	0.073	0.190	2.7	3.5	76.4	91.80	84.1
Axochiapa	0.064	0.018	1.014	0.232	1.9	4.3	--	107.9	101.9
Peña Verde	0.005	0.005	0.265	0.26	4.1	5.37	46.3	--	46.3
Cuatonco	0.001	0.003	0.063	0.089	3.9	4.13	254.0	224.7	239.4
Media	0.015	0.07	0.343	0.232	2.8	4.14	99.2	146.4	112.5
Desv. Est.	0.027	0.006	0.39	0.11	1.22	0.79	105.7	60.03	73.9

Fuente: Guerra *et al.* 2012; Cortés y Vega, 2013; Soledad, 2013.

Santiago (2018), determinó el contenido de carbono orgánico y su compartimentalización en suelo, biomasa microbiana, mantillo, parte aérea de la

vegetación y sedimento del arroyo, con los resultados que se muestran en la Figura 5.

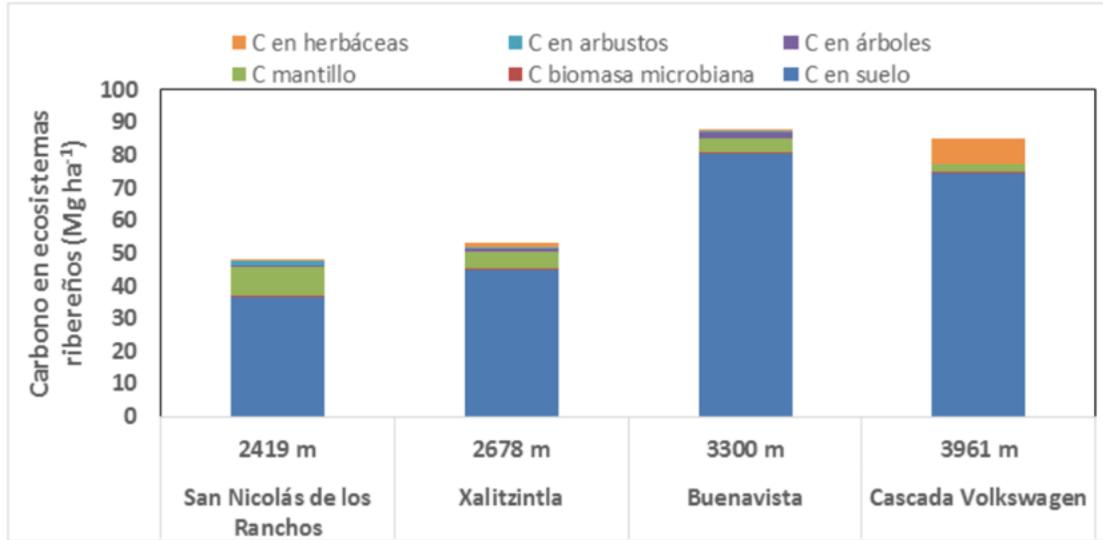


Figura 5. Contenido de carbono en compartimentos del sistema terrestre en cuatro ecosistemas ribereños distribuidos sobre el gradiente altitudinal.
Fuente: Santiago (2018).

El carbono orgánico del suelo tiene menor acumulación en zonas bajas y su contenido fue mayor en la zona media, en donde dominan aún los macizos forestales menos fragmentados por actividades. El suelo, en estas zonas, también supera al contenido de carbono de las zonas más altas, en donde dominan los zacatonales de alta montaña.

La Figura 6 muestra el contenido de carbono en diversos compartimentos en algunos de los tipos de vegetación que se observan en el Parque Nacional Iztaccihuatl Popocatepetl y que son adyacentes a ecosistemas ribereños. Los almacenes evaluados fueron el suelo, la vegetación arbórea y arbustiva, el mantillo y la capa de fermentación.

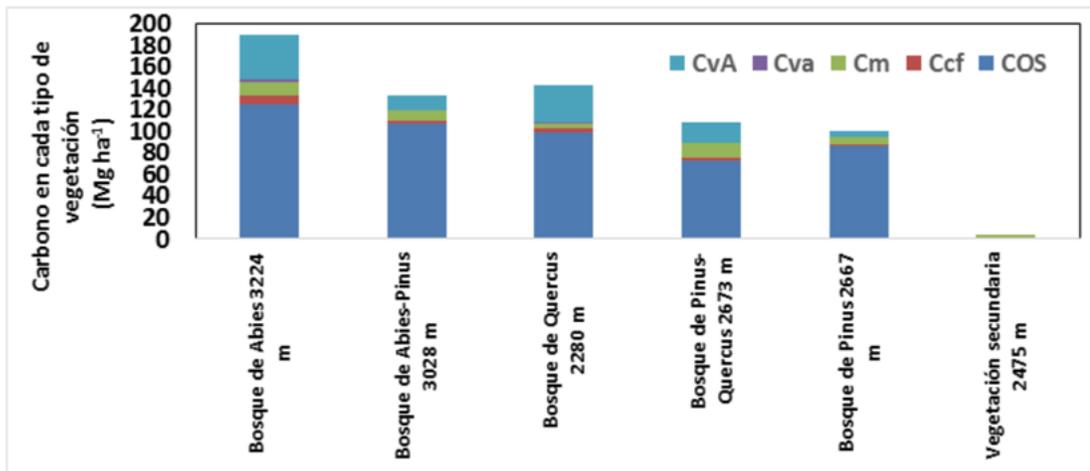


Figura 6. Contenidos de carbono en los principales macizos forestales de la región de los volcanes Iztaccihuatl-Popocatepetl, adyacentes a sistemas ribereños.
CvA=carbono en vegetación arbórea; Cva=Carbono en vegetación arbustiva; Cm=carbono en mantillo; Ccf=carbono en capa de fermentación; COS=carbono orgánico del suelo.

Un análisis del contenido de carbono en diversos compartimentos de los ecosistemas ribereños que prosperan sobre suelos derivados de materiales de origen volcánico, confirma que el suelo es el principal reservorio de C en los ecosistemas terrestres y que los suelos volcánicos tienen un gran potencial de almacenamiento de carbono orgánico, debido a factores como la estabilización de materia orgánica en los minerales amorfos (Price, 2012; Wagai *et al.*, 2015). En los sistemas ribereños, el COS presenta su mayor contenido en suelos forestales, en comparación con los suelos de uso agrícola, pecuario y urbano.

CONCLUSIONES

Durante el análisis de literatura no se encontraron estudios que incluyeran a todos los subsistemas de los ecosistemas ribereños, ni que consideraran contenidos y flujos de carbono. Las investigaciones son parciales, enfocadas en alguno de los subsistemas, por ejemplo, a la composición de la vegetación ribereña, a la estructura y diversidad de la vegetación arbórea bosques de galería, la relación de la vegetación ribereña con las propiedades del suelo, estudios en ríos para realizar actividades tendientes a su restauración ecológica, estudios de almacenamiento de carbono y productividad de la vegetación, entre otros.

En los ecosistemas ribereños de montaña el suelo fue el almacén más importante, al presentar el mayor contenido de carbono y, la vegetación, funge como el segundo compartimento en importancia. El mantillo, o capa de hojarasca, adquiere importancia en los bosques de hoja caediza y en bosques de vegetación secundaria.

Los trabajos sobre contenido de carbono en agua destacan la presencia de cantidades significativas tanto de carbono orgánico particulado, como de carbono mineral (carbonatos) en arroyos de zonas bajas que están expuestas al ingreso de sedimentos y escurrimientos de suelos dedicados a actividades agropecuarias.

BASE DE DATOS

De acuerdo con la política del Programa Mexicano del Carbono de libre acceso a las bases de datos asociadas al ciclo del carbono y sus interacciones y, para apoyar las síntesis nacionales del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres y acuáticos, la base de datos de este trabajo está disponible en http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la DGAPA- UNAM por los apoyos de beca para estudiantes y recursos financieros proporcionados para los gastos de campo, así como para la adquisición de equipo, reactivos y materiales para el proyecto PAPIME PE 215016; a la carrera de Biología de la FES Zaragoza de la UNAM y al Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados de México (COLPOS).

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Luna, J. 2018. Estructura y diversidad de la vegetación arbórea de un bosque de galería en el estado de Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9:230-252.
- APHA, AWWA y WPCF. 1992. Métodos normalizados para el análisis de agua potable y residuales. España.
- Aunan, T., B. J. Palik and E. S. Verry. 2005. A GIS approach for delineating variable-width riparian buffers based on hydrological function. *Minesota: Minesota Forest Resource Council*. 14 p.
- Ayala, M. Y. 2011. Interacción ecológica del sistema agua-suelo en ambientes ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia. Ciudad de México: UNAM-FES Zaragoza.
- Balbotín, C., C. O. Cruz, F. Paz and J. D. Etchevers. 2009. Soil carbon sequestration in different ecoregions of Mexico. pp. 71-96. *In: Lal, R. and R. F. Follett. Soil carbon sequestration and the greenhouse effects. Madison, WI: SSA Special Publication* 57.
- Beumer, V., G. Van Wirdum, B. Beltman, J. Griffioen, A. P. Grootjans and T. A. Verhoeven. 2008. Geochemistry and flooding as determining factors of plant species composition in Dutch winter-flooded riverine grassland. *Science of the Total Environment* 402:70-81.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer. *FAO Forestry Paper – 134. Rome, Italy*.
- Camacho-Rico, F., I. Trejo and C. Bonfil. 2006. Estructura y composición de la vegetación ribereña de la barranca del río Tembembe, Morelos, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 78:17-31.
- Castañeda, J. C., A. Gallegos, M. Sánchez and P. A. Domínguez. 2012. Biomasa aérea y posibles emisiones de CO₂ después de un incendio; caso del bosque "La Primavera", Jalisco, México. *Ra Ximhai*, 8:1-15.
- Castillejos, C. 2017. Estudio florístico de ambientes ribereños de alta montaña en el volcán Iztaccihuatl. pp. 89-106. *En: Cruz, G. y E. A. Guerra. Ecosistemas Ribereños de Montaña. Descripción y Estudio. UNAM-FES Zaragoza, Ciudad de México, México*.

- Ceccon, E. 2003. Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas. *Ciencias* 72:46-53.
- Cortés, A. L. and K. L. Vega. 2013. Variaciones de carbono, nitrógeno y fósforo en sitios con distinto uso de suelo en dos sistemas ribereños del río Amecameca. UNAM-FES Zaragoza. D. F., México.
- Cruz, G. 2017. Visión integral de las cuencas hidrográficas en la dinámica de los ecosistemas ribereños. Pp. 9-28. En: Cruz, G. and E. A. Guerra. *Ecosistemas Ribereños de Montaña, Descripción y Estudio*. UNAM-FES Zaragoza. Ciudad de México, México.
- Cruz, G., E. A. Guerra and J. D. Etchever. 2014. Contenidos de carbono en distintos compartimentos de ambientes ribereños en ecosistemas forestales de montaña. pp. 295-301. En Paz, F., J. Wong, M. Bazán y V. Saynes. *Estado Actual del conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013*. Programa Mexicano del Carbono, Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma de Chapingo e Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Texcoco, Estado de México.
- Cruz, G., K. Escalante, D. González, E. A. Guerra y J. D. Etchevers. 2012. Inventario de carbono en ambientes ribereños de montaña. pp. 195-200. En: Paz, F. y R. M. Cuevas. *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: síntesis a 2011*. Programa Mexicano del Carbono, Universidad Autónoma del Estado de México e Instituto Nacional de Ecología. Texcoco, Estado de México.
- Dominguez, T. M. E. 2019. Análisis temporal del Índice diferencia de vegetación Normalizado (NDVI) en relación con parámetros edáficos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Informe de Servicio Social Carrera de Biología FES Zaragoza. Ciudad de México, México.
- Escalante, K. A. y D. González. 2013. Estimación de líneas base del contenido de carbono orgánico del sistema suelo-planta en un ambiente ribereño del río Amecameca. UNAM-FES Zaragoza. D. F., México.
- Escobedo-Urías, D., A. Martínez-López, Á. Jiménez-Illescas, A.E. Ulloa-Pérez y A. Zavala-Norzagaray. 2007. Intercambio de carbono orgánico particulado del sistema lagunar San Ignacio-Navachiste, Sinaloa, con el mar adyacente. pp. 171-185. En: Hernández, B. and G. Gaxiola. *Carbono en ecosistemas acuáticos de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Franklin, K. A., K. Lyons, P. L. Nagler, D. Lampkin, E. P. Glenn, F. Molina-Freaner, T. Markow and A. R. Huete. 2006. Buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) land conversion and productivity in the plains of Sonora, Mexico. *Biological Conservation* 127:62-71.
- Galicia, L., A. Gamboa, S. Cram, B. Chávez, V. Peña, V. Saynes y C. Siebe. 2016. Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana* 34:1-29.
- Gallardo, J. F. 2016. La materia orgánica del suelo. Residuos orgánicos, humus, compostaje y captura de carbono. Salamanca, España: Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental.
- Garrido, P. A., M. L. Cuevas, H. Cotler, D. I. González y R. Thame. 2010. Evaluación del grado de alteración ecohidrológica de los ríos y corrientes superficiales de México. *Investigación Ambiental* 2:25-45.
- Gerritsen, P., A. Lomelí y C. Ortíz. 2005. Urbanización y problemática socioambiental en la costa sur de Jalisco, México. Una aproximación. *Sociedad y Territorio* 17:107-137.
- Goel, A., L. L. McConnell and A. Torrents. 2005. Wet deposition of current use pesticides at a rural location on the Delmarva Peninsula: Impact of rainfall patterns and agricultural activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53:7915-7924.
- González, M. 2008. Estimación de la biomasa aérea y captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H.E. Moree, *Pinus ocarpa* var. *orochetenai* Mtz., *Quercus sp.* en el norte del estado de Chiapas, México. Tesis de Licenciatura. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica.
- Granados, D., M. A. Hernández y G. F. López. 2006. Ecología de las zonas ribereñas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 12:55-69.
- Guerra, E. A., A. L. Cortés, K. L. Vega, G. Cruz and J. D. Etchevers. 2012. Contenidos de carbono en sedimento y agua en afluentes del río Amecameca y su relación con el cambio de uso de suelo. pp. 514-522. En: Paz, F. y R. M. Cuevas. *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011*. Programa Mexicano del Carbono, Universidad Autónoma del Estado de México y el Instituto Nacional de Ecología. Texcoco, Estado de México.
- Guerra, S., L. Lizárraga-Mendiola and J. Nívar. 2016. Riparian Communities along Longitudinal Gradients in Mexico's Northeastern San Juan River. *Tecnología y Ciencias del Agua* VII:55-73.
- Heynes-Silerio, S. A., M. S. González-Elizondo, L. Ruacho-González, M. González-Elizondo e I. López-Enríquez. 2017. Vegetación de humedales del municipio de Durango, Durango, México. *Revista Mexicana de biodiversidad*. DOI:10.1016/j.rmb.2017.03.005
- Ilhardt, B. L., E. S. Verry and B. J. Palik. 2000. Defining riparian areas. pp. 23-42. In: Verry, E. S., J. W. Hornbeck and C. A. Dolloff. *Riparian management in forest of the continental Eastern United States*. Lewis Publishers. New York.
- IPCC. 1996. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Workbook. Vol. 2. IPCC and OECD. London.

- Jarchow, C. J., P. L. Nagler and E.P. Glenn. 2017. Greenup and evapotranspiration following the Minute 319 pulse flow to Mexico: An analysis using Landsat 8 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data. *Ecological Engineering* 106:776-783.
- Kimura, A., M. B. Baptista and M. R. Scotti. 2017. Soil humic acid and aggregation as restoration indicators of a seasonally flooded riparian forest under buffer zone system. *Ecological Engineering* 98:146-156.
- Lal, R. 2008. Carbon sequestration. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363:815-830.
- Lamprecht, H. 1990. Silvicultura en los trópicos: los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas-posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido. Eschborn, Alemania: GMBH (GTZ).
- Lazdinis, M., and P. Angelstam, 2005. Functionality of riparian forest ecotones in the context of former. *Forest Policy and Economics* 7:321-332.
- Llaven-Macias, V. 2013. Mamíferos de un bosque ribereño en la cuenca media del Río Grijalva, Chiapas, México. *Acta Zoológica Mexicana (nueva serie)* 29:287-303.
- López-Hernández, M., M. G. Ramos-Espinosa y J. Carranza-Fraser. 2007. Análisis multimétrico para evaluar contaminación en el río Lerma y lago de Chapala, México. *Hidrobiológica* 17:17-30.
- Marinidou, E., B. Finegan, G. Jiménez-Ferrer, D. Delgado and F. Casanoves. 2013. Concepts and a methodology for evaluating environmental services from trees of small farms in Chiapas, México. *Journal of Environmental Management* 114:115-124.
- Martínez, M. S. A. 2012. Actividad enzimática de suelos ribereños y su fertilidad en bosques del Parque Nacional Izta-Popo. Ciudad de México: UNAM-FES Zaragoza.
- Mascot, E. 2013. Azufre en el sistema agua-sedimento-suelo para ambientes ribereños asociados a diferentes condiciones de suelo. Ciudad de México: UNAM-FES Zaragoza.
- Meli, P., L. Ruiz, R. Aguilar, A. Rabasa, J. M. Rey-Benayas y J. Carabias. 2017. Bosques ribereños del trópico húmedo: un caso de estudio y aspectos críticos para una restauración exitosa. *Maderas y Bosques* 23:181-193.
- Méndez-Estrella, R., J. R. Romo -León and A. E. Castellanos. 2017. Mapping Changes in Carbon Storage and Productivity Services Provided by Riparian Ecosystems of Semi-Arid Environments in Northwestern Mexico. 298. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* DOI:10.3390/ijgi6100298
- Mendoza, M., A. Quevedo, Á. Bravo, H. Flores, M. L. De la Isla, F. Gavi y B. P. Zamora. 2014. Estado ecológico de ríos y vegetación ribereña en el contexto de la nueva Ley General de Aguas de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 30:429-436.
- Mokany, K., J. R. Raison and A. S. Prokushkin. 2006. Critical analysis of root:shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology* 12: 84-96.
- Mora-Olivo, A. y J. L. Villaseñor. 2007. Diversidad y distribución de la flora vascular acuática de Tamaulipas, México. *Journal of the Botanical Research. Institute of Texas* 1:511-527.
- Moreno-Jiménez, V., O. Castillo-Acosta, L. Gama-Campillo, J. Zavala-Cruz y M. A. Ortiz-Pérez. 2017. Relación de vegetación ribereña y propiedades del suelo en un afluente del río Tacotalpa, Tabasco, México. *Maderas y Bosque* 23:91-109.
- Nessimian, J. L., E. M. Venticinque, J. Zuanon, Jr P. De Marco, M. Gordo, L. Fidelis, J. D'arc Batista and L. Juen. 2008. Land use, habitat integrity, and aquatic insect assemblages in Central Amazonian streams. *Hydrobiologia* 614:117-13.
- Norman, L., M. Villarreal, R. H. Pulliam, R. Minckley, L. Gass, C. Tolle and M. Coe. 2014. Remote sensing analysis of riparian vegetation response to desert marsh restoration in the Mexican Highlands. *Ecological Engineering* 70:241-254.
- Osman, K. T. 2013. Forest soil properties and management. 1st ed. Springer International Publishing. New Delhi, India. 232 p.
- Pan, Y., R. A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P. Kauppi, W. Kurz, O. Phillips, A. Shvidenko, S. 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* 333:998-993.
- Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli. 1984. *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press. Oxford. 173 p.
- Pérez, R. Y. 2017. Contenidos de azufre en diferentes componentes del ambiente en un sistema fluvial del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia en la cuenca Alta del Balsas. Ciudad de México: UNAM-FES Zaragoza.
- Polyakov, V., A. Fares and M. H. Ryder. 2005. Precision riparian buffers for the control of nonpoint source pollutant loading into surface water. A review. *Environmental Review* 13:129-144.
- Powelson, D. S., P. C. Brookes and B. T. Christensen. 1987. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry* 19:159-164.
- Price, S. P., M. A. Bradford and M. S. Ashton. 2012. Characterizing organic carbon stock and flows in forest soils. pp. 233-244. *In: Ashton, M. S., M. L. Tyrrell, D. Spalding and B. Gentry. Managing forest carbon in a changing climate*. Springer Science Business Media. New York, USA.
- Robertson, G. P., D. C. Coleman, C. S. Bledsoe and P. Sollins. 1999. *Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research*. Oxford University Press. New York, USA.
- Salinas-Rodríguez, S. y N. Ramírez-Marcial. 2010. Ríos de la reserva de la biosfera El Triunfo, un diagnóstico para su restauración ecológica. *Hidrobiológica* 20:91-100.
- Sandoval-Aparicio, J. C. 2018. Aplicación de los sistemas de información geográfica en la gestión de riberas. Curso FOR-667:

- métodos y aplicación de SIG en el manejo de recursos naturales. Colegio de postgraduados.
- Santiago, I. 2018. Contenidos de carbono orgánico y su compartimentación en sistemas ribereños adyacentes a cuatro biotopos del Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia. UNAM-FES Zaragoza. Ciudad de México, México.
- Santiago-Pérez, A., A. Ayón Escobedo, V. Rosas-Espinoza, F. Rodríguez Zaragoza y S. Toledo González. 2014. Estructura del bosque templado de galería en la sierra de quila, Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5:144-159.
- Sarr, D., D. Hibbs, J. Shatford and P. Momsen. 2011. Influences of life history, environmental gradients, and disturbance on riparian. *Forest Ecology and Management* 261:1241-1253.
- Schlesinger, W. H. 2005. *Biogeochemistry*. Elsevier Science. Durham, NC, USA.
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.
- Shan-Min, S., P. C. Brookes and D. C. Jenkinson. 1987. Soil respiration and the measurement of microbial biomass C by the fumigation technique in fresh and in air-dried soil. *Soil Biology and Biochemistry* 19:153-158.
- Silva-Arredondo, S. y J. de J. Návar-Cháidez. 2009. Estimación de factores de expansión de carbono en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15:155-163.
- Skally, C. and E. Sagor. 2001. Comparing riparian management zones to riparian areas in Minesota: a pilot study. Minesota Forest Resource Council. Minesota, USA.
- Smith, D. 1954. Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples. United State Department of Agriculture. Madison, USA.
- Soledad, A. 2013. Comportamiento nutrimental del sistema agua-suelo en la zona occidental del Parque Nacional Izta-Popo. UNAM-FES Zaragoza. D. F., México.
- Sparovek, G., L. Ranieri and S. Gassner. 2003. Soil erosion and its impacts on water treatment in the northeastern provinces of Thailand. *Environment International* 33:706-711.
- Toro, M., S. Robles, J. Avilés, C. Nuño, S. Vivas, N. Bonada, N. Prat, J. Alba-Tercedor, J. Casas, C. Guerrero, P. Jáimez-Cuéllar, J. L. Moreno, G. Moyá, G. Ramón, M. L. Suárez, M. R. Vidal-Abarca, M. Álvarez, M. e I. Pardo. 2002. Calidad de las aguas de los ríos mediterráneos del proyecto GUADALMED. Características físico-químicas. *Limnetica* 21:63-75.
- Torres, R. J. y A. Guevara. 2002. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta ecológica* 63:40-59.
- Treviño, E. J., C. Cavazos y O. A. Aguirre. 2001. Distribución y estructura de los bosques de galería en dos ríos del centro sur de Nuevo León. *Madera y Bosques* 7:13-25.
- Valderrábano, G. J. M. 2017. Aplicaciones de los sistemas de información en el estudio de sistemas ribereños. pp. 1-8. En: Cruz-Flores, G., E. A. Guerra-Hernández, G. Cruz-Flores y E. A. Guerra-Hernández (eds.). *Ecosistemas Ribereños de Montaña. Descripción y estudio*. UNAM-FES Zaragoza. México. ISBN:978-607-02-9875-2:
- Villanueva-Díaz, J., D. Stahle, J. Cerano Paredes, J. Estrada Ávalos y V. Constante García. 2013. Respuesta hidrológica del sabino en bosques de galería del Río San Pedro Mezquitil, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4:8-19.
- Wagai, R., M. Kajiura, M. Asano and A. Hiradate. 2015. Nature of soil organo-mineral assemblage examined by sequential density fractionation with and without sonication: Is allophanic soil different? *Geoderma* 241-242:295-305.
- Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid method. *Soil Science* 37:29-37.
- Weltzin, J. F. and G. R. McPherson. 1999. Facilitation of conspecific seedling recruitment and shifts in temperate savanna ecotones. *Ecological Monographs* 69:513-534.

BASE DE DATOS DE ALMACENES Y FLUJOS DE CARBONO EN HUMEDALES DE AGUA DULCE DE MÉXICO

DATABASE FOR CARBON STOCKS AND FLUXES IN FRESHWATER WETLANDS IN MEXICO

María Elizabeth Hernández-Alarcón¹, Fernando Paz-Pellat^{2†} y Alejandro Adrián Hernández-Sánchez¹

¹ Instituto de Ecología A.C. Xalapa, Veracruz, México.

² Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México.

† Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com.

RESUMEN

Los humedales de agua dulce son ecosistemas que juegan un papel importante en el ciclo del carbono, ya que sus suelos pueden almacenar grandes cantidades de carbono. Sin embargo, debido a las condiciones inundadas de los mismos, también son fuente de gases de efecto invernadero como metano, óxido nitroso y bióxido de carbono. Con el objetivo de facilitar estudios de síntesis a nivel nacional, que lleven a un mejor entendimiento de los procesos de captura y flujos de carbono en humedales de agua dulce, se construyó una base de datos de los últimos 10 años, sobre los almacenes de carbono y flujos de carbono, basada en la información que se obtuvo de publicaciones en revistas científicas, memorias de resúmenes en extenso y documentos de tesis.

Palabras clave: *Popal; Tular; selva inundable; metano; turba.*

ABSTRACT

Freshwater wetlands play an important role in the carbon cycle because their soils are capable to store large amount of carbon. However due to the flooding conditions wetland soils are sources of greenhouse gases such as methane, nitrous oxide and carbon dioxide. In order to facilitate national studies that enhance the understanding of carbon capture and fluxes processes in freshwater wetlands, a data base of carbon stocks and fluxes in coastal and continental freshwater wetlands was built, based in information published in scientific journals, conference proceedings and thesis.

Key words: *Marsh; mire; forested wetland; methane; peat.*

INTRODUCCIÓN

Los humedales son las zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres, constituyen áreas de inundación temporal, o permanente, que están sujetas o no a la influencia de la marea. La inundación debe ser lo suficientemente larga para permitir el desarrollo de suelos hídricos y/o al menos periódicamente para mantener una vegetación predominante de hidrófitas, esto es, plantas adaptadas a vivir en condiciones de inundación (Mitsch y Gosselink, 2007).

Los humedales de agua dulce ocurren tanto en la zona costera como en la zona continental y, a pesar de no contar con una amplia extensión en el país, estos ecosistemas juegan un importante papel dentro del ciclo del carbono, ya que pueden almacenar hasta cinco veces más carbono en sus suelos, que los ecosistemas terrestres (Hernández y Moreno-Casasola, 2018). Dicho potencial se debe a la alta productividad de las plantas y a la baja descomposición de materia orgánica que ocurre en los suelos inundados (Adhikari *et al.*, 2009; Hernández, 2010). Sin embargo, en los suelos de estos

humedales se llevan a cabo procesos anaerobios como la metanogénesis, cuyo producto final es el metano (CH₄), considerado un gas con efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 20 veces mayor al del CO₂ y que contribuye con el 20% al calentamiento global (Whiting y Chanton, 2001; IPCC, 2007; Kayranli *et al.*, 2010; Marín-Muñoz *et al.*, 2015; Hernández *et al.*, 2018). De allí la importancia de contar con una base de datos sobre los almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce en México.

Con el objetivo de facilitar estudios de síntesis a nivel nacional, que lleven a un mejor entendimiento de los procesos de captura y flujos de carbono en humedales de agua dulce, en este trabajo se construyó una base de datos de los últimos 10 años, sobre los datos de almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce, basada en información que se obtuvo de publicaciones de revistas científicas, memorias de resúmenes en extenso y documentos de tesis.

MATERIALES Y MÉTODOS

Métodos para estimar el almacén de carbono en biomasa de humedales

Para determinar el almacén de carbono en la biomasa, primero es necesario establecer la cantidad de biomasa por área y el contenido de carbono en ella. Para los humedales arbóreos, se mide el diámetro a la altura de pecho en parcelas de un área determinada. Se aplican ecuaciones alométricas de acuerdo con la especie y se calcula la biomasa (materia seca en g m⁻²). Para los humedales herbáceos, en campo se cosecha la biomasa área en parcelas de 1 m x 1 m, la biomasa se seca, se pesa y se calcula la biomasa (g m⁻²). Para conocer el contenido de carbono en los tejidos de las diferentes especies de humedales, se toman muestras de biomasa aérea, se secan a 60 °C y se les analiza el contenido de carbono con un analizador de carbono (Hernández *et al.*, 2016).

Para determinar la biomasa de raíces, se toman núcleos de suelo a 30 cm de profundidad y 15 cm de diámetro, las raíces contenidas en el suelo se lavan con abundante agua hasta eliminar el suelo, se secan, se pesan y se calcula la biomasa en g m⁻², considerando al área del núcleo de suelo. Con los datos anteriores se calculan los almacenes de carbono, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Almacén de carbono en biomasa aérea} = C * PBA$$

donde:

PBA= Productividad de biomasa aérea, en Mg ha⁻¹

C= Proporción de carbono en la biomasa aérea

$$\text{Almacén de carbono en raíces} = C * PR$$

donde:

PR= Productividad de raíces, en Mg ha⁻¹

C= Proporción de carbono en raíces

La concentración de carbono orgánico para cada humedal, se ajusta con la densidad aparente para estimar la densidad de carbono (Kg m⁻²) en cada horizonte, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad de carbono} = CO * DA * PH$$

donde:

CO= Contenido de carbono orgánico en el horizonte o capa de suelo, en g Kg⁻¹

DA= Densidad aparente en el horizonte, en Kg m⁻³

PH= Profundidad del horizonte, en m

Almacén de carbono en el suelo en Mg ha⁻¹ = \sum Densidad de carbono en cada horizonte Kg m⁻² * 10

\sum = Sumatoria

10= Factor de conversión de Kg m⁻² a Mg ha⁻¹ (10000/1000)

Método para determinar los flujos verticales de carbono en humedales de agua dulce

La emisión de metano, bióxido de carbono y óxido nítrico, en humedales de agua dulce, ha sido ampliamente medida a nivel internacional mediante el método de la cámara cerrada (Altor y Mitsch, 2006; Hernández y Mitsch, 2006; Kayranli *et al.*, 2010) y, más recientemente, por el método de covarianza de vórtices (Beringer *et al.*, 2013). En México, para los humedales de agua dulce, solo se encontraron datos de flujo medidos por el método de la cámara cerrada (Marín-Muñiz *et al.*, 2015; Hernández *et al.*, 2015; Rojas-Oropeza *et al.*, 2016). Esta técnica consiste en colocar una cámara enterrada en el suelo, la cual se cierra al momento de medir la emisión de los gases. En la tapa de la cámara debe haber un septo de goma y un termómetro. Con ayuda de una jeringa, a través del septo de goma, se toman muestras del gas contenido en la cámara, a diferentes intervalos, a partir de que ésta se cierra. Las muestras se colocan en viales herméticamente cerrados y la concentración de gases se determina por cromatografía de gases.

Búsqueda de datos

Se realizó una búsqueda de bibliografía sobre estudios de almacenes y flujos de carbono en humedales

de agua dulce en México. La búsqueda se hizo en bases de datos de artículos científicos y tesis en español, utilizando como palabras clave, carbono y humedales, en buscadores como Scielo, base de datos de tesis - UNAM, Instituto de Ecología, A.C., Google Académico y publicaciones del Programa Mexicano del Carbono. Así mismo, se realizó una búsqueda de artículos en inglés, utilizando las palabras clave carbon wetlands Mexico en el metabuscador de Consorcio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica CONRICyT. Es importante mencionar, que de los resultados obtenidos se excluyeron los trabajos relacionados con manglares y otros humedales salobres, ya que el objetivo de esta síntesis fue centrarse en humedales de agua dulce, costeros y continentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sólo se encontraron datos para almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce en cuatro estados del sureste mexicano: Chiapas, Tabasco, Yucatán y Veracruz (Figura 1). Sólo para el estado de Veracruz se registraron datos sobre almacenes de carbono en humedales de agua dulce costeros y continentales; para los estados restantes, sólo se encontraron datos de humedales de agua dulce costeros.

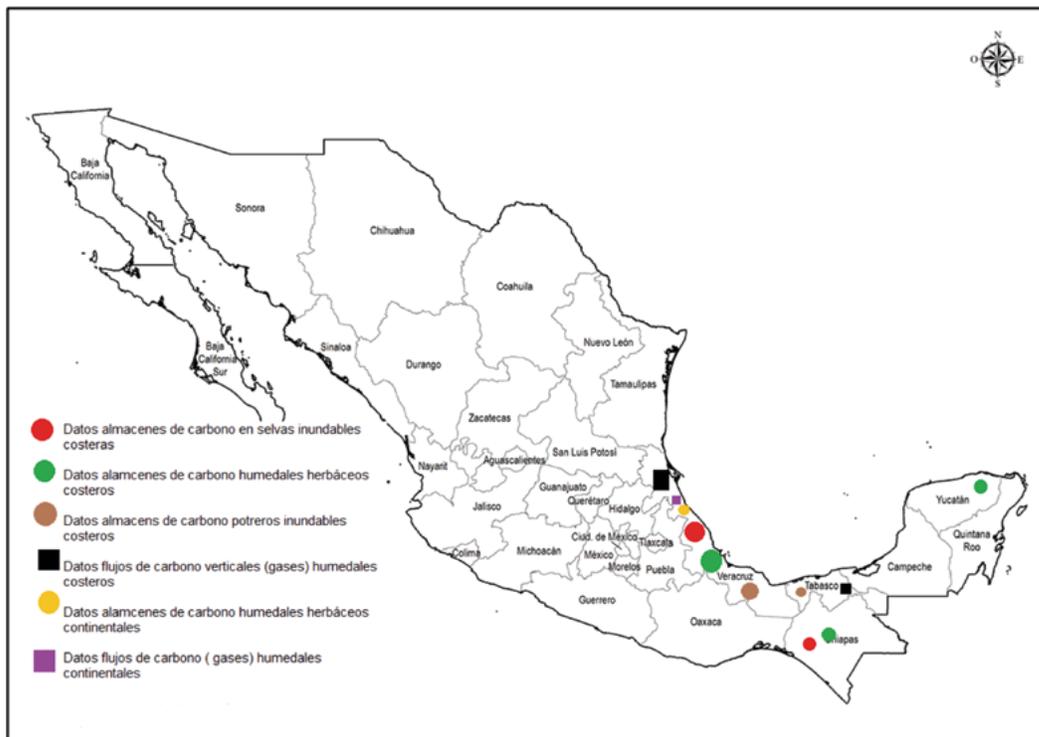


Figura 1. Sitios con datos sobre almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce.

El tipo de publicaciones que se encontraron fueron, como literatura indizada, siete artículos para el estado de Veracruz (Campos-Cascaredo *et al.*, 2011; Infante-Mata *et al.*, 2012, Marín-Muñiz *et al.*, 2014 y 2015; Moreno-Casasola *et al.*, 2017; Vázquez-González *et al.*, 2017; Hernández y Moreno-Casasola, 2018); uno para Tabasco (Kauffman *et al.*, 2016); uno para Chiapas (Adame *et al.*, 2015) y, uno para Yucatán (Adame *et al.*, 2013). Dentro de la literatura gris, se encontraron cinco capítulos de libro y dos artículos, todos con datos sobre almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce en Veracruz (Figura 2). Se encontraron dos tesis de Doctorado, una con datos de almacenes y flujos de

carbono como emisiones de gases (Marín-Muñiz, 2013) y otra con datos de flujos de carbono (como caída de hojarasca) en selvas inundables de Veracruz. También para Veracruz (Infante-Mata, 2011), se encontró una tesis de licenciatura sobre los almacenes de carbono en suelos de potreros inundables y humedales arbóreos (Salazar-Landero, 2013) y una tesis de licenciatura, en donde se comparan los almacenes de carbono en humedales costeros y continentales de Veracruz (Cruz-Zamora, 2018). Se hallaron dos resúmenes en congresos con datos de flujos de gases para humedales de Tabasco y Veracruz (Rojas-Oropeza *et al.*, 2016; Hernández *et al.*, 2018).

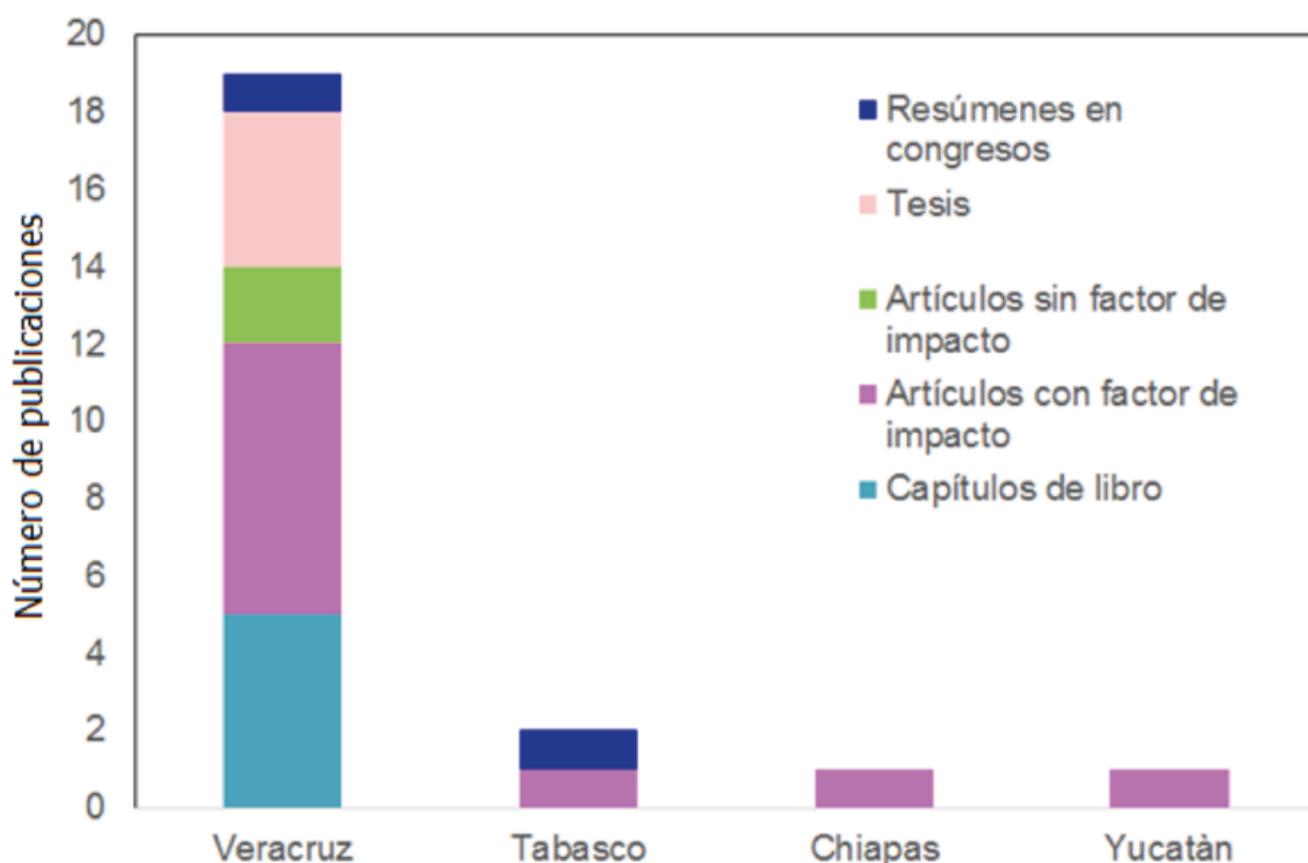


Figura 2. Literatura indizada y literatura gris, sobre almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce, por entidad federativa.

Para los almacenes de carbono en humedales de agua dulce costeros y continentales, se encontraron datos para 12 sitios, en cuatro estados de la República Mexicana

(Cuadro 1). Mientras que, para flujos de carbono, como caída de hojarasca y emisión de gases, se encontraron datos en ocho sitios, sólo en dos estados (Cuadro 2).

Cuadro 1. Sitios con datos de almacenes de carbono en humedales de agua dulce en México.

Sitio	Tipo de humedal de agua dulce	Especies dominantes	Entidad federativa	Referencia
Punta Gorda	Humedal herbáceo costero	<i>Typha dominguensis</i>	Yucatán	Adame <i>et al.</i> , 2013
Vigía Chico	Humedal herbáceo costero	<i>Cladium jamaicense</i>	Yucatán	
La encrucijada-Bajo estuario	Humedal herbáceo costero	<i>Typha dominguensis</i>	Chiapas	Adame <i>et al.</i> , 2015
Centla	Pastizal Inundable-costero		Tabasco	Kauffman <i>et al.</i> , 2016
Estero Dulce	Humedal herbáceo, Selva inundable y Pastizal inundable costeros	<i>Thalia geniculata</i> , <i>Cyperus Gigantus</i> y <i>Pachira acuática</i>	Veracruz	Campos-Cascaredo <i>et al.</i> , 2011, Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2014 y Hernández <i>et al.</i> , 2015
Laguna Chica	Humedal herbáceo y Selva inundable costeros	<i>Cyperus giganteus</i> , <i>Typha dominguensis</i> , <i>Pachira acuática</i> , <i>Hipocreatea celestratoides</i>	Veracruz	Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2014
Santander	Humedal herbáceo y Selva inundable costeros	<i>Typha dominguensis</i> , <i>Ficus insipida</i> Willd., <i>Tabebuia rosea</i>	Veracruz	Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2014
Boquilla de Oro	Humedal herbáceo, Selva inundable costeros y pastizal inundable	<i>Pontederia cordata</i> , <i>Typha dominguensis</i> , <i>Acrosticum sp</i> <i>Ficus insipida</i> <i>Pleuranthodendron lindenii</i>	Veracruz	Campos-Cascaredo <i>et al.</i> , 2011, Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2014 y Hernández <i>et al.</i> , 2015
La Mancha	Humedal herbáceo y Selva inundable costeros	<i>Anona grabra</i> <i>Sagittaria lancifolia</i> <i>Typha dominguensis</i> <i>Attalaea butyraceae</i> , <i>Roystonea dunlapiana</i> (palma de agua o yagua)	Veracruz	Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2014
Jamapa	Palmar y Selva inundable costeros	y <i>Scheelea liebmanni</i> (coyol o palma real). <i>Dendrosicus latifolius</i> , <i>Pachira aquatica</i> , <i>Ficus trigonata</i> y <i>Ficus insipida</i>	Veracruz	Salazar-Landero, 2013
Río Blanco	Humedal herbáceo y Selva inundable costeros	<i>Pachira aquatica</i> <i>Hippocratea volubilis</i> <i>Annona glabra</i> , <i>Thalia geniculata</i> <i>Leersia ligularis</i> , <i>Pontederia sagittata</i>	Veracruz	Moreno-Casasola <i>et al.</i> , 2017, Vázquez-González <i>et al.</i> , 2017
Santuario del Bosque de Niebla	Humedal herbáceo continental	<i>Typha domingensis</i>	Veracruz	Cruz-Zamora, 2018
Molinos de San Roque	Humedal herbáceo continental	<i>Typha dominguensis</i>	Veracruz	Cruz-Zamora, 2018

Cuadro 2. Sitios con datos de flujos de carbono como como caída de hojarasca* y emisión de gases⁺ en humedales de agua dulce en México.

Sitio	Tipo de humedal de agua dulce	Especies dominantes	Entidad federativa	Referencia
Lagunas de Chaschoc-Emiliano Zapata ⁺	Humedal tropical, ribereño al río Usumacinta	No específica-selva mediana y baja; con actividad agrícola, ganadera y urbana	Tabasco	Rojas-Oropeza <i>et al.</i> , 2016
Estero Dulce ^{**}	Humedal herbáceo, Selva inundable y potrero inundable costeros	<i>Thalia geniculata</i> , <i>Cyperus Gigantus</i> y <i>Pachira acuática</i> <i>Echinochloa pyramidalis</i>	Veracruz	Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2015 y Hernández <i>et al.</i> , 2015, Infante <i>et al.</i> , 2012
Laguna Chica ^{**}	Humedal herbáceo y Selva inundable costeros	<i>Pachira acuática</i> , <i>Hipocreatea</i> , <i>celestratoides</i>	Veracruz	Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2015, Infante <i>et al.</i> , 2012
Boquilla de Oro ⁺	Humedal herbáceo y Selva inundable costeros	<i>Pontederia cordata</i> , <i>Typha dominguensis</i> , <i>Acrosticum sp</i> <i>Ficus insipida</i> <i>Pleuranthodendron lindenii</i>	Veracruz	Marín-Muñiz <i>et al.</i> , 2015 y Hernández <i>et al.</i> , 2015
La Mancha [*]	Humedal herbáceo y Selva inundable costeros	<i>Anona grabra</i> <i>Ficus insipida</i>	Veracruz	Infante <i>et al.</i> , 2012
Jamapa [*]	Palmar y Selva inundable costeros	<i>Attalaea butyraceae</i> , <i>Roystonea dunlapiana</i> (palma de agua o yagua) y <i>Scheelea liebmannii</i> (coyol o palma real). <i>Dendrosicus latifolius</i> , <i>Pachira aquatica</i> , <i>Ficus trigonata</i> y <i>Ficus insipida</i>	Veracruz	Infante <i>et al.</i> , 2012
Santuario del Bosque de Niebla ⁺	Humedal herbáceo continental	<i>Typha domingensis</i>	Veracruz	Cruz-Zamora, 2018
Molinos de San Roque ⁺	Humedal herbáceo continental	<i>Typha dominguensis</i>	Veracruz	Cruz-Zamora, 2018

CONCLUSIONES

El número de sitios con datos de almacenes de carbono en humedales de agua dulce es muy bajo y sólo para 4 estados del sureste mexicano. En cuanto a los datos de flujos de carbono en estos ecosistemas, es aún más bajo, con sólo ocho sitios en dos estados del sureste. Por lo anterior, es indispensable que en México se genere conocimiento sobre la capacidad y los factores que afectan el almacenamiento de carbono en los diferentes humedales de agua dulce, costeros y continentales.

SIGUIENTES PASOS

Debido a que los humedales de agua dulce engloban ecosistemas arbóreos y herbáceos, tanto costeros como continentales, se necesita una estrategia intersectorial para lograr un mejor conocimiento de los humedales de agua dulce en México. Una vez delimitada el área de humedales de agua dulce, es necesario establecer campañas de muestreo para evaluar los almacenes de carbono, sobre todo en las zonas pacífico norte, norte, centro noreste y península de Yucatán.

BASE DE DATOS

De acuerdo con la política del Programa Mexicano del Carbono, de libre acceso a las bases de datos asociadas al ciclo del carbono y sus interacciones y, con el fin de apoyar las síntesis nacionales del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres y acuáticos, la base de datos de este trabajo está disponible en http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/.

LITERATURA CITADA

- Adame, M., J. Kauffman, I. Medina, J. Gamboa, O. Torres, J. Caamal, M. Reza and J. Herrera-Silveira. 2013. Carbon stock of tropical coastal wetlands within the Karstic landscape of the Mexican Caribbean. *PLoS ONE* DOI: 10.1371/journal.pone.0056569.
- Adame, M., N. S. Santini, C. Tovilla, A. Vázquez-Lule, L. Castro and M. Guevara. 2015. Carbon stocks and soil sequestration rates of tropical riverine wetlands. *Biogeosciences* 12:3805-3818.
- Adhikari, S., R. Bajracharya and B. Sitaula. 2009. A review of carbon dynamics and sequestration in wetlands. *Journal of Wetlands Ecology* 2:42-46.
- Altort, A. and W. J. Mitsch. 2006. Methane flux from created riparian marshes: relationship to intermittent versus continuous inundation and emergent macrophytes. *Ecological Engineering* 28: 224-234.
- Campos-Cascaredo, A., M. E. Hernández, P. Moreno-Casasola, E. Cejudo-Espinosa, A. Robledo and D. M. Infante-Mata. 2011. Soil water retention and carbon pools in tropical forested wetlands and marshes of the Gulf of Mexico. *Hydrological Sciences Journal* 56:1388-1406.
- Cruz-Zamora, E. D. 2018. Caracterización fisicoquímica de suelos de humedales naturales y perturbados. Tesis en Ingeniero ambiental. Facultad de Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico de Álamo Temapache.
- Hernandez, M. E. and W. J. Mitsch. 2006. Influence of hydrologic pulses and vegetation on nitrous oxide emissions from created riparian marshes in Midwestern USA. *Wetlands* 26 (3) 862-877.
- Hernández, M. E. y P. Moreno-Casasola. 2018. Almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce en México. *Madera y Bosques* 24:1-12.
- Hernández, M. E. 2010. El papel de los suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana* 28:139-147.
- Hernández, M. E., A. Campos, J. L. Marín-Muñiz y P. Moreno-Casasola. 2016. Almacenes de carbono en selvas inundables, manglares, humedales herbáceos y potreros inundables. pp. 121-129. En: Moreno-Casasola, P. (ed.). *Servicios Ecosistémicos de las Selvas y Bosques Costeros de Veracruz*. INECOL - ITTO - CONAFOR - INECC.
- Hernández, M. E., A. Cristóbal, Cruz-Zamora E., Hernández A., Hernández-Sánchez, A. y P. Moreno-Casasola. 2018. Emisiones de gases de efecto invernadero en un gradiente de humedales costeros en Veracruz. Resúmenes de XVII y XXVIII Congreso de Ciencias Ambientales. Zacatecas Zacatecas, 11-15 de junio de 2018.
- Hernández, M. E., J. L. Marín-Muñiz and P. Moreno-Casasola. 2015. Comparing soil carbon pools and carbon gas fluxes in coastal forested wetlands and flooded grasslands in Veracruz, Mexico. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management* 11:5-16.
- Infante-Mata, D. 2011. Estructura y dinámica de las selvas inundables de la planicie costera central del Golfo de México. Tesis Doctoral. Doctorado en Ecología y Manejo de Recursos. Instituto de Ecología A.C., Xalapa, Veracruz.
- Infante-Mata, D. M., P. Moreno-Casasola and C. Madero-Vega. 2012. Litterfall of tropical forested wetlands of Veracruz in the coastal floodplains of the Gulf of Mexico. *Aquatic Botany* 98:1-11.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Fourth assessment report: synthesis report. Geneva: IPCC, 2007.
- Kauffman, J. B., H. Hernández-Trejo, M. C. Jesús-García, C. Heider and W. M. Contreras. 2016. Carbon stocks of mangroves and losses arising from their conversion to cattle pastures in the Pantanos de Centla, Mexico. *Wetlands Ecol. Manage.* 24:203-216.
- Kayranli, B., M. Scholz, A. Mustaf and A. Hedmark. 2010. Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: a critical review. *Wetlands* 30:111-124
- Marín-Muñiz, J. L. 2013. Balance neto de carbono en suelos de humedales costeros de agua dulce: implicaciones ecológicas y sociales. Doctorado en Ecología Tropical. Centro de investigaciones tropicales. Universidad Veracruzana. Veracruz, México.
- Marín-Muñiz, J. L., M. E. Hernández and P. Moreno-Casasola. 2014. Comparing soil carbon sequestration in coastal freshwater wetlands with various geomorphic features and plant communities in Veracruz, Mexico. *Plant Soil* 378:189-203.
- Marín-Muñiz, J. L., M. E. Hernández and P. Moreno-Casasola. 2015. Greenhouse gas emissions from coastal freshwater wetlands in Veracruz Mexico: Effect of plant community and seasonal dynamics. *Atmospheric Environment* 107:107-117.
- Mitsch, W. J. and J. Gosselink. 2007. *Wetlands*. 4th ed. John Wiley and Sons Inc. Nueva York 581 p.
- Moreno-Casasola, P., M. E. Hernández and A. Campos. 2017. Hydrology, soil carbon sequestration and water retention along a coastal wetland gradient in Alvarado Lagoon system, Veracruz Mexico. *Journal of Coastal Research* 77:104-115.
- Rojas-Oropeza, M., A. Ponce-Mendoza y N. Cabirol. 2016. Emisión de gases de efecto invernadero y uso de suelo en lagunas de Chastoc (Emiliano Zapata, Tabasco). pp. 267-279. En: Paz, F. y R. Torres (eds.) *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011*. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México.
- Salazar-Landero, A. 2013. Secuestro de Carbono en selvas y potreros inundables en las localidades de la Mancha y Jamapa, Veracruz. Tesis de Ingeniero Forestal. Facultad de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Zacapoaxtla.
- Vázquez-González, C., P. Moreno-Casasola, J. L. Fermán-Almada, M. E. Hernández, A. Campos and I. Espejel. 2017. Mangrove and freshwater wetland conservation through carbon offsets: a cost benefit analysis in the Alvarado Lagoon System Mexico. *Environmental Management* 59:274-290.
- Whiting, J. G. and J. P. Chanton. 2001. Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration. *Tellus* 53:521-528.

BASE DE DATOS DE VOLÚMENES DE AGUA Y SEDIMENTO EN SUBCUENCAS COSTERAS DE MÉXICO

WATER AND SEDIMENT VOLUME DATABASE IN MEXICO COASTAL SUB-BASINS

Fernando Paz-Pellat^{1†} y Víctor Salas-Aguilar²

¹ GRENASER, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México.

² Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Carretera Cuauhtémoc-Anáhuac Km 3.5, Ejido Cuauhtémoc, 31600 Cd. Cuauhtémoc, Chih.

[†] Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

RESUMEN

La estimación del escurrimiento y sedimentos en las cuencas costeras es un insumo básico para determinar los flujos tierra-océano. Los sedimentos se producen por la erosión de las cuencas hidrológicas, por lo que es necesaria su investigación, así como las tasas de entrega y de enriquecimiento. Los balances de los ciclos biogeoquímicos en tierra-atmósfera-océanos requieren de información de las cuencas hidrológicas, la cual generalmente no está disponible y es necesario estimarla a través de modelos. En este trabajo se desarrolló un modelo empírico en función de datos meteorológicos, topográficos y de uso del suelo y vegetación, el cual se calibró mediante el uso de datos hidrométricos disponibles en México. Los resultados muestran buena correlación para el caso de los volúmenes de agua, pero menor para los sedimentos. El modelo generado se aplicó a la base de datos, periodo 2003-2012, de subcuencas costeras de México, para obtener promedios a largo plazo, los cuales se incorporaron a una base de datos del país, puesta a disposición del público.

Palabras clave: erosión; ciclos biogeoquímicos; modelo empírico; flujos laterales; subcuencas no reguladas.

ABSTRACT

The estimation of runoff and sediments in the coastal basins is a basic input to determine the land-ocean flows. The sediments are produced by the erosion of the hydrological basins, so it is necessary to determine them, as well as delivery and enrichment rates. The balances of the biogeochemical cycles land-atmosphere-oceans require information from the hydrological basins, which is generally not available, so it is necessary the use of models. In this paper an empirical model was developed based on meteorological, topographic and land use data and vegetation, which was calibrated using hydrometric data available in Mexico. The results show good correlation for the case of water volumes, but less for sediments. The generated model was applied to the database, period 2003-2012, of coastal sub-basins of Mexico, to obtain the long-term averages, which were incorporated into a database of the country, made available to the public.

Key words: erosion; biogeochemical cycles; empirical model; lateral flows; unregulated sub-basins.

INTRODUCCIÓN

El transporte de sedimentos de las cuencas hidrológicas costeras hacia los océanos ha sido materia de estudio por varias décadas (Milliman y Meade, 1983; Jansson, 1988; Walling y Webb, 1987 y 1996; Syvitski *et al.*, 2003), en particular con relación a los balances del carbono (Schlesinger y Melack, 1981; Meybeck, 1982 y 1993; Hope *et al.*, 1994; Cole *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2017; Drake *et al.*, 2018). Las estimaciones del carbono orgánico e inorgánico, exportado por las cuencas costeras, cobra especial importancia en los últimos años en los balances globales de gases efecto invernadero, con valores estimados cada vez mayores (Ward *et al.*, 2017; Drake *et al.*, 2018). Aun cuando inicialmente se creía que las corrientes de agua eran conductos pasivos del carbono y otros componentes, la inclusión de los flujos hacia la atmósfera y la deposición de materiales durante su ruta al océano, se consideran muy importantes (Cole *et al.*, 2007; Chappell *et al.*, 2013). Desde esta perspectiva, es indispensable realizar estimaciones de los sedimentos y sus elementos (*i.e.* carbono) exportados al océano por los procesos continentales.

La erosión de los suelos de las cuencas hidrológicas es la fuente de sedimentos a la salida de éstas (Lal, 1995; Walling y Webb, 1996; Smith *et al.*, 2001; Chappell *et al.*, 2015). La producción de sedimentos generalmente se calcula mediante la tasa de entrega de sedimentos, $TES = \text{Sedimentos/Erosión}$ (Walling, 1983; USDA-SCS, 1984), por lo que es necesario estimar la erosión bruta en las cuencas, mediante enfoques de modelación, relaciones empíricas u otros (Starr *et al.*, 2000), como los modelos de erosión USLE (Wischmeier y Smith, 1978) y RUSLE (Renard *et al.*, 1991), que se usan en forma común (Smith *et al.*, 2001; Martínez-Méndez *et al.*, 2001; Polyakov y Lal, 2004; Ramírez-León y Aparicio, 2009). En términos de los elementos constitutivos de los sedimentos, se utiliza la tasa de enriquecimiento, $TE = \text{Elemento Sedimentos/Elemento Cuenca}$ (Walling, 1983), la cual es función del material fino erosionado transportado (Lal, 1995; Chappell *et al.*, 2013). La TES y TE pueden estimarse de las pérdidas del suelo por erosión (Starr *et al.*, 2000; Schiettecatte *et al.*, 2008; Chappell *et al.*, 2015), usando relaciones potenciales o por medio de variables relacionadas con los gastos de agua, área de la cuenca, topografía, clima, usos del suelo, suelos y litología, principalmente (Walling, 1983; USDA-SCS, 1984). Para poder estimar sedimentos, o sus elementos, es

necesario calcular, primero, la erosión de las cuencas y los elementos del suelo original o erosionado.

En la perspectiva del uso de estaciones hidrométricas a la salida de las cuencas, donde se mide el gasto (volumen/tiempo) de sedimentos (Q_s) y agua (Q), generalmente se obtiene un modelo potencial que relaciona ambos tipos de gastos: $Q_s = aQ^b$ (Leopold *et al.*, 1964; USDA-SCS, 1984), en donde los parámetros a y b son función del tipo de uso del suelo y vegetación (Dunne, 1979; Lal, 1985; Dedkov y Mozzherin, 1996), principalmente. En cuencas no instrumentadas, el gasto de sedimentos y volúmenes, puede estimarse con regresiones estadísticas en función del área de la cuenca, clima, topografía, litología, suelo, uso del suelo y vegetación (Anderson, 1954; Langbein y Schumm, 1958; Jansen y Painter, 1974; Ludwig y Probst, 1996; Syvitski *et al.*, 2003; Beusen *et al.*, 2005; Muñoz-Salinas y Castillo, 2013 y 2015).

En el caso de México, las estimaciones de flujos laterales tierra-océano son escasas y a escala local o regional (Pou-Alberú y Pozos-Salazar, 1992; Smith *et al.*, 2008), por lo que es necesario desarrollar una base de datos con estimaciones de sedimentos a escala de país, como primera aproximación para la realización de balances de materia (*i.e.* carbono). Las corrientes de agua de México se han caracterizado en términos generales (Hudson *et al.*, 2005; Benke, 2009; Alcocer y Bernal-Brooks, 2010) para diferentes aplicaciones. En algunos casos se realizaron estimaciones de sedimentos en vasos de almacenamiento o presas, con información de batimetrías y modelos de erosión (García-Aragón *et al.*, 2007; Campos-Aranda, 2012; Estrada-Gutiérrez *et al.*, 2015), pero los resultados son difíciles de generalizar a escala de país y subcuencas costeras.

En este trabajo se presentan estimaciones de volúmenes de sedimentos y agua en todas las subcuencas costeras de México, promedio del periodo 2003-2012, utilizando un modelo de regresión estadística multivariada que considera variables climáticas, topográficas y de uso del suelo y vegetación. La base de datos que se generó, se documentó y está disponible en un sitio de descarga en internet (http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/).

MATERIALES Y MÉTODOS

Aun cuando existen estimaciones de la erosión hídrica a nivel de país (Bolaños *et al.*, 2016), la información es cualitativa, por lo que su uso se limita a la estimación del transporte de sedimentos tierra-

océano. La alternativa, para su uso en el desarrollo de modelos empíricos para estimaciones en cuencas no instrumentadas, es el empleo de las bases de datos de estaciones hidrométricas, en donde existan datos de gastos de sedimentos y agua.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tiene bases de datos diarias de mediciones de gastos de agua y sedimentos (CONAGUA, 2013), las cuales pueden utilizarse en ejercicios de modelación hidrológica.

Aunque también existen datos hidrométricos de la Comisión Federal de Electricidad (de la Peña *et al.*, 1990), éstos no estuvieron disponibles para su uso en el ejercicio que se presenta en este trabajo. La Figura 1 muestra las subcuencas hidrológicas (n=287) con datos de sedimentos en México de la base de datos BANDAS (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales) de la CONAGUA (2013).

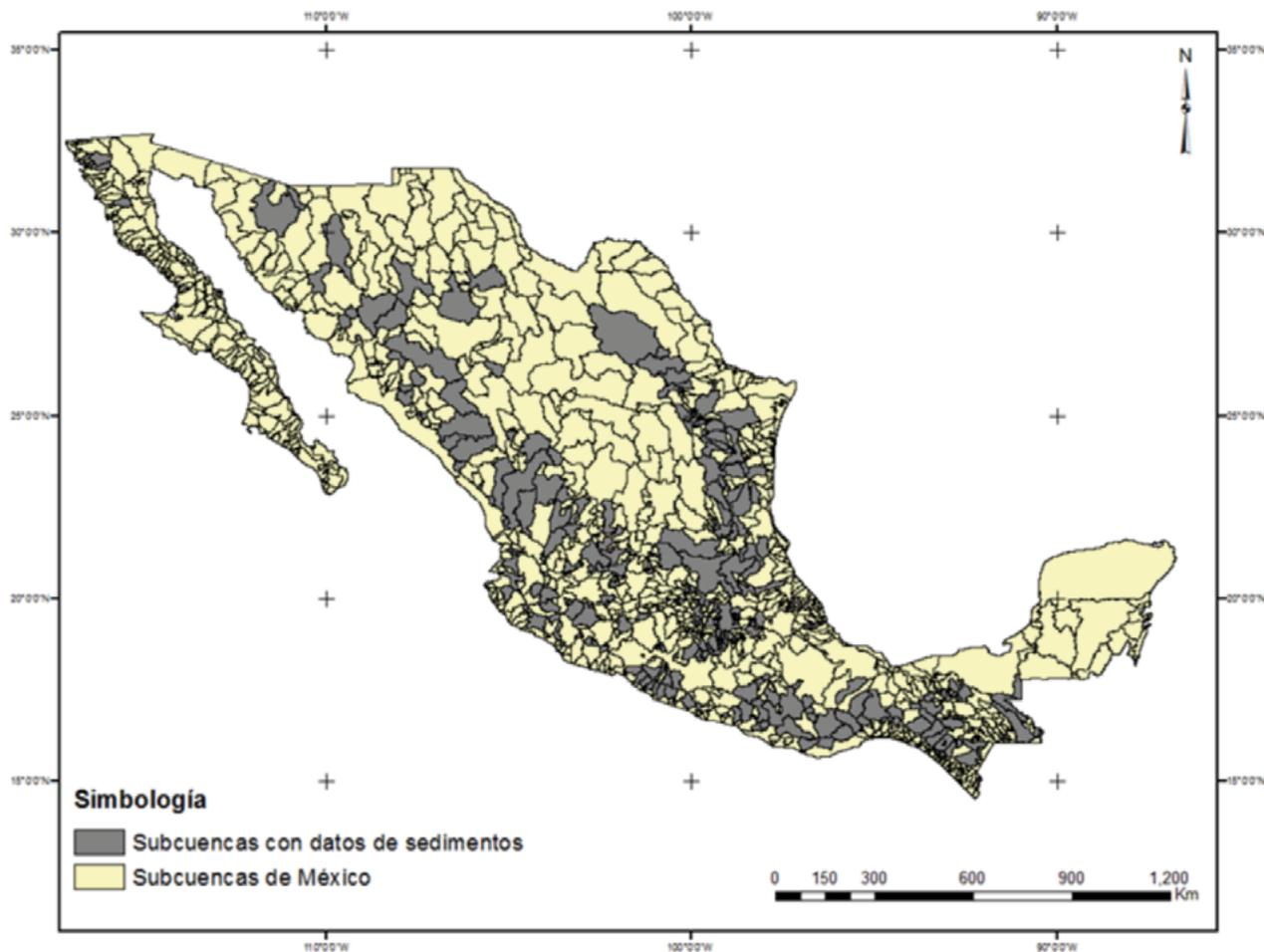


Figura 1. Subcuencas de México con datos de sedimentos.

Las subcuencas costeras con datos de información de sedimentos se muestran en la Figura 2 y corresponde

a 23 subcuencas, aun cuando solo 17 contienen información anual por 10 o más años.



Figura 2. Subcuencas costeras de México con datos de sedimentos.

La base de datos del BANDAS que se analizó corresponde al trabajo de Salas-Aguilar y Paz-Pellat (2018a), la cual utiliza información diaria y subcuencas delimitadas para cada estación hidrométrica, en donde se han estimado variables meteorológicas como precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ET_o) por el método de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), además de los usos del suelo y vegetación asociados a los mapas 1:250 000 del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) y variables topográficas (altura mínima o H_{min}, altura máxima o H_{max} y rango de alturas o H_{rango}). La información meteorológica proviene, también, de la base de datos generada por Salas-Aguilar y Paz-Pellat (2018b).

Para realizar estimaciones del promedio de largo plazo de los volúmenes de sedimentos y agua en las subcuencas costeras de México, se analizaron

los promedios de subcuencas con datos anuales completos y de registros mayores o iguales a 10 años, lo que resultó en un total de 146. La base de datos usada en la modelación empírica consistió de mediciones de volúmenes de agua y sedimentos, de variables asociadas Prec, ET_o, área de la subcuenca (A), H_{min}, H_{max}, H_{rango} y coberturas (%) de usos del suelo y vegetación, descritas en Salas-Aguilar y Paz-Pellat (2018b).

Los promedios de largo plazo de los volúmenes de agua y sedimentos, periodo 2003-2012, se consideraron como asociados al balance hídrico $P = Q + ET$, con $ET =$ evapotranspiración real, donde el almacenamiento de agua en el suelo es despreciable, de acuerdo con los diagramas tipo Budyko (1974). Las coberturas de los tipos de suelo y vegetación en las subcuencas instrumentadas se plantearon en función del modelo (Fu, 1981; Zhang *et al.*, 2004):

$$\frac{Q}{P} = \left[1 + \left(\frac{ET_o}{P} \right)^w \right]^{\frac{1}{w}} - \frac{ET_o}{P} \tag{1}$$

donde ET_o es la evapotranspiración potencial y w (2 a 4) es un parámetro relacionado con las características de la cuenca.

Para las clases de uso del suelo y vegetación de los mapas del INEGI se estimó un valor ponderado de w :

$$w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \tag{2}$$

donde p_i es el porcentaje de cobertura aérea de la subcuenca por la clase de uso del suelo y vegetación i .

Para estimar el valor del parámetro w en función de las clases de uso del suelo y vegetación (*sensu* INEGI), se analizaron las bases de datos de cuencas

hidrográficas mundiales de Zhang *et al.* (1999 y 2001) y se ajustó w a las relaciones P-Q, Figura 3.

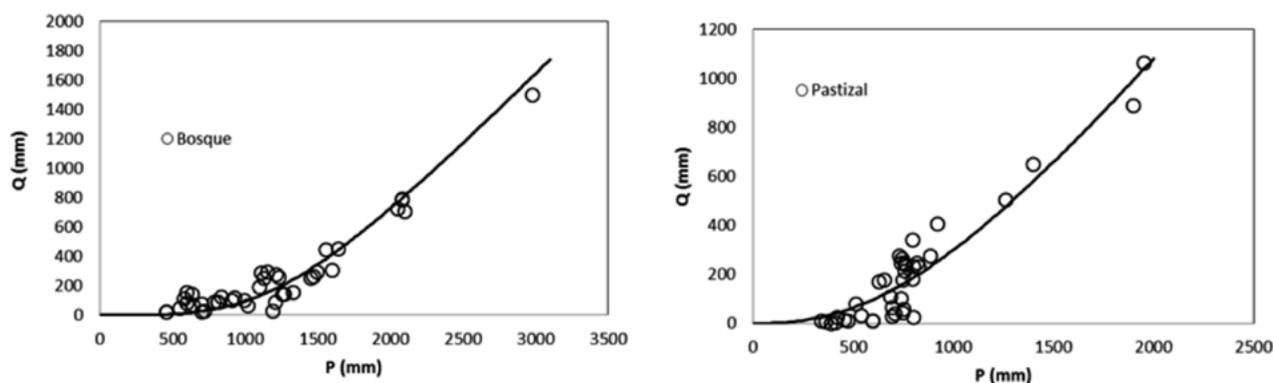


Figura 3. Ajuste del modelo de Fu a cuencas con vegetación dominada por bosque y pastizal.

En el Cuadro 1 se muestran los ajustes obtenidos en los ajustes del modelo de Fu, junto con su error (RECM = Raíz del Error Cuadrático Medio).

Cuadro 1. Parámetro w para diferentes usos del suelo en cuencas.

Uso del suelo	w	RECM
Bosque	3.76	77.3
Vegetación mixta (pastizal y bosque)	2.46	70.8
Pastizal y cultivo	2.93	59.7
Pastizal	2.42	77.4
Vegetación mixta (otra)	2.89	60.9

Los valores utilizados de w_i para las clases de uso del suelo y vegetación i definidas en las subcuencas (Salas-Aguilar y Paz-Pellat, 2018b) se observan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Valor de w para las clases de uso del suelo y vegetación.

Uso del Suelo y Vegetación	Parámetro w
Cuerpos de agua	2.1
Área agrícola	2.3
Sin vegetación	2.0
Bosque	4.0
Matorral	2.5
Pastizal	2.4
Selva húmeda	4.0
Selva seca	3.5
Vegetación hidrófila	3.5
Zona urbana	2.2

RESULTADOS

Aunque la base de datos de subcuencas costeras que se muestra en la Figura 2 no es representativa de la escala nacional, se utilizó para realizar un proceso de regresión estadística multivariada para estimar

los volúmenes de agua (VEsc) y sedimentos (VSed), después de eliminar la subcuenca con identificador 24 150 que tiene un patrón anómalo (valor muy pequeño de gastos de sedimentos en relación al valor muy alto de gastos de agua) y corresponde a la subcuenca de mayor tamaño (21 520.32 km²), para obtener los modelos:

$$\ln(\text{VEsc}) = -33.5 + 0.893 \ln(A) + 3.89 \ln(P) + 1.097 (E_{To}/P) + 1.622 \ln(H_{rango}) - 0.275 \ln(w) \quad (3)$$

con $R^2 = 0.881$ y error cuadrático e.e. = 0.397, donde VEsc está en miles de m³, A en km², P en mm, ETo en mm, Hrango en m y w es adimensional.

$$\ln(\text{VSed}) = -39.22 + 0.832 \ln(A) + 3.953 \ln(P) + 1.921 (E_{To}/P) + 1.373 \ln(H_{rango}) - 0.368 \ln(w) \quad (4)$$

con $R^2 = 0.618$ y error cuadrático e.e. = 0.717, donde VSed está en miles de m³.

Para el caso del uso de la base de datos nacional de subcuencas con sedimentos ($n = 146$), los modelos obtenidos fueron:

$$\ln(\text{VEsc}) = -20.78 + 1.033 \ln(A) + 3.438 \ln(P) + 1.172 (E_{To}/P) + 0.22 \ln(H_{rango}) + 0.3209 \ln(w) \quad (5)$$

con $R^2 = 0.872$ y error cuadrático e.e. = 0.682

$$\ln(\text{VSed}) = -26.91 + 0.776 \ln(A) + 2.968 \ln(P) + 2.422 (E_{To}/P) + 0.717 \ln(H_{rango}) - 0.218 \ln(w) \quad (6)$$

con $R^2 = 0.642$ y error cuadrático e.e. = 1.008.

Los coeficientes de correlación y el error cuadrático presentados en los modelos corresponden a la escala logarítmica.

El uso del modelo de las subcuencas costeras produce subestimaciones marcadas en relación con el modelo de las subcuencas nacionales, con algunos casos de sobreestimaciones también marcadas.

Por representatividad nacional, se seleccionó el modelo de las subcuencas nacionales para generar una base de datos de estimaciones de volúmenes de agua y sedimentos de todas las subcuencas costeras, Figura 3.

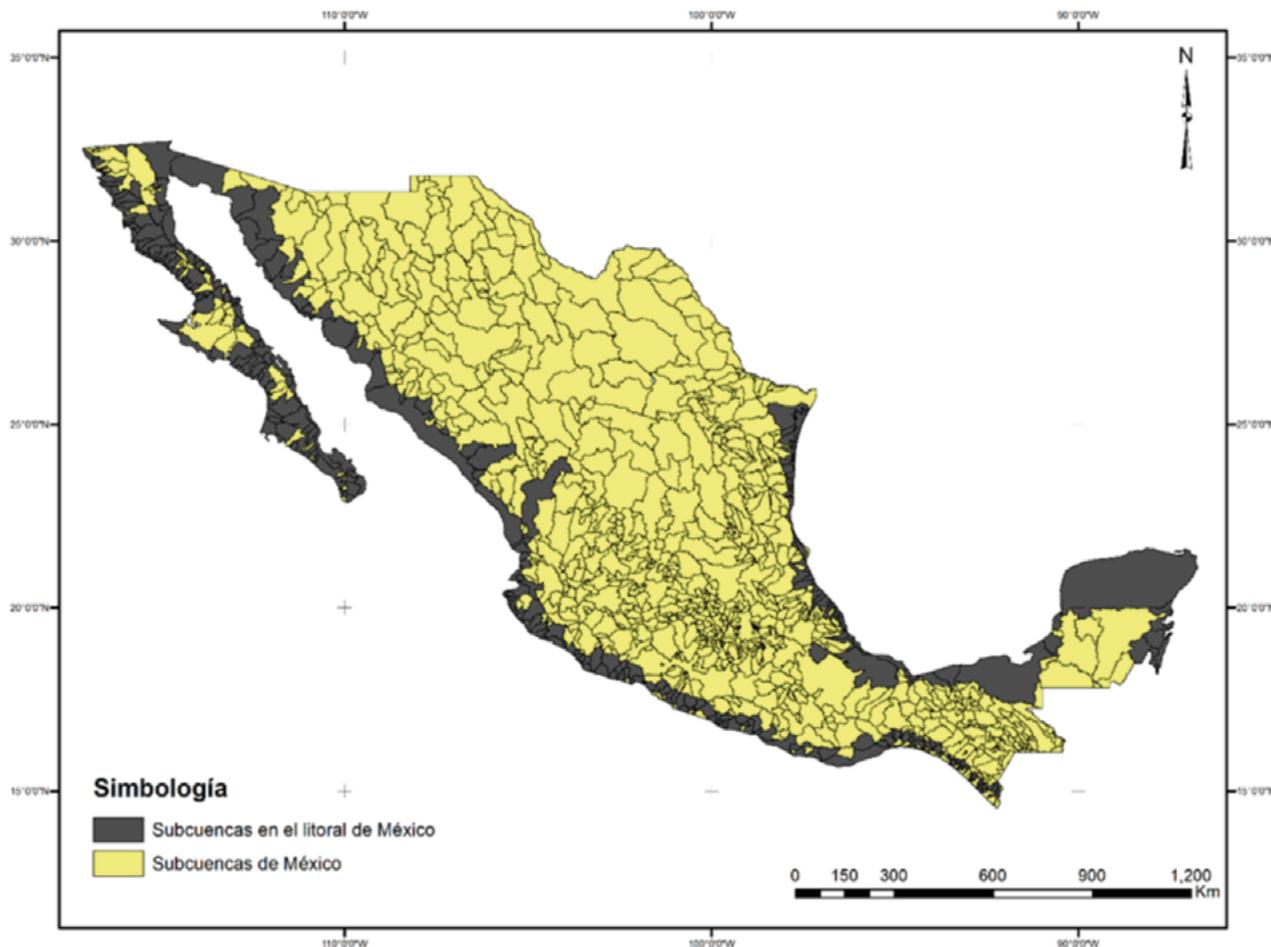


Figura 3. Subcuencas pertenecientes al litoral mexicano.

El Cuadro 3 muestra la estructura de la base de datos generada para todas las subcuencas costeras de México, para el promedio del período 2003-2012.

Cuadro 3. Estructura de la base de datos generada.

Campo	Descripción
Subcuenca	Identificador de la subcuenca
Nombre	Nombre de la subcuenca/río
Estado	Estado de la República
Area	Área de la subcuenca (km ²)

Campo	Descripción
ETo	Evapotranspiración potencial (mm)
P	Precipitación (mm)
Hrango	Rango de alturas (Hmáx - Hmín) en la subcuenca, en m
W	Parámetro adimensional
VEsc	Volumen de escurrimiento en la subcuenca (miles m ³)
VSed	Volumen de sedimento en la subcuenca (miles m ³)

DISCUSIÓN

La base de datos generada debe considerarse como una primera estimación de los volúmenes promedio de agua escurrida y descarga de sedimentos de las subcuencas costeras de México, para el período 2003-2012. En el caso de los volúmenes de agua el modelo desarrollado presentó una buena correlación, pero en el de sedimentos, la correlación es relativamente buena.

Es necesario convertir los datos de los volúmenes de sedimentos a masa (Mg) usando las densidades de los sedimentos, dato que no está disponible en la base de datos del BANDAS. A pesar de ello, es posible realizar una estimación del carbono orgánico total (COT) con la masa de los sedimentos, suponiendo un porcentaje de la masa del sedimento (*i.e.* $\approx 2\%$, Stallard, 1998; Lal, 2003 y 2006), que está en un intervalo de 1.6 a 6% (Meybeck, 1982).

Para mejorar la modelación de balances de flujos hacia el océano, es necesario considerar la integración de los ciclos biogeoquímicos e hidrológicos (Cole *et al.*, 2007; Aufdenkampe *et al.*, 2011; Ward *et al.*, 2017), para poder analizar los efectos de las perturbaciones antropogénicas (Aufdenkampe *et al.*, 2011; Regnier *et al.*, 2013).

Un aspecto importante a considerar en las estimaciones de los volúmenes de sedimento y agua es la regulación de las corrientes de agua por presas o vasos de almacenamientos aguas arriba de la localización de las estaciones hidrométricas, ya que alteran los patrones hidrológicos de las cuencas.

CONCLUSIONES

Las estimaciones de los volúmenes de agua y sedimentos de las subcuencas costeras de México pueden considerarse como una primera aproximación

para realizar balances de masa de los flujos tierra-océano. Los modelos desarrollados se generaron en función de la información disponible, pero pueden mejorarse al incorporar nuevas variables.

Es necesario continuar con los esfuerzos de síntesis y modelación de los flujos laterales tierra-océano para poder realizar balances de los ciclos biogeoquímicos del país, así como para contribuir a los balances regionales y globales.

BASE DE DATOS

En seguimiento a la política del Programa Mexicano del Carbono de libre acceso a las bases de datos asociadas al ciclo del carbono y sus interacciones, así como en soporte de las síntesis nacionales del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres y acuáticos, la base de datos de este trabajo está disponible en http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/.

LITERATURA CITADA

- Alcocer, J. and F. Bernal-Brooks. 2010. Limnology in Mexico. *Hydrobiologia* 644:15-68.
- Anderson, H. W. 1954. Suspended sediment discharge as related to streamflow, topography, soil and land use. *Trans. AGU* 35:268-281.
- Aufdenkampe, A. K., E. Mayorga, P. A. Raymond, J. M. Melack, S. C. Doney, S. R. Alin, R. E. Aalto and K. Yoo. 2011. Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. *Coupled Biogeochemical Cycles* 9:53-60.
- Benke, A. C. 2009. Streams and rivers of North America: western, northern and Mexican basins. pp. 425-437. *In: Likens, G. E. (ed.) Encyclopedia of Inland Waters. Elsevier.*
- Beusen, A. H. W., A. L. M. Dekkers, A. F. Bouwman, W. Ludwig and J. Harrison. 2005. Estimating of global river transport of sediments and associated particulate C, N, and P. *Global Biogeochemical Cycles* DOI:10.1029/2005GB002453.

- Bolaños, M. A., F. Paz, C. O. Cruz, J. A. Argumedo, V. M. Romero y J. C. de la Cruz. 2016. Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana* 34:271-288
- Budyko, M. I. 1974. *Climate and Life*. Academic Press, Orlando, Florida. 508 p.
- Campos-Aranda, D. F. 2012. Resultados de 35 batimetrías de la región centro-noreste de México, según el diagrama universal de sedimentación en embalses de Zhide Zhou. *Tecnología y Ciencia del Agua* 3:163-173.
- Chappell, A., J. Baldock and J. Sanderman. 2015. The global significance of omitting soil erosion from soil organic cycling schemes. *Nature Climate Change* DOI:10.1038/NCLIMATE2829.
- Chappell, A., N. P. Webb, H. Butler, C. Strong, G. H. McTainsch, J. F. Leys and R. Viscarra Rossel. 2013. Soil organic carbon dust emission: an omitted global source of atmospheric CO₂. *Global Change Biol.* 19:3238-3244.
- Cole, J. J., Y. Prairie, N. Caraco, W. McDowell, L. Tranvik, R. Striegl, C. M. Duarte, P. Kortelainen, J. A. Downing, J. J. Middelburg and J. Melack. 2007. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems* 10:171-184.
- CONAGUA. 2013. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Consulta de datos hidrométricos, de presas y sedimentos. Comisión Nacional del Agua, México. www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/contenido/documentos/portada%20bandas.htm (Consulta: 15 de septiembre de 2015).
- de la Peña, R., H. Hernández, G. J. Hernández, V. R. Islas y R. Terrés. 1990. La hidrometeorología en la Comisión Federal de Electricidad. *Ingeniería Hidráulica en México* Sep-Dic:31-42.
- Dedkov, A. P. and V. I. Mozzherin. 1996. Erosion and sediment yield on the Earth. pp. 29-33. *In: Walling, D. E. and B. W. Webb. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996. IAHS Publ. No. 236.*
- Drake, T. W., P. A. Raymond and R. G. M. Spencer. 2018. Terrestrial carbon inputs to inland waters: a current synthesis of estimates and uncertainty. *Limnology and Oceanography Letters* 3:132-142.
- Dunne, T. 1979. Sediment yield and land use in tropical catchments. *Journal of Hydrology* 42:281-300.
- Estrada-Gutiérrez, G., H. Silva-Hidalgo, M. L. Villalba, F. Astorga-Bustillos y B. Franco-Estrada. 2015. Tasa de acumulación de sedimentos en embalses del río Conchos, Chihuahua, México. 1er Congreso Iberoamericano sobre Sedimentos y Ecología. Querétaro, México 21-24 julio 2015. 8 p.
- Fu, B. P. 1981. On the calculation of the evaporation from land Surface. *Sci. Atmos. Sin.* 51:23-31.
- García-Aragón, J. A., E. Quentin, C. Díaz-Delgado and J. R. Hunt. 2007. Watershed level analysis of sediment filling in a Mexican highland reservoir. *Limnetica* 26:209-218.
- Hargreaves, G. H and Z. A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture* 1:96-99.
- Hope, D., M. Billett and M. Cresser. 1994. A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes. *Environmental Pollution* 84:301-324.
- Hudson, P., D. A. Hendrickson, A. C. Benke, A. Varela-Romero, R. Rodiles-Hernández and W. L. Minckley. 2005. Rivers of Mexico. pp. 171-182. *In: Benke, A. C. and C. E. Cushing (eds.). Rivers of North America. Elsevier Academic Press, San Diego, CA.*
- Jansen, I. M. L. and R. B. Painter. 1974. Predicting sediment yield from climate and topography. *Journal of Hydrology* 21:371-380.
- Jansson, M. B. 1988. A global survey of sediment yield. *Geografiska Annaler* 70:81-98.
- Lal, R. 1985. Soil erosion and sediment transport research to tropical Africa. *Hydrological Sciences Journal* 30:239-256.
- Lal, R. 1995. Global soil erosion by water and carbon dynamics. pp. 131-142. *In: Lal, R., J. Kimble, E. Levine and B. A. Stewart (eds.). Soil Management and Greenhouse Effect. CRC/Lewis. Boca Raton, FL, USA.*
- Lal, R. 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environ. Int.* 29:437-450.
- Lal, R. 2006. Influence of soil erosion on carbon dynamics in the world. pp 23-35. *In: Roose, E. J., R. Lal, C. Feller, B. Barthes and B. A. Stewart (eds). Soil erosion and carbon dynamics. Adv Soil Sci CRC. Taylor & Francis, Boca Raton, Florida.*
- Langbein, W. B. and S. A. Schumm. 1958. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Trans. AGU* 39:1076-1084.
- Leopold, L. B., M. G. Wolman and J. P. Miller. 1964. *Fluvial Processes in Geomorphology*. Freeman, San Francisco, CA.
- Li, M., C. Peng, M. Wang, W. Xue, K. Zhang, K. Wang, G. Shiy and Q. Zhu. 2017. The carbon flux of global rivers: A re-evaluation of amount and spatial patterns. *Ecological Indicators* 80:40-51.
- Ludwig, W. and J. L. Probst. 1996. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles* 10:23-41.
- Martínez-Méndez, R. López Martínez y E. Hernández Fuentes. 2001. Relación sedimentos – erosión en la cuenca alta del Papaloapan. XI Congreso nacional de Irrigación. Guanajuato, México 19-21/09/2001. 7 p.
- Meybeck, M. 1982. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science* 282:401-450.
- Meybeck, M. 1993. Riverine transport of atmospheric carbon: sources, global typology and budget. *Water, Air, and Soil Pollution* 70:443-463.
- Milliman, J. D. and R. H. Meade. 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Geology* 91:1-21.



- Muñoz-Salinas, E. and M. Castillo. 2013. Sediment and water discharge assessment on Santiago and Pánuco rivers (central Mexico): the importance of topographic and climate factors. *Geografiska Annaler. Series A, Physical geography*. DOI:10.1111/geoa.12007.
- Muñoz-Salinas, E. and M. Castillo. 2015. Streamflow and sediment load assessment from 1950 to 2006 in the Usumacinta and Grijalva Rivers (Southern Mexico) and the influence of ENSO. *Catena* 127:270-278.
- Polyakov, V. O. and R. Lal. 2004. Soil erosion and carbon dynamics under simulated rainfall. *Soil Science* 169:590-599
- Pou-Alberú, S. y G. Pozos-Salazar. 1992. Cantidad de sedimento drenado hacia la costa del Pacífico en el Noroeste de Baja California, México. *Ciencias Marinas* 18:125-141.
- Ramírez-León, J. M. y J. Aparicio. 2009. Estimación de producción de sedimentos en cuencas. Aplicación al río Apulco, México. *Ingeniería Hidráulica en México*. 24:145-157.
- Regnier, P., P. Friedlingstein, P. Ciais, F. Mackenzie, N. Gruber, I. Janssens, G. Laurelle, R. Lauerwald, S. Luysaert, A. Andersson, S. Arndt, C. Arnosti, A. Borges, A. Dale, A. Gallego-Sala, Y. Goddérís, N. Goossens, J. Hartmann, C. Heinze, T. Ilyina, F. Joss, D. Larowe, J. Leifeld, F. Meysman, G. Munhoven, P. Raymond, R. Spahni, P. Suntharalingam and M. Thullner. 2013. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nature Geoscience* DOI: 10.1038/ngeo1830.
- Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies and J. A. Porter. 1991. RUSLE: revised universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv.* 46:30-33.
- Salas-Aguilar, V. M. y F. Paz-Pellat. 2018a. Base de datos para la estimación de sedimentos en subcuencas de México. *Elementos para Políticas Públicas* 2:1-8.
- Salas-Aguilar, V. M. y F. Paz-Pellat. 2018b. Desarrollo de una base de datos climática nacional anual, 1989-2012: resolución 250 m. *Elementos para Políticas Públicas* 2:1-13.
- Schiettecatte, W., D. Gabriels, W. M. Cornelis and G. Hoffman. 2008. Enrichment of organic carbon in sediment transport by interrill and rill erosion processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:50-55.
- Schlesinger, W. H. and J. M. Melack. 1981. Transport of organic carbon in the world's rivers. *Tellus* 33:172-187.
- Smith, S. V., S. E. Ibarra-Obando, V. Díaz-Castañeda, F. J. Aranda-Manteca, J. D. Carriquiry, B. N. Popp and O. González-Yajimovich. 2008. Sediment organic carbon in Todos Santos Bay, Baja California, Mexico. *Estuaries and Coasts* 31:719-727.
- Smith, S. V., W. H. Renwick, R. B. Buddemeier and C. J. Crossland. 2001. Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States. *Global Biogeochemical Cycles* 15:697-707.
- Stallard, R. F. 1998. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: coupling weathering and erosion to carbon burial. *Global Biogeochemical Cycles* 12:231-257.
- Starr, G. C., R. Lal, R. Malone, D. Hothorn, L. Owens and J. Kimble. 2000. Modeling soil carbon transport by water erosion processes. *Land Degradation and Development* 11:83-91.
- Syvitski, J. P. M., S. D. Peckham, R. Hilberman and T. Mulder. 2003. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective. *Sedimentary Geology* 162:5-24.
- USDA-SCS. 1984. National Engineering Handbook. Section 3: Sedimentation. Chapter 6: Sediment sources, yields, and delivery ratios. pp. 6.1-6.14. *In: Soil Conservation Service and U.S. Dept. Agric. National Engineering Handbook*.
- Walling, D. E. 1983. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology* 65:209-237.
- Walling, D. E. and B. W. Webb. 1987. Material transport by the world's rivers: evolving perspectives. *Water for the Future: Hydrology in Perspective*. pp. 313-329. *In: Rodda, J. C. and N. C. Matalas (eds.). Proc. Rome Symp., April 1987. IAHS Publ. No. 164.*
- Walling, D. E. and B. W. Webb. 1996. Erosion and sediment yield: a global overview. pp. 3-19. *In: Walling, D. E. and B. W. Webb. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. Proc. Exeter Symp., July 1996. IAHS Publ. No. 236. Press, Wallingford, UK.*
- Ward, N. D., T. Bianchi, P. Medeiros, M. Seidel, J. Richey, R. Keil and H. Sawakuchi. 2017. Where carbon goes when water flows: carbon cycling across the aquatic continuum. *Frontiers in Marine Science* 4:1-27.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *USDA Handbook 537. U.S. Gov. Print. Off. Washington, D.C.* 57 p.
- Zhang, L., K. Hickel, W. R. Dawes, F. H. S. Chiew, A. W. Western and P. R. Briggs. 2004. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resour. Res.* DOI:10.1029/2003WR002710.
- Zhang, L., W. R. Dawes and G. R. Walker. 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. *Technical Report 99/12. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. CSIRO Land and Water. Australia* 35 p.
- Zhang, L., W. R. Dawes and G. R. Walker. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale, *Water Resour. Res.* 37: 701-708.

BASE DE DATOS DE LA EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS EN MÉXICO

DATABASE OF THE EVALUATION OF THE DEGRADATION OF SOILS IN MEXICO

Fernando Paz-Pellat^{1†} y Carlos A. Ortiz-Solorio²

¹ GRENASER, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, CP 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México.

² Posgrado en Edafología, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, CP 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México.

† Autor para correspondencia: ferpazpel@gmail.com

RESUMEN

En el estudio para la evaluación de la degradación de los suelos en México de SEMARNAT-CP del 2002, se utilizó una base de datos de 4583 muestras de suelo, procedentes de todo el país. Las muestras se colectaron a una profundidad de 20 cm. Para los inventarios nacionales de gases efecto invernadero asociados al carbono, la información sobre el contenido de materia orgánica del suelo (MOS) proveniente de muestreos sistemáticos es un insumo crítico. En estos ejercicios, es necesario contar con datos de la MOS, densidad aparente y fragmentos gruesos (> 2 mm) para poder estimar densidades de carbono. En la base de datos de SEMARNAT-CP solo hay 1843 mediciones de la densidad aparente y los fragmentos gruesos no se midieron, por lo que es necesario que, en el futuro, se midan estas variables en cada muestreo de suelos que se realice. En este trabajo se documenta y analiza la base de datos SEMARNAT-CP, la cual se encuentra disponible para el público en general (http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/).

Palabras clave: *carbono orgánico del suelo; densidad aparente; fragmentos gruesos; almacenes de carbono; inventarios nacionales.*

ABSTRACT

The study for the evaluation of the soil degradation in Mexico of SEMARNAT-CP of 2002, used a database of 4583 soil samples from all over the country. The samples were collected at a depth of 0 to 20 cm. The information of soil samples that include organic matter data (SOM) is a critical input for national inventories of greenhouse gases associated with carbon. In these exercises, in addition to having the results of the SOM analysis, it is necessary to know the soil bulk density and the coarse fragments (> 2 mm) fraction to estimate soil carbon densities. In the database of SEMARNAT-CP there were only 1843 measurements of bulk density and no coarse fragments were measured, so in the future it is necessary to have all the measured variables. In this work the aforementioned database is documented, which can be consulted by the general public (http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/).

Key words: *organic soil carbon; bulk density; coarse fragments; carbon stocks; national inventories.*

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica del suelo (MOS) es un ingrediente crítico en la estabilidad de los agregados del suelo, su fertilidad y propiedades hidráulicas, por lo que el conocimiento de la distribución espacial de la MOS permite focalizar acciones de intervención para preservarla o restaurarla (Paz *et al.*, 2016).

El carbono orgánico del suelo (COS) es el principal almacén en los ecosistemas terrestres (Eswaran *et al.*, 1993; Batjes, 1996; Hiederer y Köchy, 2011; FAO e ITPS, 2015) y se relaciona estrechamente con las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) y el cambio climático. El COS equivale aproximadamente a dos a tres veces el almacén de la biomasa (Lal, 2004), por lo que la pérdida del COS contenido en los ecosistemas terrestres puede causar grandes emisiones de GEI como consecuencia de perturbaciones antropogénicas.

En México se han realizado varios ejercicios de mapeo del COS a escala nacional (Segura *et al.*, 2004; Balbontín *et al.*, 2009; Paz *et al.*, 2016; Guevara *et al.*, 2018), considerando diferentes profundidades, con el fin de evaluar el almacén de carbono del suelo. En estos ejercicios de evaluación del COS a escala nacional se ha utilizado la base de datos de perfiles de suelo del INEGI (1998, 2004), documentadas en Paz-Pellat y Velázquez-Rodríguez (2018); así como los muestreos asociados a la evaluación de la degradación de los suelos de México (SEMARNAT-CP, 2002). Esta última base de datos no ha sido documentada y puesta a disposición

del público, por lo que es importante realizar esta tarea, que será de utilidad para estudios a futuro.

De acuerdo con lo anterior, en el presente manuscrito se analiza y documenta la base de datos de la evaluación de la degradación de los suelos en México de SEMARNAT-CP (2002), la cual puede consultarse en el sitio que se describe al final del trabajo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La base de datos del estudio de la degradación de los suelos de México de SEMARNAT-CP (2002), consta de 4583 muestras colectadas en pozos de dimensiones de 20 cm x 20 cm x 20 cm, distribuidas en el territorio nacional (Figura 1). Para la elaboración de los inventarios nacionales de gases efecto invernadero (INEGEI), el IPCC (2003 y 2006) recomienda, en lo referente a las estimaciones del COS requeridas para calcular el suelo como fuente de los mismos, recolectar muestras a la profundidad de 0 a 30 cm. En el caso de México, la base de SEMARNAT-CP se usó para elaborar la tercera comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (de Jong *et al.*, 2006 y 2010). En dicho documento, la profundidad original de las muestras de suelo (0 a 20 cm) se extendió a 30 cm, para lo cual se usaron relaciones empíricas por tipo de suelo. La misma base se ha utilizado para caracterizar las estructuras de variación espacial del COS en México (Segura *et al.*, 2004; Paz *et al.*, 2008).



Figura 1. Distribución de las muestras de suelos del estudio de SEMARNAT-CP (2002).

Los protocolos de muestreo, campo y laboratorio de la base de datos de SEMARNAT-CP, fueron los recomendados por la norma oficial mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT (2002) y van Reeuwijk (1999). Una limitante de esta base de datos, es que solo se realizaron 1843 mediciones de la densidad aparente (DA), que corresponden a las muestras que

contaban con terrones, dato requerido para calcular densidades de carbono cuando los resultados de carbono están expresados en concentración (%). Otra variable no medida fue la fracción de fragmentos gruesos (> 2 mm), lo cual permite estimar el COS en forma correcta (Poeplau *et al.*, 2017). Los modelos empleados fueron los siguientes:

$$COS = (DA)(p)(COSp) \left(1 - \frac{FG}{100}\right) \quad (1)$$

$$COS = (DA_{ff})(p)(COSp) \left(1 - \frac{FG_v}{100}\right) \quad (2)$$

donde el COS está expresado en Mg C ha⁻¹, la DA es la densidad aparente del suelo total (Mg m⁻³), p es la profundidad del suelo (cm), FG es el porcentaje de la masa de fragmentos gruesos (> 2mm), COSp es la concentración de carbono (%) de la fracción ≤ 2 mm del suelo (fracción fina), DA_{ff} se refiere a la densidad aparente de la fracción fina y FG_v al porcentaje en volumen de los fragmentos gruesos.

Las estimaciones de la densidad de carbono que se hacen sin considerar la FG y DA generan sobreestimaciones y deben reevaluarse (Poeplau *et al.*, 2017). de Jong *et al.* (2006 y 2010) utilizaron estimaciones de la DA y una aproximación a la estimación de FG, para lo cual estimaron la FG_v sin usar DA_{ff}, tal como se muestra en la relación (2), por lo que el COS está sobreestimado.

La MOS medida por el método de Walkley and Black (SEMARNAT, 2002) solo mide aproximadamente 76% de ésta, por lo que es necesario ajustarla por un factor empírico para estimar la MOS total. Adicionalmente, se sabe que la MOS humificada contiene, en promedio, 58% de C en su estructura. Por lo que, para estimar

el C contenido en la MOS, es preciso multiplicar su valor por el factor de conversión 0.58. Padilla *et al.* (2012) verificaron que dicho factor empírico coincide con los resultados de COS obtenidos al medir el COS empleando autoanalizadores (TOC), con los generados mediante el método de Walkley and Black y modificados por los factores empíricos indicados.

RESULTADOS

En el Cuadro 1 se muestra la estructura de la base de datos de los muestreos de suelos de la evaluación de la degradación de los suelos de SEMARNAT-CP (2002).

Cuadro 1. Estructura de la base de datos de SEMARNAT-CP

Campo	Descripción	Tipo	Unidades
ID	Identificador de la muestra	Numérico	Número entero
Longitud	Localización geográfica: longitud	Numérico	Grados con decimales
Latitud	Localización geográfica: latitud	Numérico	Grados con decimales
pH	Reacción del suelo, método del potenciómetro, relación con agua 1:2.5	Numérico	Número real
MO	Materia orgánica, método de Walkley y Black	Numérico	%
CE	Conductividad eléctrica del extracto de suelo 1:5, método del puente de Wheatstone	Numérico	dS m ⁻¹
DA	Densidad aparente, método del terrón	Numérico	Mg m ⁻³

En el caso de información faltante en la base (*i.e.* densidad aparente), se utilizó el valor -999. El Cuadro 2 muestra los estadísticos de las variables incluidas en la base de datos SEMARNAT-CP.

Cuadro 2. Estadísticos de las variables de la base de datos de SEMARNAT-CP (2002).

Variable	Mínimo	Promedio	Máximo
pH	3.50	7.03	10.50
MO	0.00	2.60	28.22
CE	0.00	0.45	40.70
DA	1.01	1.51	2.45

En la Figura 2 se muestra, como contexto, el mapa de degradación de los suelos de México generado en la evaluación de SEMARNAT-CP (2002) y, en la Figura 3, un mapa de la distribución del COS en México.

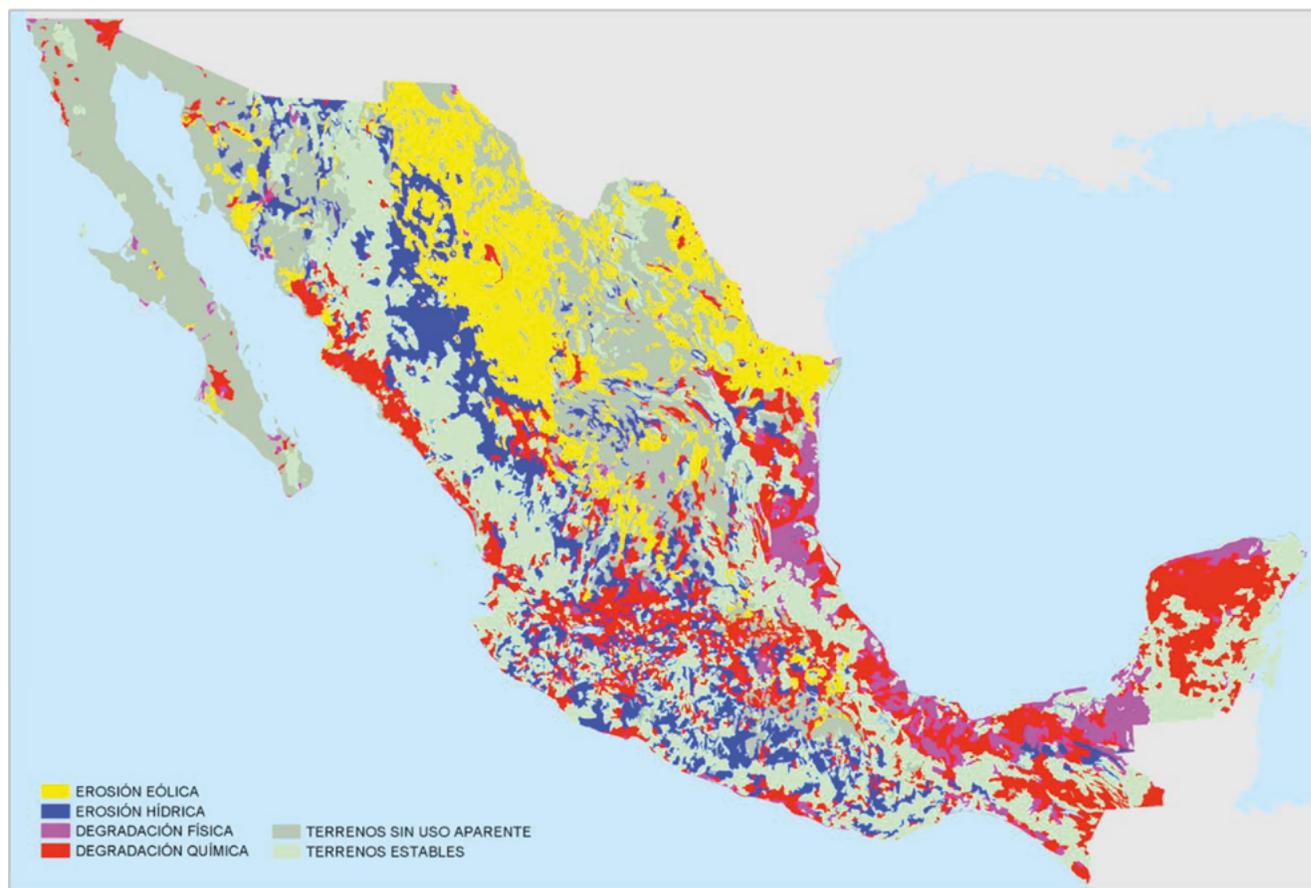


Figura 2. Mapa de la degradación de los suelos de México. Fuente: SEMARNAT-CP (2002).

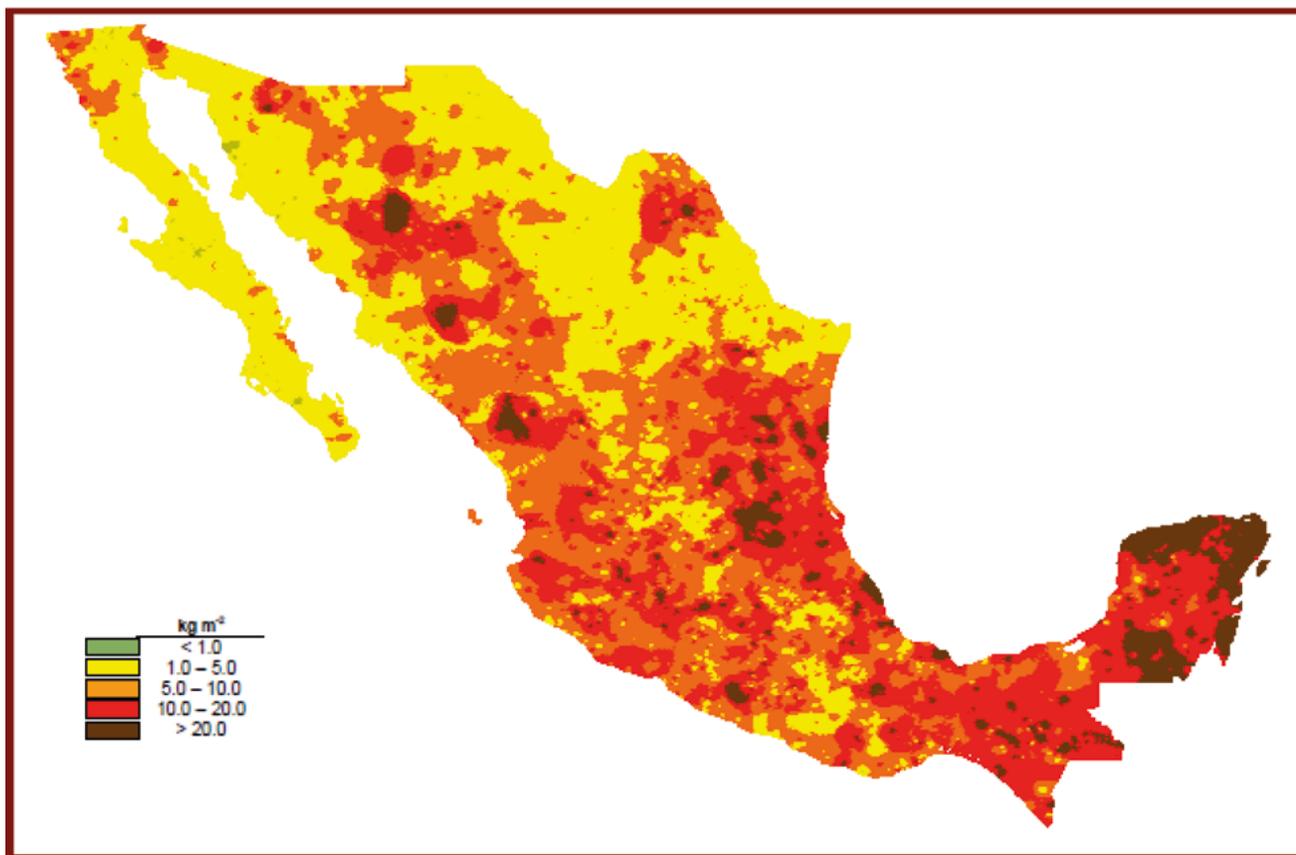


Figura 3. Mapa del carbono orgánico de los suelos de México. Fuente: SEMARNAT-CP (2002).

COMENTARIOS FINALES

La base de datos documentada y abierta al público permite utilizar información nacional estandarizada para evaluación de los almacenes de carbono (Segura *et al.*, 2004; Paz *et al.*, 2016), así como de la degradación de los suelos (SEMARNAT-CP, 2002; Bolaños *et al.*, 2016).

La base de datos de SEMARNAT-CP (2002), al igual que otras bases de datos en México, no cuenta con información completa para estimar densidades de COS, por lo que es necesario que en el futuro se realicen mediciones de los fragmentos gruesos y de la densidad aparente del suelo usando métodos analíticos estandarizados. Sólo de esta manera se podrán evaluar los almacenes del COS y tener datos interoperables (Vargas *et al.*, 2017) a nivel de país.

BASE DE DATOS

En seguimiento a la política del Programa Mexicano del Carbono de libre acceso a las bases de datos asociadas al ciclo del carbono y sus interacciones,

así como en soporte de las síntesis nacionales del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres y acuáticos, la base de datos de este trabajo está disponible en http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a SEMARNAT su disposición en hacer disponibles los datos generados con el financiamiento del estudio de la evaluación de la degradación de los suelos en México.

LITERATURA CITADA

- Balbotín, C., C. O. Cruz, F. Paz and J. D. Etchevers. 2009. Soil carbon sequestration in different ecoregions of Mexico. pp. 71-96. In: Lal, R. and R. F. Follett (eds.). Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect. SSSA Special Publication 57. 2nd Edition. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI.
- Batjes, N. H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47:161-163.
- Bolaños, M. A., F. Paz, C. O. Cruz, J. A. Argumedo, V. M. Romero y J. C. de la Cruz. 2016. Mapa de erosión de los suelos de

- México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana* 34:271-288.
- de Jong, B., C. Anaya, O. Masera, M. Olguin, F. Paz, J. Etchevers, R. Martínez, G. Guerrero and C. Balbontin. 2010. Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecology and Management* 260:1689-1701.
- de Jong, B., O. Masera, R. D. Martínez, F. Paz, M. Olguin, C. Anaya, C. 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.
- Eswaran, H., E. Van Den Berg and P. Reich. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal* 57:192-104.
- FAO and ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWRS) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy.
- Guevara, M., G. Federico-Olmedo, E. Stell, Y. Yigini, Y. Aguilar-Duarte, C. Arellano-Hernández, G. E. Arévalo, C. E. Arroyo-Cruz, A. Bolívar, S. Bunning, N. Bustamante-Cañas, C. O. Cruz-Gaistardo, F. Davila, M. Dell-Acqua, A. Encina, H. Figueredo-Tacona, F. Fontes, J. A. Hernández-Herrera, A. R. Ibelle-Navarro, V. Loayza, A. M. Manueles, F. Mendoza-Jara, C. Olivera, R. Osorio-Hermosilla, J. Rodríguez-Rodríguez, R. Roopnarine, A. Rosales-Ibarra, K. A. Rosales-Riveiro, G. A. Schulz, A. Spence, G. M. Vasques, R. R. Vargaas and R. Vargas. 2018. No silver bullet for digital soil mapping: country-specific soil organic carbon estimates across Latin America. *Soil* 4:173-193.
- Hiederer, R. and M. Köchy. 2011. Global soil organic carbon estimates of the harmonized world soil database. EUR 25225. Publication Office of the European Union. Luxembourg 79 p.
- INEGI. 1998. Información nacional sobre perfiles de suelo Versión 1.0. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI. 2004. Información nacional sobre perfiles de suelo Versión 1.2. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. *In*: Penman, J., M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe and F. Wagner (eds). 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*: Eggleston, H. S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe (eds.). National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123:1-22.
- Padilla, J., J. D. Etchevers, R. C. Gomora, C. I. Hidalgo, M. Carrasco y V. Saynes. 2012. Relación entre los métodos TOC, LOI, Walkley-Black y NIR para determinar carbono en suelos. pp. 187-194. 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.
- Paz, F., C. Balbontín, J. Etchevers, M. Martínez y C. Ortiz. 2008. Análisis multifractal del carbono en los suelos 1. Función universal de escalamiento. *Terra Latinoamericana* 26:183-191.
- Paz, F., J. Argumedo, C. O. Cruz, J. D. Etchevers y B. de Jong. 2016. Distribución espacial y temporal del carbono orgánico del suelo en los ecosistemas terrestres de México. *Terra Latinoamericana* 34:289-310.
- Paz-Pellat, F. y A. Velázquez-Rodríguez. 2018. Base de datos de perfiles de suelos en México. *Elementos para Políticas Públicas* 2:210-235.
- Poeplau, C., C. Vos and A. Don. 2017. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. *Soil* 3:61-66.
- Segura, M. A., P. Sánchez, C. A. Ortiz y M. C. Gutiérrez. 2004. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana* 23:21-28.
- SEMARNAT. 2002. NOM-021-SEMARNAT-2000 (antes NOM-021-RECNAT-2000) Norma oficial mexicana, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación del 31 de Diciembre de 2002.
- SEMARNAT-CP. 2002. Evaluación de la degradación de los suelos causada por el hombre en la República Mexicana, a escala 1:250 000. Memoria Nacional. D. F., México.
- Van Reeuwijk, L. P. (ed.). 1999. Procedimientos para Análisis de Suelos, versión 1995. Traducción: Gutiérrez-Castorena, Ma. Del C., C. A. Tavares-Espinoza y C. A. Ortiz-Solorio. 1a edición en español. Especialidad de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 145 p.
- Vargas, R., D. Alcaraz-Segura, R. Birdsey, N. A. Brunsell, C. O. Cruz-Gaistardo, B. de Jong, J. Echevers, M. Guevara, D. J. Hayes, K. Johnson, H. W. Loescher, F. Paz, Y. Ryu, Z. Sanchez-Mejia and K. P. Toledo-Gutierrez. 2017. Enhancing interoperability to facility implementation of REDD+: case study of México. *Carbon Management* DOI: 10.1080/17583004.2017.1285177.

BASE DE DATOS DE LA BIOMASA DE LOS SITIOS DEL INVENTARIO NACIONAL FORESTAL PERIÓDICO, CICLO 1992-1994

DATABASE OF THE BIOMASS OF THE SITES OF THE PERIODIC NATIONAL FOREST INVENTORY, CYCLE 1992-1994

Ben de Jong^{1‡}, Marcela Olguín¹, Fabiola Rojas¹, Vanessa Maldonado¹ y Fernando Paz²

¹ Unidad Tabasco y Campeche, El Colegio de la Frontera Sur, Villahermosa, Tabasco y Campeche, Campeche, México

² GRENASER, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México

[‡] Autor para correspondencia: bjong@ecosur.mx

RESUMEN

Los inventarios nacionales forestales permiten estimar los almacenes de los ecosistemas terrestres y generar inventarios nacionales de gases efecto invernadero. Aun cuando México había realizado un primer inventario nacional forestal en el periodo 1961-1985, la base de datos se desconoce. Un segundo esfuerzo es el Inventario Nacional Forestal Periódico (INFP) realizado en el periodo 1992-1994. Este inventario se documenta en el presente trabajo y la base de datos asociada se utiliza para estimar la biomasa de las clases de uso del suelo y vegetación *sensu* INEGI, utilizando para esta tarea ecuaciones alométricas, en función de las clases de precipitación del país. Los resultados se presentan en una base de datos abierta al público para su consulta (http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/).

Palabras clave: *componente aérea y subterránea; SARH; ecuaciones alométricas; clases de vegetación y uso del suelo; materia seca.*

ABSTRACT

National forest inventories allow the estimation of the stocks of terrestrial ecosystems, and the generation of national inventories of greenhouse gases. Although Mexico has carried out a first national forest inventory in the period 1961-1985, the database is unknown. A second effort made by Mexico is the Periodic National Forest Inventory (PNFI) carried out in the period 1992-1994. This inventory is documented and the associated database is used to estimate the biomass of the land use and vegetation classes *sensu* INEGI, using allometric equations for this task according to the country's precipitation classes. The results are presented in a database open to the public for consultation (http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/).

Key words: *above and below ground component; SARH; allometric equations; land use and vegetation types; dry matter.*

INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones nacionales de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) se basan en Inventarios Nacionales de Gases Efecto Invernadero (INEGEI), que incluyen al sector usos del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (USCUSS), agrupados en los últimos años, de acuerdo a las guías y directrices del IPCC (2003 y 2006), como sector agricultura, forestería y otros usos del suelo (ASOUS). En el sector USCUSS o ASOUS, la biomasa aérea y subterránea de la vegetación, se incluye en los inventarios de los almacenes de carbono.

Los inventarios nacionales forestales permiten realizar inventarios de los recursos forestales y de otro tipo, para la planeación de actividades de manejo y conservación de los bosques y selvas del país. En México, se realizó el Primer Inventario Nacional Forestal en el periodo de 1961 a 1985, dando como resultado las memorias estatales de los inventarios. Las bases de datos de los levantamientos de campo de este inventario se desconocen.

En el periodo de 1991-1992, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), realizó el Inventario Nacional Forestal de Gran Visión (SARH, 1992), que consistió en la generación de un mapa de la vegetación de México mediante el uso de sensores remotos y datos de 720 estudios dasonómicos y planes de manejo integral forestal, distribuidos en el territorio nacional. El resultado de este esfuerzo fue un inventario de los recursos forestales del país, a nivel de gran visión. La misma SARH (1994), en el periodo de 1992-1994, realizó un Inventario Nacional Forestal Periódico (INFP), con la intención de repetirlo cada diez años. El INFP muestreó alrededor de 16 000 sitios (conglomerados de muestreo de tres sitios de 1000 m², configurados en “L”) distribuidos en distintos tipos de

vegetación. Los datos de este inventario se usaron en el tercer INEGEI (de Jong *et al.*, 2006 y 2010), pero no han sido documentados previamente.

A partir del 2004, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) inicio el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS), de carácter periódico, con un primer periodo de muestreo nacional (CONAFOR, 2004) con alrededor de 22 000 conglomerados (cuatro sitios de 400 m² de muestreo distribuidos en “Y”). El remuestreo del INFyS se planeó en ciclos de cinco años; el primero inició en 2009 (CONAFOR, 2009). El primer ciclo, 2004-2007, se utilizó en el cuarto INEGEI (de Jong *et al.*, 2009) y la base de datos de la biomasa de los sitios del INFyS se documentó en de Jong *et al.* (2018).

En este trabajo se documenta la base de datos de la biomasa de la vegetación asociada al INFP de la SARH (1994), para que pueda ser consultada por el público en general, en el sitio de internet http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/. El INFP se revisó y documentó, como contexto para la base de datos que se presenta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Inventario nacional forestal periódico de la SARH, ciclo 1992-1994

En el año 1992, la SARH (1994) inició el inventario nacional forestal periódico (INFP), cuyos sitios de muestreo se distribuyeron en una retícula de 2.5 km x 2.5 km sobre las clases de vegetación definidas en un mapa nacional, mediante el uso de sensores remotos (Landsat TM), con resolución espacial de 30 m x 30 m. Las clases de vegetación se interpretaron en forma visual, a partir de las imágenes satelitales (periodo 1991-1993). La Figura 1 muestra las clases de vegetación utilizadas en la planeación del INFP.

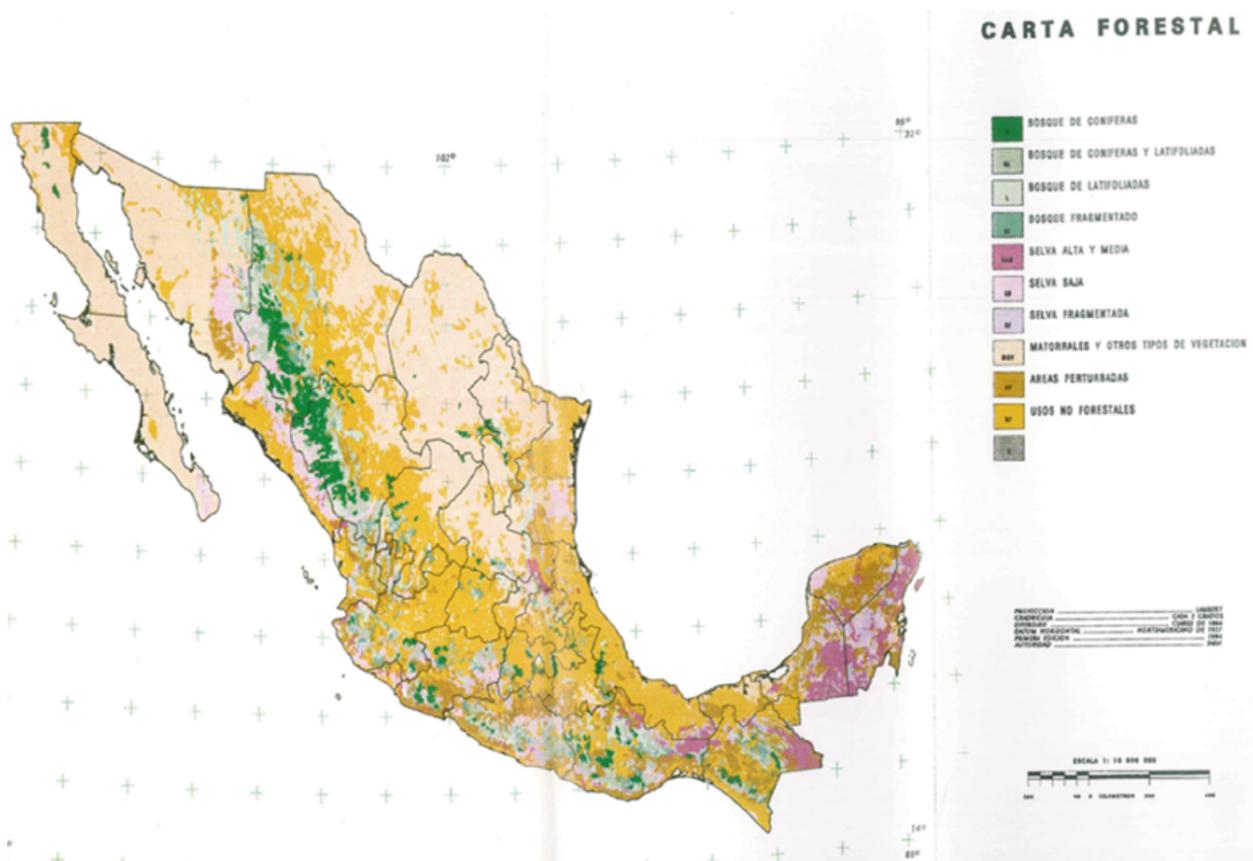


Figura 1. Carta forestal nacional elaborada por la SARH (1994).

Para la distribución de los sitios de muestreo del INFP, la vegetación se ordenó estratificó: bosques, selvas altas y medianas, selvas bajas y, otros tipos de

vegetación. En el Cuadro 1 se muestran las clases de vegetación usadas en el INFP.

Cuadro 1. Clase de tipos de vegetación y sus grupos, utilizados en el INFP.

Ecosistema	Formación	Tipo de vegetación	Clave
BOSQUES	Coníferas	Bosque de pino abierto	1
		Bosque de pino cerrado	2
		Bosque de oyamel abierto	3
		Bosque de oyamel cerrado	4
		Bosque de otras coníferas abierto	5
		Bosque de otras coníferas cerrado	6
	Coníferas y Latifoliadas	Bosque de pino y encino abierto	7
		Bosque de pino y encino cerrado	8
		Bosque fragmentado	9
	Latifoliadas	Bosque de encino abierto	10
		Bosque de encino cerrado	11
	Plantaciones Forestales	Bosque de galería	12
			13

Ecosistema	Formación	Tipo de vegetación	Clave
	Selvas Altas y Medianas	Selva alta y mediana	14
	Selvas Bajas	Selva baja	15
SELVAS		Bosque mesófilo de montaña cerrado	16
		Bosque mesófilo de montaña abierto	17
		Manglar	18
	Otras Asociaciones	Selva de galería	19
		Palmar	20
		Selva fragmentada	21
		Sabana	22
	Arbustos	Mezquitales y huizachales	23
		Chaparrales	24
	VEGETACIÓN DE ZONAS ÁRIDAS		Matorral subtropical
Matorrales		Matorral submontano	26
		Matorral espinoso	27
		Matorral xerófilo	28
		Vegetación hidrófila	29
VEGETACIÓN HIDRÓFILA Y HALÓFILA		Vegetación halófila	30
			31
ÁREAS FORESTALES PERTURBADAS		Agricultura de riego	32
		Agricultura de temporal	33
		Plantaciones agrícolas	34
		Pastizal	35
	USOS NO FORESTALES		Vegetación de desiertos arenosos
		vegetación de dunas costeras	37
		Áreas sin vegetación aparente	38
		Cuerpos de agua	39
		Zonas urbanas	40

La distribución de los sitios de muestreo de 1000 m² utilizados en el inventario, que corresponde a poco más de 16 000 sitios, se muestran en la Figura 2.

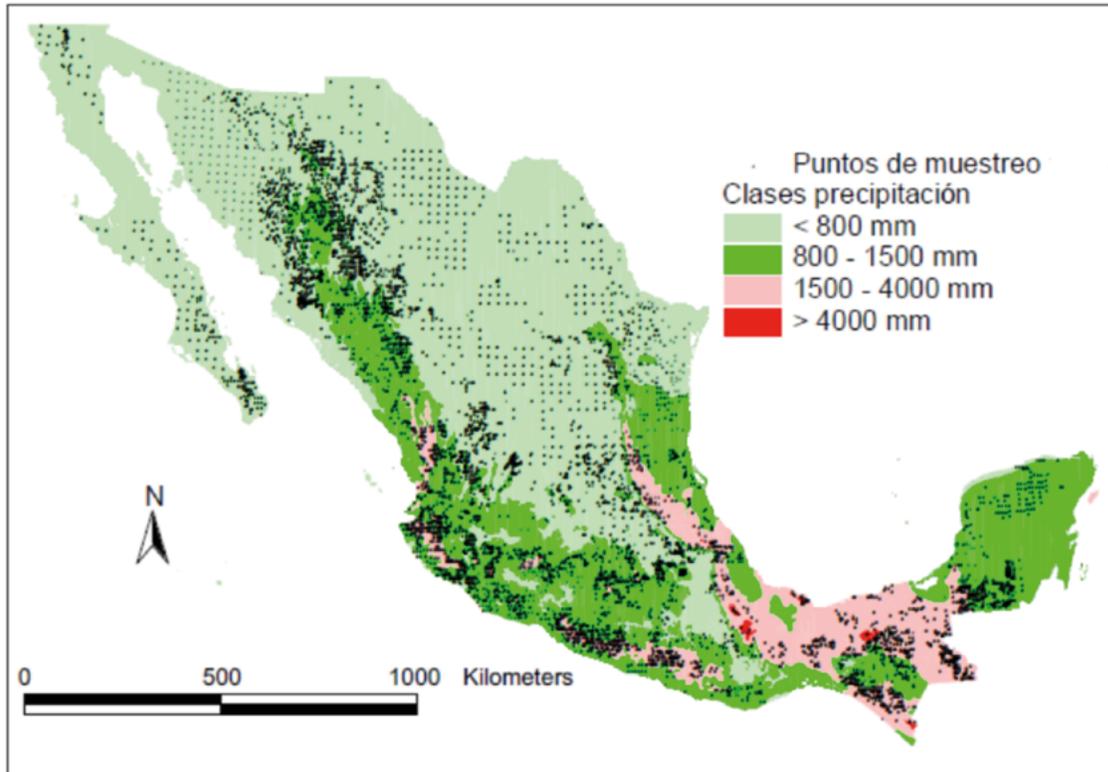


Figura 2. Distribución de los sitios de muestreo en el país y las clases de precipitación asociadas. La información de precipitación corresponde al mapa digital de precipitación media anual de la CONABIO, escala 1:4 000 000.

El arreglo de muestreo del INFP consistió de conglomerados con tres sitios de muestreo en forma de “L”, tal como se muestra en la Figura 3.

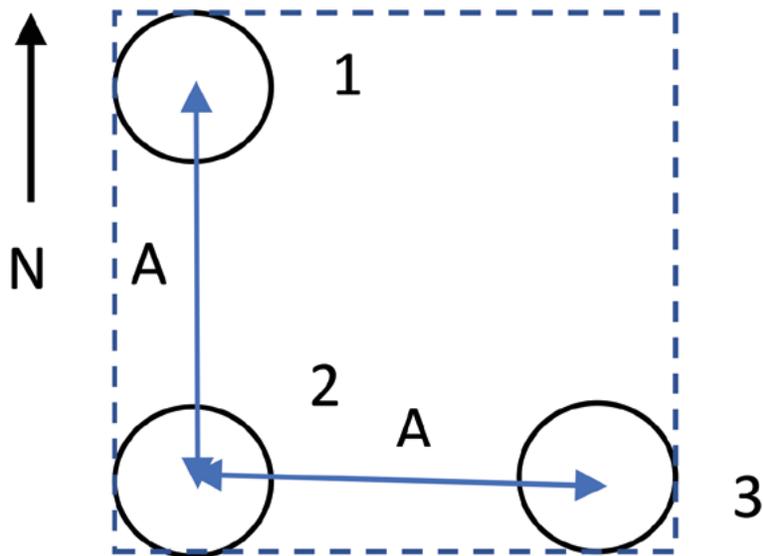


Figura 3. Arreglo espacial de los sitios de muestreo en un conglomerado.

Las distancias A entre los sitios de muestreo del conglomerado de la Figura 3, se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Distancias A entre centros de los sitios de muestreo.

Estrato	Distancia A entre centros de los sitios (m)
Bosque	150
Selva alta y mediana	200
Selva baja	200
Otros tipos	250

Para los estratos bosques y selvas, en los sitios de 1000 m² se colocó un círculo concéntrico menor de 50 m² para el muestreo de la regeneración, Figura 4. Se midieron las plantas con diámetro normal (DN) mayor o igual a 7.5 cm y, en el círculo de regeneración, las plantas menores a 7.5 cm de DN y altura mayor a 25 cm, por clases de alturas de 25 cm.

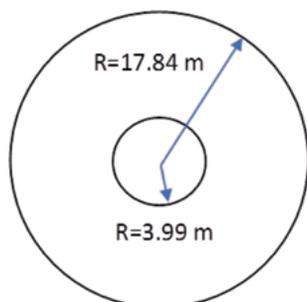


Figura 4. Arreglo de los muestreos en el sitio de 1000 m² para bosques y selvas.

La Figura 5 muestra la configuración para el estrato Otros tipos. Se colocó un círculo concéntrico de 10 m² para cuantificar las plantas menores a 0.5 m de altura y un círculo concéntrico intermedio de 100 m², para las plantas entre 0.5 a 1.5 m de altura; el círculo mayor de 1000 m² se utilizó para las plantas mayores de 1.5 m.

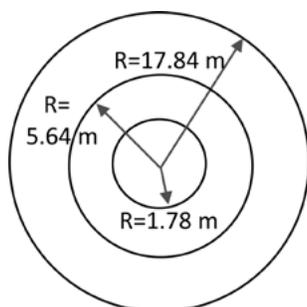


Figura 5. Arreglo de los muestreos en el sitio de 1000 m² para Otros tipos.

Para la ubicación de los sitios de muestreo del INFP se utilizó un GPS con un error de muestreo entre 100 y 150 m.

Estimación de la biomasa en los sitios de muestreo

La base de datos del INFP se revisó detalladamente y se detectaron algunos errores ocasionados, principalmente, por ausencia o inconsistencia en la georreferenciación. Los errores en la localización geográfica se corrigieron, cuando fue posible. En aquellos casos en que no fue viable la corrección, el sitio no se consideró en los análisis para estimar la biomasa. También se desecharon datos de especies con carencia de información, como cuando se trataba solo de tocones; cuando la altura (H) o el DN eran iguales a cero o, cuando el cociente entre H y Dn estaba fuera de los límites considerados normales.

En el Cuadro 3 se muestran las ecuaciones alométricas utilizadas para estimar la biomasa viva aérea y subterránea. En el caso de árboles muertos en pie, la biomasa estimada se multiplicó por un factor de 0.25. En el caso de la biomasa de los arbustos, el INFP solo midió altura y cobertura, por lo que se usaron valores por defecto para convertir estos datos a biomasa aérea, de acuerdo con el INEGI del 2000.

Cuadro 3. Ecuaciones alométricas utilizadas para estimar la biomasa de los sitios del INFP.

Biomasa	Grupo	Precipitación promedio anual (mm)	Ecuación	Referencia
Aérea	Latifoliadas	< 800	$10^{-0.535+\log(AB)}$	Brown (1997)
		800-1500	$\exp[-1.996+2.32\ln(DN)]$	
		1500-4000	$\exp[-3.1141+0.9719\ln(DN2H)]$	Brown <i>et al.</i> (1989)
	Coníferas	Todas	$\exp^{-1.170+2.0119\ln(DN)}$	Brown (1997)
	Palmas	Todas	$10+6.4H, DN > 7.5 \text{ cm}$	Brown (1997)
Subterránea	Todos	Todas	$\exp[-1.0587+0.8836\ln(BA)]$	Cairns <i>et al.</i> (1997)

DN en cm, H en m, AB (área basal) en cm² y biomasa en kg de materia seca (M.S.).

RESULTADOS

Con el objetivo de contar con estimaciones de biomasa compatibles con la cartografía nacional actual disponible, se realizaron estimaciones de la biomasa de los sitios del INFP, evaluando sus estadísticos a nivel

de ecorregiones de Norteamérica en México, mediante el uso de las clases o estratos del Cuadro 1 y las clases de uso del suelo y vegetación (USyV) definidas por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) en la Serie III, con año base 1993 (INEGI, 2005 y 2009), Figura 6.

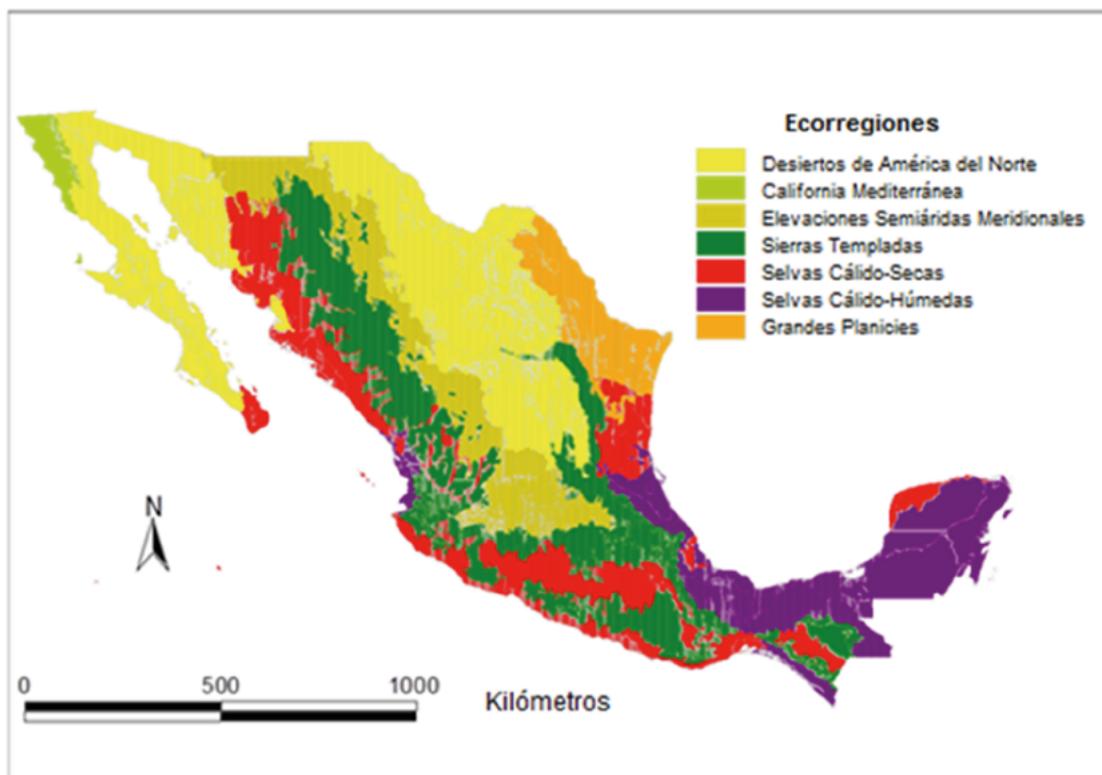


Figura 6. Ecorregiones de Norteamérica en México definidas por el INEGI.

Las clases de uso del suelo y vegetación del INEGI se muestran en el Cuadro 4; se incluye la vegetación secundaria (VS) y su estado de sucesión.

Cuadro 4. Tipos de vegetación y usos del suelo y, otros rasgos, con su estado de sucesión.

Tipo de Información	Grupos de Vegetación / Agroecosistemas/ Otros	Tipo de Vegetación	Clave	Sucesión (VS)			
				A	a	h	
Información ecológica, florística y fisonómica	Bosque de Coníferas	Bosque de Ayarín	BS	1	1	1	
		Bosque de Cedro	BB	1	1	1	
		Bosque de Oyamel	BA	1	1	1	
		Bosque de Pino	BP	1	1	1	
		Bosque de Pino-Encino	BPQ	1	1	1	
		Bosque de Táscate	BJ	1	1	1	
		Matorral de Coníferas	MJ	0	1	1	
	Bosque de Encino	Bosque de Encino	BQ	1	1	1	
		Bosque de Encino-Pino	BQP	1	1	1	
	Bosque Mesófilo de Montaña	Bosque Mesófilo de Montaña	BM	1	1	1	
	Selva Perennifolia	Selva Alta Perennifolia	SAP	1	1	1	
		Selva Alta Subperennifolia	SAQ	1	1	1	
		Selva Mediana Perennifolia	SMP	1	1	1	
		Selva Mediana Subperennifolia	SMQ	1	1	1	
		Selva Baja Perennifolia	SBP	1	1	1	
		Selva Baja Subperennifolia	SBPQ	1	1	1	
		Selva Subcaducifolia	Selva Mediana Subcaducifolia	SMS	1	1	1
			Selva Baja Subcaducifolia	SBS	1	1	1
			Selva Mediana Caducifolia	SMC	1	1	1
		Selva Caducifolia	Selva Baja Caducifolia	SBC	1	1	1
	Matorral Subtropical		MST	1	1	1	
	Selva Espinosa	Selva Baja Espinosa Caducifolia	SBK	1	1	1	
		Selva Baja Espinosa Subperennifolia	SBQ	1	1	1	
Mezquital Tropical		MKE	1	1	1		

Continuación Cuadro 4...

Tipo de Información	Grupos de Vegetación / Agroecosistemas/ Otros	Tipo de Vegetación	Clave	Sucesión (VS)			
				A	a	h	
Información ecológica, florística y fisonómica	Pastizal	Pastizal Natural	PN	0	1	1	
		Pastizal Halófilo	PH	0	1	1	
		Pastizal Gipsófilo	PY	0	1	1	
		Pradera de Alta Montaña	VW	0	1	1	
		Sabana	VS	1	1	1	
		Vegetación de Desiertos Arenosos	VD	0	1	1	
		Vegetación Gipsófila	VY	0	1	1	
		Vegetación Halófila	VH	0	1	1	
		Matorral Desértico Micrófilo	MDM	0	1	1	
	Matorral Xerófilo	Matorral Desértico Rosetófilo	MDR	0	1	1	
		Matorral Crasicaule	MC	1	1	1	
		Matorral Sarcocaulo	MSC	0	1	1	
		Matorral Sarcocrasicaule	MSCC	0	1	1	
		Matorral Sarcocrasicaule de Neblina	MSN	0	1	1	
		Matorral Rosetófilo Costero	MRC	0	1	1	
		Matorral Espinoso Tamaulipeco	MET	1	1	1	
		Matorral Submontano	MSM	1	1	1	
		Chaparral	ML	0	1	1	
	Vegetación Hidrófila	Mezquital Xerófilo	MKX	0	1	1	
		Selva de Galería	SG	1	1	1	
		Bosque de Galería	BG	1	1	1	
		Vegetación de Galería	VG	0	1	1	
		Manglar	VM	1	1	1	
		Popal	VA	0	0	0	
		Tular	VT	0	0	0	
		Vegetación de Petén	VPT	1	1	1	
		Vegetación Halófila-Hidrófila	VHH	0	1	1	
		Otros Tipos de Vegetación	Bosque de Mezquite	MK	1	1	1
			Vegetación de Dunas Costeras	VU	0	1	1
			Palmar Natural	VP	1	1	1

Tipo de Información	Grupos de Vegetación / Agroecosistemas/ Otros	Tipo de Vegetación	Clave	Sucesión (VS)		
				A	a	h
Información ecológica, florística y fisonómica	Vegetación Inducida	Pastizal Inducido	PI	0	0	0
		Sabanoide	VSI	0	0	0
		Palmar Inducido	VPI	0	0	0
		Bosque Inducido	BI	0	0	0
		Acuícola	ACUI	0	0	0
Información agrícola, pecuaria y forestal (IAFP)	Agroecosistemas	Agricultura de humedad	H (inicial)	0	0	0
		Agricultura de riego	R (inicial)	0	0	0
		Agricultura de temporal	T (inicial)	0	0	0
		Bosque cultivado	BC	0	0	0
		Pastizal cultivado	PC	0	0	0
		Desprovisto de vegetación	ADV	0	0	0
Información Complementaria	Otros Rasgos	Asentamientos humanos	AH	0	0	0
		Cuerpos de agua	H2O	0	0	0
		País extranjero	P/E	0	0	0
		Zona urbana	ZU	0	0	0
		Sin vegetación aparente	DV	0	0	0

A = arbórea, a = arbustiva, h = herbácea; asociados: 0 = no aplica y 1 = sí aplica.

En el Cuadro 5 se muestran los promedios de la biomasa total de las clases de vegetación y usos del suelo del INEGI, así como sus intervalos de confianza (IC), con probabilidad del 95%.

Cuadro 5. Estimaciones de los estadísticos de la biomasa total (aérea y subterránea, viva y muerta) de los grupos de clases de USyV del INEGI.

Tipo de vegetación	Ecorregión	Número	Promedio (Mg M.S. ha ⁻¹)	IC al 95 %
<i>Bosque de coníferas</i>				
Primario y secundario arbóreo	ST	553	99.3A	-6.4
	DN; CM; ESM; SCS	74	30.1 B	-17.4
Secundario arbustivo y herbáceo	ST	306	30.8 a	-4.6
	ESM; DN	19	25.5 a	-18.3
<i>Bosque de coníferas y latifoliadas</i>				
Primario y secundario arbóreo	ST	1,357	83.9 A	-3.5
	SCS; ESM; DN; GP	91	54.1 B	-13.6
Secundario arbustivo y herbáceo	ST	461	37.5 a	-3.7
	ESM; DN; SCS	63	28.7 a	-10.1
<i>Bosque de latifoliadas</i>				
Primario y secundario arbóreo	SCH; ST	867	71.5 A	-4
	ESM; DN; SCS	206	35.7 B	-8.3
Secundario arbustivo y herbáceo	SCH; ST	383	29.1 a	-3.3
	ESM; SCS	188	22.5 b	-4.7

Continuación Cuadro 5...

Tipo de vegetación	Ecorregión	Número	Promedio (Mg M.S. ha ⁻¹)	IC al 95 %
<i>Selvas mediana y alta</i>				
Primario y secundario arbóreo	SCH; ST	1020	107.6 A	-5.9
	SCS	106	64.1 B	-18.3
Secundario arbustivo y herbáceo	ST	21	63.6 a	-20.5
	SCH; SCS	417	37.1 b	-4.6
<i>Selvas bajas</i>				
Primario y secundario arbóreo	SCH	91	76.4 A	-5.8
	ST; ESM; DN; SCS; GP	1043	34.6 B	-1.7
Secundario arbustivo y herbáceo	SCH	21	67.0 a	-12.7
	ST; ESM; DN; SCS; GP	482	27.2	-2.7
<i>Matorrales</i>				
Primario y secundario arbóreo	ST	64	26.9 A	-3.2
	GP	157	21.1 B	-2
	DN; ESM; SCS; CM	1113	9.8 C	-0.8
Secundario arbustivo y herbáceo	GP; ST; SCS	76	17.0 a	-2.3
	ESM; DN	101	8.4 b	-2
<i>Pastizales naturales y cultivados</i>				
	ST; SCH	852	28.5 a	-2.9
	DN; GP; CM; ESM; SCS	663	14.3 b	-3.3
<i>Agricultura de temporal y humedad</i>				
Annual	ST; SCS; SCH	828	27.7 a	-2.9
	ESM; DN; GP; CM	124	9.8 b	-7.5
Semipermanente	ST; SCS; SCH	32	10.1 *	-4.8
Permanente	ST; SCS; SCH	84	26.0 *	-6.4
<i>Agricultura de riego</i>				
Annual	ST; ESM; SCS; SCH; GP	74	20.2 a	-5.5
	DN	16	2.1 b	-11.8
Semipermanente	ST; SCS; SCH	7	10.0 *	-15.6
Permanente	ST; ESM; SCS; SCH; GP	14	27.6 *	-28.1

Letras seguidas del valor de biomasa promedio denotan diferencias significativas entre las ecorregiones de un mismo tipo de vegetación, según la prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha=0.05$). Letras mayúsculas corresponden a vegetación arbórea y las minúsculas a vegetación secundaria arbustiva y herbácea. Ecorregiones: DN: Desiertos de Norteamérica; CM: California Mediterránea; ESM: Elevaciones Semiáridas Meridionales; ST: Sierras Templadas; SCS: Selvas Cálido-Secas; SCH: Cálido-Húmedas; GP: Grandes Planicies.

Finalmente, en el Cuadro 6 se muestra la estructura de la base de datos de la biomasa de los sitios del Inventario Nacional Forestal Periódico del período 1992-1994.

Cuadro 6. Estructura de la base de datos de la biomasa estimada en los sitios del INFP.

Campo	Descripción
Clave	Clave general del sitio
Conglomerado	Clave del conglomerado
Sitio	Número del sitio
Longitud	Localización geográfica: longitud (grados decimales)
Latitud	Localización geográfica: latitud (grados decimales)
Estado	Clave del estado (INEGI)
Clase_Precipitacion	Clase de precipitación (mm)
Clase_USyV	Clase de uso del suelo y vegetación (INEGI)
Biomasa_Arbustos	Biomasa total de arbustos (Mg M.S. ha ⁻¹)
No_Arboles	Número de árboles
Biomasa_Arboles	Biomasa total de árboles (Mg M.S. ha ⁻¹)
Biomasa_Total	Biomasa total de arbustos y árboles (Mg M.S. ha ⁻¹)

COMENTARIOS FINALES

Para poder contar con insumos para evaluar el estado de los almacenes de la biomasa de los ecosistemas terrestres en México, es necesario contar con sitios de muestreo distribuidos en el territorio nacional y con mediciones en campo de variables tales como el diámetro normal y la altura de los árboles, para poder usar esta información en estimaciones con ecuaciones alométricas.

La base de datos documentada y abierta para su consulta, contiene estimaciones de la biomasa de las diferentes clases de uso del suelo y vegetación *sensu* INEGI, la cual puede usarse para establecer un inventario nacional para el establecimiento de niveles de referencia del almacén de la biomasa.

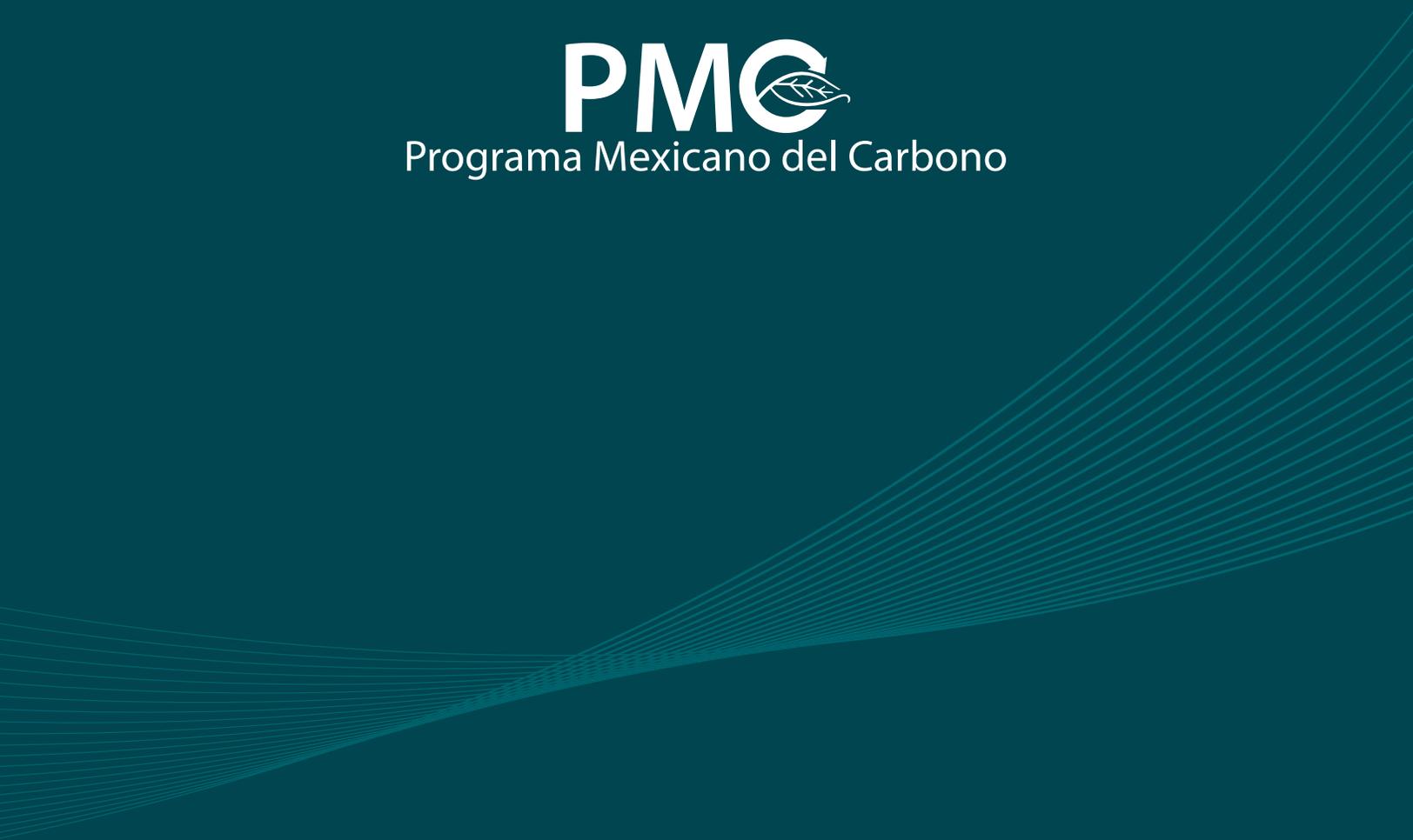
BASE DE DATOS

En seguimiento a la política del Programa Mexicano del Carbono de libre acceso a las bases de datos asociadas al ciclo del carbono y sus interacciones, así como en soporte de las síntesis nacionales del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres y acuáticos, la base de datos de este trabajo está disponible en http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/.

LITERATURA CITADA

- Brown, S. 1997. Estimating biomass change of tropical forests, a primer. Forest Resources Assessment Publication. Forestry Papers 134. FAO. Rome 134 p.
- 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.
- Cairns, M. A., E. H. Helmer and S. Brown. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111:1-11.
- 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.
- de Jong, B., C. Anaya, O. Maser, 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., M. Olguin, F. Rojas, V. Maldonado y F. Paz 2018. Base de datos de la biomasa de los sitios del inventario nacional forestal y de suelos del ciclo 2004-2007. *Elementos para Políticas Públicas* 2:69-84.

- de Jong, B., M. Olguin, F. Rojas, V. Maldonado, 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., O. Maserá, 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.
- INEGI. 2005. 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. 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.
- IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Penman, J., M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendía, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe and F. Wagner (eds.). Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC.
- IPCC. 2006. Agriculture, forestry and other land use IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Eggleston, H. S., L. Buendía, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe (eds.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan.
- SARH. 1992. Inventario Nacional Forestal de Gran Visión, Reporte Principal. Subsecretaría Forestal, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. D.F., México. 51 p.
- SARH. 1994. Inventario Nacional Forestal Periódico, Memoria Nacional. Subsecretaría Forestal, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. D.F., México. 81 p.



PMC
Programa Mexicano del Carbono