

BASE DE DATOS DE ALMACENES DE CARBONO EN LOS MANGLARES DE MÉXICO

DATABASE OF CARBON STOCKS IN THE MANGROVES OF MEXICO

Jorge A. Herrera-Silveira^{1†}, Andrea Camacho-Rico¹, Juan Caamal-Sosa, Siuling Cinco-Castro¹, Sara M. Morales-Ojeda¹, Javier Ramírez-Ramírez¹, Karla Zenteno-Díaz¹, Eunice Y. Pech-Poot¹, Mónica Pech-Cárdenas¹, Laura B. Carrillo-Baeza¹, Judith E. Erosa-Angulo¹, Oscar Pérez-Martínez¹ y Claudia Teutli-Hernández²

¹Laboratorio de Producción Primaria, CINVESTAV – Instituto Politécnico Nacional, Mérida, Yucatán, México.

²Facultad de Ciencias, UMDI-UNAM, Sisal, Yucatán, México.

[†]Autor para correspondencia: jorge.herrera@cinvestav.mx

RESUMEN

Los manglares son uno de los mayores almacenes de carbono en los ecosistemas terrestres, particularmente en la parte subterránea, por lo que el conocimiento de la distribución espacial en México es una tarea muy importante, dado lo escaso de trabajos publicados con relación a este tópico. En este trabajo se compiló una base de datos del análisis de 64 estudios realizados en las diferentes regiones del país, generando 424 sitios con datos de los almacenes de carbono en los diferentes tipos de manglares. Se presenta y discute la descripción de los datos obtenidos, así como las conclusiones y recomendaciones relacionadas con este tipo de análisis.

Palabras clave: *sitios medición; región; biomasa aérea; suelo; tipos de manglar.*

ABSTRACT

Mangroves are one of the largest carbon stocks in terrestrial ecosystems, particularly in the underground part, so knowledge of their spatial distribution in Mexico is a very important task, given the scarcity of published works related to this topic. In this paper, a database of 64 studies carried out in the different regions of the country was compiled, generating 424 sites with data from the carbon stores in the different types of mangroves. A description of the data obtained is presented and discussed, as well as the conclusions and recommendations related to this type of analysis.

Key words: *measurement sites; regions; aerial biomass; soil; types of mangroves.*

INTRODUCCIÓN

Los manglares constituyen el tipo de vegetación dominante de las costas en la banda tropical y subtropical (Lara-Domínguez *et al.*, 2005), entre los 30° de latitud N y S (Tomlinson, 1986) cubriendo

aproximadamente el 75% de la línea de costa del planeta (Kangas y Lugo, 1990). Los manglares son formaciones vegetales en las que predominan ciertas especies de árboles o arbustos conocidos como mangles, poseen raíces aéreas respiratorias llamadas neumatóforos y tienen la particularidad de ser resistentes a la salinidad

(CONABIO, 2009). Esta vegetación domina la zona tropical intermareal de los deltas de los ríos y estuarios, los cuales presentan importantes aportaciones de sedimentos terrígenos (alóctonos), se pueden localizar en plataformas calcáreas con poco o ninguna influencia de escorrentías terrestres superficiales, pero si subterráneas (Woodroffe, 1992). Se ubican en una zona de transición entre los ecosistemas terrestres y marinos, ya que existe conectividad entre los manglares, los pastos marinos y los arrecifes de coral que permite el flujo de las especies que viven en estos ecosistemas.

Tipos de manglares

Los manglares se desarrollan dentro de cinco grupos básicos de geomorfologías costeras que dependen de la combinación de energías geofísicas incluyendo la influencia relativa de la precipitación, la descarga de los ríos, la amplitud de la marea, la turbidez y la fuerza del oleaje (Figura 1). En cada uno de estos tipos geomorfológicos las variaciones locales en la topografía e hidrología pueden resultar en el desarrollo de diferentes tipos ecológicos de manglares: ribereño, franja, cuenca y chaparro que poseen características específicas en su estructura y función (Lugo y Snedaker, 1974; Twilley, 1988; Twilley, 1995).

La clasificación geomorfológica y ecológica genera diferentes niveles de organización del paisaje costero que integran diferentes escalas de factores ambientales que controlan los atributos y estructura del bosque de manglar.

La combinación de las variaciones en la microtopografía y la hidrología de una región, determina muchos de los aspectos biogeoquímicos del suelo que controlan la composición y zonación de especies, así como las características fisionómicas del manglar. Lugo y Snedaker (1974) con base en las características locales de la estructura de los manglares en la región del sur de Florida hicieron una clasificación de 6 tipos ecológicos: ribereños, sobreinundados, franja, cuenca, chaparro y tipo petén (Figura 2).

Manglares ribereños

Se localizan en los bordes de ríos y estuarios, son los mejor desarrollados estructuralmente, ya que reciben constantemente aportes de agua dulce, causando baja salinidad y altos aportes de nutrientes, por lo que su productividad se mantiene alta.

Manglares sobreinundados

Se encuentran en pequeñas islas, e influenciados por el lavado continuo de las mareas.

Manglares de franja

Se localizan a lo largo de la línea de costa, canales, ríos y lagunas. Están expuestos al efecto diario de las mareas, no reciben aportes directos de agua dulce, por lo que presentan salinidad variable y el aporte de nutrientes es bajo. Son menos productivos que los Ribereños.

Manglares de cuenca

Se presentan en las depresiones topográficas por detrás de los manglares Ribereños y de Franja, solamente se inundan en mareas muy altas, el movimiento del agua es lento. Las condiciones reducidas del suelo y alta salinidad son factores importantes que causan baja productividad.

Manglares chaparros

Son bosques con árboles menores a dos o tres metros de altura y muy densos como consecuencia del pobre enriquecimiento de nutrientes en sus sedimentos y/o altas salinidades.

Manglares de petén (Hammock)

Son manglares similares a los de cuenca, excepto por que se ubican en zonas más elevadas (Zaldívar *et al.*, 2010). En la península de Yucatán se presentan estos petenes que son áreas de manglar tierra adentro, pero que hidrológicamente se conectan al mar debido a la naturaleza cárstica del suelo y en época de lluvias se conectan debido a la corta distancia que tienen con el mar, pero no durante la época de sequía (Lara-Domínguez *et al.*, 2005).

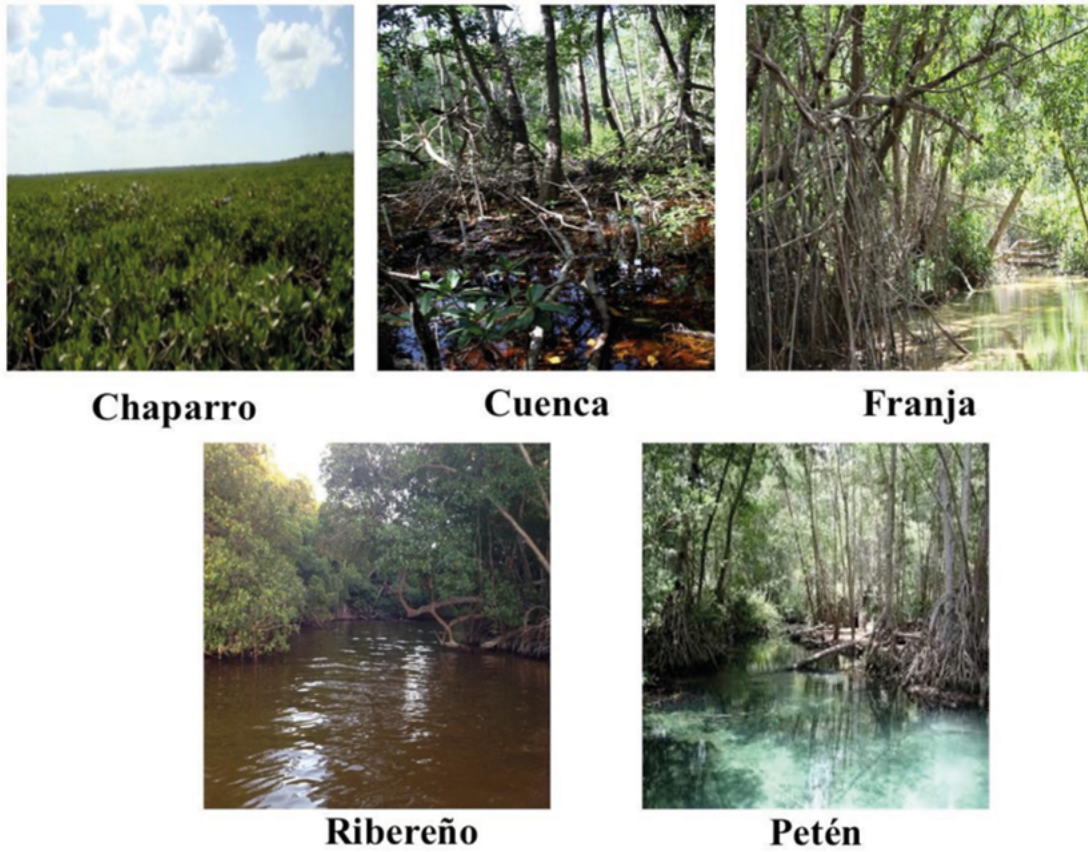


Figura 1. Tipos ecológicos de manglar: chaparro, cuenca, franja, ribereño y petén. Foto: A. Camacho.

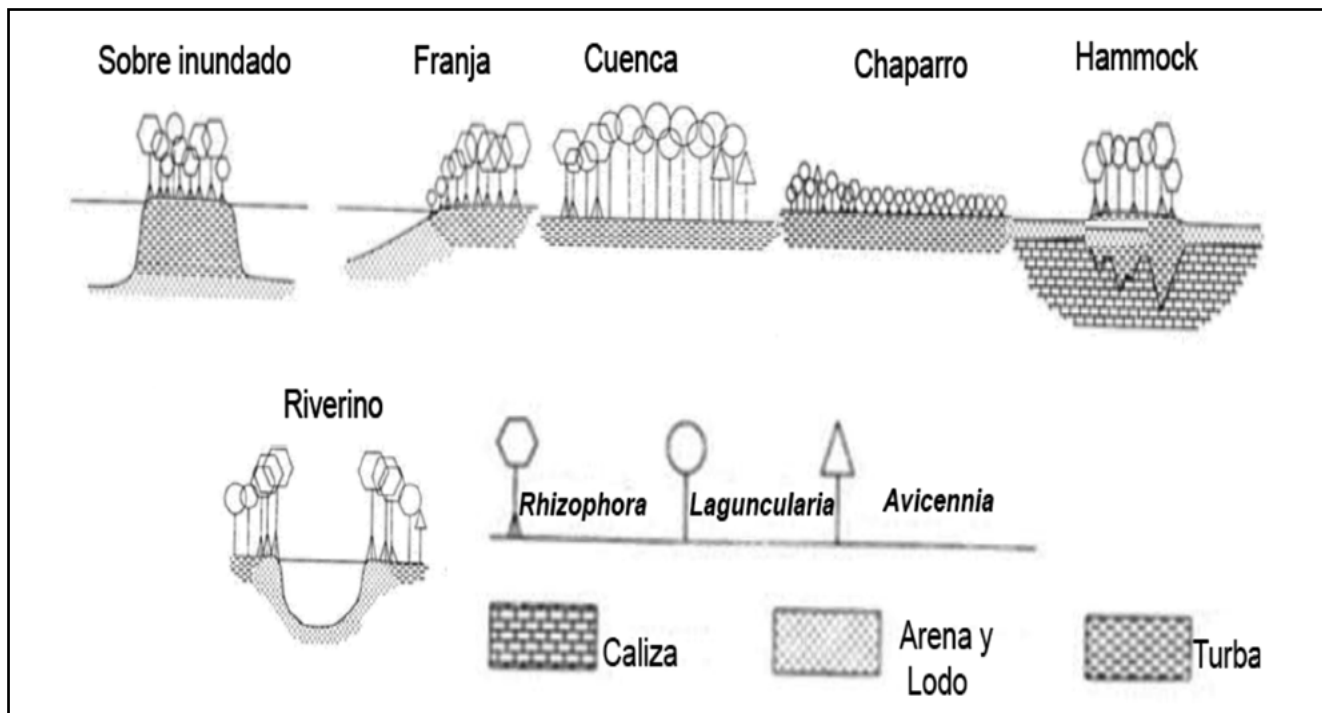


Figura 2. Tipos ecológicos de manglares. Modificado de Lugo y Snedaker (1974).

El manglar se encuentra dentro de las especies halófilas reunidas en ocho familias que contienen mangles verdaderos y 12 géneros (FAO, 2007): *Avicenniaceae* (*Avicennia germinans*), *Chenopodiaceae* (*Suaeda*), *Combretaceae* (*Laguncularia*, *Lumnitzera*), *Meliaceae* (*Conocarpus*, *Xylocarpus*), *Myrsinaceae* (*Aegiceras*), *Plumbaginaceae* (*Aegialitis*), *Rhizophoraceae* (*Rhizophora*, *Bruguiera*), *Sonneratiaceae* (*Sonneratia*); incluyendo un total de 11 especies en el nuevo mundo y 36 en el Indo Pacífico y África.

En México predominan cuatro especies de manglar: el mangle rojo (*Rhizophora mangle*), el mangle blanco (*Laguncularia racemosa*), el mangle negro (*Avicennia germinans*) y el mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*). Las cuatro especies están sujetas a protección especial de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010, porque podrían llegar a encontrarse amenazadas por factores que inciden negativamente en su viabilidad, lo que determinaría la necesidad de propiciar su recuperación y conservación.

Cobertura de manglar en México

La cobertura de manglar en México se ha estimado entre 882 032 ha, 741 917 ha y 775 555 ha de acuerdo con FAO (2007), Giri *et al.* (2011) y Valderrama-Landeros *et al.* (2017), respectivamente. En tanto que las tasas de deforestación reportadas varían entre 10 000 y 19 000 ha por año, con tasa de pérdida de entre el 1 y 2.5% de la cobertura anualmente. De acuerdo con Valderrama *et al.* (2014), se han perdido 81 711 ha en 25 años. Estos ecosistemas se encuentran bajo la presión antropogénica como: el cambio de uso de suelo para la acuicultura, agricultura, desarrollo urbano y turismo.

Almacenes de carbono en manglares de México

En México son escasos los estudios que se han realizado con el enfoque y metodología apropiada para evaluar los almacenes de carbono (Figura 3). A continuación, se describen los resultados más relevantes referentes a los manglares (*carbono azul*) en México con métodos estandarizados y publicados en literatura científica.

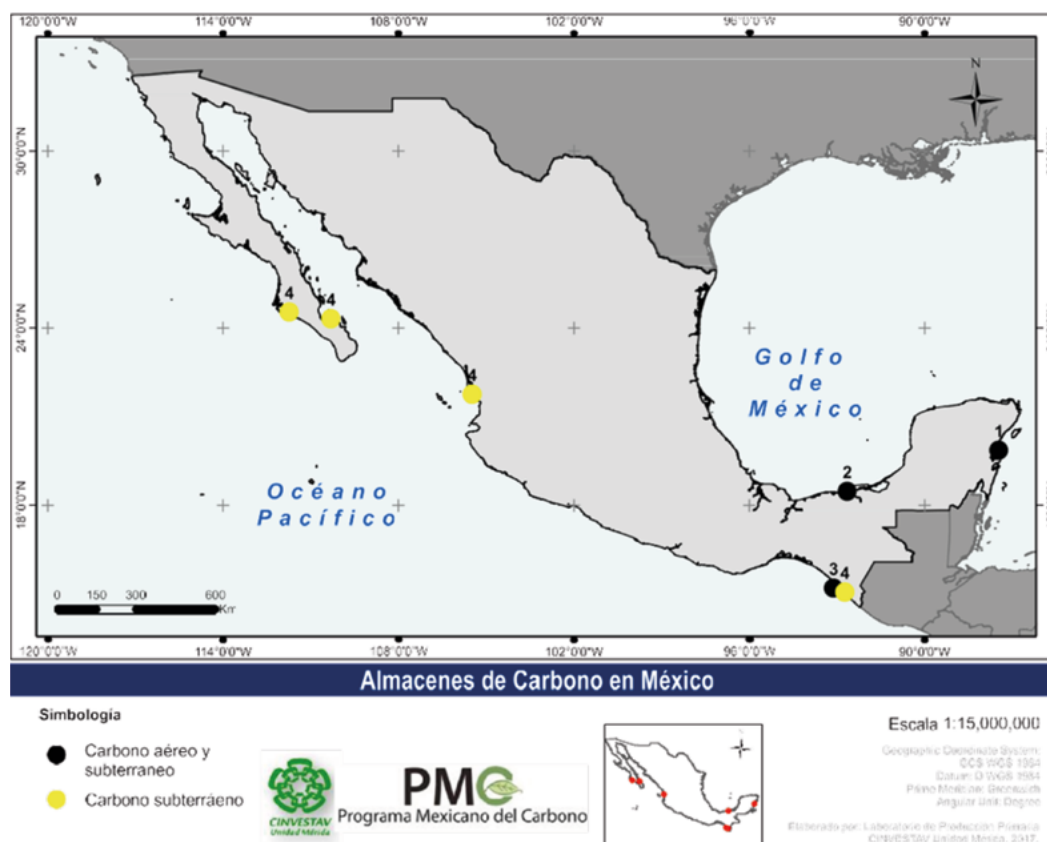


Figura 3. Localización geográfica de sitios donde se ha evaluado el almacén de carbono aéreo y/o subterráneo que corresponden a: 1) Adame *et al.* (2013); 2) Kauffman *et al.* (2016); 3) Adame *et al.* (2015); 4) Ezcurra *et al.* (2016). Fuente: Herrera-Silveira *et al.* (2017).

En la región de Pacífico Sur (Figura 3), Adame *et al.* (2015) evaluaron el almacén de carbono en un gradiente de sitios dominados por las fuerzas fluviales (estuario superior) a sitios dominados por procesos costeros (estuario inferior) en los manglares de la Área Natural Protegida (ANP) de la Encrucijada. Observó que el almacén de carbono en el suelo del manglar es mayor en los sitios cercanos a los ríos (estuario superior) y disminuye hacia el estuario inferior (cercano al mar). La variabilidad del almacén de C en los manglares fue mucho menor en el estuario superior (744 - 912 Mg C ha⁻¹) en comparación con el promedio del estuario inferior (537 - 1115 Mg C ha⁻¹).

La variabilidad en los almacenes de carbono no se limita al tipo geomorfológico donde se desarrollan los manglares, también está relacionada con el tipo ecológico. Adame *et al.* (2013) en un estudio realizado en los manglares de Sian Ka'an (Península de Yucatán) (Figura 3), observaron que los manglares de tipo petén presentan un almacén de carbono mayor (987 ± 338 Mg C ha⁻¹), en relación con los manglares de franja (623 ± 41 Mg C ha⁻¹) y de tipo chaparro (381 ± 52 Mg C ha⁻¹). Registraron que las mayores reservas de carbono (C) se midieron en sitios donde los valores de salinidad intersticial son relativamente bajos y la concentración de fósforo (P) en los sedimentos es alta, así como la relación nitrógeno:fósforo es baja, sugiriendo que en estos sitios el P limita el secuestro de C y el potencial de acumulación.

Ezcurra *et al.* (2016) evaluaron el almacén de carbono subterráneo de cuatro sitios (Figura 3), tratando de responder dos preguntas: ¿Cuánto del carbono capturado por los manglares en una zona desértica se almacena en sus sedimentos?, y ¿cómo este almacén se compara con el de otros manglares de zonas tropicales? Los cuatro sitios de muestreo fueron en el Pacífico (Figura 3). Los resultados mostraron que, en zonas de clima muy árido que se localizan en el Pacífico Norte (Balandra), los sedimentos pueden contener de 400 a 1300 Mg C ha⁻¹ mientras que en Bahía Magdalena son menores (< 200 - 400 Mg C ha⁻¹). Marismas Nacionales se encuentra en un sitio de clima Subhúmedo y se observó que, a pesar de la gran extensión de estos pantanos costeros, los valores más bajos de carbono subterráneo se registraron en este sitio (300 Mg C ha⁻¹). La Encrucijada se encuentra en una zona de clima húmedo y presenta los sedimentos más profundos y ricos en carbono de los cuatro lugares con un núcleo de 3 m

de profundidad que alcanzaba más de 2000 Mg C ha⁻¹. Quizás uno de los resultados más importantes es saber que los manglares situados en costas desérticas pueden almacenar cantidades comparables y, en ocasiones, más altas de carbono subterráneo que sus contrapartes tropicales, contribuyendo desproporcionadamente a la reserva de carbono de los ecosistemas costeros de zonas áridas.

En zonas áridas, a pesar de la altura (< 3-4 m) de los manglares, la cantidad de carbono orgánico subterráneo almacenado en los suelos topográficamente restringidos del Golfo de California fue similar a los valores que se encuentran en los bosques de manglares de zonas tropicales de alta precipitación como La Encrucijada, donde los árboles de *Rhizophora mangle* -especie dominante- tienen alturas de 30 a 40 m, comparables a los almacenes subterráneos de carbono para los manglares tropicales en la región Indo-Pacífico reportados por Donato *et al.* (2011).

Otro trabajo que sobresale, es el realizado por Kauffman *et al.* (2016) debido a la contribución que hace al evaluar las reservas de carbono de los manglares y la pérdida o emisiones derivadas de la conversión del uso de suelo del manglar a pastos ganaderos en la región de Pantanos de Centla (Tabasco) (Figura 3).

Para analizar la variabilidad y representación de los manglares y sus tipos, se realizó una revisión bibliográfica, incluyendo literatura gris, de publicaciones sobre estudios de los almacenes de carbono.

MATERIALES Y MÉTODOS

Revisión bibliográfica

Para la revisión de los almacenes de carbono (aéreo y subterráneo) en manglares de México, se siguieron los siguientes pasos. Se inició con la búsqueda bibliográfica consultando bases de datos, artículos científicos, tesis, libros publicados por el Programa Mexicano del Carbono (PMC), informes técnicos, memorias de congresos, entre otros. Los estudios se revisaron para obtener información sobre los almacenes (aéreo y subterráneo) en manglares.

La información de cada trabajo se clasificó de acuerdo con las regiones de México (Figura 4), el tipo de clima, la geomorfología del sitio de estudio y el tipo ecológico de manglar.



Figura 4. Regionalización de los manglares en México. Imagen de CONABIO (2009).

Las Regiones de México fueron las propuestas por especialistas en el estudio de manglares (Rodríguez-Zúñiga *et al.*, 2013):

1. Pacífico Norte (PN) corresponde a los estados de Baja California Norte, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa y Nayarit;
2. Pacífico Centro (PC) Jalisco, Colima y Michoacán;
3. Pacífico Sur (PS), Guerrero, Oaxaca, Chiapas; Golfo de México (GM) Tabasco, Tamaulipas y Veracruz;
4. Península de Yucatán (PY) Campeche, Quintana Roo y Yucatán (Figura 4).

La clasificación de climas que se utilizó, fue con base en los intervalos de humedad: Húmedo, Subhúmedo, Árido-Semiárido, Muy Árido (García, 1998).

Los recursos hídricos de México están constituidos por ríos, arroyos, lagos y lagunas, así como por almacenamientos subterráneos y grandes masas de agua oceánica. En México existen cerca de 42 ríos principales que transcurren en tres vertientes: occidental o del Océano Pacífico, oriental o del Océano Atlántico (Golfo de México y Mar Caribe) y al interior cuyos ríos desembocan en lagunas interiores (INEGI, 1995). La mayor parte de la Península de Yucatán carece de

drenaje superficial pues se trata de una extensión de poco relieve y sustrato permeable, por lo que casi toda la circulación de agua es subterránea. Las lagunas costeras son comunes en zonas donde la planicie mal drenada hace contacto con el mar, por lo que pueden estar formadas por agua dulce, salobre o salada; el contenido de sal varía de una época a otra y, también, en función de la apertura temporal o el cierre de la comunicación con otras lagunas y, con el mar.

Para la clasificación geomorfológica se consideraron los recursos hídricos de México, donde se pueden desarrollar los bosques de manglar, por lo que se organizó en cuatro categorías con base en su geomorfología.

El almacén (aéreo y subterráneo) también se clasificó de acuerdo con el tipo ecológico de manglar (chaparro, cuenca, franja, ribereño, petén; Figura 1). Con base en la información que contiene cada trabajo, se estimaron los valores de carbono para los almacenes aéreo y subterráneo, finalmente los resultados se presentan en Mg de CO₂ ha⁻¹.

El almacén subterráneo se estimó mediante la información de la literatura revisada, la cual podía contener valores de porcentaje de materia orgánica en sedimentos, densidad aparente de los sedimentos, porcentaje de carbono orgánico, largo de la fracción del núcleo de sedimento y biomasa en raíces; con esta información se realizaron las estimaciones del almacén subterráneo. Es importante resaltar que solo

se consideraron los valores de carbono orgánico en los sedimentos hasta la profundidad de 1 m, debido a que por debajo de esta profundidad se pueden registrar valores mayores a 1573 Mg C ha⁻¹, con lo cual se podría sobreestimar el almacén subterráneo.

En años recientes se publicaron trabajos enfocados en la evaluación de los almacenes de carbono en la región de Pacífico Norte, Pacífico Sur, Golfo de México y Península de Yucatán (Adame *et al.*, 2013; Adame *et al.*, 2015; Ezcurra *et al.*, 2016; Kauffman *et al.*, 2016), los valores reportados proporcionaron una referencia inicial para los resultados obtenidos al realizar las estimaciones con la información extraída de los trabajos revisados.

Cabe mencionar que sólo en algunos casos se reportaban datos de biomasa aérea, de tal modo que cuando no fue así, se estimó utilizando ecuaciones alométricas propuestas por Fromard *et al.* (1998) y Howard *et al.* (2014), con base en la especie de manglar y clima. Los datos utilizados fueron especie, altura, área basal o diámetro a la altura de pecho y densidad de árboles. Una vez obtenida la biomasa en (Mg ha⁻¹), se multiplicó por el factor 0.45 (Kauffman y Donato,

2012) para obtener el carbono contenido en la biomasa de los árboles vivos. Finalmente, las estimaciones se reportaron en Mg de CO₂ ha⁻¹, utilizando la relación del peso molecular de CO₂ (44) y C (12) (Howard *et al.*, 2014).

RESULTADOS

En esta revisión se consultaron 64 trabajos (Figura 5), en donde la región de Península de Yucatán presentó el mayor número de estudios (n=24), seguida por el Golfo de México (n=18), Pacífico Norte (n=9) y Pacífico Sur (n=7), mientras que Pacífico Central presentó el menor número de estudios (n=6). Esto representa a un estudio por cada 12 000 ha de manglar. En la misma Figura 5 se puede observar el número de sitios de donde se obtuvieron datos e información (n=424), y el número de sitios correspondientes para cada región, siendo la mejor representada la Península de Yucatán (n=179), seguida por el Golfo de México (n=140), Pacífico Sur (n=63), Pacífico Norte (n=34), mientras que Pacífico Central presentó el menor número (n=8).

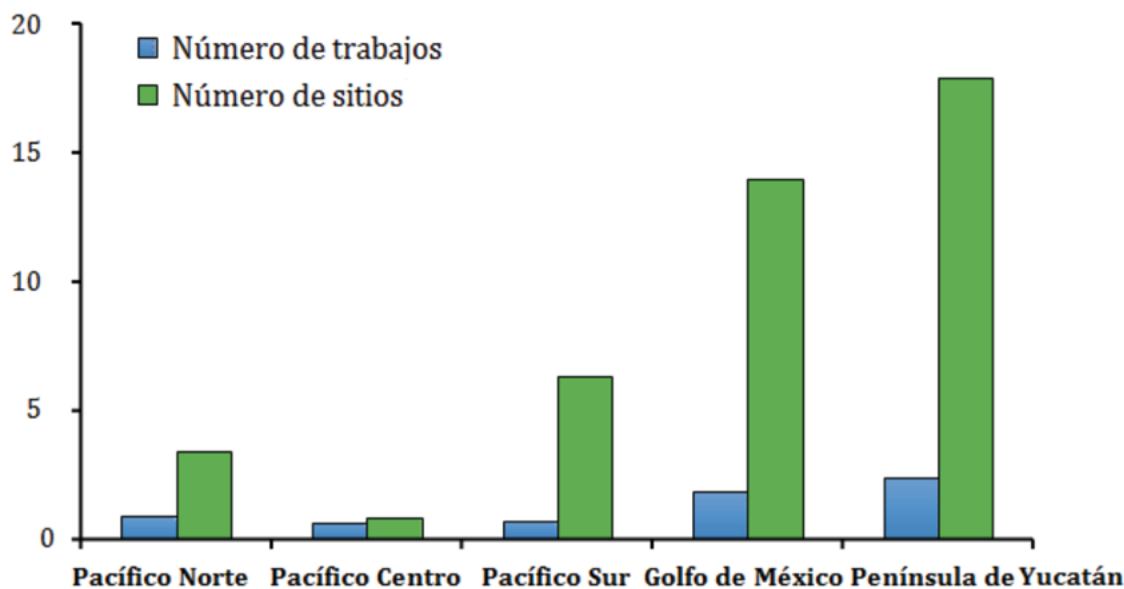


Figura 5. Número de trabajos consultados y número de sitios con datos sobre carbono en manglares por región de acuerdo con la clasificación propuesta por CONABIO (2009).

La distribución geográfica de los trabajos responde a la extensión de los manglares en México, donde el 52% del total está en los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo (Valderrama-Landeros *et al.*, 2017). No obstante, existen muchas áreas de las que se desconoce la información básica ambiental para asociar desde la composición de especies de manglar

hasta los factores relacionados con la estructura de la comunidad y, en particular, con los almacenes y flujos de carbono. Mucho queda por investigar sobre los manglares de México.

En la Figura 6 se presenta la distribución de la información recopilada con base en el tipo de publicaciones. En esta resalta la mayor cantidad de

información localizada en literatura gris (reportes, tesis, informes (n=27), seguida de artículos nacionales (n=20) y artículos internacionales (n=17). De estos resultados es importante destacar que, si bien en México se está generando información relevante sobre

los ecosistemas de manglar, mucha de esta información se queda en lo que se denomina *literatura gris*, la cual por una parte es de difícil acceso y por otra el nivel de incertidumbre de la calidad de los datos es alta.

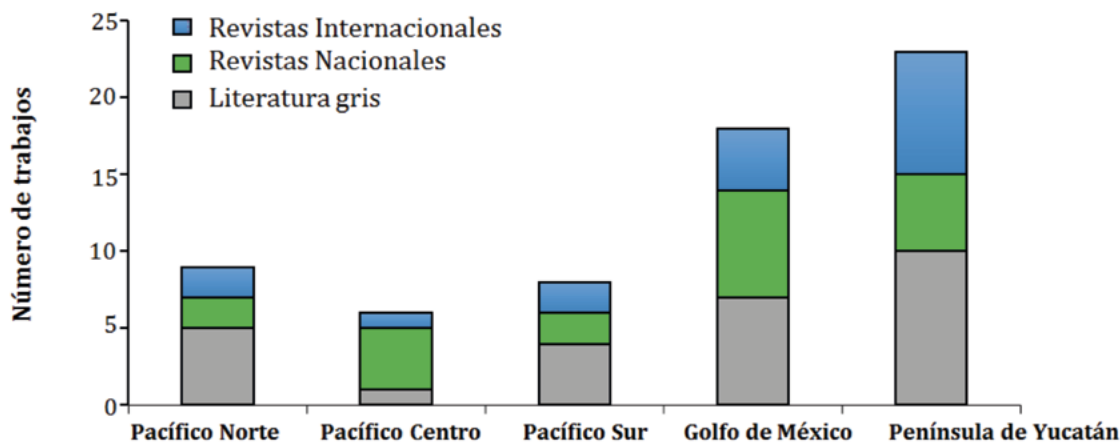


Figura 6. Número de trabajos consultados y clasificados por tipo de publicación; Revistas internacionales, Revistas Nacionales y Literatura gris, por región de acuerdo con la clasificación propuesta por CONABIO (2009).

Los mapas de los sitios donde se cuenta con datos sobre el almacén de carbono en manglares, de acuerdo con la región, se muestran en las Figuras 7, 8, 9, 10 y 11.

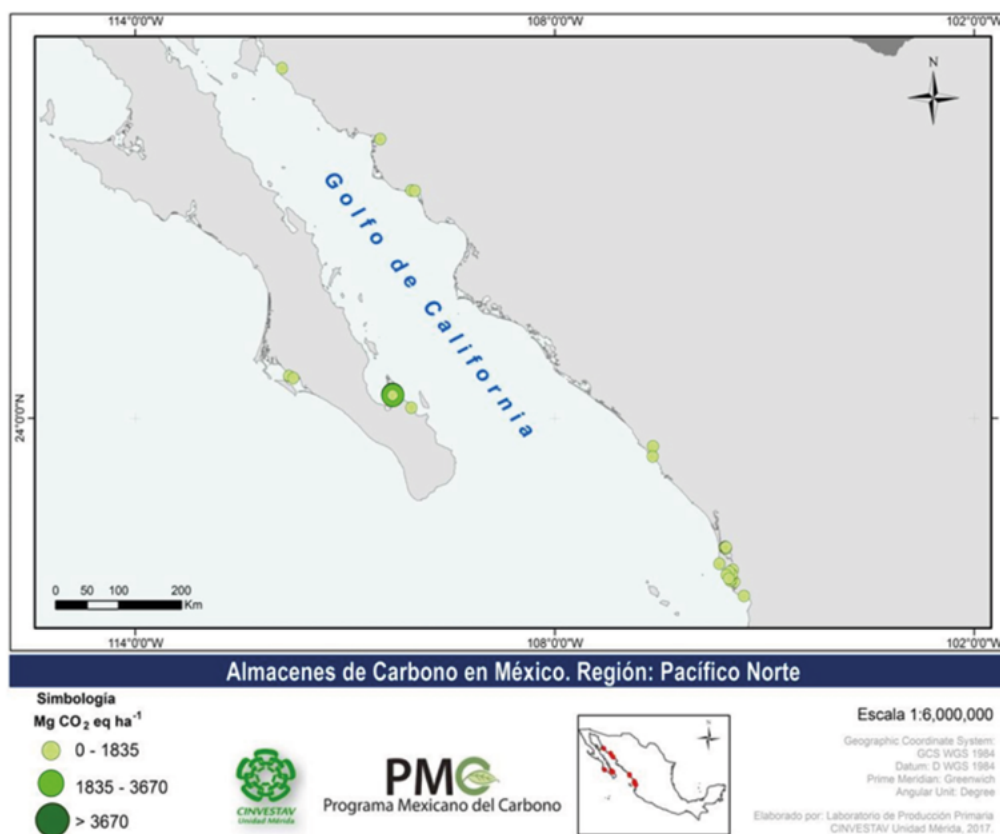


Figura 7. Sitios de manglar en la Región de Pacífico Norte en donde se cuenta con datos para estimar el almacén de carbono (aéreo y/o subterráneo), o se realizó un estudio específico para determinar el almacén de carbono. Fuente: Herrera-Silveira *et al.* (2017).

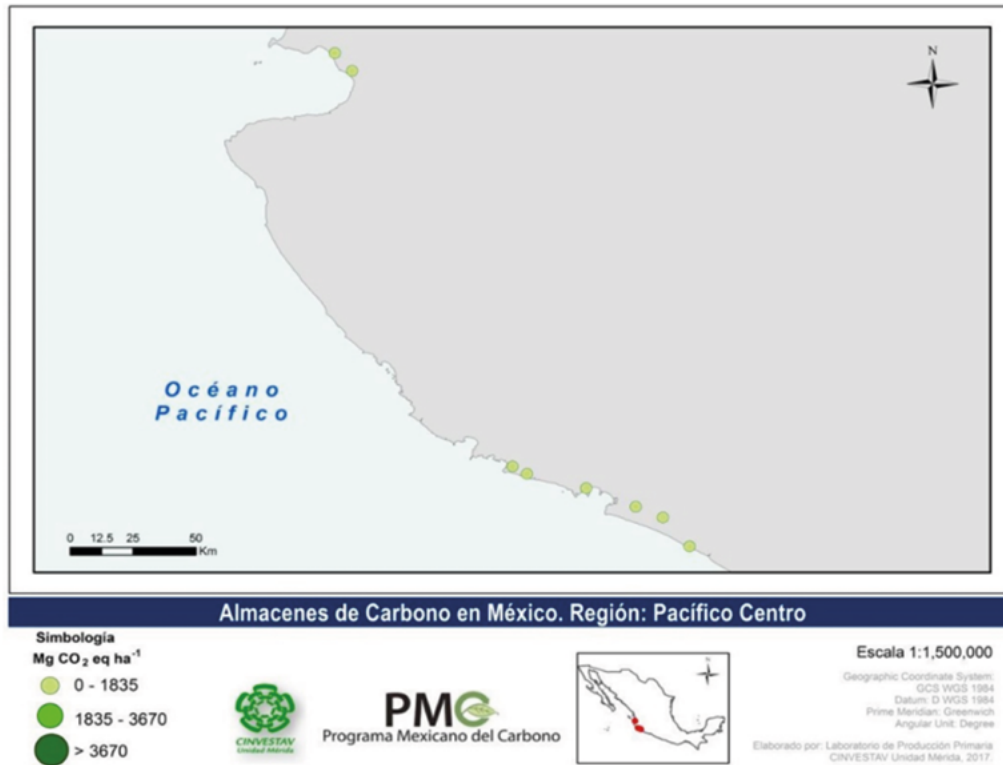


Figura 8. Sitios de manglar en la Región de Pacífico Centro en donde se cuenta con datos para estimar el almacén de carbono (aéreo y/o subterráneo), o se realizó un estudio específico para determinar el almacén de carbono. Fuente: Herrera-Silveira *et al.* (2017).

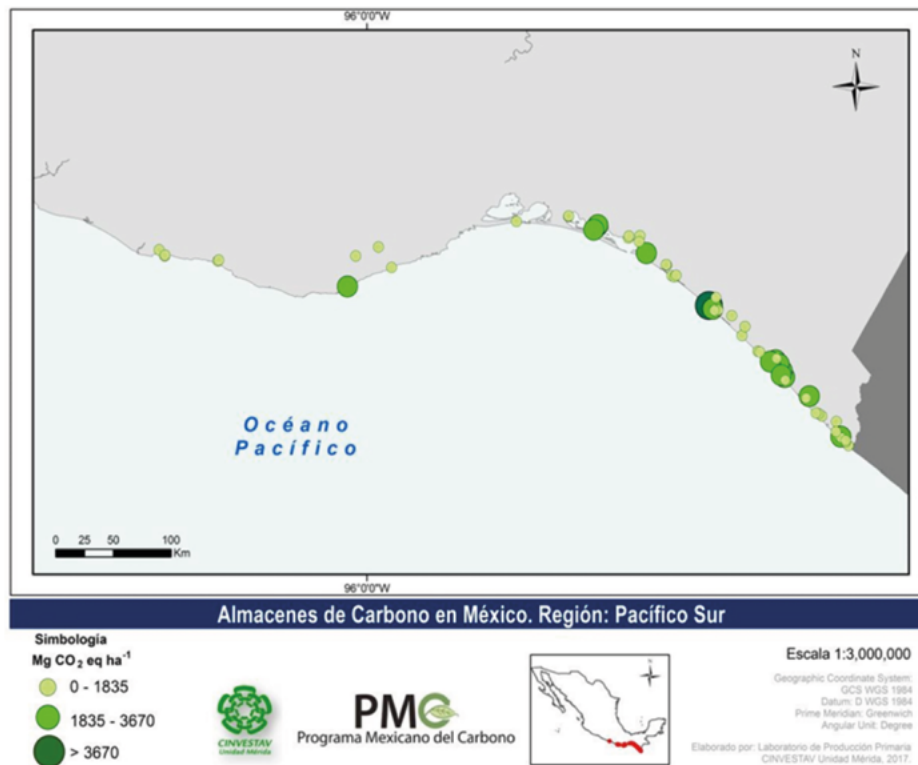


Figura 9. Sitios de manglar en la Región de Pacífico Sur en donde se cuenta con datos para estimar el almacén de carbono (aéreo y/o subterráneo), o se realizó un estudio específico para determinar el almacén de carbono. Fuente: Herrera-Silveira *et al.* (2017).



Figura 10. Sitios de manglar en la Región de Golfo de México en donde se cuenta con datos para estimar el almacén de carbono (aéreo y/o subterráneo), o se realizó un estudio específico para determinar el almacén de carbono. Fuente: Herrera-Silveira *et al.* (2017).

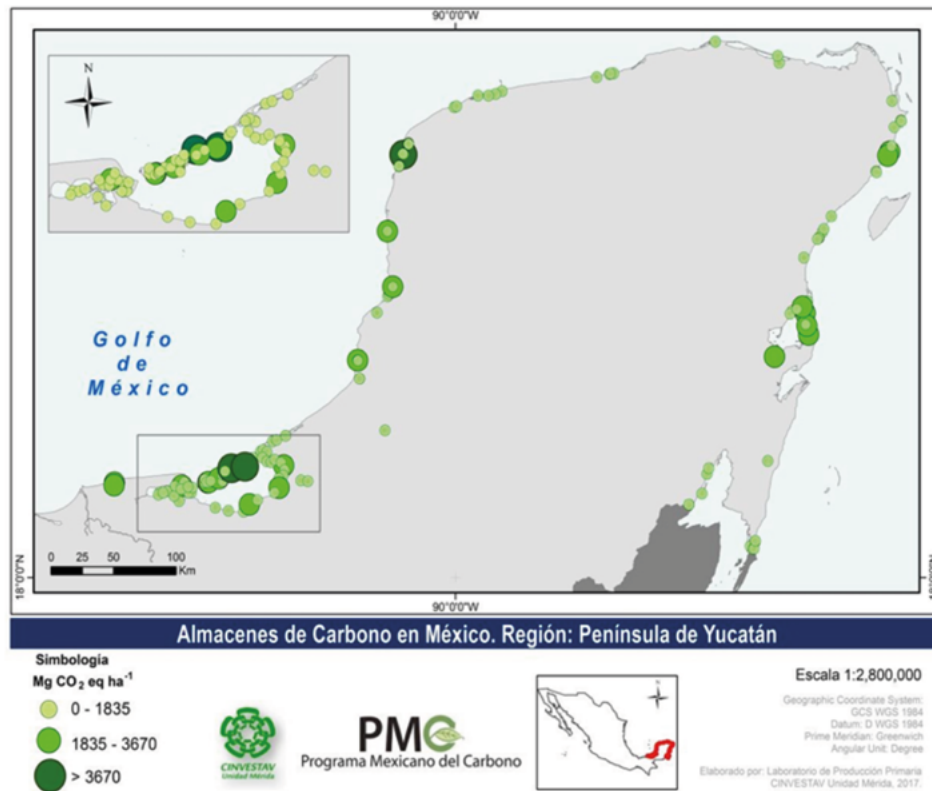


Figura 11. Sitios de manglar en la Región de Península de Yucatán en donde se cuenta con datos para estimar el almacén de carbono (aéreo y/o subterráneo), o se realizó un estudio específico para determinar el almacén de carbono. Fuente: Herrera-Silveira *et al.* (2017).

DISCUSIÓN

Los estudios en México sobre almacenes de carbono en manglares muestran que la mayor parte de los trabajos se encuentran en la literatura gris (tesis, informes, resúmenes de congresos, etc.), resaltando la importancia de fomentar y generar un mayor número de publicaciones en revistas indizadas a nivel nacional e internacional.

En México, los almacenes de carbono presentan variabilidad en función del clima, la geomorfología, el tipo ecológico y la región. Resalta la contribución de los estudios realizados por Ezcurra *et al.* (2016) y Adame *et al.* (2015), en donde el carbono almacenado en manglares de zonas áridas llega a ser mayor que el de zonas húmedas y, comparable con el almacén reportado por Donato *et al.* (2011) para manglares del Indo-Pacífico

Si bien, son escasos los estudios de almacenes de carbono en los manglares de México, lo son aún más los que se relacionan con flujos de carbono verticales y laterales. Investigaciones sobre la dinámica de hojarasca (caída, descomposición) relacionados con la acreción del suelo del manglar son también escasos. Los flujos laterales principalmente los relacionados con la exportación de carbono orgánico disuelto y particulado de los manglares hacia cuerpos de agua adyacente son poco frecuentes (Camacho-Rico *et al.*, 2017). Otro tipo de estudio que está creciendo en interés por el tipo de información a nivel del ecosistema que provee, es el de flujos de CO₂ y CH₄ que utiliza torres de *Covarianza de Vórtices* (Aubinet *et al.*, 2012).

CONCLUSIONES

Un aspecto importante con relación al almacén de carbono total en manglares es que, hasta el momento, no ha sido posible calcular la concentración de carbono almacenado a nivel nacional con base en las coberturas de los diferentes tipos de manglar ya que, a diferencia de otros tipos de vegetación de México, no existen mapas de la cobertura que se centren en los diferentes tipos ecológicos.

Se observa la necesidad de que los almacenes de carbono de los manglares mexicanos se incluyan en los inventarios de emisiones dadas las magnitudes que se registran en la literatura analizada. Por otra parte, destaca la escasez de estudios relativos a los factores de emisión por actividad y el financiamiento de acciones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero por degradación y deforestación.

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

Esta compilación es resultado de muchos estudios realizados por un sin número de investigadores, a todos ellos se agradece y reconoce su esfuerzo y dedicación. El trabajo de recopilación, análisis y síntesis ha sido gracias a diferentes apoyos, por lo que se agradece a PNUD e INECC por el apoyo a través del Proyecto CSP-2016-057, a CONABIO por los apoyos a los proyectos FN009, KN003 y GH009, al CONACyT por apoyo a los proyectos PO20CCOR892654, I0017-254175, D112-904672, 4147P-T y 66223.

LITERATURA CITADA

- Adame, F., V. Hermoso, K. Perhans, E. Lovelock and J. Herrera-Silveira. 2015. Selecting cost-effective areas for restoration of ecosystem services. *Conservation Biology* 29:493- 502.
- Adame, M. F., J. B. Kauffman, I. Medina, J. N. Gamboa, O. Torres, J. P. Caamal and J. Herrera-Silveira. 2013. Carbon stocks of tropical coastal wetlands within the karstic landscape of the Mexican Caribbean. *PLoS ONE* 8:1-13. DOI: 10.1371/journal.pone.0056569.
- Aubinet M., T. Vesala and D. Papale (eds.). 2012. *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer. Netherlands. 438 p. DOI:10.1007/978-94-007-2351-1
- Camacho-Rico A.; J. A. Herrera-Silveira; I. Mariño-Tapia y G. Giacomán-Vallejos. 2016. Flujos laterales de COD en un manglar de franja con influencia marina. pp. 321-329. *In*: Paz, F. y R. Torres. (eds.). 2016. *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2016. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*. Texcoco, Estado de México, México.
- CONABIO. 2009. *Manglares de México: Extensión y distribución* 2ª ed. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 99 p.

- Donato, C., J. Kauffman, D. Murdiyarsa, S. Kurnianto, M. Stidham and M. Kanninen. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience* 4:293-297.
- Ezcurra, P., E. Ezcurra, P. P. Garcillán, M. T. Costa and O. Aburto-Oropeza. 2016. Coastal landforms and accumulation of mangrove peat increase carbon sequestration and storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113:4404-4409.
- FAO. 2007. The world's mangroves 1980-2005. FAO Forestry Paper 153. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Fromard, F., H. Puig, E. Mougin, G. Marty, J. L. Betoulle and L. Cadamuro. 1998. Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana. *Oecologia* 115:39-53.
- García, E. 1998. 'Climas' (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). D.F., México.
- Giri, C., E. Ochieng, L. Tieszen, Z. Zhu, A. Singh, T. Loveland and N. Duke. 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography* 20:154-159.
- Herrera-Silveira, J.A., R.A. Camacho, G.I. Medina, J. Ramírez-Ramírez, H.M. López, S.M. Morales-Ojeda, P.E. Pech, J.P. Caamal-Sosa, M.J.E. Mendoza, C.S.G. Cinco, C.M. Pech y C. Teutli-Hernández. 2017. Síntesis basada en el análisis y diagnóstico documental sobre Carbono Azul en México. PNUD CSP-2016-057. Programa Mexicano del Carbono-CINVESTAV-IPN. 120 p.
- Howard, J., S. Hoyt, K. Isensee, E. Pidgeon and M. Telszewski (eds.). 2014. Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA. 180 p.
- INEGI. 1995. Estadísticas del Medio Ambiente Aguascalientes, Ags., México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Kangas, P. and A. Lugo. 1990. The distribution of mangrove and salt marsh in Florida. *Tropical Ecology* 31:32-39.
- Kauffman, J. B. and D. C. Donato. 2012. Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. Working Paper 86, CIFOR, Bogor, Indonesia. 40 p.
- Kauffman, J., H. Trejo, M. García, G. Heider and W. Contreras. 2016. Carbon stocks of mangroves and losses arising from their conversion to cattle pastures in the Pantanos de Centla, Mexico. *Wetlands Ecology and Management* 24:203-216.
- Lara-Domínguez, A., J. Day, G. Zapata, R. Twilley, H. Guillén and H.A. Yanez-Arancibia. 2005. Structure of a unique inland mangrove forest assemblage in fossil lagoons on the Caribbean Coast of Mexico. *Wetlands Ecology and Management* 13:111-122.
- Lugo, A. and S. Snedaker. 1974. The ecology of mangroves. *Annual Review of Ecology and Systematics* 5:39-64.
- Rodríguez-Zúñiga, M., C. Troche-Souza, A. Vázquez-Lule, J. Márquez-Mendoza, B. Vázquez-Balderas, L. Valderrama-Landeros, S. Velázquez-Salazar, M. Cruz-López, R. Ressler, A. Uribe-Martínez, S. Cerdeira-Estrada, J. Acosta-Velázquez, J. Díaz-Gallegos, R. Jiménez-Rosenberg, L. Fueyo-Mac Donald y L. Galindo-Leal. 2013. Manglares de México/extensión, distribución y monitoreo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. D.F., México 128 p.
- Tomlinson, P. B. 1986. The botany of mangroves. Cambridge University Press, Cambridge. New York, USA. 413 p.
- Twilley, R. 1988. Coupling of mangroves to the productivity of estuarine and coastal waters. pp. 155-180. *In: Jansson B. O. (ed.). Coastal-Offshore Ecosystem Interactions. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*, vol 22. Springer, Heidelberg, Berlin.
- Twilley, R. R. 1995. Properties of mangrove ecosystems related to the energy signature of coastal environments. pp. 43-62. *In: Hall, C. (ed.). Maximum power: the ideas and applications of H.T. Odum. The University Press of Colorado.*
- Valderrama, L., C. Troche, M. Rodríguez, D. Márquez, B. Vázquez, S. Velázquez and R. Ressler. 2014. Evaluation of mangrove cover changes in Mexico during the 1970-2005 period. *Wetlands* 34:747-758.
- Valderrama-Landeros, L., M. Rodríguez-Zúñiga, C. Troche-Souza, S. Velázquez-Salazar, E. Villeda-Chávez, J. Alcántara-Maya, B. Vázquez-Balderas, M. Cruz-López y R. Ressler. 2017. Manglares de México: actualización y exploración de los datos del sistema de monitoreo 1970/1980-2015. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. CDMX, México 128 p.
- Woodroffe, C. 1992. Mangrove sediments and geomorphology. *Tropical Mangrove Ecosystems* 41:7-41.
- Zaldívar-Jiménez, A., J. Herrera-Silveira, H. Teutli, S. Hernández y J. Caamal. 2010. Estudio de caso: manglares de Yucatán. pp. 138-139. *In: Durán, R. y M. Méndez (eds.). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. Yucatán, México.*