

# 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<sup>1†</sup>, Eloísa A. Guerra-Hernández<sup>2</sup>, Juan Manuel Valderrábano-Gómez<sup>1</sup>, Alma Bella López-López<sup>1</sup>, Inyasid Santiago-Aguilar<sup>1</sup>, Carlos Castillejos-Cruz<sup>1,2</sup>, Luis Samuel Campos-Lince<sup>1</sup>, Jorge D. Etchevers-Barra<sup>3</sup>, Claudia Hidalgo-Moreno<sup>3</sup>, Juan Carlos Sandoval-Aparicio<sup>3</sup> y Mayra Mendoza-Cariño<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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.

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

<sup>3</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 m<sup>2</sup> hasta 1000 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup>) 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 (m<sup>3</sup>).

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 m<sup>2</sup>, 1 m<sup>2</sup> y 2 m<sup>2</sup>, 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 CO<sub>2</sub> 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.

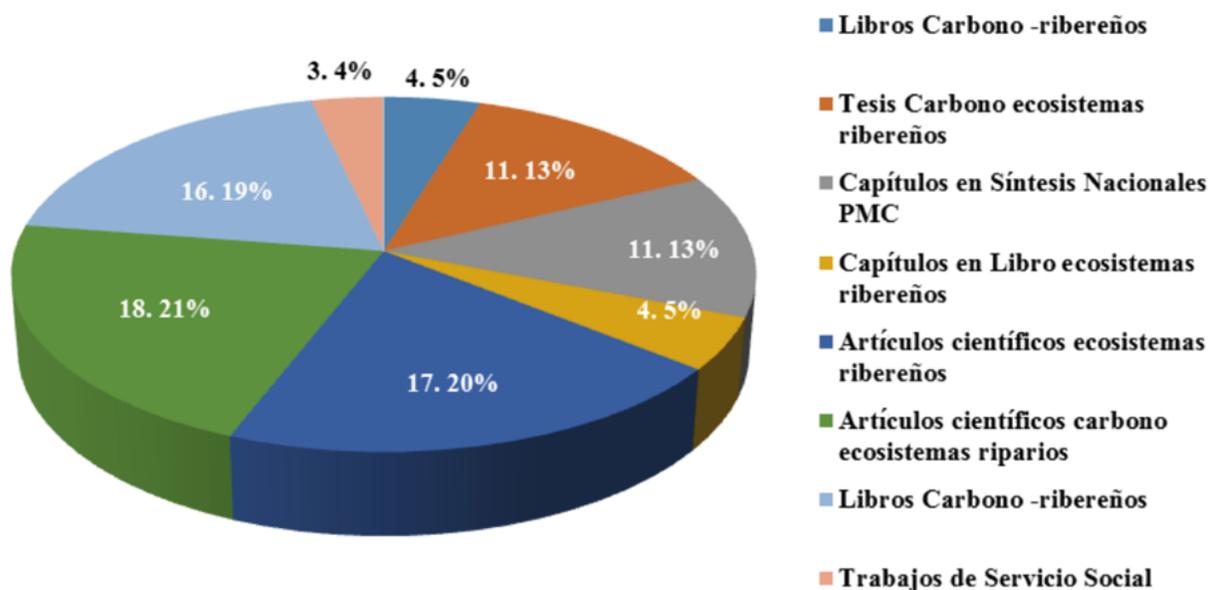


Figura 1. Trabajos de investigación utilizados para la revisión del estado del carbono en ecosistemas ribereños de montaña alta y cuenca media.

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.

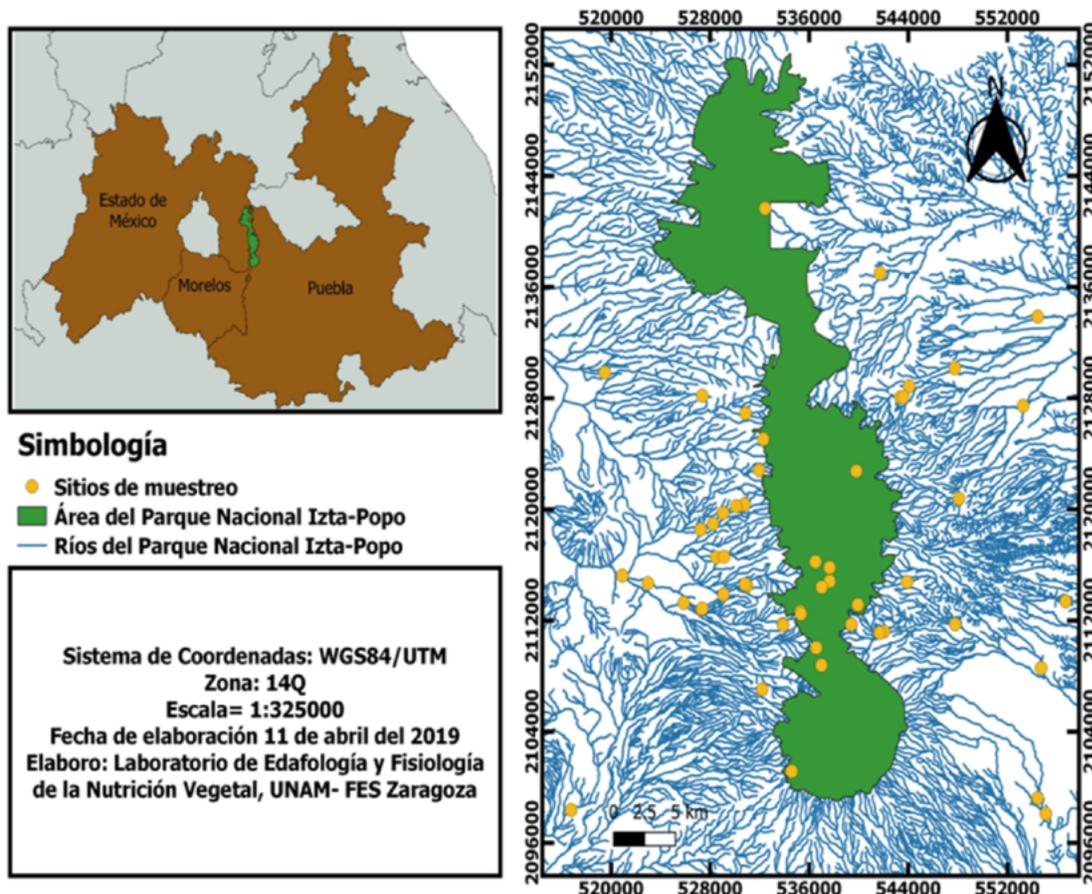


Figura 2. Se muestran algunos de los diferentes sitios de estudio de los ecosistemas ribereños en las cabeceras y parte media de las Cuencas del alto Balsas y de la Cuenca de México.

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 <sup>-1</sup>	Carbono orgánico particulado	Carbono Orgánico del suelo g kg <sup>-1</sup>
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 <sup>-1</sup>	Carbono orgánico particulado	Carbono Orgánico del suelo g kg <sup>-1</sup>
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 <sup>-1</sup>	Carbono orgánico particulado	Carbono Orgánico del suelo g kg <sup>-1</sup>
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<sup>-1</sup> de zonas altas, aumenta hasta más de 1300 mg L<sup>-1</sup> 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.

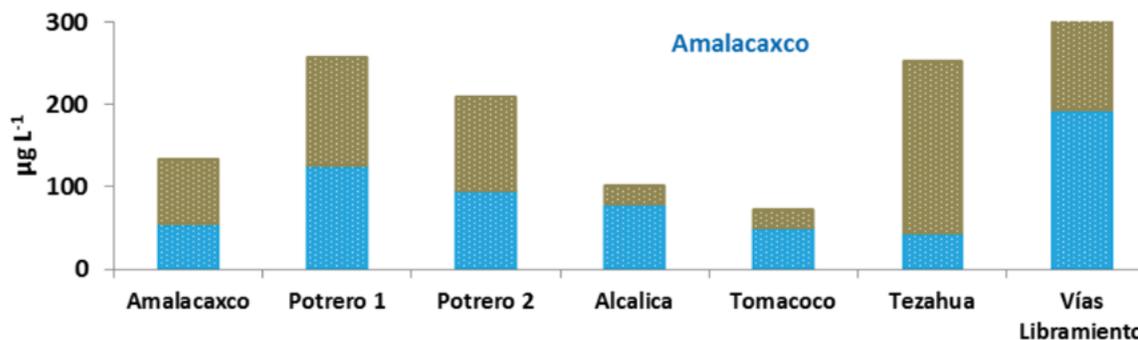


Figura 4. Carbono orgánico particulado (COP) acumulado en lluvia y estiaje en dos afluentes de la cuenca de México. En ambos casos los sitios se ubican en orden descendente en altitud.

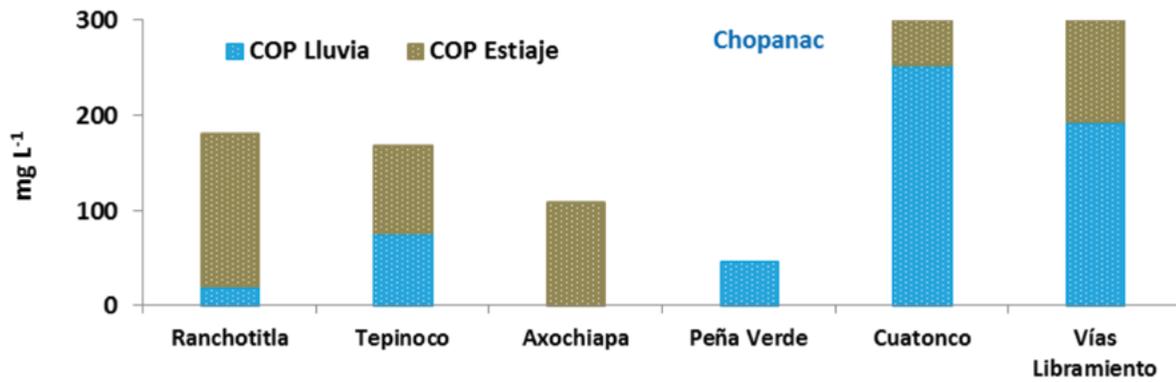


Figura 4. Carbono orgánico particulado (COP) acumulado en lluvia y estiaje en dos afluentes de la cuenca de México. (Continuación). En ambos casos los sitios se ubican en orden descendente en altitud.

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 <sup>r</sup>		Agua	Suelo	
			CaCO <sub>3</sub>	COS	CE
			mg L <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	dS m <sup>-1</sup>
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 <sup>†</sup>		Agua	Suelo	
			CaCO <sub>3</sub>	COS	CE
			mg L <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	dS m <sup>-1</sup>
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
		Promedio	55.10	42.4	
Total 1987 – 4058 m		Máximo	472.94	155.8	
		Mínimo	4.00	0.4	

<sup>†</sup>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<sup>-1</sup> (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 <sup>-1</sup>	Azufre- foliar	Fósforo- foliar	S- Extractable mg kg <sup>-1</sup>	P- Extractable mg kg <sup>-1</sup>
				%			
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	Es. - 0.58	0.21	0.34
				Eg. - 0.013	Eg. - 0.27		
Apozonalco	2684	F, R	45	Ax. - 0.053	Ax. - 0.19	0.22	0.32
				Cs. - 0.052	Cs. - 0.11		
				Qc. - 0.043	Qc. - 0.12		
Tomacoco	2545	F, A	38	Gl. - 0.068	Gl. - 0.14	N/D	0.21
				Bc. - 0.060	Bc. - 0.30		
				Cp. - 0.083	Cp. - 0.14		

Continuación Cuadro 4...

Sitio	Altitud m	US	COS g kg <sup>-1</sup>	Azufre- foliar	Fósforo- foliar	S- Extractable mg kg <sup>-1</sup>	P- Extractable mg kg <sup>-1</sup>
				%			
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 <sub>-CF</sub>	COS	CO <sub>-CF</sub>	C:N <sub>-S</sub>	C:N <sub>-CF</sub>
		%		g kg <sup>-1</sup>			
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 <sub>-CF</sub>	COS	CO <sub>-CF</sub>	C:N <sub>-S</sub>	C:N <sub>-CF</sub>
		%		g kg <sup>-1</sup>			
	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<sub>-CF</sub>= materia orgánica de la capa de fermentación, COS= carbono orgánico del suelo, CO<sub>-CF</sub>= carbono orgánico de la capa de fermentación, C:N<sub>-S</sub>= relación carbono nitrógeno del suelo, C:N<sub>-CF</sub>= carbono orgánico de la capa de fermentación.

El contenido de COS entre 30 y 50 g kg<sup>-1</sup> en suelos ribereños inmersos en ecosistemas forestales, disminuye hasta menos de 20 g kg<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup> y, en áreas de aprovechamiento, no alcanza 30 Mg C ha<sup>-1</sup>. 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 <sup>r</sup>	Parte aérea	Radical <sup>r</sup>	
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
Cuatonco .....Fm	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	

<sup>r</sup>Estimado 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 <sub>-CF</sub>	CO <sub>-M</sub>	CO <sub>-VA</sub>
		Media ± Desv. Est.	Media ± Desv. Est.	Media ± Desv. Est.	Media ± Desv. Est.
		Mg Carbono ha <sup>-1</sup>			
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<sub>-CF</sub> = Carbono en capa de fermentación, CO<sub>-M</sub> = Carbono en mantillo, CO<sub>-VA</sub> = 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 <sup>-1</sup>		m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>		%	mg L <sup>-1</sup>	µg C L <sup>-1</sup>		
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.

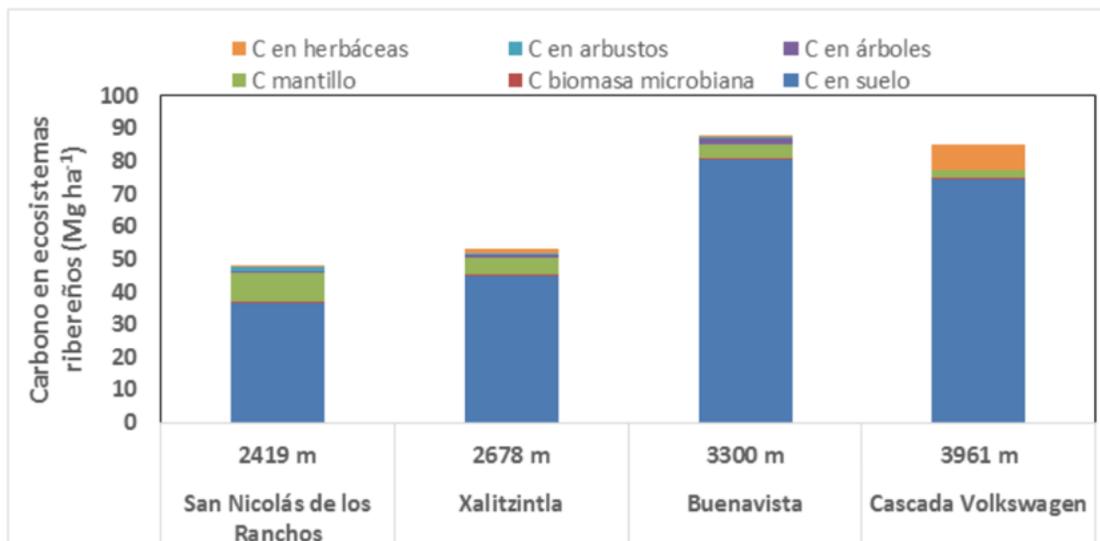


Figura 5. Contenido de carbono en compartimentos del sistema terrestre en cuatro ecosistemas ribereños distribuidos sobre el gradiente altitudinal.

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.

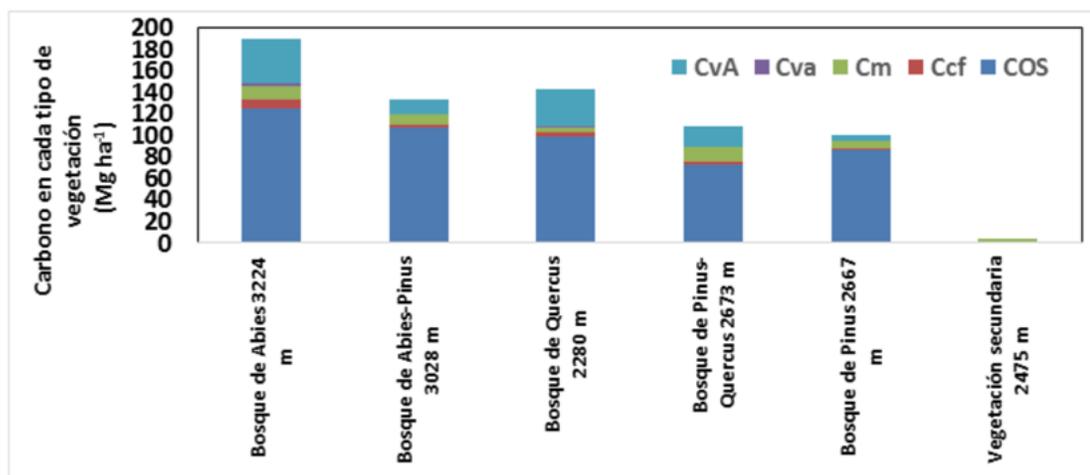


Figura 6. Contenidos de carbono en los principales macizos forestales de la región de los volcanes Iztaccihuatl-Popocatepetl, adyacentes a sistemas ribereños.

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/](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 CO<sub>2</sub> 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.